мир электроники

ДЖ. ФРАЙДЕН

Современные датчики. Справочник

ТЕХНОСФЕРА

МИР электроники

ДЖ. ФРАЙДЕН

Современные датчики. Справочник

Перевод с английского
Ю. А. Заболотной
под редакцией Е. Л. Свинцова

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2005

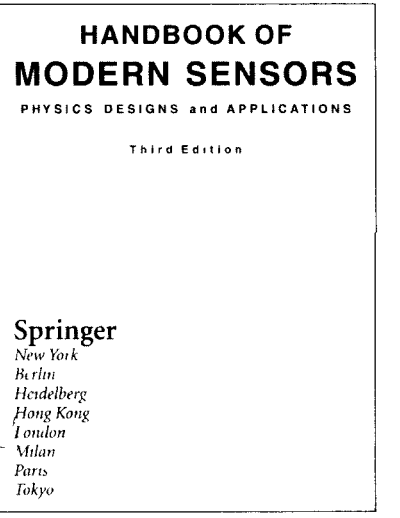
– 196972 –

Дж. Фрайден
Современные датчики. Справочник
Москва:
Техносфера, 2005. – 592 с. ISBN 5-94836-050-4

Справочник по современным датчикам можно назвать настольной книгой исследователя в любой области естествознания, поскольку в нем изложены физические принципы, методы разработки и варианты практического использования широкого спектра датчиков в самых разнообразных областях применений. Книга издана на английском языке уже третий раз, и это не случайно, поскольку любая современная система измерений не обходится без применения датчиков, которые являются «переводчиками» окружающей аналоговой природы на язык цифровой техники, т.е. можно сказать, что датчики являются «глазами, ушами и носами» кремниевых кристаллов.

Последнее издание дополнено описанием датчиков, реализованных по самым современным технологиям. Речь идет об электромеханических микродатчиках (MEMS) и об электрооптомеханических микросистемах (MEOMS), без которых был бы невозможен такой резкий прогресс в областях беспроводных систем телекоммуникации и отдельных областях медицины и техники, наблюдаемый в последние годы.

Книга является превосходным справочным пособием для студентов, исследователеи, проектировщиков датчиков и специалистов, разрабатывающих измерительные системы.



© 2004, 1996 Springer-Verlag New York, Inc.
© 2005, ЗАО «РИЦ «Техносфера»
перевод на русский язык, оригинал-макет, оформление

ISBN 5-94836-050-4
ISBN 0-387-00750-4 (англ.)

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ 17

Глава 1
СБОР ДАННЫХ 19
1 1 Датчики, сигналы и системы 19
1 2 Классификация датчиков 25
1 3 Единицы измерения 29
Литература 31

Глава 2
ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ 32
2 1 Передаточная функция 32
2 2 Диапазон измеряемых значений (Максимальный входной сигнал) 35
2 3 Диапазон выходных значений 35
2 4 Точность 36
2 5 Калибровка 38
2 6 Ошибка калибровки 39
2 7 Гистерезис 40
2 8 Нелинейность 41
2 9 Насыщение 42
2 10 Воспроизводимость 43
2 11 Мертвая зона 43
2 12 Разрешающая способность 44
2 13 Специальные характеристики 44
2 14 Выходной импеданс 44
2 15 Сигнал возбуждения 45
2 16 Динамические характеристики 45
2 17 Факторы окружающеи среды 50
2 18 Надежность 52
2 19 Характеристики датчиков, диктуемые условиями их применения 55
2 20 Статистическая оценка 55
Литература 57

Глава 3
ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ДАТЧИКОВ 58
3 1 Электрические заряды, поля и потенциалы 59
3 2 Емкость 66
3 2 1 Конденсатор 67
3 2 2 Диэлектрическая проницаемость 69
3 3 Магнетизм 73
3 3 1 Закон Фарадея 75
3 3 3 Соленоид 76
3 3 4 Тороид 77
3 3 5 Постоянные магниты 78
3 4 Индукция 79

3 5 Сопротивление 82
3 5 1 Удельное сопротивление 84
3 5 2 Температурная чувствительность 85
3 5 3 Тензочувствительность 88
3 5 4 Влагочувствительность 89
3 6 Пьезоэлектрический эффект 90
3 6 1 Пьезоэлектрические пленки 96
3 7 Пироэлектрический эффект 100
3 8 Эффект Холла 106
3 9 Эффекты Зеебека и Пельтье 110
3 10 Звуковые волны 115
3 11 Температурные и тепловые свойства материалов 118
3 11 1 Температурные шкалы 119
3 11 2 Тепловое расширение 120
3 11 3 Теплоемкость 122
3 12 Теплопередача 123
3 12 1 Теплопроводность 124
3 12 2 Тепловая конвекция 126
3 12 3 Тепловое излучение 127
3 12 3 1 Излучающая способность 131
3 12 3 2 Резонансный эффект 134
3 13 Световое излучение 136
3 14 Динамические модели чувствительных элементов 138
3 14 1 Механические элементы 140
3 14 2 Тепловые элементы 142
3 14 3 Электрические элементы 143
3 14 4 Аналогии 144
Литература 144

Глава 4
ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ ДАТЧИКОВ 146
4 1 Радиометрия 148
4 2 Фотометрия 152
4 3 Светопропускающие окна 155
4 4 Зеркала 156
4 5 Линзы 159
4 6 Линзы Френеля 160
4 7 Оптические волокна и волноводы 163
4 8 Концентраторы 167
4 9 Покрытия, поглощающие тепловое излучение 168
4 10 Электрооптические и акустикооптические модуляторы 169
4 11 Интерферометрическая оптоволоконная модуляция 171
Литература 172

Глава 5
ИНТЕРФЕЙСНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ 173
5 1 Входные характеристики интерфейсных схем 173
5 2 Усилители 178
5 2 1 Операционные усилители 178
5 2 2 Повторители напряжения 181
5 2 3 Измерительный усилитель 181

5 2 4 Усилители заряда 184
5 3 Схемы возбуждения 187
5 3 1 Генераторы тока 187
5 3 2 Источники опорного напряжения 191
5 3 3 Генераторы 193
5 3 4 Задающие устройства 196
5 4 Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) 198
5 4 1 Принципы построения АЦП 198
5 4 2 Преобразователи напряжения в частоту (ПНЧ) 200
5 4 3 АЦП двоиного интегрирования 204
5 4 4 АЦП последовательного приближения 207
5 4 5 Улучшение разрешающей способности систем сбора данных 209
5 5 Прямая дискретизация и обработка сигналов 210
5 6 Измерители отношений сигналов 214
5 7 Мостовые схемы 216
5 7 1 Неуравновешенный мост 218
5 7 2 Уравновешенный мост 219
5 7 3 Температурная компенсация резистивного моста 219
5 7 4 Мостовые усилители 225
5 8 Передача данных 226
5 8 1 Двухпроводная передача 226
5 8 2 Четырехпроводной способ подключения датчика 227
5 8 3 Шестипроводный способ подключения мостовой схемы 228

5 9 Шумы в датчиках и интерфейсных схемах 229
5 9 1 Собственные шумы 229
5 9 2 Вносимый шум 233
5 9 3 Электрическое экранирование 237
5 9 4 Блокировочные конденсаторы 240
5 9 5 Экранирование от магнитных полей 241
5 9 6 Механический шум 243
5 9 7 Слои заземления 243
5 9 8 Развязка по цепи заземления и паразитные контуры заземления 244
5 9 9 Шум Зеебека 246
5 10 Гальванические источники питания для маломощных датчиков 247
5 10 1 Первичные элементы 248
5 10 2 Вторичные элементы аккумуляторы 249
Литература 250

Глава 6
ДЕТЕКТОРЫ ПРИСУТСТВИЯ И ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ 251
6 1 Ультразвуковые датчики присутствия 252
6 2 Микроволновые детекторы движения 253
6 3 Емкостные датчики присутствия 257
6 4 Электростатические датчики движения 261
6 5 Оптоэлектронные детекторы движения 264
6 5 1 Структуры датчиков 264
6 5 1 1 Составные датчики 265
6 5 1 2 Датчики со сложнои формой чувствительного элемента 266
6 5 1 3 Искажение изображения 266
6 5 1 4 Фасетныи фокусирующий элемент 266
6 5 2 Детекторы движения, работающие в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра 268
6 5 3 Детекторы движения, работающие в дальнем ИК диапазоне 269
6 5 3 1 Детекторы движения на основе пассивных ИК элементов 270
6 5 3 2 Анализ эффективности работы пассивного ИК детектора движущихся объектов (ПИК-детектора) 273
Литература 277

Глава 7
ДЕТЕКТОРЫ ПОЛОЖЕНИЯ, ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И УРОВНЯ 278
7 1 Потенциометрические датчики 279
7 2 Гравитационные датчики 282
7 3 Емкостные датчики 284
7 4 Индуктивные и магнитные датчики 287
7 4 1 Линейно-регулируемые дифференциальные трансформаторы (ЛРДТ) и поворотно-регулируемые дифференциальные трансформаторы (ПРДТ) 288
7 4 2 Вихретоковые датчики 290
7 4 3 Поперечныи индуктивныи датчик 291
7 4 4 Датчики приближения, использующие эффект Холла 292
7 4 5 Магниторезистивные датчики 296
7 4 6 Магнитострикционный детектор 299

7 5 Оптические датчики 300
7 5 1 Оптические мостовые схемы 301
7 5 2 Поляризационный детектор приближения 301
7 5 3 Волоконооптические датчики 302
7 5 4 Датчики Фабри-Перо 304
7 5 5 Решетчатые датчики 306
7 5 6 Позиционно-чувствительные детекторы 308
7 6 Ультразвуковые датчики 312
7 7 Радары 314
7 7 1 Микромощные импульсные радары 314
7 7 2 Радар для зондирования грунта 316
7 8 Датчики толщины и уровня 317
7 8 1 Датчики абляции 318
7 8 2 Детекторы толщины пленок 319
7 8 3 Датчики уровня жидкости 320
Литература 321

Глава 8
СКОРОСТЬ И УСКОРЕНИЕ 323
8 1 Характеристики акселерометров 325
8 2 Емкостные акселерометры 327
8 3 Пьезорезистивные акселерометры 329
8 4 Пьезоэлектрические акселерометры 330
8 5 Тепловые акселерометры 331
8 5 1 Акселерометры с нагреваемой пластиной 331
8 5 2 Акселерометры с нагреваемым газом 332
8 6 Гироскопы 335
8 6 1 Роторный гироскоп 335
8 6 2 Монолитные кремниевые гироскопы 336
8 6 3 Оптические гироскопы 339
8 7 Пьезоэлектрические кабели 341
Литература 343

Глава 9
ДАТЧИКИ СИЛЫ, МЕХАНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ПРИКОСНОВЕНИЯ 345
9 1 Тензодатчики 347
9 2 Тактильные чувствительные элементы 349
9 3 Пьезоэлектрические датчики силы 356
Литература 358

Глава 10
ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ 359
10 1 Общие понятия о давлении 359
10 2 Единицы измерения давления 361
10 3 Ртутные датчики давления 361
10 4 Сильфоны, мембраны и тонкие пластины 362
10 5 Пьезорезистивные датчики 364
10 6 Емкостные датчики 369
10 7 Датчики переменного магнитного сопротивления 370
10 8 Оптоэлектронные датчики 372

10 9 Вакуумные датчики 374
10 9 1 Вакуумметры Пирани 374
10 9 2 Ионизационные датчики 376
10 9 3 Датчик газового сопротивления 377
Литература 377

Глава 11
РАСХОДОМЕРЫ 378
11 1 Основы гидродинамики 378
11 2 Датчики скорости потока по перепаду давления 380
11 3 Тепловые расходомеры 382
11 4 Ультразвуковые расчходомеры 386
11 5 Электромагнитные расходомеры 389
11 6 Микрорасходомеры 391
11 7 Детектор изменения скорости потока газа 393
11 8 Кориолисовские расходомеры 394
11 9 Расходомеры с мишенями 396
Литература 397

Глава 12
АКУСТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ 398
12 1 Резистивные микрофоны 399
12 2 Электростатические микрофоны 399
12 3 Оптоволоконные микрофоны 400
12 4 Пьезоэлектрические микрофоны 402
12 5 Электретные микрофоны 403
12 6 Твердотельные акустические детекторы 405
Литература 407

Глава 13
ДАТЧИКИ ВЛАЖНОСТИ И СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ 408
13 1 Общие понятия о влажности 408
13 2 Емкостные датчики 410
13 3 Резистивные датчики влажности 413
13 4 Термисторные датчики влажности 415
13 5 Оптический гигрометр 416
13 5 Вибрационный гигрометр 417
Литература 420

Глава 14
ДЕТЕКТОРЫ СВЕТОВЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ 419
14 1 Введение 419
14 2 Фотодиоды 423
14 3 Фототранзистор 430
14 4 Фоторезисторы 433
14 5 Охлаждаемые детекторы 435
14 6 Детекторы ИК-излучений 438
14 6 1 Ячейки Голея 439
14 6 2 Детекторы излучении на основе термоэлементов 440
14 6 3 Пироэлектрические датчики ИК-излучений 442
14 6 4 Болометры 447
14 6 5 Активный датчик излучения дальнего ИК диапазона 450

14 7 Детекторы газового пламени 452
Литература 454

Глава 15
ДЕТЕКТОРЫ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 455
15 1 Сцинтилляционные детекторы 456
15 2 Ионизационные детекторы 459
15 2 1 Ионизационные камеры 459
15 2 2 Пропорциональные камеры 461
15 2 3 Счетчики Гейгера-Мюллера 462
15 2 4 Полупроводниковые детекторы радиоактивности 463
Литература 467

Глава 16
ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ 468
16 1 Терморезистивные датчики 473
16 1 1 Резистивные детекторы температуры 473
16 1 2 Кремниевые резистивные датчики 476
16 1 3 Термисторы 478
16 1 3 1 Термисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления 478
16 1 3 1 1 Простая модель 479
16 1 3 1 2 Модель Фрайдена 481
16 1 3 1 3 Модель Стейнхарта-Харта 483
16 1 3 1 4 Изготовление термисторов с отрицательным температурным коэффициентом 485
16 1 3 2 Явление саморазогрева в термисторах с отрицательным температурным коэффициентом 486
16 1 3 3 Термисторы с положительным температурным коэффициентом 490
16 2 Термоэлектрические контактные датчики 493
16 2 1 Законы термоэлектричества 494
16 2 2 Схемы подключения термопар 496
16 2 3 Термопарные сборки 498
16 3 Полупроводниковые датчики температуры на основе p-n перехода 500
16 4 Оптические датчики температуры 504
16 4 1 Флуоресцентные датчики 504
16 4 2 Интерферометрические датчики 506
16 4 3 Датчики на основе растворов, изменяющих цвет от температуры 507
16 5 Акустические датчики температуры 507
16 6 Пьезоэлектрические датчики температуры 509
Литература 509

Глава 17
ХИМИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ 511
17 1 Характеристики химических датчиков 512
17 2 Проблемы химических датчиков 512
17 3 Классификация химических детекторов 513
17 4 Датчики прямого деистия 514
17 4 1 Металл-оксидные химические датчики 514
17 4 2 Химические полевых транзисторы 516
17 4 3 Электрохимические датчики 517

17 4 4 Потенциометрические датчики 518
17 4 5 Кондуктометрические датчики 519
17 4 6 Амперометрические датчики 520
17 4 7 Каталитические детекторы газов 522
17 4 8 Эластомерные химические резисторы 523
17 5 Составные датчики 524
17 5 1 Тепловые датчики 524
17 5 2 Каталитические датчики Пелистера 525
17 5 3 Оптические химические датчики 526
17 5 4 Гравиметрические детекторы 528
17 5 5 Биохимические датчики 531
17 5 6 Энзимные датчики 532
17 6 Химические детекторы в составе аналитических приборов 532
17 6 1 Хемометрия 535
17 6 2 Измерения при помощи нескольких датчиков 536
17 6 3 Датчики обоняния 537
17 6 4 Нейронные сети для обработки информации датчиков обоняния 540
17 6 5 Интеллектуальные химические датчики 542
Литература 543

Глава 18
МАТЕРИАЛЫ ДАТЧИКОВ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ 545
18 1 Материалы 545
18 1 1 Применение кремния для изготовления датчиков 545
18 1 2 Пластмассы 549
18 1 3 Металлы и сплавы 553
18 1 4 Керамические материалы 555
18 1 5 Стекла 556
18 2 Поверхностные технологии 557
18 2 1 Нанесение тонких и толстых пленок 557
18 2 2 Литье при вращении 557
18 2 3 Термовакуумное напыление 557
18 2 4 Ионное распыление 558
18 2 5 Химическое осаждение из газовой фазы 559
18 3 Нано-технологии 560
18 3 1 Фотолитография 560
18 3 2 Методы обработки кремния 561
18 3 2 1 Основные методы 562
18 3 2 1 1 Нанесение тонких пленок 562
18 3 2 1 2 Жидкостное травление 562
18 3 2 1 3 Травление с барьерным слоем 564
18 3 2 1 4 Сухое травление 565
18 3 2 1 5 Метод обратной литографии 565
18 3 2 2 Соединение подложек 566
Литература 566

Приложение Единицы физических величин
Справочные данные по физическим характеристикам материалов 567

Предисловие к изданию на русском языке.

Sensus (лат.) – ощущение, чувство, способность воспринимать «раздражение», является, по-видимому, одним из наиболее универсальных свойств систем живой и неживой природы, проявляющееся в способности реагировать на внешнее воздействие. Данная реакция может быть чрезвычайно слабой, носить линейный, нелинейный или пороговый характер, поэтому функцию первичных преобразователей внешних воздействий: термо-, механо-, опто-, хемо- и акусторецепторов успешно выполняют как естественные природные материалы и системы, так и искусственно синтезированные «конструкции» неорганической и органической природы.

Применительно к представленной книге Дж. Фрайдена, выдержавшей не одно издание, известное изречение: «Ничто не бывает в уме, чего раньше не было в ощущении», как нельзя кстати. Даже первичное восприятие оглавления данного справочника оставляет в памяти чрезвычайно высокий уровень упорядочения и лаконичности представленного материала, что особенно важно для эффективного его использования широким кругом читателей. Для студентов и аспирантов - это великолепное учебное пособие по современной сенсорике; для инженеров – справочная книга, позволяющая оптимизировать технические решения на современном уровне; для исследователей – монография, изложенная профессионалом высокого уровня, стимулирующая к поиску современных методов контроля и измерений параметров технических, биологических объектов и окружающей среды с использованием новых материалов, конструкций и технологий.

В настоящее время сенсорика – это, фактически, целое системное направление, интегрирующее явления, эффекты, процессы и алгоритмы из таких областей знаний как физика, химия, биология, информатика, электротехника, теплотехника, электроника, оптика, генетика и других естественнонаучных, технических и биологических дисциплин. Оглавление данной книги в полной мере отражает системный междисциплинарный характер её изложения. В справочнике, в первую очередь, нашли свое отражение различные виды чувствительных элементов, однако, имеется раздел, посвященный вторичным преобразователям, что позволяет перейти от классического понятия «датчик» к таким понятиям как адаптивные, умные, интеллектуальные сенсоры и, конечно, трансдьюсеры. Данный переход ассоциируется с известным афоризмом В. Шекспира: «Чувствовать – это быть, размышлять – это жить». Умные сенсоры и трансдьюсеры, организованные или самоорганизованные в сенсорные сети, создаваемые с использованием современных микро- и нанотехнологий – ключевое направление развития дружественной и безопасной для человека комфортной среды обитания и эффективной жизнедеятельности.

Справочник Дж. Фраидена «Современные датчики», безусловно, займет достойное место в библиотеке широкого круга отечественных специалистов, ориентированных на разработку, создание и использование сенсоров.

Директор Центра микротехнологии
и диагностики СПбГЭТУ,
д.т.н. *Лучинин В.В.*

Предисловие

Уже прошло семь лет с выхода предыдущего издания этой книги. За это время в технологии изготовлении датчиков произошел значительный прогресс. Чувствительность датчиков стала выше, размеры меньше, избирательность лучше, а цена ниже. Но при всем при этом не изменились основные принципы разработки датчиков, поскольку все они базируются на законах природы. Леонардо Да Винчи, бесспорно являющийся одним из величайших гениев, когда-либо живших на земле, так говорил в своих молитвах: «Спасибо, тебе Боже, за то, что ты никогда не нарушаешь своих собственных законов.» Для развития науки очень важен тот факт, что с течением времени законы природы не изменяются, а только уточняются. Конечно же, и в этой книге принципы действия всех рассматриваемых датчиков основываются на старых и добрых законах природы. Это издание не сильно отличается от предыдущего. В нем существенно расширены разделы, посвященные практическим вопросам разработки датчиков. В новое издание также добавлен материал, описывающий последние разработки и новые идеи датчиков, а ряд менее важных разделов исключен из книги. Наиболее ощутимый прогресс в технологии изготовления датчиков произошел в областях разработки электромеханических и электрооптомеханических микродатчиков, чему в новом издании уделено большое внимание.

Использование микропроцессоров позволяет создавать очень сложные инструменты, находящие свое применение в различных областях повседневной жизни. Например, микропроцессорные системы «умеют» стирать одежду, варить кофе, воспроизводить музыку, охранять дома, а также регулировать температуру внутри помещений. Микропроцессоры являются цифровыми устройствами, работающими с двоичными кодами. В виде двоичных кодов можно представить практически любые электрические сигналы. Однако мы живем в аналоговом мире, где большинство устройств не являются цифровыми. Более того, сигналы окружающего нас мира не всегда бывают электрическими. Для того, чтобы сложные интеллектуальные цифровые системы могли воспринимать информацию из внешнего мира, необходимы интерфейсный устройства, преобразующие разнообразные физические величины в электрические сигналы. Такими интерфейсными устройствами и являются датчики. Другими словами, датчики – это глаза, уши и органы обоняния кремниевых кристаллов. В настоящее время датчики стали неотъемлемой частью жизни любого человека. Только в США объем их выпуска составляет 12 миллиардов долларов.

Работая инженером, я часто ощущал потребность в книге, объединяющей практическую информацию по вопросам, касающимся принципов действия, разработки и использования различных датчиков. Конечно, я мог найти всю интересующую информацию в учебниках по физике и электронике, в технических журналах и в каталогах производителей. Однако вся эта информация была разбросана по разным публикациям, и для того, чтобы найти ответ на какой-либо вопрос, мне приходилось много часов проводить в библиотеках. Таким образом мне удалось

собрать довольно много информации по вопросам разработки и применения различных датчиков в научной и инженерной практике. Вскоре я понял, что собранная мной информация может быть весьма полезной и для других людей. Именно это заставило меня написать эту книгу.

При работе над этой книгой я старался включить в нее, как можно, более широкий спектр датчиков. При этом я стремился дать краткое описание различных вариантов датчиков без подробного рассмотрения их деталей. Я надеюсь, что мне удалось охватить большую часть существующих в настоящее время датчиков и детекторов (хотя, это может быть весьма нескромным утверждением). Многие из рассмотренных устройств хорошо известны, но я старался дать системное описание всех типов датчиков, что является очень полезным для студентов. Для инженеров эта книга может служить очень удобным справочным пособием. Здесь представлена информация о современных датчиках: дано описание их физических принципов, устройства и практических способов применения в научных, промышленных и пользовательских приложениях. Материал, включенный в книгу, отражает практический опыт автора: его предпочтения и толкование. Конечно же, некоторые читатели могут найти описания отдельных датчиков либо слишком подробными, либо, наоборот, слишком краткими. Хотя в большинстве случаев я стремился найти компромисс между детальным описанием и простотой изложения материала.

Эта книга охватывает очень широкий спектр современных датчиков и детекторов. Однако, очевидно, что ни в одной книге нельзя отобразить все многообразие датчиков и их применений, даже если она будет называться «Энциклопедией датчиков». Данная работа не претендует быть энциклопедией, ее цель гораздо менее амбициозная. Автор стремился сделать удобное справочное пособие, полезное для студентов, исследователей (инженеров и научных сотрудников), работающих с измерительной аппаратурой, разработчиков датчиков и специалистов, для которых необходимо знать и уметь подбирать датчики для применения в конкретных практических системах.

Предыдущие издания этой книги достаточно широко использовались в качестве учебных пособий в технических учебных заведениях. В этом издании учтены дополнения, предложенные разработчиками датчиков, профессорами и студентами, а также внесены некоторые изменения и исправлены ошибки.

Jacob Fraden
Сан Диего, Калифорния
Ноябрь, 2003

ГЛАВА 1

СБОР ДАННЫХ

«Это такое же большое, как жизнь, но гораздо более натуральное»
Lewis Caroll, "Through the Looking Glass"

1.1. Датчики, сигналы и системы

Наиболее часто используемое определение датчиков звучит так: «датчик – это устройство, воспринимающее сигналы и внешние воздействия и реагирующее на них». Это очень широкое определение. Фактически, оно настолько широкое, что охватывает почти все: от человеческого глаза до спускового крючка в револьвере. Рассмотрим систему контроля за уровнем жидкости, показанную на рис. 1.1 [1]. Оператор управляет уровнем жидкости в резервуаре при помощи клапана. При этом оператор должен учитывать расход жидкости, изменение температуры (от которого зависит вязкость жидкости, и, следовательно, скорость ее прохождения через клапан), а также другие параметры, оказывающие влияние на эту систему. Без осуществления контроля резервуар либо перельется, либо, наоборот, станет пустым. Для принятия правильного решения оператору необходимо постоянно получать информацию об уровне воды в резервуаре. В рассматриваемом примере информация поступает от датчика, состоящего из двух основных частей: смотровой трубки на резервуаре и глаза оператора, подающего импульсы на зрительный нерв. Сами по себе ни глаз оператора, ни смотровая трубка не являются датчиками, но их комбинация формирует детектор, обладающий избирательной способностью определять уровень жидкости. При корректном проектировании системы изменение уровня жидкости в резервуаре быстро отразится на уровне жидкости в смотровой трубке, поэтому, можно сказать, что рассматриваемый датчик характеризуется хорошей реакцией или малой инерционностью. Но если внутренний диаметр трубки будет слишком мал для вязких жидкостей, уровень в ней будет отставать от уровня в резервуаре. Поэтому необходимо учитывать фазовые характеристики такого датчика. Для некоторых применений такая задержка может быть приемлемой, тогда как для других надо использовать иную конструкцию смотровой трубки. Отсюда видно, что рабочие характеристики каждого датчика можно оценить только относительно конкретной системы сбора данных.

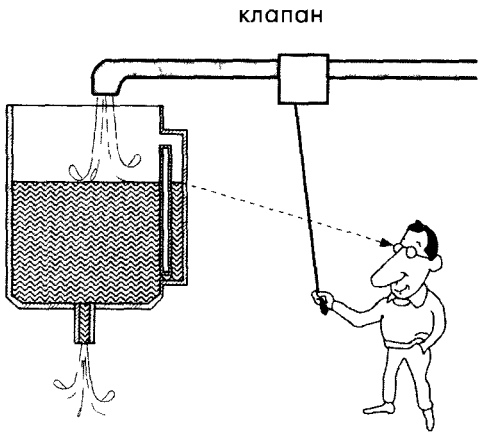


Рис. 1.1 Система контроля за уровнем воды. Смотровая трубка и глаз оператора формируют датчик (устройство, преобразующее информацию в электрический сигнал).

Окружающий нас мир можно разделить на две части: природа и объекты, созданные человеком. Естественные сенсоры, которыми снабжен любой живой организм, обычно реагируют на электрохимические сигналы, т.е. их физический принцип действия основывается на передаче ионов в нервных тканях, как это было в рассмотренном примере со зрительным нервом оператора. В системах же, созданных людьми, в передаче сигналов участвуют электроны. Датчики в таких системах «разговаривают» с устройствами, в которые они встроены, на одном языке. Язык общения здесь – электрические сигналы, в которых информация, передается при помощи электронов, а не ионов. (Хотя в оптических системах связи информация передается через фотоны, но этот раздел выходит за рамки книги.) В данной книге будут рассматриваться датчики, которые могут быть подключены к измерительной системе при помощи электрических проводов, а не через электрохимические растворы и нервные волокна. Исходя из этого, перефразируем определение датчика:

Датчик – это устройство, воспринимающее внешние воздействия и реагирующее на них изменением электрических сигналов.

Термин *внешние воздействия* широко используется в этой книге, поэтому его необходимо правильно воспринимать. Под внешним воздействием понимается количественная характеристика объекта, его свойство или качество, которые необходимо воспринять и преобразовать в электрический сигнал. В некоторых книгах (например, [2]) для этих целей используется термин *измеряемая величина*, имеющий аналогичное значение, однако в этом термине делается акцент на количественной характеристике сенсорной функции.

Назначение датчиков – реакция на определенное внешнее физическое воздействие и преобразование его в электрический сигнал, совместимый с измерительными схемами. Другими словами, можно сказать, что датчик – это преобразователь физической величины (часто неэлектрической) в электрический сигнал. Под термином *электрический сигнал* понимается сигнал, который может быть преобразован при помощи электронных устройств, например, усилен или передан по линии передач. Выходными сигналами датчиков могут быть напряжение, ток или заряд, которые описываются следующими характеристиками: амплитудой, частотой, фазой или цифровым кодом. Этот набор характеристик называется *форматом выходного сигнала*. Таким образом, каждый датчик характеризуется набором входных параметров (любой физической природы) и набором выходных электрических параметров.

Любой датчик является преобразователем энергии. Вне зависимости от типа измеряемой величины всегда происходит передача энергии от исследуемого объекта к датчику. Работа датчика – это особый случай передачи информации, а любая передача информации связана с передачей энергии. Очевидным является тот факт, что передача энергии может проходить в двух направлениях, т.е. она может быть как положительной, так и отрицательной, например, энергия может передаваться от объекта к датчику, и, наоборот, от датчика к объекту. Особым случаем является ситуация, при которой энергия равна нулю, но и в этом случае происходит передача информации о существовании именно такой особой ситуации. Например, инфракрасный датчик температуры вырабатывает положительное напряжение, когда объект теплее датчика (инфракрасное излучение направлено в сторону датчика), или отрицательное напряжение, когда объект холоднее датчика (инфракрасное излучение направлено от датчика на объект). Когда датчик и объект имеют одинаковую температуру, инфракрасный поток равен нулю, и выходное напряжение также равно нулю. В этой ситуации и заключена информация о равенстве температур датчика и объекта.

Понятие *датчик* необходимо отличать от понятия *преобразователь*. Преобразователь конвертирует один тип энергии в другой, тогда как датчик преобразует любой тип энергии внешнего воздействия в электрический сигнал. Примером преобразователя может служить громкоговоритель, конвертирующий электрический сигнал в переменное магнитное поле для последующего формирования акустических волн. Здесь речь не идет ни о каком восприятии внешней информации. (Интересно отметить тот факт, что если громкоговоритель подключить ко входу усилителя, он будет работать как микрофон. В этом случае его можно назвать акустическим датчиком.) Преобразователи могут выполнять также функции *приводов*. Привод можно определить как устройство, противоположное датчику, поскольку он преобразует электрическую энергию, как правило, в неэлектрическую энергию. Примером привода является электрический мотор, преобразующий электрическую энергию в механическую.

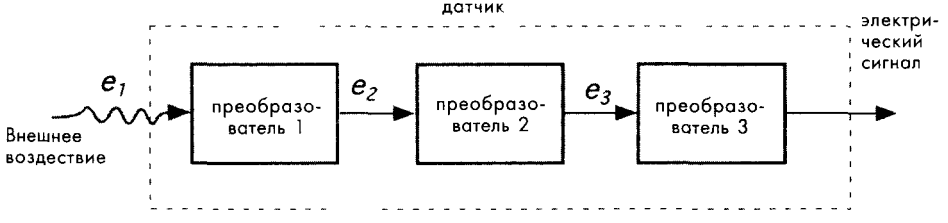


Рис. 1.2 Датчик может состоять из нескольких преобразователей. e_1, e_2,...- различные виды энергии. Отметим, что последний элемент данной схемы является датчиком прямого действия

Преобразователи могут быть частью составных датчиков (рис. 1.2). Например, в состав химического датчика могут входить два преобразователя, один из которых конвертирует энергию химических реакций в тепло, а другой, термоэлемент, преобразовывает полученное тепло в электрический сигнал. Комбинация этих двух

преобразователей представляет собой химический датчик – устройство, вырабатывающее электрический сигнал в ответ на химическую реакцию. Отметим, что в рассмотренном примере химический датчик является составным датчиком, состоящим из преобразователя и еще одного датчика – датчика температуры. В структуру составных датчиков, как правило, входит хотя бы один датчик прямого действия и несколько преобразователей. *Датчиками прямого действия* называют датчики, которые построены на физических явлениях, позволяющих проводить непосредственное преобразование энергии внешнего воздействия в электрические сигналы. Примерами таких физических явлений являются фотоэффект и эффект Зеебека, описываемые в третьей главе.

Таким образом, все датчики можно разделить на две группы: датчики прямого действия и составные датчики. Датчики прямого действия преобразуют внешнее воздействие непосредственно в электрический сигнал, используя для этого соответствующее физическое явление, в то время как в составных датчиках прежде чем получить электрический сигнал на выходе оконечного датчика прямого действия необходимо осуществить несколько преобразований энергии.

На практике датчики не работают сами по себе. Как правило, они входят в состав измерительных систем, часто довольно больших, объединяющих много разных детекторов, преобразователей сигналов, сигнальных процессоров, запоминающих устройств и приводов. Датчики в таких системах могут быть как наружными, так и встроенными. Часто их располагают на входах измерительных приборов для того,

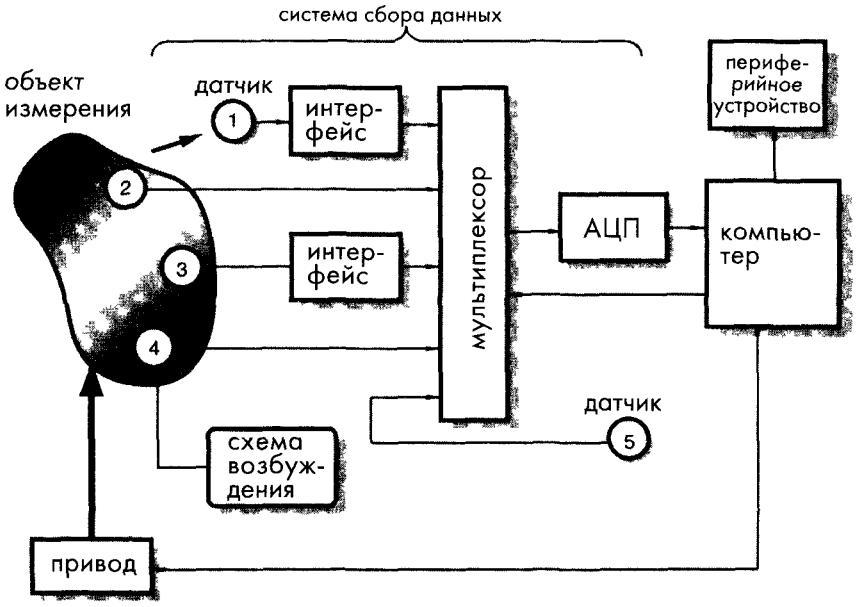


Рис. 1.3 Автоматизированный измерительный комплекс, показывающий роль датчиков в системе сбора данных. Датчик 1 является бесконтактным, датчики 2 и 3 – пассивными устройствами, датчик 4 – активным, а датчик 5 - внутренним элементом системы сбора данных.

чтобы они реагировали на внешние воздействия и сообщали системе об изменениях в окружающих условиях. Также они размещаются внутри измерительных систем для мониторинга их функционирования, что необходимо для поддержания корректной работы всех внутренних устройств. Датчики являются неотъемлемой частью систем сбора данных, которые, в свою очередь, могут входить в состав больших измерительных комплексов со множеством обратных связей.

На рис. 1.3 показана блок-схема автоматизированного измерительного комплекса, состоящего из системы сбора данных и управляющего устройства. Из этого рисунка хорошо видна роль датчиков в таких системах. Субъектами измерений могут быть любые материальные объекты: автомобили, космические корабли, человеческие тела, различные жидкости и газы. Данные об измеряемом объекте собираются при помощи датчиков, часть из которых, (2, 3 и 4), располагается на поверхности или внутри объекта. Датчик 1 не имеет непосредственной связи с объектом, т.е. является *бесконтактным*. Телевизионные камеры и детекторы излучений служат примерами таких датчиков. Даже когда датчик называется бесконтактным, всегда между ним и объектом происходит передача энергии.

Датчик 5 может выполнять различные функции. Часто он служит для контроля за условиями внутри самой системы сбора данных. Датчики 1 и 3 не могут быть напрямую подсоединены к стандартным электронным схемам из-за несоответствия форматов выходных сигналов. Для их подключения требуются специальные интерфейсные устройства – преобразователи сигналов. Датчики 1, 2, 3 и 5 являются пассивными, поскольку для формирования выходных сигналов им не требуется дополнительная электрическая энергия. Датчик 4 – представитель активных устройств. Для обеспечения его работы необходим вспомогательный сигнал, получаемый от схемы возбуждения. При этом датчик модулирует этот сигнал в соответствии с изменением измеряемого параметра. Примером активных датчиков является температурно-чувствительный резистор, который часто называется термистором. Такой датчик работает от источника постоянного тока, являющегося в данном случае схемой возбуждения. Измерительный комплекс может включать в себя либо один датчик (домашний термостат), либо несколько тысяч (космический корабль).

Электрические сигналы с выходов датчиков поступают на мультиплексор, выполняющий роль переключателя. Если выходные сигналы датчиков являются аналоговыми, они поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), если цифровыми – непосредственно на компьютер, который синхронизирует работу мультиплексора и АЦП, а также посылает управляющие сигналы на привод, воздействующий непосредственно на объект. В качестве приводов могут использоваться электрические моторы, соленоиды, реле и пневматические клапаны. В состав измерительной системы также входят периферийные устройства (накопители данных, дисплеи, сигнализаторы и т.д.) и другие компоненты, не показанные в блок-схеме. Такими компонентами могут быть фильтры, схемы выборки и хранения, усилители и прочие преобразователи.

Для иллюстрации того, как такая схема работает, рассмотрим простую систему, контролирующую закрытие дверей в автомобиле. Каждая дверь автомобиля оснащена датчиком, определяющим ее состояние (открыта она или закрыта). В большинстве

машин в качестве такого датчика используется обыкновенный электрический выключатель. Сигналы от датчиков всех дверей поступают на встроенный микропроцессор автомобиля (здесь нет необходимости использовать АЦП, поскольку сигналы датчиков являются цифровыми: 0 – дверь открыта, 1 – закрыта). Микропроцессор определяет какая из дверей открыта и посылает на соответствующее периферийное устройство (приборную панель или звуковой сигнализатор) специальный сигнал. Водитель автомобиля (играющий роль привода) получает это сообщение и воздействует на объект, т.е. закрывает дверь.

Примером более сложной системы является дозатор паров анестезирующих веществ, применяемый в медицине для регулирования количества анестетиков, вдыхаемых пациентом в ходе хирургических операций. В такую систему входят несколько активных и пассивных датчиков. Концентрация паров анестезирующих веществ контролируется при помощи пьезоэлектрического датчика, установленного в отводной трубке. Молекулы анестетиков увеличивают массу пьезокристалла, тем самым изменяя частоту его колебаний. Величина изменения собственной частоты кристалла и является мерой концентрации паров анестезирующих веществ. Чтобы отличить вдох от выдоха применяется датчик, контролирующий уровень CO_2. В дополнение к этому для компенсации некоторых переменных составляющих в системе используются датчики температуры и давления. Сигналы от всех этих датчиков поступают на мультиплексор, отцифровываются и подаются в микропроцессор, который и определяет реальную концентрацию паров анестезирующих веществ. Анестезиолог задает требуемый уровень подачи анестетиков, а процессор, управляя соответствующим образом приводом (в данном случае клапанами), поддерживает необходимую концентрацию анестезирующих веществ.

На рис. 1.4 показан комплекс, состоящий из комбинации различных датчиков, приводов и сигнализаторов, применяемый в корпорации Nissan для повышения безопасности автомобиля. В его состав входят две системы, борющиеся с засыпанием водителя за рулем автомобиля. Действие одной из этих систем направлено на предупреждение водителя, а другой – на выравнивание курса автомобиля. Для выполнения этих функций необходимы специальные датчики, роль которых могут играть сенсоры слежения за глазным яблоком водителя и детекторы наклона его головы. В систему выдачи сигнала необходимости экстренного торможения, построенную на основе датчиков микроволнового, ультразвукового и инфракрасного диапазонов, часто входит устройство опережающего включения индикаторов торможения, позволяющее заранее предупредить об опасности водителей транспортных средств, едущих сзади. В состав системы предупреждения о препятствиях входят инфракрасные детекторы и радар. Адаптивная система круиз-контроля начинает работать в момент, когда водитель слишком приблизился к впереди идущему транспортному средству: при этом скорость автомобиля немедленно снижается для обеспечения безопасной дистанции. Устройство мониторинга пешеходов определяет присутствие людей на дороге в темное время суток и в зонах, закрытых для обзора, и предупреждает об этом водителя автомобиля. Система контроля полосы движения определяет ситуации, при которых отклонение автомобиля происходит не по воле водителя. При этом система оповещает водителя об уходе с полосы и автоматически выравнивает транспортное средство.

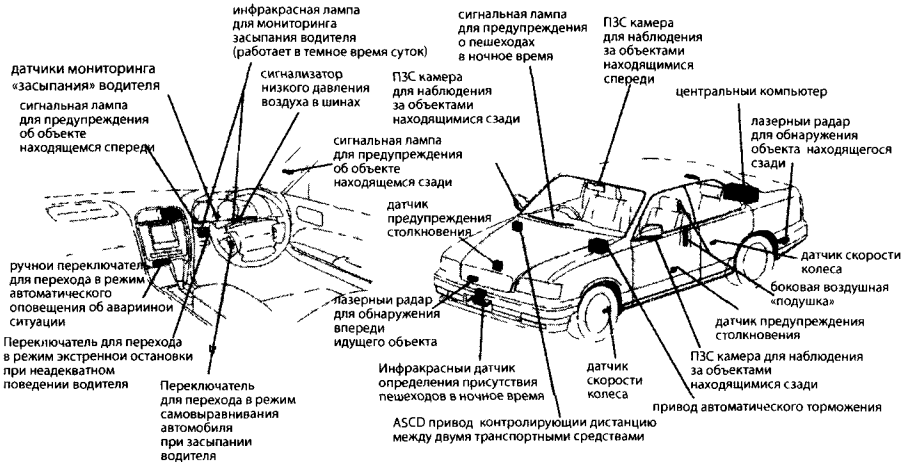


Рис. 1.4 Система безопасности автомобиля (*с разрешения Nissan Motor Company*)

В следующих главах будут подробно рассмотрены типы сенсорных элементов, физические основы работы датчиков, их конструктивные решения и электронные схемы интерфейсных устройств. Описания других важных элементов измерительных комплексов, таких как приводы, дисплеи, накопители данных, передающие устройства, не вошли в эту книгу, и о них будет встречаться только краткое упоминание.

Входные сигналы датчиков (внешние воздействия) могут иметь практически любую физическую или химическую природу. Поток света, температура, давление, колебания, перемещение, положение, скорость, концентрация ионов – все это примеры внешних воздействий. Конструкция датчиков меняется в зависимости от их предназначения. Для особых условий применения может потребоваться разработка специальных корпусов и схем монтажа. Например, пьезорезистивный датчик для измерения кровяного давления внутри аорты монтируется в герметичном корпусе и имеет очень миниатюрные размеры для возможности прохождения через микрокатетер. Корпус того же самого датчика будет совсем другим для случая применения внутри надувной манжеты медицинского тонометра. Иногда от датчиков требуется чтобы они реагировали только на определенный диапазон входных сигналов. Например, детектор движения в охранной системе должен срабатывать только на перемещение людей и никак не реагировать на передвижение маленьких животных, таких как собаки и кошки.

1.2. Классификация датчиков

Системы классификации датчиков могут быть очень разными. от очень простых до сложных. Критерий классификации всегда выбирается в зависимости от цели проведения классификации. В этой книге предлагается несколько практических подходов к этой проблеме.

Все датчики можно разделить на две категории: **пассивные** и **активные**. Пассивный датчик не нуждается в дополнительном источнике энергии и в ответ на изменение

внешнего воздействия на его выходе всегда появляется электрический сигнал. Это означает, что такой датчик преобразует энергию внешнего сигнала в выходной сигнал. Примерами пассивных датчиков являются термопары, фотодиоды и пьезоэлектрические чувствительные элементы. Большинство пассивных датчиков являются устройствами прямого действия (их определение приведено в разделе 1.1). В отличие от пассивного собрата активный датчик для своей работы требует внешней энергии, называемой *сигналом возбуждения*. При формировании выходного сигнала активный датчик тем или иным способом воздействует на сигнал возбуждения. Поскольку такие датчики меняют свои характеристики в ответ на изменение внешних сигналов, их иногда называются *параметрическими*. Фактически, в активных датчиках происходит преобразование изменения их внутренних характеристик в электрические сигналы, т.е. определенные параметры активных датчиков модулируют сигналы возбуждения, и эта модуляция несет в себе информацию об измеряемой величине. Например, термисторы являются температурно-чувствительными резисторами. Сами по себе термисторы не производят никаких электрических сигналов, но при прохождении через них электрического тока (сигнала возбуждения), их сопротивление может быть определено по изменению тока и/или падению напряжения на них. Значение сопротивления (в омах) отражает измеряемую температуру, которая может быть найдена по известным зависимостям. Другим примером активных датчиков является резистивный тензодатчик, чье электрическое сопротивление зависит от величины его деформации. Для определения сопротивления датчика через него также необходимо пропустить электрический ток от внешнего источника питания.

В зависимости от выбора точки отсчета датчики можно разделить на **абсолютные** и **относительные.** *Абсолютный* датчик определяет внешний сигнал в абсолютных физических единицах, не зависящих от условий проведения измерений, тогда как выходной сигнал *относительного* датчика в каждом конкретном случае может трактоваться по-разному. Примером абсолютного датчика является термистор. Его электрическое сопротивление напрямую зависит от абсолютной температуры по шкале Кельвина. Другой же популярный датчик температуры – термопара – является относительным устройством, поскольку напряжение на его выходе является функцией градиента температуры на проволочках термопары. Поэтому определить конкретную температуру по выходному сигналу термопары можно только относительно известной базовой точки отсчета. Другим примером абсолютных и относительных датчиков является датчик давления. Показания абсолютного датчика соответствуют значениям давления относительно абсолютного нуля по шкале давлений, т.е. относительно полного вакуума. Относительный датчик определяет давление относительно атмосферного давления, которое не является нулевым.

Другой подход к классификации датчиков заключается в рассмотрении их характеристик. Для того чтобы отнести датчик к той или иной группе необходимо знать, какие величины он может измерять, его характеристики, на каком физическом принципе он реализован, какой механизм преобразований он применяет, из какого материала он изготовлен, какая область его применения. В таблицах 1.1-1.6, взятых из книги [3], представлена схема такой классификации, которая является наиболее информативной. Для примера рассмотрим акселерометр на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Согласно приведенным таблицам ему можно дать следующее описание.

Внешнее воздействие	Ускорение
Характеристики	Чувствительность определяется как отношение изменения частоты на единицу ускорения, краткосрочная и долговременная стабильность измеряется в Гц на единицу времени и т.д.
Физический принцип	Механический
Механизм преобразований	Упругоэлектрический
Материал	Неорганический диэлектрик
Область применения	Морской и автомобильный транспорт, космические исследования, научные измерения

Таблица 1.1 Характеристики

Чувствительность	Диапазон входных значений
Стабильность(краткосрочная и долговременная)	Разрешающая способность
Точность	Избирательность
Быстродействие	Окружающие условия
Характеристики при перегрузке	Линейность
Гистерезис	Мертвая зона
Эксплуатационный ресурс	Формат выходного сигнала
Стоимость, размеры, вес	Другие

Таблица 1.2 Материалы датчиков

Неорганические	**Органические**
Проводники	Диэлектрики
Полупроводники	Жидкости, газы, плазма
Биологические ткани	Другие

Таблица 1.3 Средства детектирования

Биологические
Химические
Электрические, магнитные или электромагнитные волны
Тепло, температура
Механическое перемещение или волна
Радиоактивность, излучение
Другие

Таблица 1.4 Механизм преобразований

Физические	**Химические**
Термоэлектричество	Химические преобразования
Фотоэлектричество	Физические преобразования
Фотомагнетизм	Электрохимический процесс
Магнитоэлектричество	Спектроскопия
Электромагнетизм	Другие
Термоупругость	**Биологические**
Электроупругость	Биохимические преобразования
Термомагнетизм	Физические преобразования
Термооптика	Влияние на тестируемые организмы
Фотоупругость	Спектроскопия
Другие	Другие

Таблица 1.5 Области применения

Архитектура	Домашнее применение
Гражданское строительство, проектирование	Окружающая среда, метеорология, средства безопасности
Распределение, торговля, финансы	Средства информации, телекоммуникация
Энергетика	Судоходство
Здравоохранение, медицина	Отдых, развлечения
Оборонная промышленность	Космос
Научные исследования	другие
Транспорт (исключая автомобильный)	
Автомобильный транспорт	

Таблица 1.6 Внешние воздействия

Акустические	**Электрические**
Амплитуда волны, фаза, поляризация	Заряд, ток
Спектр	Потенциал, напряжение
Скорость волны	Электрическое поле (амплитуда, фаза, поляризация, спектр)
Другие	Проводимость
Биологические	Диэлектрическая проницаемость
Биомасса (вид, концентрация, состояние)	Другие
Другие	**Магнитные**
Химические	Магнитное поле (амплитуда, фаза, поляризация, спектр)
Элементы (идентичность, концентрация, состояние)	Магнитный поток
Другие	Проницаемость
	Другие

Таблица 1.6 Внешние воздействия (продолжение)

Оптические
Амплитуда волны, фаза, поляризация, спектр
Скорость волны
Коэффициент отражения
Излучающая способность
Отражающая способность, поглощение
Другие

Механические
Положение (координаты линейные и угловые)
Ускорение
Сила
Напряжение, давление
Деформация
Масса, плотность
Движение, момент
Скорость потока, расход массы
Форма, шероховатость, ориентация
Жесткость, податливость

Вязкость
Упорядоченность структуры, интеграция
Другие

Излучение
Тип
Энергия
Интенсивность
Другие

Тепловые
Температура
Поток
Тепло
Теплопроводность
Другие

1.3. Единицы измерения

В этой книге используются единицы измерения системы СИ, принятые на 14-ой Международной Конференции по Мерам и Весам (1971). В таблице 1.7 приведены основные единицы измерения физических величин, взятые из французского справочника *Le Systeme International d'Unites* [4]. Все остальные единицы измерения являются производными от этих основных единиц. Некоторые из них приведены в Приложении.

Таблица 1.7 Основные единицы измерения системы СИ

Величина	Название	Обозначение	Определение (Год установления)
Длина	Метр	м	Метр – длина пути, пройденного светом в вакууме за время, равное 1/299792458 доли секунды (1983)
Масса	Килограмм	кг	Килограмм – масса эталона, сделанного из сплава платины и иридия (1889)
Время	Секунда	с	Секунда – длительность 9192631 периодов излучения, испускаемого атомом Цезия 133 при точно определенных условиях резонанса (1967)

Величина	Название	Обозначение	Определение (Год установления)
Электрический ток	Ампер	А	Ампер - сила установившегося электрического тока, который проходя по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого поперечного сечения, расположенных в вакууме на расстоянии 1 метра друг от друга, вызывает появление силы между ними, равной $2x10^{-7}$Н/м (1946)
Термодинамическая температура	Кельвин	К	Кельвин определяется температурой тройной точки воды (когда все три фазы воды жидкая, парообразная и твердая –находятся в термодинамическом равновесии) Эта температура равна 273 16 К (1967)
Количество	Моль	моль	Моль – количество элементарных частиц (атомов, вещества молекул, ионов, электронов и др), содержащихся в 0 012 кг изотопа улерода-12 (1971)
Интенсивность света	Кандела (свеча)	кд	Свеча – сила света, излучаемого в перпендикулярном направлении черным телом, имеющим площадь поверхности 1/600000 м^2, при температуре замерзания Pt и давлении 101325 Нм^2 (1967)
Плоский угол	Радиан	рад	Дополнительная единица
Телесный угол	Стерадиан	срад	Дополнительная единица

Часто на практике бывает неудобно напрямую использовать основные единицы или их производные, поскольку они могут быть либо слишком большими, либо слишком маленькими. Тогда применяют стандартные множители или делители, приведенные в Приложении. При произношении полученных единиц ударение всегда делается на первый слог. Например, 1 Ампер (А) при умножении на коэффициент 10^{-3} образует меньшую единицу, называемую миллиампером (мА), равную одной тысячной доле ампера.

Иногда используются еще две системы единиц измерения: Система Гаусса и Британская Система, которая в США называется *Пользовательской Системой США*. Америка является единственной развитой страной, в которой система СИ не является общеупотребимой. Однако, в скором будущем система СИ будет также принята и в США. В этой книге в большинстве случаев используется система СИ. Однако для удобства понимания в некоторых местах применяется американская система. Для перевода единиц измерения других систем в систему СИ читатель может воспользоваться таблицами приведенными в Приложении (Номенклатура, аббревиатура и произношение многих единиц взяты из работы «Standard practice for use of the International System of units (SI)». Standard E380-91a.©1991 ASTM, West Conshocken, PA.) Для перевода любой единицы в систему СИ ее необходимо умножить на коэффициент, указанный в таблице. Например, для перевода ускорения 55 фут/с^2 в систему СИ надо умножить это значение на коэффициент 0.3048:

$$55 фут / с^2 \times 0.3048 = 16.764 м / с^2 .$$

Подобным образом можно преобразовать значение электрического заряда 1.7 фарадей:

$$1.7 \textit{фарадей} \times 9.65 \times 10^{19} = 1.64 \times 10^{20} \textit{Кл}.$$

Читатель должен понимать как физическую, так и техническую терминологию, принятую в разных странах. Например, в США и многих других странах разность потенциалов называется «вольтаж», тогда как в остальных странах – «электрическое напряжение» или просто «напряжение». В этой книге будет часто встречаться терминология, принятая в США.

Литература

1 Thompson, S *Control Systems Engineering & Design* Longman Scientific & Technical, Essex, UK, 1989
2 Norton, H N *Handbook of Transducers* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989
3 White, R W A sensor classification scheme In *Microsensors* IEEE Press, New York, 1991, pp 3-5
4 *The International System of Units (SI)* B N Taylor, ed , NIST Special Publication 330,2001

ГЛАВА 2

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ

«О, на что только люди не отваживаются! Что только они могут сделать! А что люди делают ежедневно, не осознавая, что они творят!»
Шекспир, «Много шума из ничего»

Может потребоваться несколько этапов преобразований, прежде чем входной сигнал, поступающий на датчик, превратится в выходной электрический сигнал. Для примера рассмотрим оптоволоконный датчик давления. Внешнее давление, действующее на датчик, вызывает деформацию волоконного световода, что в свою очередь приводит к изменению его показателя преломления, из-за чего меняются характеристики оптической линии передач и происходит модуляция плотности фотонов. Результирующий поток фотонов детектируется и преобразуется в электрический ток. В этой главе будут рассматриваться общие характеристики датчиков, вне зависимости от их физической природы и количества необходимых промежуточных этапов преобразований. При этом датчики будут представлены в виде «черных ящиков», где важными будут только соотношения между сигналами на их входах и выходах.

2.1. Передаточная функция

Для каждого датчика можно вывести *идеальное* или *теоретическое* соотношение, связывающее сигналы на его входе и выходе. Если была бы возможность идеально спроектировать датчик, изготовить его из идеальных материалов и идеальными инструментами, при этом все работы выполнялись бы идеальными работниками, то сигнал на выходе такого датчика всегда бы соответствовал *реальному* значению внешнего воздействия. Выведенное идеальное соотношение между входным и выходным сигналом можно выразить в виде либо таблицы, либо графика, либо математического выражения. Это идеальное (теоретическое) выражение часто называют *передаточной функцией*. Передаточная функция устанавливает взаимосвязь между выходным электрическим сигналом датчика S и внешним воздействием s: $S = f(s)$. Эта функция может быть как линейной, так и нелинейной (например, логарифмической, экспоненциальной или степенной). Во многих случаях передаточная

функция является одномерной (т е связывает выходной сигнал только с одним внешним воздействием) Одномерную линейную функцию можно представить в виде выражения

$$S = a + bs, \tag{2 1}$$

где a – постоянная составляющая (т е значение выходного сигнала при нулевом входном воздействии), b – наклон прямой, который часто называют *чувствительностью* датчика Параметр S – эта та характеристика электрического сигнала, которую системы сбора данных воспринимают в качестве выходного сигнала датчика В зависимости от свойств датчика это может быть амплитуда, частота или фаза

Логарифмическая передаточная функция имеет вид

$$S = a + b\ln s, \tag{2 2}$$

экспоненциальная –

$$S = ae^{ks}, \tag{2 3}$$

степенная –

$$S = a_0 + a_1 s^k, \tag{2 4}$$

где κ – постоянное число

Однако датчик может иметь передаточную функцию, которую невозможно описать вышеприведенными аппроксимационными выражениями В таких случаях применяются полиноминальные аппроксимации более высоких порядков

Для нелинейных передаточных функций чувствительность b не является константой, как это было в случае линейных зависимостей Для каждого конкретного значения входного сигнала s_0 ее можно определить в виде

$$b = \frac{dS(s_0)}{ds} \tag{2 5}$$

Во многих случаях нелинейные датчики могут считаться линейными внутри ограниченного диапазона значений Для более широкого диапазона значений нелинейная передаточная функция представляется в виде отрезков нескольких прямых линий Это называется кусочно-линейной аппроксимацией Для того, чтобы определить, может ли данная передаточная функция быть представлена в виде ли нейной зависимости, наблюдают за изменением выходных сигналов в линейной и реальной моделях при постепенном увеличении входного сигнала Если разность сигналов не выходит за допустимые пределы (см раздел 2 4), передаточную функцию данного датчика можно считать линейной

В случаях, когда на выходной сигнал датчика оказывают влияние несколько внешних воздействий, его передаточная функция становится многомерной Примером датчика с двумерной передаточной функцией является инфракрасный датчик температуры Его передаточная функция связывает две температуры (T_b – абсолютную температуру объекта измерения и T_s – абсолютную температуру поверхности сенсорного элемента) с выходным напряжением V

$$V = G(T_b^4 - T_s^4), \tag{2.6}$$

где G – константа. Из выражения видно, что зависимость между температурой объекта и выходным напряжением (передаточная функция) является не только нелинейной (параболой четвертого порядка), но она также зависит от температуры поверхности чувствительного элемента. Для определения чувствительности такого датчика по отношению к температуре объекта, надо взять частную производную от выражения (2.6):

$$b = \frac{\partial V}{\partial T_b} = 4GT_b^3. \tag{2.7}$$

На рис. 2.1 передаточная функция (2.6) показана графически. Из рисунка видно, что каждое значение выходного напряжения однозначно определяется по двум входным температурам. Следует отметить, что, как правило, передаточные функции представляются в виде зависимости «выход от входа». Однако, когда датчик используется для количественного определения внешнего воздействия, необходимо получить инверсную зависимость – «вход от выхода». При линейной передаточной функции получить обратную зависимость несложно. Но в случае присутствия в системе нелинейностей эта задача сильно усложняется, и во многих случаях аналитического выражения, пригодного для вычислений, получить не удается. Тогда снова привлекаются аппроксимационные методы.

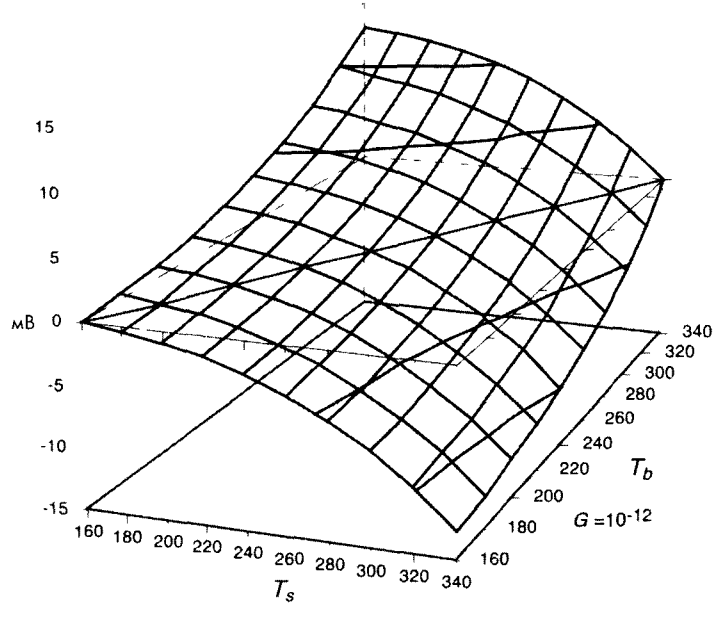


Рис. 2.1. Двумерная передаточная функция инфракрасного датчика температуры

2.2. Диапазон измеряемых значений (Максимальный входной сигнал)

Динамический диапазон внешних воздействий, который датчик может воспринять, называется *диапазоном измеряемых значений* (FS). Эта величина показывает максимально возможное значение входного сигнала, которое датчик может преобразовать в электрический сигнал, не выходя за пределы допустимых погрешностей. Для датчиков с очень широкой и нелинейной амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) динамический диапазон внешних воздействий часто выражается в децибелах, которые являются логарифмической мерой отношений либо мощности, либо напряжений. Всегда необходимо помнить, что децибелы выражают не абсолютные значения, а только отношения величин. Сигналы отображенные в логарифмическом виде, имеют гораздо меньшие значения, чем исходные, что на практике в ряде случаев бывает очень удобно. Поскольку логарифмическая шкала является нелинейной, сигналы низкого уровня в ней представляются с большим разрешением, тогда как сигналы высокого уровня претерпевают большее сжатие. Другими словами, логарифмическая шкала для малых сигналов работает как микроскоп, а в случае больших сигналов – как телескоп. По определению децибел равен десяти логарифмам отношения мощности двух сигналов (см. таблицу 2.1), т.е.:

$$1дБ = 10\log\frac{P_2}{P_1}, \tag{2.8}$$

Исходя из этого можно утверждать, что децибел в двадцать раз превышает логарифмы отношений силы, тока и напряжений, т.е.:

$$1дБ = 20\log\frac{S_2}{S_1}. \tag{2.9}$$

Таблица 2.1 Отношения между мощностью, силой (напряжением, током) и децибелами

Отношение мощности	1 023	1 26	10	100	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9	10^{10}
Отношение сил	1 012	1 12	3 16	10	31 6	100	316	10^3	3162	10^4	3×10^4	10^5
Децибелы	0	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

2.3. Диапазон выходных значений

Диапазон выходных значений (FSO) – алгебраическая разность между электрическими выходными сигналами, измеренными при максимальном и минимальном внешнем воздействии. В эту величину должны входить все возможные отклонения от идеальной передаточной функции. На рис. 2.2А величина S_{FS} отображает диапазон выходных значений.

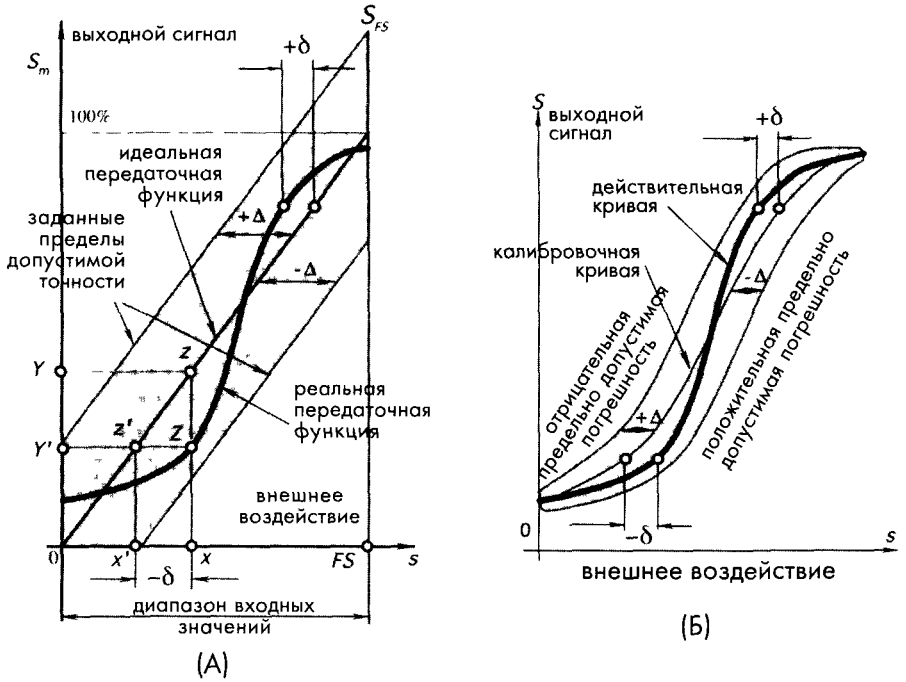


Рис. 2.2 Передаточная функция (А) и пределы допустимой погрешности (Б). Погрешности определены относительно входных значений.

2.4. Точность

Точность – очень важная характеристика любого датчика. Правда, когда говорят о точности датчика, чаще всего подразумевают его *неточность* или *погрешность измерений*. Под погрешностью измерений, как правило, понимают величину максимального расхождения между показаниями реального и идеального датчиков. Считается, что измеренное значение соответствует реальному с определенной степенью достоверности (см. раздел 2.20).

Погрешность датчика можно также представить в виде разности между значением, вычисленным по выходному сигналу датчика, и реальным значением поданного входного сигнала. Например, рассмотрим линейный датчик перемещений. В идеальном случае, если его чувствительность b равна 1 мВ/мм, при смещении объекта на 1 мм напряжение на выходе должно измениться на 1 мВ. Однако на практике при перемещении объекта на расстояние $s = 10$ мм выходное напряжение изменилось на 10.5 мВ, т.е. $S = 10.5$ мВ. Преобразовав это значение при помощи инверсной передаточной функции, получим, что при таком напряжении перемещение объекта должно быть равным $s_x = S/b = 10.5$ мм, т.е. на 0.5 мм больше действительного. Вот эти 0.5 мм и являются погрешностью измерений. Следовательно, можно утверждать, что в пределах 10-мм диапазона абсолютная погрешность измерений данного датчика составляет 0.5 мм, а в относительных

единицах она равна: (0.5 мм/10 мм)×100% = 5%. Если при отсутствии случайных ошибок каждый раз при повторении этого эксперимента будет наблюдаться погрешность, равная 0.5 мм, говорят, что датчик в диапазоне 10 мм имеет *систематическую погрешность*, равную 0.5 мм. Но, как правило, случайные ошибки всегда присутствуют, поэтому на практике систематическая погрешность чаще всего представляется в виде среднего значения из множества экспериментальных значений.

На рис. 2.2А показана идеальная или теоретическая передаточная функция. В реальной жизни любой датчик обладает теми или иными недостатками. Толстой линией на рисунке выделена одна из реальных передаточных функций, которые не обязательно являются линейными и монотонными. Реальная функция почти никогда не совпадает с идеальной. Даже когда датчики изготавливаются в идентичных условиях, из-за разницы в материалах, в мастерстве работников, ошибок разработчиков, производственных допусков и т.п., их передаточные функции всегда будут различаться друг от друга. Однако все они не должны выходить за пределы определенной зоны, лежащей в границах предельно допустимых погрешностей, которые находятся от линии идеальной передаточной функции на расстоянии $\pm\Delta$. Следовательно, разница между реальной и идеальной передаточной функцией δ всегда должна быть меньше или равна Δ. Для примера рассмотрим ситуацию, когда входной сигнал датчика равен x (рис. 2.2А). В идеальном случае при этом выходной сигнал должен быть равен Y, что соответствует точке z на передаточной функции. Вместо этого по реальной функции при значении x мы попадем в точку Z, и, следовательно, получим выходной сигнал, равный Y', соответствующий точке z' на идеальной передаточной функции, которой, в свою очередь, должен соответствовать входной сигнал x'. Поскольку $x' < x$, погрешность измерений в данном случае будет равна $-\delta$.

На точность датчиков влияют такие характеристики как: гистерезис, мертвая зона, параметры калибровки, повторяемость датчиков от партии к партии и воспроизводимость погрешностей, которые будут рассмотрены в следующих разделах. Предельно допустимые погрешности обычно соответствуют самым худшим рабочим характеристикам датчиков. Из рис. 2.2Б видно, что при более корректном проведении калибровки (например, при проведении калибровки на большем количестве точек), калибровочная кривая проходит ближе к реальным передаточным функциям, что означает повышение точности измерений. На практике пределы допустимых погрешностей устанавливаются не вокруг идеальной передаточной функции, а относительно калибровочной кривой. Допустимые пределы становятся меньше, если они не включают в себя погрешности, связанные с различиями датчиков от партии к партии, а также когда они относятся только к одному специально откалиброванному датчику. Все это повышает точность измерении, однако значительно повышает стоимость, из-за чего во многих ситуациях эти методы не могут быть применены.

Погрешность датчиков может быть представлена в следующих видах:

1. Непосредственно в единицах измеряемой величины (Δ),
2. В процентах от значения максимального входного сигнала,
3. В единицах выходного сигнала.

Например, погрешность пьезорезистивного датчика давления с диапазоном входных сигналов 100 кПа и диапазоном выходных сигналов 10 Ом можно определить следующим образом: ±0.5%, ±500 Па или ±0.05 Ом.

В современных датчиках точность часто характеризуется величиной *статистической ошибки измерений* (см. раздел 2.20), учитывающей влияние как систематических, так и случайных погрешностей, и не зависящих от ошибок, допущенных при определении передаточных функций.

2.5. Калибровка

Если производственные допуски на датчик и допуски на интерфейс (схемы преобразования сигналов) превышают требуемую точность системы, всегда необходимо проводить калибровку. Например, требуется измерить температуру с точностью ±0.5°C датчиком, по справочным данным обладающим погрешностью ±1°C. Это можно сделать только после проведения калибровки конкретного датчика, что необходимо для нахождения его индивидуальной передаточной функции, а также после проведения полной калибровки системы. В процессе проведения полной калибровки определяются коэффициенты, описывающие передаточную функцию всей системы в целом, включая датчик, интерфейсное устройство и АЦП. Математическое описание передаточной функции необходимо знать до начала проведения калибровки. Если выражение для передаточная функции является линейным (уравнение (2.1)), в процессе калибровки необходимо определить коэффициенты a и b, если экспоненциальным (уравнение (2.3)) – то коэффициенты a и κ и т.д. Рассмотрим простой пример линейной передаточной функции. Поскольку для нахождения коэффициентов, описывающих прямую линию, необходимо иметь два уравнения, придется проводить калибровку, как минимум, в двух точках. Для примера возьмем полупроводниковый датчик температуры, построенный на основе прямосмещенного p-n перехода. С высокой степенью точности можно утверждать, что его передаточная функция (температура – входной сигнал, напряжение – выходной) является линейной и описывается уравнением:

$$v = a + bt. \tag{2.10}$$

Для определения констант a и b датчик необходимо поместить в две среды: одну с температурой t_1, другую с температурой t_2, и измерить значения двух соответствующих напряжений: v_1 и v_2. После чего надо подставить эти величины в выражение (2.10):

$$v_1 = a + bt_1,$$

$$v_2 = a + bt_2, \tag{2.11}$$

и найти значения констант:

$$b = \frac{v_1 - v_2}{t_1 - t_2}, \quad a = v_1 - bt_1. \tag{2.12}$$

Для получения температуры из выходного напряжения, значение измеренного напряжения необходимо подставить в инверсное выражение передаточной функции:

$$t = \frac{v - a}{b} . \qquad (2.13)$$

В некоторых случаях одна из констант может быть заранее определена с достаточной степенью точности, тогда нет необходимости проведения калибровки в двух точках. Для того же самого датчика температуры с p-n переходом наклон передаточной функции b для определенного типа полупроводников обычно является хорошо воспроизводимой величиной. Тогда, если известно значение b для выбранного типа диода, например, b = -0.002268 В/°С, достаточно провести калибровку только в одной точке для нахождения коэффициента a: $a = v_1 + 0.002268\ t_1$.

Для нелинейных функций калибровку требуется проводить более чем в двух точках. Количество необходимых калибровок диктуется видом математического выражения. Если передаточная функция моделируется полиноминальной зависимостью, число калибровочных точек выбирается в зависимости от требуемой точности. Поскольку, как правило, процесс калибровки занимает довольно много времени, для снижения стоимости изготовления датчиков на производстве количество калибровочных точек задается минимальным.

Применение кусочно-линейной аппроксимации является другим подходом к калибровке нелинейных датчиков. Как упоминалось выше, любую кривую в пределах достаточно небольшого интервала можно заменить линейной функцией, описываемой уравнением (2.1). Поэтому нелинейную передаточную функцию можно представить в виде комбинации линейных отрезков, каждый из которых обладает своими собственными коэффициентами a и b. Во время измерений сначала необходимо определить на каком отрезке аппроксимационной функции находится полученное напряжение S, после чего выбрать соответствующие коэффициенты a и b и вычислить значение внешнего воздействия по уравнению, аналогичному (2.13).

Для проведения калибровки датчиков важно иметь точные физические эталоны, позволяющие моделировать соответствующие внешние воздействия. Например, при калибровке контактного датчика температуры его необходимо помещать либо в резервуар с водой, либо в «сухой колодец», в которых есть возможность точно регулировать температуру. При калибровке инфракрасных датчиков требуется наличие черного тела, а для калибровки гигрометров – набор насыщенных растворов солей, используемых для поддержания постоянной относительной влажности в закрытом контейнере и т.д. Отсюда ясно видно, что точность последующих измерений напрямую связана с точностью проведения калибровки. В разделе 2.20 будет показано, что ошибка калибровочных эталонов должна включаться в полную ошибку измерений.

2.6. Ошибка калибровки

Ошибка калибровки – это погрешность, допущенная производителем при проведении калибровки датчика на заводе. Эта погрешность носит систематический характер, и, значит, добавляется ко всем реальным передаточным функциям. Ошибка

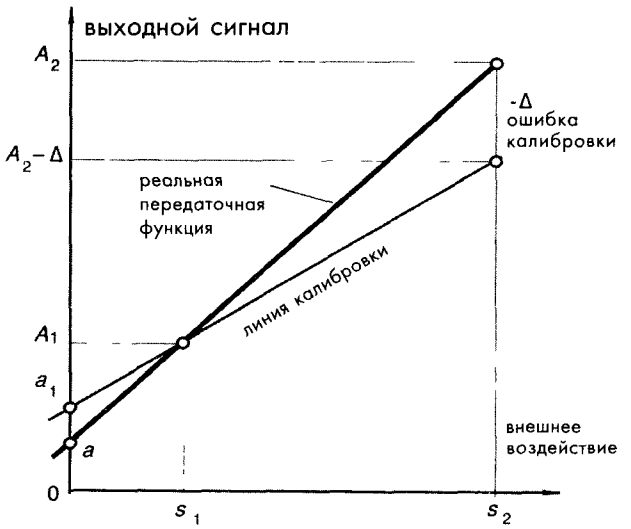


Рис. 2.3 Ошибка калибровки

калибровки сдвигает характеристику преобразования датчика в каждой точке на определенную величину. Она необязательно должна быть равномерной во всем диапазоне измерений и может зависеть от типа ошибки, допущенной в процессе калибровки. Для примера рассмотрим калибровку в двух точках реальной передаточной функции, показанной толстой линией на рис. 2.3. Для определения наклона и начального сдвига функции на датчик подадим последовательно два внешних воздействия s_1 и s_2 и зарегистрируем два соответствующих выходных сигнала A_1 и A_2. Первый сигнал был измерен абсолютно точно, однако, при определении второго сигнала была допущена погрешность – Δ, что привело к ошибкам при определении коэффициентов a и b. Полученное значение начального сдвига a_1 будет отличаться от реального значения a на величину:

$$\delta_a = a_1 - a = \frac{\Delta}{s_2 - s_1} \tag{2.14}$$

а наклон будет определен с ошибкой:

$$\delta_b = -\frac{\Delta}{s_2 - s_1}. \tag{2.15}$$

2.7. Гистерезис

Гистерезис – это разность значений выходного сигнала для одного и того же входного сигнала, полученных при его возрастании и убывании (рис. 2.4). Например, пусть показания датчика перемещений при движении объекта слева направо отличаются на 20 мВ от его показаний при движении объекта в той же самой точке

справа налево. Если чувствительность датчика составляет 10 мВ/мм, ошибка гистерезиса в единицах перемещения будет равна 2 мм. Типичной причиной возникновения гистерезиса является трение и структурные изменения материалов.

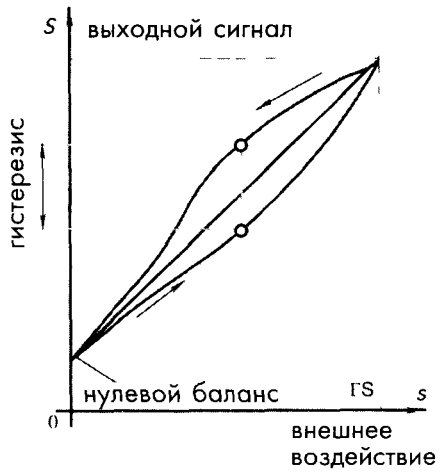


Рис. 2.4 Передаточная функция с гистерезисом

2.8. Нелинейность

Нелинейность определяется для датчиков, передаточную функцию которых возможно аппроксимировать прямой линией (уравнение (2.1)). Под нелинейностью понимается максимальное отклонение L реальной передаточной функции от аппроксимирующей прямой линии. Под термином «линейность» на самом деле понимается «нелинейность». При проведении нескольких циклов калибровки выбирается худшее из полученных значений нелинейности. Нелинейность обычно выражается либо в процентах от максимального входного сигнала, либо в единицах измеряемых величин (например, в кПа или °С). В зависимости от способа проведения аппроксимирующей линии различают несколько типов линеаризации. Один из способов – проведение прямой через *конечные* точки передаточной функции (рис. 2.5А). Для этого сначала определяются выходные значения, соответствующие наибольшему и наименьшему внешним воздействиям, а потом через эти точки проводится прямая линия (линия 1). При такой линеаризации ошибка нелинейности минимальна в конечных точках и максимальна где-то в промежутке между ними.

Другой способ линеаризации основан на применении *метода наименьших квадратов* (линия 2 на рис. 2.5А). Для этого в широком диапазоне измеряемых величин (лучше в полном диапазоне) для ряда значений (n) внешних воздействий s измеряются выходные сигналы S. После чего, применяя формулу линейной регрессии, определяют значения коэффициентов a и b:

$$a = \frac{\Sigma S \Sigma s^2 - \Sigma s \Sigma s S}{n\Sigma s^2 - (\Sigma s)^2}, \quad b = \frac{n\Sigma s S - \Sigma s \Sigma S}{n\Sigma s^2 - (\Sigma s)^2}, \tag{2.16}$$

где Σ – это сумма n чисел.

На практике, в некоторых случаях, может потребоваться большая точность линеаризации в узком диапазоне входных сигналов. Например, медицинские термометры должны обладать повышенной точностью в диапазоне 37°С...38°С. Вне этой зоны точность может быть несколько ниже. В этом случае калибровку проводят в узкой области, где требуется повышенная точность, после чего через калибровочную точку c проводится аппроксимирующая линия (линия 3 на рис. 2.5А).

В результате такой процедуры наименьшее значение нелинейности достигается в зоне калибровочной точки, а ближе к концам диапазона измерения линейность значительно ухудшается. Как видно из рисунка, в данном методе аппроксимирующая линия часто является касательной к передаточной функции в точке калибровки *c*. Если известно выражение для реальной передаточной функции, наклон этой линии может быть найден по уравнению (2.5).

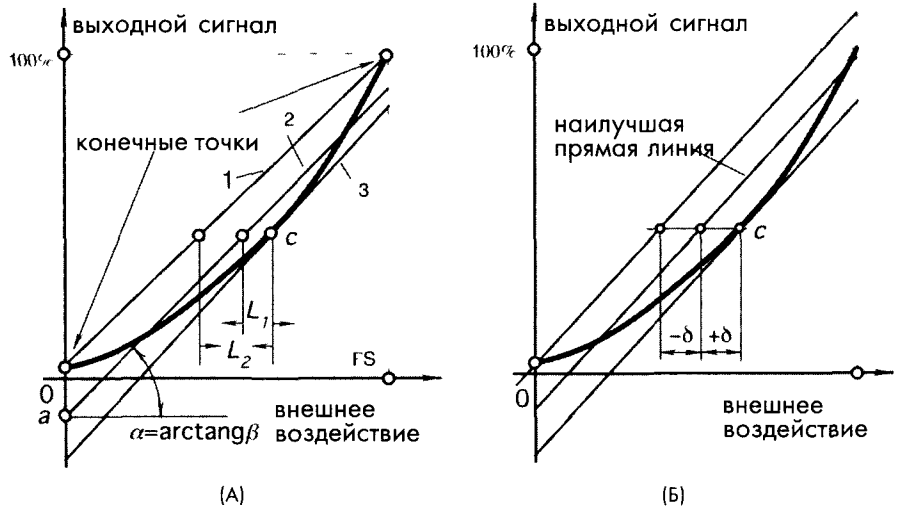


Рис. 2.5 Линейная аппроксимация нелинейной передаточной функции (А) и независимая линеаризация (Б)

Метод *независимой линеаризации* часто называется «методом наилучшей прямой» (рис. 2.5Б). Он заключается в нахождении линии, проходящей посередине между двумя параллельными прямыми, расположенными, как можно, ближе друг к другу и охватывающими все выходные значения реальной передаточной функции.

В зависимости от метода линеаризации аппроксимирующие линии будут иметь разные коэффициенты *a* и *b*. Следовательно, значения нелинейности, полученные разными способами, могут серьезно различаться друг от друга.

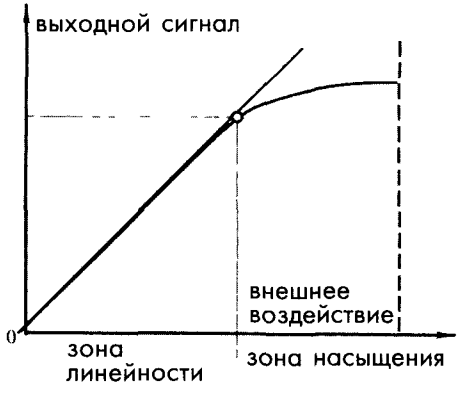


Рис. 2.6 Передаточная функция с насыщением

2.9. Насыщение

Каждый датчик имеет свой пределы рабочих характеристик. Даже если он счи-

тается линейным, при определенном уровне внешнего воздействия его выходной сигнал перестанет отвечать приведенной линейной зависимости. В этом случае говорят, что датчик вошел в зону нелинейности или в зону насыщения (рис. 2.6)

2.10. Воспроизводимость

Воспроизводимость - это способность датчика при соблюдении одинаковых условий выдавать идентичные результаты. Воспроизводимость результатов определяется по максимальной разности выходных значений датчика, полученных в двух циклах калибровки (рис. 2.7А). Обычно она выражается в процентах от максимального значения входного сигнала (FS):

$$\delta_r = \frac{\Delta}{FS} \times 100\%. \qquad (2.17)$$

Причинами плохой воспроизводимости результатов часто являются: тепловой шум, поверхностные заряды, пластичность материалов и т.д.

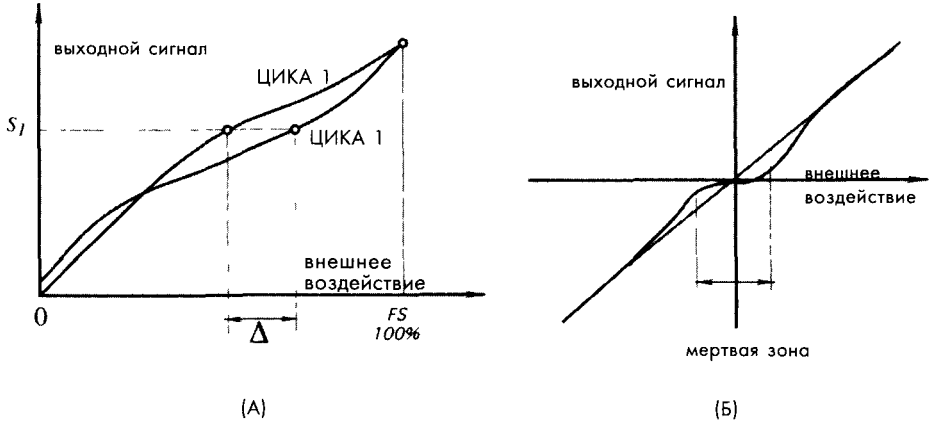


Рис. 2.7 А - ошибка воспроизводимости: одному и тому же выходному сигналу соответствуют разные внешние воздействия. Б – мертвая зона на передаточной функции

2.11. Мертвая зона

Мертвая зона – это нечувствительность датчика в определенном диапазоне входных сигналов (рис. 2.7Б). В пределах этой зоны выходной сигнал остается почти постоянным (часто равным нулю).

2.12. Разрешающая способность

Разрешающая способность характеризует минимальное изменение измеряемой величины, которое может почувствовать датчик. При непрерывном изменении внешнего воздействия в пределах диапазона измеряемых значений выходные сигналы датчиков не будут всегда абсолютно гладкими, даже при отсутствии шумов. На них всегда будут видны небольшие ступеньки. Особенно отчетливо это видно в потенциометрических датчиках, инфракрасных датчиках контроля территории с сетчатой маской и других устройствах, в которых выходные сигналы меняются только при определенных изменениях внешних воздействий. В дополнение к этому при преобразовании любого сигнала в цифровой код происходит его разбивка на маленькие ступеньки, каждой из которых приписывается конкретное значение. Величина изменения входного сигнала, приводящая к появлению минимальной ступеньки на выходном сигнале датчика при определенных условиях, называется его разрешающей способностью. Например, для инфракрасного датчика контроля территории можно дать следующее определение разрешающей способности: «разрешающая способность – возможность обнаружения объекта на расстоянии 5 м при его перемещении на 20 см». Для проволочного потенциометрического датчика, используемого для измерения углов, разрешающая способность – это минимальный угол, равный, допустим, 0.5°. Иногда разрешающая способность определяется в процентах от полной шкалы FS (максимального значения входного сигнала). Например, для датчика измерения углов, у которого полный диапазон измеряемых значений равен 270°, разрешающую способность 0.5° можно представить как 0.181% от FS. Следует отметить, что размер ступени может меняться внутри диапазона измеряемых значений, поэтому, как правило, разрешающая способность определяется либо как средняя, либо как наихудшая величина. Разрешающая способность датчиков с цифровыми выходными сигналами часто задается числом бит слова данных. Например, в описании может быть информация, что разрешение датчика равно 8 бит. Отсюда можно получить либо полный диапазон входных сигналов, либо оценить величину младшего значащего разряда (МЗР). Если на выходном сигнале не удается определить различимых ступеней, говорят, что датчик обладает *бесконечно большим* разрешением. Термин «бесконечное разрешение» является ошибочным.

2.13. Специальные характеристики

Для некоторых датчиков необходимо указывать *специальные характеристики входных сигналов*. Например, для детекторов освещенности такой характеристикой является его чувствительность в пределах ограниченной оптической полосы. Следовательно, для таких датчиков необходимо определять спектральные характеристики.

2.14. Выходной импеданс

Выходной импеданс $Z_{вых}$ является характеристикой, указывающей насколько легко датчик согласовывается с электронной схемой. Сопротивление, соответствующее выходному импедансу датчика, подключаются параллельно сопротивлению, характеризу-

ющему входной импеданс электронной схемы Z_{in}, (потенциальное соединение) или последовательно с ним (токовое соединение). Оба варианта соединений показаны на рис. 2.8. Обычно входные и выходные импедансы представляются в комплексном виде, поскольку они, как правило, включают в себя активные и реактивные компоненты. Для минимизации искажений выходного сигнала датчик с токовым выходом (рис. 2.8Б) должен иметь максимально возможный выходной импеданс, а его интерфейсная схема – минимальный входной импеданс. В случае потенциального соединения (рис. 2.8А) датчику следует иметь низкий выходной импеданс, а интерфейсной схеме – высокий входной.

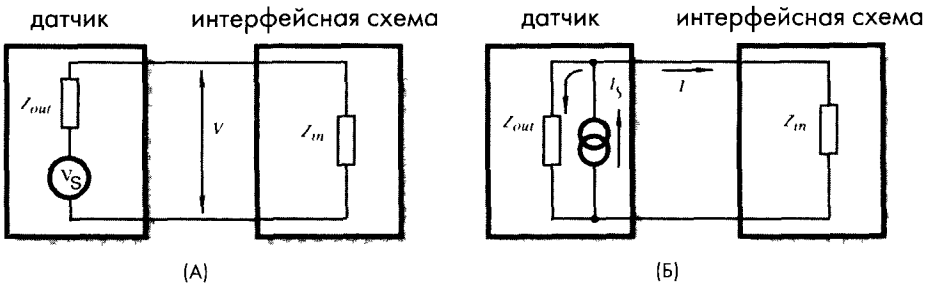


Рис. 2.8 Соединение датчика с интерфейсной схемой А – датчик с выходным сигналом в виде напряжения, Б – датчик с токовым выходом

2.15. Сигнал возбуждения

Сигнал возбуждения – это электрический сигнал, необходимый активному датчику для работы. Сигнал возбуждения описывается интервалом напряжений и/или тока. Для некоторых типов датчиков также необходимо указывать частоту сигнала возбуждения и его стабильность. Выход сигнала возбуждения за приведенные пределы может привести к изменению передаточной функции датчика, и, следовательно, к искажению выходного сигнала. Приведем пример описания сигнала возбуждения:

Максимальный ток, протекающий через термистор:

В воздухе без возмущений: ..... 50 мкА,
В воде: ..... 200 мкА.

2.16. Динамические характеристики

В стационарных условиях датчик полностью описывается своей передаточной функцией, диапазоном измеряемых значений, калибровочными коэффициентами и т.д. Однако на практике выходной сигнал датчика не всегда достаточно точно отслеживает изменение внешнего сигнала. Причины этого заключаются как в самом датчике, так и в его соединении с источником внешних воздействий, не позволяющем сигналам распространяться с бесконечно большой скоростью Другими словами можно сказать, что любой датчик обладает параметрами, зависящими от времени,

называемыми *динамическими характеристиками*. Если датчик имеет ограниченное быстродействие, он может регистрировать значения внешних воздействий, отличающиеся от реальных. Это означает, что датчик работает с *динамической погрешностью*. Отличие между статическими и динамическими погрешностями заключается в том, что последние всегда зависят от времени. Если датчик входит в состав измерительного комплекса, обладающего определенными динамическими характеристиками, внесение дополнительных динамических погрешностей может привести, в лучшем случае, к задержке отображения реального значения внешнего воздействия, а, в худшем случае, - к возникновению колебаний.

Время разогрева – это время между подачей на датчик электрического напряжения или сигнала возбуждения и моментом, когда датчик начинает работать, обеспечивая требуемую точность измерений. Многие датчики обладают несущественным временем разогрева. Однако некоторые детекторы, особенно работающие в устройствах с контролируемой температурой (термостатах), для своего разогрева требуют секунды, а то и минуты.

В теории автоматического управления (ТАУ) принято описывать взаимосвязь между входами и выходами устройства в виде линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Очевидно, что при решении таких уравнений можно определить динамические характеристики устройства. В зависимости от конструкций датчиков, уравнения, описывающие их, могут иметь разный порядок.

Датчики нулевого порядка, имеющие линейную передаточную функцию (уравнение (2.1)), можно описать следующими зависимостями от времени *t*:

$$S(t) = a + bs\ (t). \tag{2.18}$$

Коэффициент *a* называется смещением, а *b* – статической чувствительностью. Из вида уравнения видно, что оно описывает датчики в состав которых не входят энергонакопительные элементы, такие как конденсаторы или массы. Датчики нулевого порядка относятся к устройствам мгновенного действия. Иными словами, у таких датчиков нет необходимости определять динамические характеристики.

Дифференциальные уравнения *первого порядка* описывают поведение датчиков, в состав которых входит один энергонакопительный элемент. Такие уравнения имеют вид:

$$b_1 \frac{dS(t)}{dt} + b_0 S(t) = s(t). \tag{2.19}$$

Типичный пример датчика первого порядка – датчик температуры, в котором роль энергонакопительного элемента играет теплоемкость. Для описания датчиков первого порядка существует несколько способов. Но производители датчиков для этого чаще всего используют *частотные характеристики*, показывающие насколько быстро датчик может среагировать на изменение внешнего воздействия. Для отображения относительного уменьшения выходного сигнала при увеличении частоты применяется амплитудно-частотная характеристика, показанная на рис. 2.9А. Для описания динамических характеристик датчиков часто используется граничная частота, соответствующая 3- дБ снижению выходного сигнала, показывающая на какой частоте происходит 30% уменьшение выходного напряжения или тока.

Эта граничная частота f_u, часто называемая верхней частотой среза, считается предельной частотой работы датчика.

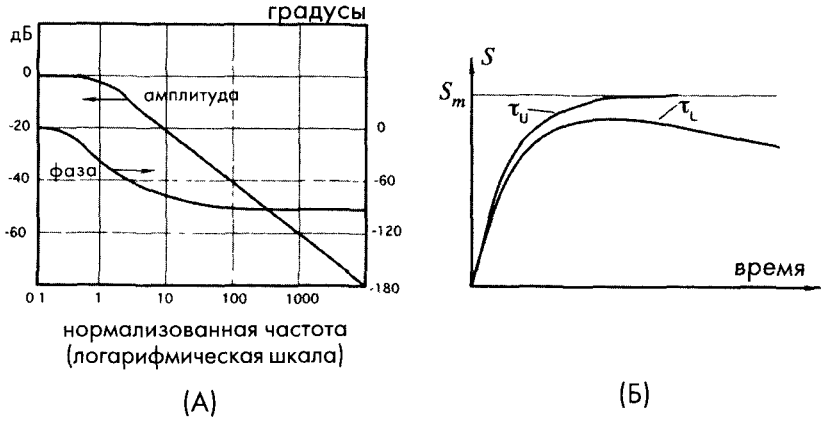


Рис. 2.9 Частотные характеристики: А – частотная характеристика датчика первого порядка, Б – частотная характеристика датчика с ограничениями по верхней и нижней частоте среза, где τ_u и τ_L – соответствующие постоянные времени

Частотные характеристики напрямую связаны с *быстродействием* датчика, выражаемого в единицах внешнего воздействия на единицу времени. Какие характеристики: АЧХ или быстродействие, используются для описания датчика, зависит от его типа, области применения и предпочтений разработчика.

Другой способ описания быстродействия заключается в определении времени, требуемого для достижения выходным сигналом датчика уровня 90% от стационарного или максимального значения при подаче на его вход ступенчатого внешнего воздействия. Для датчиков первого порядка очень удобно использовать параметр, называемый *постоянной времени*. Постоянная времени τ является мерой инерционности датчика. В терминах электрических величин она равна произведению емкости на сопротивление: $\tau = CR$. В тепловых терминах под C и R понимаются теплоемкость и тепловое сопротивление. Как правило, постоянная времени довольно легко измеряется. Временная зависимость системы первого порядка имеет вид:

$$S = S_m(1 - e^{-t/\tau}), \tag{2.20}$$

где S_m – установившееся значение выходного сигнала, t – время, а e – основание натурального логарифма. Заменяя t на τ, получаем:

$$\frac{S}{S_m} = 1 - \frac{1}{e} = 0.6321. \tag{2.21}$$

Другими словами можно сказать, что по истечении времени, равного постоянной времени, выходной сигнал датчика достигает уровня, составляющего приблизительно

63% от установившегося значения. Аналогично можно показать, что по истечении времени, равного двум постоянным времени, уровень выходного сигнала составит 86.5%, а после трех постоянных времени – 95%.

Частота среза характеризует наименьшую или наибольшую частоту внешних воздействий, которую датчик может воспринять без искажений. Верхняя частота среза показывает насколько быстро датчик реагирует на внешнее воздействие, а нижняя частота среза – с каким самым медленным сигналом он может работать. На рис.2.9Б показана характеристика датчика, который имеет ограничения как по верхней, так и по нижней частоте среза. На практике для установления связи между постоянной времени датчика первого порядка и его частотой среза f_c, как верхней так и нижней, используют простую формулу:

$$f_c \approx \frac{0.159}{\tau}. \qquad (2.22)$$

Фазовый сдвиг на определенной частоте показывает насколько выходной сигнал отстает от внешнего воздействия (рис. 2.9А). Сдвиг измеряется либо в градусах, либо в радианах и обычно указывается для датчиков, работающих с периодическими сигналами. Если датчик входит в состав измерительной системы с обратными связями, всегда необходимо знать его фазовые характеристики. Фазовый сдвиг датчика может снизить запас по фазе всей системы в целом и привести к возникновению нестабильности.

Дифференциальные уравнения второго порядка описывают поведение датчиков с двумя энергонакопительными элементами:

$$b_2 \frac{d^2 S(t)}{dt^2} + b_1 \frac{dS(t)}{dt} + b_0 S(t) = s(t). \qquad (2.23)$$

Примером датчика второго порядка является акселерометр, в состав которого входит масса и пружина.

На выходах датчиков второго порядка после подачи на их входы ступенчатого воздействия практически всегда появляются колебания. Эти колебания могут быть очень кратковременными, тогда говорят, что датчик демпфирован, или они могут длиться продолжительное время, а то и постоянно. Продолжительные колебания на выходе датчика являются свидетельством его неправильной работы, поэтому их надо стараться избегать. Любой датчик второго порядка характеризуется *резонансной (собственной) частотой,* которая выражается в герцах или радианах в секунду. На собственной частоте происходит значительное увеличение выходного сигнала датчика. Обычно производители указывают значение собственной частоты датчика и его коэффициент затухания (демпфирования). От резонансной частоты зависят механические, тепловые и электрические свойства детекторов. Обычно рабочий частотный диапазон датчиков выбирается либо значительно ниже собственной частоты (по крайней мере на 60%), либо выше ее. Однако для некоторых типов датчиков резонансная частота является рабочей. Например, детекторы разрушения стекла, используемые в охранных системах, настраиваются на узкую полосу частот в зоне частоты резонанса, характерную для акустического спектра, производимого разбивающимся стеклом.

Демпфирование – это значительное снижение или подавление колебаний в датчиках второго и более высоких порядков. Когда выходной сигнал устанавливается достаточно быстро и не выходит за пределы стационарного значения, говорят, что система обладает критическим затуханием, а ее коэффициент демпфирования равен 1 (рис. 2.10). Когда коэффициент затухания меньше 1, и выходной сигнал превышает установившееся значение, говорят, что система недодемфирована. А когда коэффициент затухания больше 1, и сигнал устанавливается гораздо медленнее, чем в системе с критическим затуханием, говорят, что система передемпфирована.

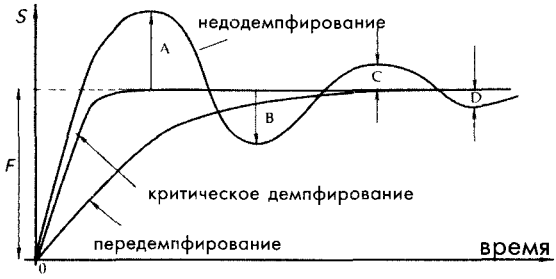


Рис. 2.10 Виды выходных сигналов в датчиках с разным коэффициентом демпфирования

Для колебательного выходного сигнала, показанного на рис. 2.10, *коэффициент затухания или демпфирования* определяется абсолютным значением отношения большей амплитуды к меньшей пары последовательно взятых полуволн колебаний относительно установившегося значения, т.е. можно записать:

$$\textit{коэффициент демпфирования} = \frac{F}{A} = \frac{A}{B} = \frac{B}{C} = \ldots \qquad (2.24)$$

На рис. 2.11 приведены возможные варианты выходных сигналов датчиков в ответ на ступенчатое внешнее воздействие.

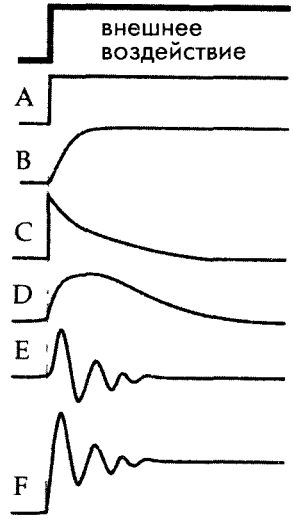


Рис. 2.11 Варианты выходных сигналов: A – бесконечные верхняя и нижние частоты, B– система первого порядка с ограниченной верхней частотой среза, C – система первого порядка с ограниченной нижней частотой среза, D – система первого порядка с ограниченными верхней и нижней частотами среза, E – система с узкой полосой частот (резонансная система), F – широкополосная система с резонансом.

2.17. Факторы окружающей среды

Условия хранения – совокупность предельных значений факторов окружающей среды, воздействующих на датчик в течение определенного промежутка времени, при которых не происходит существенного изменения его рабочих характеристик и обеспечивается поддержание его работоспособности. Обычно условия хранения устанавливают: максимальную и минимальную температуры хранения, а также максимальную относительную влажность при этих температурах. К значению относительной влажности необходимо добавить такую характеристику, как «отсутствие конденсата». В зависимости от физической природы датчика могут указываться дополнительные условия хранения, например, максимальное давление, присутствие некоторых газов или отсутствие вредных испарений.

Краткосрочная и долгосрочная стабильность (дрейф) – характеристики точности датчиков. Краткосрочная стабильность описывает изменения рабочих характеристик датчика в течении минут, часов и даже дней. Выходной сигнал датчика может увеличиваться или уменьшаться, что может быть выражено через величину шума сверхнизкой частоты. Долгосрочная стабильность зависит от процессов *старения*, которые изменяют электрические, механические, химические и термические свойства материалов датчика. Долгосрочный дрейф параметров может измеряться достаточно длительными интервалами времени: месяцами и годами. Долгосрочная стабильность является очень важной характеристикой для датчиков, используемых для прецизионных измерений. Скорость старения определяется условиями хранения и эксплуатации, а также тем, насколько хорошо элементы датчиков изолированы от окружающей среды, и какие материалы использовались для их изготовления. Интенсивное старение типично для датчиков, в состав которых входят органические компоненты, и не столь существенно для датчиков из неорганических элементов. Например, металоксидные термисторы в стеклянных корпусах обладают лучшей долговременной стабильностью, чем такие же термисторы, покрытые эпоксидной смолой. Для повышения долговременной стабильности элементы датчиков подвергают термоцикличной подготовке, моделирующей экстремальные условия работы. Например, датчик может периодически перемещаться из среды с температурой замерзания в среду с очень высокой температурой. Такая термоцикличная подготовка повышает стабильность характеристик датчиков, позволяет обнаружить скрытые дефекты и произвести отбраковку негодных устройств. Например, стабильность термисторов с эпоксидным покрытием значительно повышается, если перед калибровкой и установкой в прибор они в течение месяца выдерживались при температуре +150°C.

В перечень условий окружающей среды, воздействующих на датчики, практически никогда не входят физические параметры, измеряемые датчиками. Например, для датчика, определяющего давление воздуха, учитываются следующие факторы окружающей среды: температура воздуха и рядом расположенных объектов, влажность, вибрации, ионизирующая радиация, электромагнитные поля, гравитационные силы и т.п. Все эти параметры не только могут, но и влияют на рабочие характеристики датчика. При этом необходимо учитывать, как динамические, так и статические составляющие этих факторов. Многие из параметров окружающей среды имеют мультипликативную

природу, т.е. они влияют на передаточную функцию датчика, например, меняют его коэффициент усиления. Одним из подтверждений этого эффекта является поведение резистивного датчика напряжений, чувствительность которого увеличивается с ростом температуры.

Очень важным требованием для современных датчиков является обеспечение их стабильной работы в разнообразных условиях окружающей среды. Поэтому разработчики, а также экспериментаторы всегда должны учитывать все возможные внешние воздействия, способные повлиять на рабочие характеристики датчиков. Например, на выходе пьезоэлектрического акселерометра могут появляться паразитные сигналы из-за: резкого изменения окружающей температуры, электростатического разряда, образования электрических зарядов (эффект трибоэлектричества), вибрации соединительных проводов, электромагнитной интерференции (ЭМИ) и т. п. Даже если производитель датчика не указал эти факторы, экспериментатор должен проверить его поведение в конкретных условиях эксплуатации и в случае необходимости (при реальном ухудшении рабочих характеристик от влияния внешних факторов) принять соответствующие меры (см. четвертую главу), на пример поместить датчик в защитный корпус, использовать электрический экран, применить теплоизоляцию или термостат.

Температура окружающей среды влияет на рабочие характеристики датчиков, поэтому всегда должна приниматься во внимание. Рабочий диапазон температур – это интервал окружающих температур, задаваемых верхним и нижним предельными значениями (например, -20...+100°С), внутри которого датчик работает с заданной точностью. Передаточные функции многих датчиков сильно зависят от окружающей температуры. Для снижения температурных погрешностей в состав самих датчиков или в схемы преобразователей сигналов часто встраиваются специальные компенсационные элементы. Самый простой способ определения допусков по температуре заключается в установлении интервалов внутри рабочего диапазона температур, для каждого из которых указывается индивидуальная погрешность. Например, в паспортных данных может быть указано, что в интервале температур 0...50°С точность датчика составляет 1%, в интервалах -20...0°С и +50...100°С – 2%, в остальных интервалах в пределах диапазона измеряемых температур (-40...+150°С) –3%. Температура окружающей среды также влияет на динамические характеристики, особенно в случаях, когда применяется вязкостное демпфирование. Сравнительно быстрые изменения температур могут привести к появлению паразитных сигналов на выходах датчиков. Например, пироэлектрический чувствительный элемент, используемый в детекторах движения, практически не реагирует на медленное изменение окружающей температуры. Однако при быстром скачке температуры на его выходе может появиться электрический сигнал (ток), распознаваемый электронными цепями как отклик на внешнее воздействие, что приводит к ошибкам детектирования.

Погрешность саморазогрева появляется в датчиках, нагревающихся от сигнала возбуждения настолько, что это начинает влиять на его точностные характеристики. Например, через термисторный датчик температуры необходимо пропускать электрический ток, что приводит к рассеянию тепла внутри его конструкции. При этом степень саморазогрева датчика зависит от его конструкционных особенностей и от условий окружающей среды: либо это сухой воздух, либо жидкость и т.д.

Саморазогрев датчика приводит к появлению ошибок при измерении температуры, поскольку термистор начинает работать как источник дополнительной тепловой энергии. Самый сильный разогрев датчиков наблюдается в среде стоячего воздуха. Для термисторов производители часто указывают погрешность саморазогрева при работе в воздухе, стоячей жидкости и других средах.

Увеличение температуры датчика относительно температуры окружающей среды можно найти при помощи формулы:

$$\Delta T^{\circ} = \frac{V^2}{(\xi v c + \alpha)R}, \qquad (2.25)$$

где ξ - плотность массы датчика, c – удельная теплоемкость, v – объем датчика, α - коэффициент теплопроводности (описывающий взаимосвязь датчика с внешней средой), R – электрическое сопротивление, V – эффективное напряжение на сопротивлении. Это выражение часто используется разработчиками для оценки погрешности от саморазогрева. Из выражения (2.25) видно, что для увеличения коэффициента α необходимо обеспечивать плотный контакт датчика с объектом измерения при одновременном увеличении площади контакта, для чего можно применять теплопроводные смазочные и адгезионные вещества. С целью уменьшения погрешности саморазогрева предпочтительнее использовать высокорезистивные датчики и датчики с низким рабочим напряжением.

2.18. Надежность

Надежность – это способность датчика выполнять требуемые функции при соблюдении определенных условий в течение заданного промежутка времени. Если использовать статистические термины, можно дать следующее определение: надежность – это вероятность того, что устройство будет функционировать без *поломок* в течение указанного интервала времени или заданного количества циклов. Следует отметить, что *надежность* не является характеристикой дрейфа или шума. Она отражает время до выхода устройства из строя (*отказа*), либо временного, либо постоянного при соблюдении регламентированных условий эксплуатации.

Несмотря на то, что надежность является очень важной характеристикой, она редко указывается производителями датчиков. Возможно, причина этого заключается в отсутствии общепринятых способов ее измерения. В США для многих электронных приборов в качестве способа определения эксплуатационной надежности применяется процедура вычисления среднего времени между отказами (СВМО), описанная в стандарте MIL-HDBK-217. Эта процедура основана на определении СВМО всего устройства после вычисления СВМО его отдельных элементов, при этом необходимо учитывать влияние внешних факторов: температуры, давления, механических напряжений, степени экранирования и т.д. К сожалению, процедура нахождения СВМО не позволяет оценить надежность напрямую, и такую характеристику трудно применять на практике. Поэтому часто для определения надежности датчиков их подвергают квалификационным испытаниям, которые проводятся в наихудших условиях. Напри-

мер, датчики заставляют непрерывно работать при максимальной рабочей температуре в течение 1000 часов (эта методика описана в стандарте MIL-STD-883). Но этот метод не учитывает ситуации резких изменений внешних условий, например, быстрого повышения температуры. Он имитирует работу датчика в модели реального окружения, но при этом стремится сжать годы в недели. Перед такими квалификационными испытаниями стоят три задачи: оценка СВМО, определение самого уязвимого места конструкции (места первой поломки) для последующего усовершенствования датчика и нахождение эксплуатационного срока жизни всей системы.

Другим возможным способом «ускоренного старения» является использование той же самой совокупности параметров, что и в реальных режимах эксплуатации, включая максимальную нагрузку и циклы включения/выключения, но проверку системы проводить в расширенных диапазонах окружающих условий (по сравнению с регламентированными в паспортных данных). При этом допускается, чтобы рабочие характеристики датчиков выходили за пределы, указанные в их описаниях, но в нормальных условиях эксплуатации они должны возвращаться к требуемым значениям. Например, если в документации говорится, что датчик должен работать при температуре, не превышающей 50°С, и наибольшей относительной влажности 85% при максимальном рабочем напряжении +15 В, его следует тестировать в цикличном режиме при температуре 100°С, относительной влажности 99% и напряжении +18 В. Для оценки количества циклов (n) может применяться следующая эмпирическая формула, предложенная в Sandstrand Aerospace, (Rockford, IL) и Interpoint Corp. (Redmond, WA) [1]:

$$n = N\left(\frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{test}}\right)^{2.5}, \qquad (2.26)$$

где N – приблизительное количество циклов за весь эксплуатационный период, ΔT_{max} – максимально возможная флуктуация температуры, а ΔT_{test} - максимальная флуктуация температуры, зафиксированная во время тестирования. Например, пусть нормальная рабочая температура датчика равна 25°С, максимальная рабочая температура, указанная в описании, составляет 50°С, тестирование проводилось при температуре 100°С. Также было оценено, что датчик за период своей эксплуатации (допустим, 10 лет) подвергается 20000 рабочим циклам, тогда количество тестовых циклов, определенное по формуле (2.26), составит:

$$n = 20000\left(\frac{50-25}{100-25}\right)^{2.5} = 1283.$$

Это значит, что для тестирования, моделирующего весь срок эксплуатации, проведенного при вышеуказанных условиях, потребуется 1300 циклов вместо 20000. Следует отметить, что коэффициент 2.5 получен для мест соединения припоем, поскольку именно эти элементы наиболее подвержены выходу из строя. Но некоторые датчики не имеют паянных соединений, а элементы других устройств обладают более высоким коэффициентом, чем 2.5 (например, соединения при помощи

электропроводных эпоксидных смол), поэтому на практике этот коэффициент может либо слегка снижаться, либо слегка увеличиваться. В результате тестирования на «ускоренное старение», надежность выражается через вероятность отказов. Например, если при проведении тестирования 100 датчиков два из них вышли из строя (при оцененном сроке службы 10 лет), можно утверждать, что надежность данного типа устройств составляет 98% в течение первых 10 лет их эксплуатации.

Датчик, в зависимости от области применения, может подвергаться воздействию и других факторов окружающей среды, которые потенциально могут менять его рабочие характеристики или помогать обнаруживать скрытые дефекты. Поэтому иногда применяются следующие виды дополнительных испытаний:

- Тестирование при высокой температуре и высокой влажности при максимальном напряжении питания. Например, датчик заставляют работать при максимально допустимой температуре и относительной влажности 85-90% в течение 500 часов. Такое тестирование является очень полезным для обнаружения загрязнений и оценки целостности корпусов устройств. Срок службы датчиков часто определяется по тесту ускоренного старения, проводимого при температуре 85°С и относительной влажности 85%. Такую проверку часто называют «тестированием 85-85».
- Для моделирования неблагоприятных условий окружающей среды при проверке надежности соединений: проводных, клеевых и т.п., датчики часто подвергаются воздействию механических ударов и вибрациям. Для получения высоких значений ускорений моделируется падение датчика. Часто требуется проводить такие испытания относительно разных осей устройства. Частота гармонических колебаний, прикладываемых к датчику при вибрационном тестировании, должна изменяться в интервале, включающем его собственную частоту. В США в оборонной промышленности при проведении механических тестов часто используются методы 2016 и 2056 стандарта 750.
- Для моделирования экстремальных условий хранения и перевозок датчик, как минимум, 1000 часов выдерживается либо при очень высоких (+100°С), либо при очень низких температурах (-40°С). Этот вид тестирования проводится, как правило, на неработающих устройствах. Выбор верхнего и нижнего температурных пределов должен проводится в соответствии с физической природой датчиков. Например, для пироэлектрических TGS датчиков фирмы Philips, характеризуемых точкой Кюри +60°С, эта температура никогда не должна превышать +50°С, что всегда должно быть четко указано на их корпусах.
- Для проверки поведения датчиков при экстремально изменяющихся внешних условиях их подвергают воздействию теплового шока или циклических температур. Например, устройство находится в течение 30 минут в среде с температурой -40°С, после чего быстро перемещается на 30 минут в среду с температурой +100°С и так много раз. Количество таких циклов, как правило, лежит в пределах 100...1000. Этот тест помогает обнаруживать дефекты разных типов соединений и проверяет целостность корпуса.
- Для моделирования условий морских перевозок датчики могут подвергаться воздействию соляных туманов в течение определенного интервала времени (например, 24 часов). Такое тестирование помогает определять устойчивость устройств к коррозии и обнаруживать дефекты корпусов.

2.19. Характеристики датчиков, диктуемые условиями их применения

Для возможности применения в различных областях важными становятся следующие характеристики датчиков: их *конструкция*, *вес* и *габариты*. Если для датчиков главными параметрами являются точность и надежность, такая характеристика, как *стоимость* отходит на второй план. Так если устройства предназначены для систем жизнеобеспечения, оборонных комплексов или космических кораблей, их высокая стоимость всегда оправдана предъявляемыми требованиями по точности и надежности. Однако существует ряд других областей применения датчиков, где их стоимость является основополагающей.

2.20. Статистическая оценка

В этом мире нет ничего совершенного. Все наши знания о материалах носят весьма приблизительный характер, и, на самом деле, они представляют собой не совсем то, что мы думаем о них. Все станки тоже весьма несовершенны и никогда не производят детали в точном соответствии с чертежами. У всех компонентов любых устройств существует дрейф характеристик, связанный с окружающими условиями и старением. Внешние помехи могут влиять на рабочие параметры систем и менять их выходные сигналы. Работники также неидеальны, и всегда присутствует человеческий фактор. Производители борются за однородность и согласованность технологических процессов, но, несмотря на это, ни один из производимых элементов не является совершенным и говорить о значениях их параметров можно только с некоторой степенью определенности. Любые измерительные комплексы состоят из множества компонентов, включая датчики. Поэтому вне зависимости от того, насколько точно проводились исследования, можно говорить лишь о приблизительной оценке значения реальной физической величины, являющейся объектом измерений (т.е. внешним воздействием). Результаты измерений могут рассматриваться законченными, только когда они сопровождаются статистической оценкой полученных данных, поскольку никогда не бывает 100% уверенности в точности определенных значений.

В зашумленных условиях показания датчика s' будут отличаться от реального значения внешнего сигнала s на величину ошибки измерения δ, которую можно выразить в следующем виде:

$$\delta = s' - s \,. \tag{2.27}$$

Необходимо всегда четко понимать разницу между *погрешностью* измерений, которую можно определить при помощи формулы (2.27), и *статистической ошибкой* результатов. Погрешность измерений можно до некоторой степени снизить за счет корректировки систематических составляющих. Но, несмотря на достигнутую малую величину погрешности, статистическая ошибка при этом может быть очень высокой. В таком случае мы не можем считать результаты измерений достоверными. Другими словами можно сказать, что погрешность измерений – это то, что мы реально получаем во время проведения конкретных измерений, а статистическая ошибка – это то, насколько мы можем поверить полученным результатам.

Международный Комитет по Мерам и Весам считает, что статистические ошибки можно разделить на две группы, хотя между группами А и Б нет четких границ [2, 3]:

Группа А: погрешности, оцениваемые статистическими методами.

Группа Б: погрешности, оцениваемые другими методами.

Статистическая ошибка типа А обычно определяется по стандартному отклонению s_i, равному положительному квадратному корню из статистически определенной дисперсии $\Sigma\, s_i^2$, деленной на число измерений v_i. Для отдельных компонентов *стандартная* статистическая ошибка u_i обычно равна s_i. Стандартная ошибка показывает вклад каждого компонента в общую статистическую ошибку.

Для оценки дисперсии обычно применяют статистическую обработку результатов измерений. Для этого методом наименьших квадратов находят уравнение зависимости, наиболее точно описывающей полученные экспериментальные данные, и определяют отклонения каждого измеренного значения от полученной таким образом осредненной кривой.

Для определения статистической ошибки типа Б обычно используют всю доступную информацию, включающую:

- Все данные, полученные в предыдущих измерениях,
- Знания, полученные из анализа характеристик и поведения аналогичных датчиков, использования подобных материалов и инструментов,
- Спецификации, выданные производителем,
- Данные, полученные в процессе калибровки,
- Статистические данные, полученные из справочников и другой литературы.

Для получения более подробной информации, связанной с определением статистических ошибок измерений, рекомендуем обратиться к специализированным литературным источникам, например, [4].

После получения оценок всех статистических погрешностей их необходимо объединить и определить полную стандартную статистическую ошибку. Это можно сделать при помощи *закона распространения статистических погрешностей*, который заключается в нахождении квадратного корня из суммы квадратов всех компонентов статистических ошибок:

$$u_c = \sqrt{u_1^{\,2} + u_2^{\,2} + \ldots + u_i^{\,2} + \ldots + u_n^{\,2}}, \qquad (2.28)$$

где n – число компонентов полной стандартной статистической ошибки.

В таблице 2.2 приведен пример распределения статистических погрешностей электронного термометра, реализованного на основе термистора, измеряющего температуру воды в ванной. При вычислении полной статистической погрешности по данной схеме необходимо учитывать ошибку каждого компонента измерительной цепи: датчика, интерфейсной схемы, экспериментальной установки и самого объекта измерений. Все это должно быть выполнено для разных условий окружающей среды, включая температуру, влажность, атмосферное давление, колебания в сети питания, шумы при передаче данных, старение и многие другие факторы.

Таблица 2.2. Распределение статистических погрешностей термисторного термометра

Источник погрешности	Стандартная ошибка (°C)	Тип
Калибровка датчика	0 03	Б
Ошибки измерений		
Повторяющиеся результаты	0 02	А
Шумы датчика	0 01	А
Шумы усилителя	0 005	А
Старение датчика	0 025	Б
Тепловые потери на проводных соединениях	0 015	А
Динамические ошибки из-за инерционности датчика	0 005	Б
Температурная нестабильность объекта измерения	0 04	А
Шумы при передаче сигналов	0 01	А
Несоответствие передаточной функции	0 02	Б
Дрейф из-за влияния факторов окружающей среды		
Эталонного напряжения	0 01	А
Резисторов мостовой схемы	0 01	А
Диэлектрические потери в конденсаторах	0 005	Б
Цифровое разрешение	0 01	А

Несмотря на то, что все конкретные измерения проводились достаточно аккуратно, ни у кого не может быть уверенности в том, что полученная температура соответствует реальной температуре объекта Стандартная ошибка, равная 0 068°C, вовсе не означает, что погрешность измерений не превышает 0 068°C Это значение всего лишь соответствует величине стандартного отклонения, и если экспериментатор внимательно проанализирует результаты измерений, он обнаружит, что индивидуальные погрешности могут намного превышать стандартную статистическую ошибку Величина стандартного отклонения позволяет лишь оценить достоверность получаемых результатов

Литература

1 Better reliability via system tests *Electron Eng Times* 40 41, Aug 19, 1991
2 CIPM *BIPM Proc Verb Corn Int Poids et Mesures* 49, pp 8-9, No 26, 1981 (in French)
3 ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements *International Organization for Standardization, Geneva, 1993*
4 *Taylor, B N and Kuyatt, C E* Guidelines for Evaluation and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results *NIST Technical Note 1297 Gaithersburg 1994*

ГЛАВА 3

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ДАТЧИКОВ

«То, как мы пытаемся описать Природу, обычно является непонятным для нас самих »
Ричард П. Фейнман, «Странная теория света и вещества»

«Необходимо так объяснять законы физики, чтобы они стали понятны даже буфетчице »
Альберт Эйнштейн

Датчики являются преобразователями обычно неэлектрических физических величин в электрические сигналы Перед тем как превратиться в выходной электрический сигнал внешнее воздействие проходит один или более этапов преобразований Эти этапы включают в себя преобразования одного вида энергии в другой, а последнее превращение всегда заключается в формировании электрического сигнала в требуемом выходном формате В первой главе упоминалось о двух самых распространенных типах датчиков *прямого действия* и *составных* Датчики прямого действия непосредственно преобразуют неэлектрические внешние воздействия в электрические сигналы Однако некоторые внешние сигналы не могут быть напрямую превращены в электрические, для этого им необходимо пройти несколько этапов преобразований Для примера рассмотрим задачу детектирования перемещения непрозрачного объекта Для ее решения можно использовать оптоволоконный датчик Для работы этому датчику необходим сигнал возбуждения, источником которого служит светоизлучающий диод (СИД) Свет от СИД проходит через волоконный световод и отражается от поверхности объекта Отраженный поток фотонов попадает на приемный световод, по которому доходит до фотодиода Сила тока в цепи фотодиода пропорциональна расстоянию от конца световода до объекта Из описания видно, что цикл работы такого датчика состоит из нескольких этапов преобразования электрического тока в фотоны, прохождения фотонов через преломляющую среду, отражения и обратного преобразования в электрический ток Очевидно, что весь процесс детектирования состоит из двух ступенеи преобразования энергии и управления оптическим сигналом

Датчики прямого действия могут строиться на основе некоторых физических явлений, позволяющих в ответ на неэлектрические воздействия сразу получать на выходе электрические сигналы Примерами таких явлений являются термоэлектричество (эффект Зеебека), пьезоэлектричество и фотоэффект

В этой главе описываются различные физические явления, которые могут быть использованы для *прямого* преобразования внешних воздействий в электрические сигналы Поскольку все эти явления основаны на основных законах физики, глава начинается с их краткого рассмотрения

3.1. Электрические заряды, поля и потенциалы

Люди, живущие в сухом климате, часто сталкиваются с таким явлением, как возникновение искр от трения при хождении по ковру Это явление называется электростатическим эффектом или процессом освобождения электрических зарядов, возникающих из-за трения тканей друг об друга, турбулентности воздуха, атмосферного электричества и т д Существует две разновидности зарядов Подобные заряды отталкивают друг друга, а противоположные – притягиваются друг к другу Бенджамин Франклин (1706–1790) наряду с другими своими заслугами был также первым американским физиком Именно он дал названия двум типам зарядов один стал называться *положительным*, другой – *отрицательным* Эти названия сохранились и до настоящего времени Франклин провел очень элегантный эксперимент с воздушным змеем, летающим во время грозы, подтвердившим факт, что атмосферное электричество появляется в результате деиствия сил трения Во время проведения эксперимента ему очень повезло – он остался жив, в отличие от нескольких других европейских исследователей, пытавшихся повторить этот опыт и погибших от ран, полученных от молнии

Электростатический эффект возникает в результате механического перераспределения зарядов Например, при натирании стеклянного стержня шелковой тканью происходит унос электронов с его поверхности, в результате чего в нем остается избыток положительных зарядов, что делает его положительно заряженным Следует отметить, что электрические заряды не могут ни разрушаться, ни создаваться – они могут только перемещаться из одного места в другое Например, фраза «передача отрицательного заряда» означает, что электроны берутся с одного объекта и переносятся на другой, делая его отрицательно заряженным Объект, теряющий электроны, становится положительно заряженным

Электростатический эффект сказывается на совсем небольшом количестве электронов по сравнению с общим количеством заряженных частиц в объекте Реальное количество зарядов в каждом объекте очень велико Для иллюстрации этого посчитаем количество электронов в американской медной монете, достоинством 1 цент [1] (Правда, в настоящее время 1-центовые монеты состоят из сплава цинка, гальванически покрытого медью, но до 1982 года они были из чистой меди) Монета весит 3 1 г, поэтому нетрудно проверить, что общее количество атомов, входящих в ее состав, равно $2\ 9\times10^{22}$ Ядро атома меди обладает положительным зарядом $4\ 6\times10^{-18}$ Кл и такой же заряд, но отрицательной полярности имеют электроны Суммарный заряд всех электронов q, входящих в состав монеты,

равен (4.6×10 ^{18}Кл/атом)×(2.9×10^{22}атомов) или 1,3×10^{5}Кл, что является очень большой величиной. Такой электронный заряд, полученный только от одной монеты, может служить источником тока 0.91 А, достаточного для питания 100-ваттной лампочки в течение 40 часов.

По своему отношению к электрическим зарядам материалы можно разделить на три группы: проводники, диэлектрики и полупроводники. В проводниках электрические заряды (электроны) свободно перемещаются внутри материала, тогда как в диэлектриках они этого делать не могут. Хотя в природе не существует идеальных диэлектриков, изоляционные характеристики различных материалов довольно значительно отличаются друг от друга (например, у кварца и меди они различаются в 10^{25} раз), поэтому многие материалы могут считаться очень хорошими диэлектриками. По своей способности проводить электричество полупроводники находятся посередине между проводниками и диэлектриками. Самыми известными полупроводниками являются кремний и германий. При легировании полупроводников небольшим количеством определенных элементов, их электрическая проводимость резко возрастает; для этой цели чаще всего применяются мышьяк и бор.

На рис. 3.1А показан объект, обладающий положительным электрическим зарядом q. Если в окрестность этого объекта внести небольшой тестовый положительный заряд, на него начнут действовать электрические силы отталкивания. Если объект будет заряжен отрицательно, он станет притягивать тестовый заряд. В векторной форме силу отталкивания или притяжения можно выразить в виде вектора **f** (выделение указывает на то, что величина является вектором). Факт того, что сила действует на тестовый заряд при отсутствии физического контакта между зарядами, означает наличие *электрического поля* в пространстве между ними.

Электрическое поле в каждой точке можно определить по величине силы, действующей на заряд:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{f}}{q_0} \qquad (3.1)$$

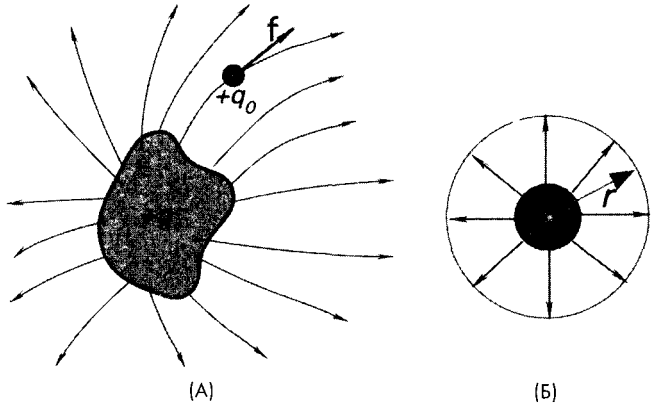


Рис. 3.1 А – Положительный тестовый заряд внесен в окрестность заряженного объекта, Б – электрическое поле сферического объекта.

Здесь **E** – вектор того же самого направления, что и сила **f**, а q_0 является скалярной величиной. При этом тестовый заряд должен быть очень маленьким, чтобы не нарушать электрическое поле объекта. В идеальном случае он должен быть бесконечно малым, но поскольку любой заряд имеет квантовую природу, его величина не может быть меньше заряда электрона: $e = 1.602\times10^{-19}$Кл.

На рис. 3.1А электрическое поле показано в виде *силовых линий*, которые в каждой точке пространства являются касательными к вектору силы. По определению силовые линии исходят из положительного заряженного объекта, а входят в отрицательно заряженный. Плотность силовых линий характеризуется напряженностью электрического поля **E** в конечном объеме пространства.

Для физиков любое поле – это физическая величина, которую можно одновременно определить для всех точек внутри заданной области пространства. Примеры: температурные, электрические и магнитные поля. Переменная, характеризующая поле, может быть либо скаляром (пример - температурное поле), либо вектором (пример – гравитационное поле вокруг Земли). Поле может быть либо стационарным, либо изменяющимся во времени. Характеристикой любого векторного поля является физическая величина, соответствующая распределению в нем векторов, называемая потоком (Ф). Слово поток произошло от латинского глагола *fluere*, что означает «протекать». Поток в любом поле можно сравнить со стационарным равномерным потоком жидкости (воды), описываемым вектором **v**, соответствующим постоянной скорости потока в любой заданной точке. В случае электрического поля вектор **v** заменяется на вектор **E**, являющийся его характеристикой, при этом поток **Ф** будет соответствовать совокупности всех силовых линий. Для гипотетической замкнутой поверхности ***S*** (поверхности Гаусса) связь между зарядом q и потоком **Ф** может быть записана в виде:

$$\varepsilon_0 \Phi_E = q\,, \tag{3.2}$$

где $\varepsilon_0 = 8.8542\times10^{-12}$ Кл^2/Н×м^2 – электрическая постоянная, или в виде интегральной зависимости:

$$\varepsilon_0 \oint \mathbf{E} ds = q, \tag{3.3}$$

где интеграл равен Φ_E. В приведенных уравнениях, известных под названием закона Гаусса, заряд q соответствует полному заряду, заключенному внутри замкнутой поверхности. Если внутри замкнутой поверхности находится равное количество положительных и отрицательных зарядов, полный поток Φ_E будет равен нулю. Заряд снаружи этой поверхности никак не влияет на величину q, также как и расположение внутренних заряженных частиц никак не сказывается на его значении. Из закона Гаусса можно сделать следующий важный вывод: *заряд на изолированном проводнике всегда находится в равновесном состоянии и всегда располагается на внешней стороне его поверхности.* Справедливость этой гипотезы была доказана еще до того, как были сформулированы законы Гаусса и Кулона. Закон Кулона является следствием закона Гаусса. Он гласит, что сила действующая на тестовый заряд, обратно пропорциональна квадрату расстояния до этого заряда:

$$f = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qq_0}{r^2}. \tag{3.4}$$

Другим следствием закона Гаусса является утверждение, что электрическое поле снаружи заряженного тела направлено перпендикулярно его поверхности (рис. 3.1Б) и модуль векторов силовых линий может быть найден из уравнения:

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}, \tag{3.5}$$

где r – расстояние от центра сферы.

Аналогично этому можно записать выражение для электрического поля внутри однородной сферы с зарядом q. Силовые линии этого поля будут также иметь радиальное направление, а их модуль соответствовать выражению:

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qr}{R^3}, \tag{3.6}$$

где R – радиус сферы, а r – расстояние от центра сферы. Следует отметить, что в центре сферы ($r = 0$) электрическое поле равно нулю.

Если электрический заряд распределен вдоль бесконечно длинного тонкого стержня (рис. 3.2А), силовые линии поля будут направлены перпендикулярно к нему, а его напряженность равна значениям, полученным из уравнения:

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}, \tag{3.7}$$

где r – расстояние до стержня (его толщина должна быть мала, чтобы ею можно было пренебречь), а λ – линейная плотность зарядов (заряд на единицу длины). Электрическое поле бесконечной заряженной пластины (рис. 3.3Б) будет также перпендикулярно ее поверхности, а его напряженность определяться выражением:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}, \tag{3.8}$$

где σ - плотность поверхностного заряда (заряда на единицу площади). Однако для изолированного проводящего объекта электрическое поле является в два раза сильней:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}. \tag{3.9}$$

Разница между уравнениями (3.8) и (3.9) объясняется различиями в геометрии заряженных объектов: первый – бесконечная пластина, второй – тело произвольной формы. Очень важным следствием из закона Гаусса является то, что электрические заряды распределяются только по внешней поверхности заряженного тела. Это происходит в результате действия сил отталкивания между одноименными зарядами, поэтому все одинаково заряженные частицы стараются отодвинуться друг от друга на максимально возможное расстояние. Единственный способ это сделать – переместиться на самую дальнюю точку объекта, т.е. на его поверхность. Из всех мест на поверхности объекта самыми предпочтительными для расположения зарядов (самыми удаленными) являются места наибольшей выпуклости, здесь

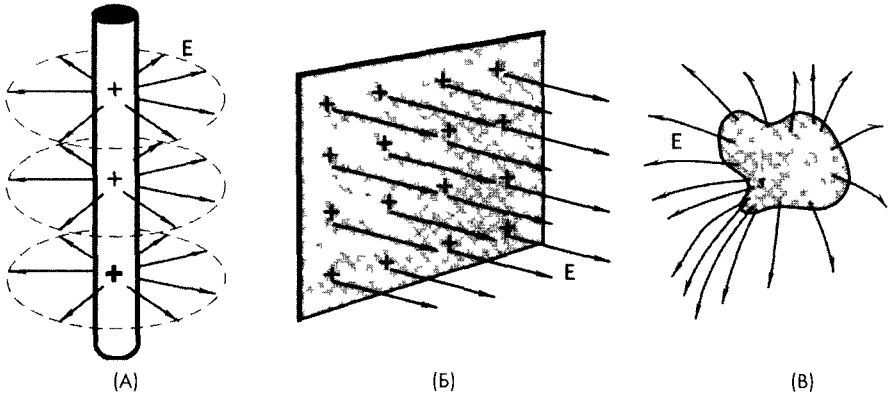


Рис. 3.2 Электрическое поле вокруг бесконечного тонкого стержня (А), в ок рестности бесконечной пластины (Б) Силовые линии электрическо го поля с различной концентрацией, отображающие изменение гео метрии объекта (В)

и наблюдается наивысшая концентрация силовых линий (рис 3 2В) Очень полезным научным и инженерным устройством является цилиндр Фарадея камера, полностью покрытая либо заземленными токопроводящими листами, либо металлической сеткой Вне зависимости от того, насколько сильно внешнее электрическое поле, поле внутри такого устройства будет практически равно нулю Именно поэтому автомобили и металлические корабли являются лучшими укрытиями во время грозы, поскольку они работают как виртуальные устройства Фарадея Но всегда следует помнить, что хотя такие устройства являются блестящей защитой от электрических полей, они практически бесполезны против магнитных полей, если только их стенки не выполнены из толстых ферромагнитных материалов

Электрический диполь – это комбинация двух разноименных зарядов, расположенных на расстоянии $2a$ друг от друга (рис 3 3А) Каждый из зарядов будет действовать на внесенный тестовый заряд с силой, определяемой их электрическими полями $\mathbf{E}_1$ и $\mathbf{E}_2$ Результирующее электрическое поле диполя $\mathbf{E}$ определяется из суммы векторов напряженности двух полей Модуль вектора $\mathbf{E}$ может быть найден из уравнения

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qa}{r^3}, \qquad (3\ 10)$$

где r – расстояние от центра диполя Важными характеристиками распределения зарядов в этом случае являются величина заряда q и расстояние $2a$ В выражение (3 10) входит произведение этих величин, это означает, что при измерении напряженности электрического поля E на различном расстоянии от диполя (считается, что это расстояние должно быть намного больше a), никогда не удастся получить раздельные значения q и $2a$, а только их произведение Например, при одновременном удвоении q и уменьшении a в два раза, величина электрического

поля останется неизменной. Произведение $2qa$ называется дипольным моментом p. Теперь выражение (3.10) можно записать в виде:

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{p}{r^3}. \tag{3.11}$$

Пространственное расположение диполя характеризуется его моментом, выраженным в векторном виде: **p**. Не все материалы обладают дипольным моментом. Его нет у таких газов, как метан, ацетилен, этилен, диоксид углерода и многих других. При этом оксид углерода обладает слабым дипольным моментом (0.37×10^{-30} Кл×м). В качестве примера вещества с сильным дипольным моментом можно назвать воду (6.17×10^{-30} Кл×м).

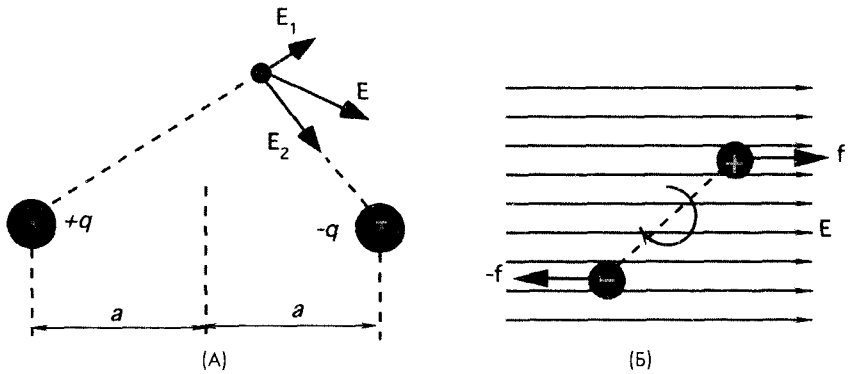


Рис. 3.3 А – электрический диполь, Б – диполь в электрическом поле подвергается действию силы вращения.

Диполи были обнаружены в некоторых материалах с кристаллической структурой. Это позволило реализовать пьезоэлектрические и пироэлектрические детекторы. Первоначальная ориентация диполя определяется типом кристаллической решетки. Когда диполь помещается в электрическое поле, на него начинают действовать силы вращения (рис. 3.3Б). Если электрическое поле достаточно сильное, диполь занимает положение вдоль его силовых линий. Вращательный момент, действующий на диполь в это время, может быть записан в векторной форме в следующем виде:

$$\tau = \mathbf{pE} \tag{3.12}$$

Для изменения ориентации диполя во внешнем электрическом поле должна быть совершена работа. Эту работу можно выразить в виде потенциальной энергии U, запасенной в системе диполь – устройство, генерирующее внешнее электрическое поле. В векторной форме эта потенциальная энергия имеет вид:

$$\mathbf{U} = -\mathbf{pE}. \tag{3.13}$$

Процесс изменения ориентации диполя называется *поляризацией*. Приложенное электрическое поле должно быть достаточно сильным для возможности

преодоления сил, стремящихся сохранить кристаллическую решетку материала неизменной. Для упрощения процесса поляризации прибегают к нагреву материала, что повышает подвижность его молекулярной структуры. Поляризация применяется при изготовлении пьезоэлектрических и пироэлектрических кристаллов.

Электрическое поле вокруг заряженного объекта может быть описано не только вектором напряженности **E**, но и скалярной величиной, называемой *электрическим потенциалом V*. Обе эти величины тесно связаны друг с другом, и какую из них применять на практике, как правило, диктуется соображениями удобства. Потенциал редко используется для описания электрических полей в заданной точке пространства. На практике чаще применяется понятие разности потенциалов (напряжения) между двумя точками. Для нахождения напряжения между двумя произвольными точками можно применить метод тестового заряда, описанный выше. Роль тестового заряда здесь играет очень маленький положительный заряд q_0. Пусть электрический заряд помещен в точку A, где он находится в состоянии равновесия (теоретически, бесконечно долгое время), при этом на него действует сила, равная $q_0\mathbf{E}$. Если теперь мы попытаемся переместить заряд из точки A в точку B, нам придется совершить работу по преодолению этой силы. Работу W_{AB}, выполненную против сил электрического поля для перемещения заряда из точки A в точку B можно выразить через величину напряжения между этими точками:

$$V_B - V_A = -\frac{W_{AB}}{q_0}. \tag{3.14}$$

В соответствии с этим выражением можно утверждать, что электрический потенциал в точке B меньше потенциала в точке A. В системе СИ единица измерения напряжения 1 Вольт определяется равной отношению 1 джоуля на 1 кулон (1 В = 1Дж/Кл). Для удобства точка A выбирается на расстоянии, значительно удаленном от всех остальных зарядов (теоретически, на бесконечно большом расстоянии), и электрический потенциал в этой точке считается равным нулю. Исходя из этого, электрический потенциал в любой другой точке пространства можно определить как:

$$V = -\frac{W}{q_0}. \tag{3.15}$$

Из этого уравнения видно, что потенциал в окрестности положительного заряда является положительным. Это объясняется тем, что при перемещении положительного тестового заряда из бесконечности в конкретную точку пространства была выполнена работа на преодоление сил отталкивания. Поэтому знак минус из формулы можно убрать. Следует отметить, что разность потенциалов между двумя точками не зависит от траектории перемещения тестового заряда. Она только описывает разницу электрического поля между двумя выбранными точками. При измерении величины V в точках, расположенных вдоль прямой линии, оказалось, что скорость изменения параметра V при перемещении заряда вдоль пути l соответствует напряженности поля **E** в этом направлении, т.е.

$$E_l = -\frac{dV}{dl} \tag{3.16}$$

Минус в этой формуле означает, вектор **E** направлен в сторону уменьшения параметра *V*. Поэтому напряженность электрического поля можно измерять в единицах вольт/метр (В/м).

3.2. Емкость

Рассмотрим два объекта произвольной формы, выполненные из токопроводящего материала, (например, пластины), и подсоединим их к противоположным полюсам батареи (рис. 3.4А). При этом пластины получат одинаковое количество разноименных зарядов, это означает, что отрицательно заряженная пластина получила дополнительное количество электронов, в то время как, положительно заряженная пластина потеряла такое же количество электронов. Теперь батарею отсоединим. Если бы пластины были полностью изолированы друг от друга и находились в вакууме, они бы сохраняли полученный заряд бесконечно долго. Устройство из двух пластин, способных сохранять электрический заряд, называется *конденсатором*. Если между двумя заряженными объектами поместить тестовый положительный заряд q_0, на него начнет действовать электрическая сила, направленная от положительной пластины к отрицательной. Положительно заряженная пластина будет отталкивать тестовый заряд, а отрицательно заряженная – притягивать его. В зависимости от расположения тестового заряда между пластинами, эта сила будет иметь разное направление и величину, характеризуемые вектором **f**.

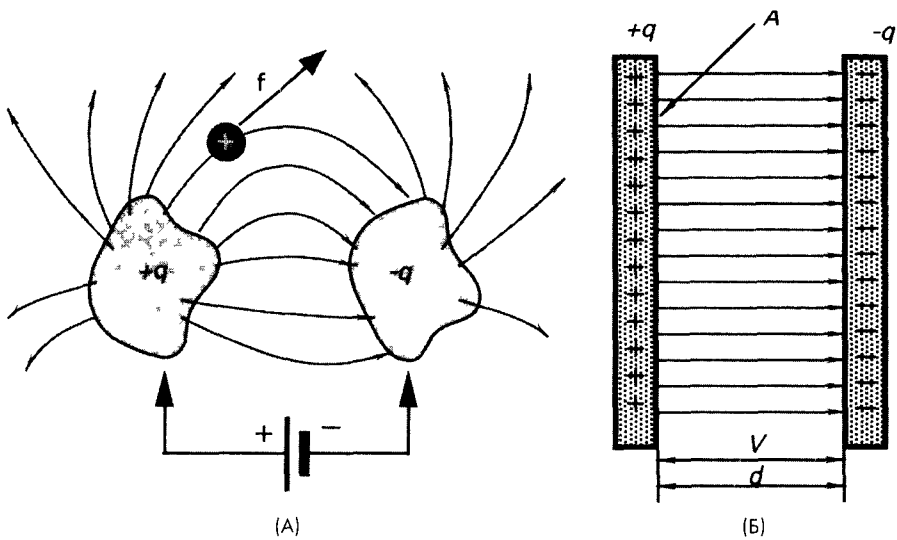


Рис. 3.4 А – Электрический заряд и напряжение определяют емкость между двумя объектами, Б – конденсатор с параллельными пластинами.

Конденсатор характеризуется величиной заряда q, накопленного на обоих пластинах, и напряжением V – положительной разностью потенциалов между ними (рис. 3.4А). Следует отметить, что q не соответствует суммарному заряду конденсатора, равного нулю, а V не является потенциалом каждой пластины, а выражает разность потенциалов между ними. Отношение заряда к напряжению является константой для каждого конденсатора:

$$\frac{q}{V} = C \ . \tag{3.17}$$

Постоянная величина C называется *емкостью* конденсатора. Величина емкости зависит от формы пластин и их расположения друг относительно друга, а также от свойств среды между ними. Отметим, что величина C всегда положительная, потому что в формуле (3.17) заряд и напряжение берутся одного знака. В системе СИ единицей емкости является Фарад: 1 фарад = 1 Кулон/Вольт (Ф = Кл/В). Но фарад соответствует очень большой емкости, поэтому на практике используются следующие производные от него:

1 пикофарад (пФ) = 10^{12} Ф,

1 нанофарад (нФ) = 10^{9} Ф,

1 микрофарад (мкФ) = 10^{6} Ф.

При включении в электронную схему емкость конденсатора может быть выражена в виде комплексного сопротивления:

$$\frac{V}{i} = -\frac{1}{j\omega C}, \tag{3.18}$$

где $j = \sqrt{-1}$, а i – это синусоидальный ток с частотой ω. Из формулы видно, что комплексное сопротивление конденсатора уменьшается с ростом частоты. Выражение (3.18) называется законом Ома для конденсаторов. Знак минус в этой формуле означает, что напряжение на конденсаторе отстает от тока на 90°.

Конденсатор – это очень полезный электрический элемент, часто используемый в составе различных датчиков, например, для измерения расстояния, площади, объема, давления, силы и т.д. В следующих разделах будут рассмотрены основные свойства конденсаторов и приведены некоторые полезные соотношения. На рис. 3.4Б показан конденсатор с параллельными пластинами, в котором проводники имеют форму пластин площади A, расположенные параллельно на расстоянии d друг от друга. Если расстояние d гораздо меньше, чем размеры пластин, электрическое поле между ними будет однородным. Это означает, что силовые линии **f** являются параллельными и равномерно расположенными. Из законов электромагнетизма следует, что на концах пластин крайние силовые линии будут немного искажаться, но для достаточно малых значений d мы можем этим пренебречь.

3.2.1 Конденсатор

Для вычисления емкости необходимо знать разность потенциалов между пластинами V и заряд конденсатора q:

$$C = \frac{q}{V}. \tag{3.19}$$

Существует еще одна формула для нахождения емкости плоского конденсатора:

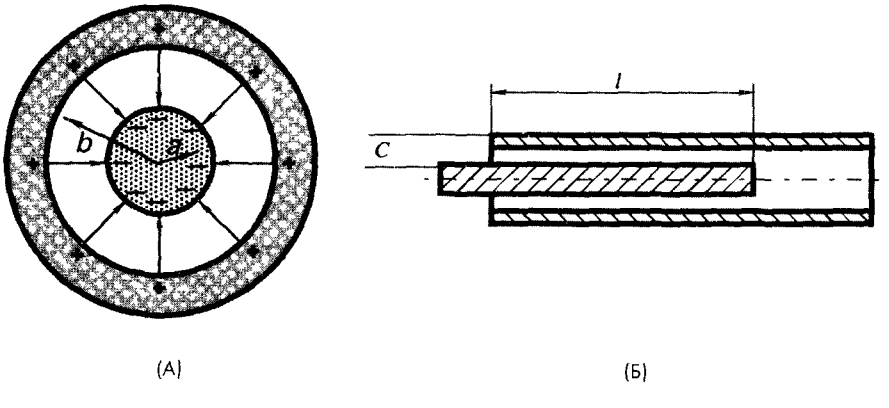
$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d}. \tag{3.20}$$

Именно эта зависимость чаще всего используется при проектировании емкостных датчиков. Она устанавливает взаимосвязь между площадью пластин и расстоянием между ними. При изменении одного из этих параметров меняется значение емкости, что может быть достаточно точно измерено при помощи соответствующих схем. Следует отметить, что уравнения (3.19) и (3.20) справедливы только для конденсаторов с параллельными пластинами. Изменение геометрии пластин приведет к модификации этих формул. Отношение A/d часто называют геометрическим фактором конденсатора с параллельными пластинами.

На рис. 3.5А показан цилиндрический конденсатор. Он состоит из двух коаксиальных цилиндров, радиусы которых равны a и b, а длина – l. Если $l>>b$, краевыми эффектами можно пренебречь, а для вычисления емкости использовать следующую формулу:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0 l}{\ln(b/a)}. \tag{3.21}$$

В этом выражении l – длина зоны перекрытия двух цилиндров (рис. 3.5Б), а коэффициент $2\pi l/\ln(b/a)$ называется геометрическим фактором коаксиального конденсатора. Если внутренний цилиндр способен вдвигаться внутрь внешнего цилиндра и выдвигаться из него, на основании такой конструкции можно реализовать датчик перемещений, обладающий линейной зависимостью между емкостью и перемещением (см. уравнение 3.21).



(А) (Б)

Рис. 3.5 А – цилиндрический конденсатор, В – емкостной датчик перемещения

3.2.2. Диэлектрическая проницаемость

Уравнение (3.20) справедливо для конденсатора с параллельными пластинами, находящимися в вакууме (или в воздухе для большинства практических случаев). М. Фарадей в 1837 году первым заполнил пространство между пластинами диэлектриком и обнаружил, что при этом емкость конденсатора возросла на коэффициент κ, известный под названием диэлектрической константы[1] материала.

Увеличение емкости конденсатора, благодаря наличию между его пластинами диэлектрика, объясняется эффектом поляризации молекул. В некоторых диэлектриках (например, в воде) молекулы обладают постоянным дипольным моментом, тогда как в других диэлектриках молекулы становятся поляризованными только после того, как они попадают под действие внешнего электрического поля. Такая поляризация называется индуцированной. В обоих случаях поляризации внешнее приложенное поле всегда стремится к выравниванию направлений молекул. Этот процесс называется поляризацией диэлектрика. Он проиллюстрирован на рис. 3.6 На рис. 3.6А показано расположение диполей до того, как на конденсатор было подано внешнее электрическое поле. А на рис. 3.6Б показаны те же диполи при подключенном электрическом напряжении. В первом случае все диполи имеют хаотическую ориентацию, а во втором – в процессе зарядка конденсатора все диполи начинают выравниваться вдоль силовых линий электрического поля, однако тепловое перемешивание не позволяет им полностью закончить эту процедуру. Каждый диполь формирует свое собственное электрическое поле, которое в большинстве случаев направлено против внешнего электрического поля $\mathbf{E}_0$. Благодаря сложению полей большого количества диполей ($\mathbf{E'}$), результирующее поле внутри конденсатора становится слабей ($\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E'}$) по сравнению со случаем конденсатора без диэлектрика, когда электрическое поле было равно $\mathbf{E}$

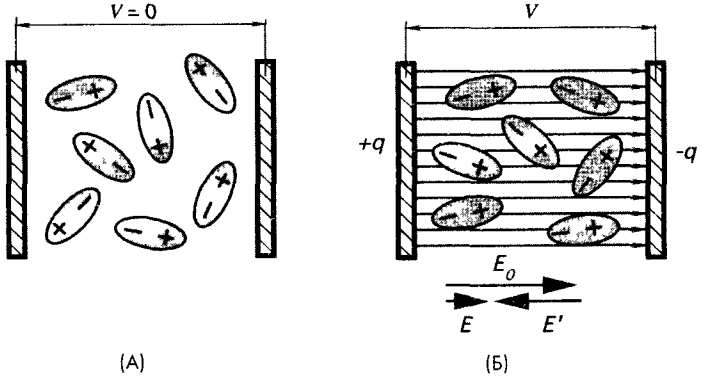


Рис. 3.6 Поляризация диэлектрика А – без внешнего электрического поля диполи имеют произвольную ориентацию, Б – диполи выравниваются вдоль силовых линий приложенного электрического поля.

[1] В литературе на русском языке чаще всего используется относительная диэлектрическая проницаемость ε

Уменьшение электрического поля ведет к снижению напряжения на конденсаторе: $V = V_0/\kappa$. Подставляя это выражение в формулу (3.19), получим выражение для нахождения емкости конденсатора с диэлектриком между проводниками:

$$C = k\frac{q}{V_0} = kC_0. \tag{3.22}$$

Для конденсатора с параллельными пластинами справедливо следующее соотношение:

$$C = \frac{k\varepsilon_0 A}{d}. \tag{3.23}$$

В более общей форме емкость между двумя объектами можно выразить при помощи геометрического фактора G:

$$C = \varepsilon_0 kG, \tag{3.24}$$

где G определяется формой объекта (пластин) и расстоянием между ними. В Приложении приведены диэлектрические константы различных материалов.

Диэлектрические константы определяются при заданных частоте и температуре. Диэлектрические константы некоторых диэлектриков почти не меняются в очень широком частотном диапазоне (например, у полиэтилена), в то время как у других – демонстрируют сильную отрицательную зависимость от частоты, т.е. их значения уменьшаются с ростом частоты. На рис. 3.7 показана зависимость диэлектрической константы от температуры, полученная для воды.

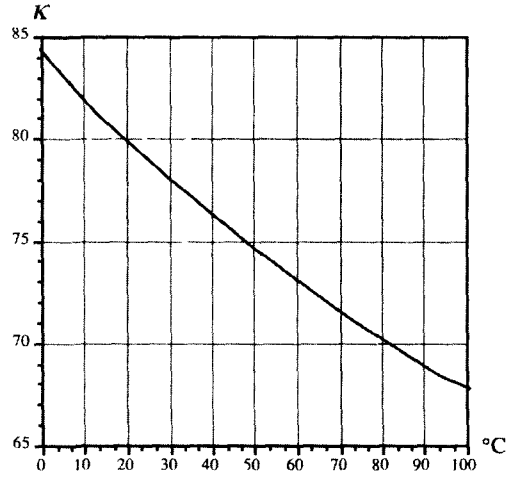


Рис. 3.7 Зависимость диэлектрической константы от температуры для воды

В идеальном конденсаторе диэлектрическая константа κ и его геометрический фактор имеют очень стабильное значения, они не зависят ни от температуры, ни от влажности, ни от давления и ни от других факторов окружающей среды. Для построения электронных схем очень важно применять конденсаторы, характеристики которых близки к идеальным. Однако при проектировании емкостных датчиков необходимо выбирать конденсаторы с параметрами, изменяющимися либо от температуры, либо от давления, либо от влажности, либо от любого другого исследуемого фактора. Если какая-либо характеристика конденсатора меняется при определенном внешнем воздействии, на его основе можно построить соответствующий датчик.

Рассмотрим емкостной датчик, измеряющий уровень воды (рис. 3.8А). Он изготовлен на основе коаксиального конденсатора, в котором поверхность каждого цилиндра покрыта тонким слоем изоляционного материала для предотвращения короткого замыкания через воду (этот слой также является диэлектриком, но он не будет учитываться в последующих рассуждениях, поскольку его свойства не меняются в процессе измерений). Датчик размещается в резервуаре с водой. При увеличении уровня вода заполняет все больший объем между коаксиальными проводниками, изменяя при этом емкость датчика. Полная емкость датчика определяется следующим выражением:

$$C_h = C_1 + C_2 = \varepsilon_0 G_1 + \varepsilon_0 k G_2, \tag{3.25}$$

где C_1 – емкость части датчика, свободной от воды, а C_2 – емкость части датчика, заполненной водой, а G_1 и G_2 – соответствующие геометрические факторы. Из формул (3.21) и (3.25) можно получить выражение для полной емкости датчика:

$$C_h = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln(b/a)}\left[H - h(1-k)\right], \tag{3.26}$$

где h – высота части датчика, заполненной водой. Если вода находится ниже уровня h_0, емкость датчика остается постоянной и равной:

$$C_0 = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln(b/a)} H. \tag{3.27}$$

На рис. 3.8Б показана зависимость емкости датчика от уровня воды (при этом датчик имел следующие размеры: a = 10 мм, b = 12 мм, H = 200 мм, исследуемая жидкость была водой). Она представляет собой прямую линию, начинающуюся с уровня h_0. Поскольку диэлектрическая константа воды зависит от температуры (рис. 3.7), емкостной датчик следует использовать совместно с датчиком температуры – например, термистором или резистивным детектором температуры, который будет отслеживать температуру окружающей среды. Соответствующая температурная корректировка сигнала емкостного датчика может проводиться на специальном электронном преобразователе.

Наклон линии передаточной функции зависит от типа используемой жидкости. Например, если вместо воды в резервуар налить трансформаторное масло, чувствительность датчика снизится в 22 раза (см. Приложение).

Другим примером является емкостной датчик влажности. В таком датчике диэлектрический слой между пластинами конденсатора выполняется из гигроскопичного материала. Такой диэлектрик поглощает молекулы воды и в соответствии с их количеством меняет диэлектрическую константу. Согласно уравнению (3.24) это приводит к изменению емкости датчика, что может быть достаточно точно измерено. По полученному значению и определяется относительная влажность. На рис. 3.9 показана зависимость емкости такого датчика от величины относительной влажности. Как видно из рисунка, эта зависимость не является линейной, но это, как правило, учитывается на стадии обработки сигналов.

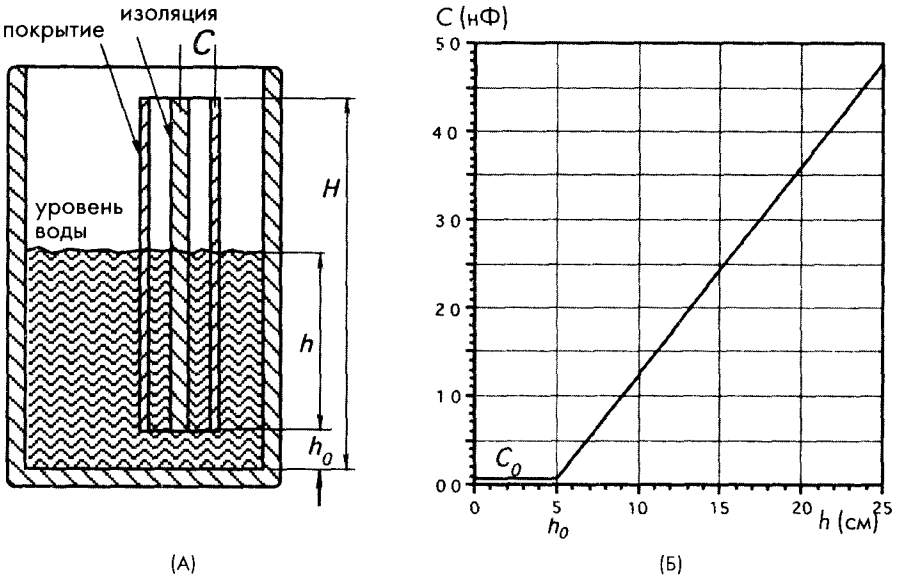


Рис. 3.8 А – емкостной датчик уровня воды, Б – зависимость емкости датчика от уровня воды

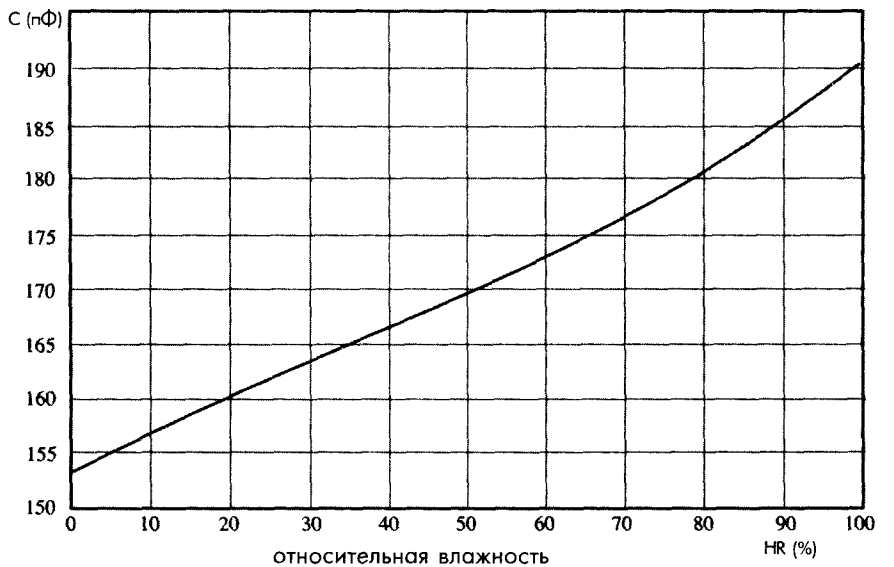


Рис. 3.9 Передаточная функция емкостного датчика относительной влажности

3.3. Магнетизм

Магнитные свойства некоторых материалов были известны в очень древние времена. Фактически, это произошло тогда, когда были добыты образцы минерала железной руды, получившие название магнетита (Fe_3O_4). Было обнаружено, что кусочки мягкого железа после соприкосновения с магнитными материалами тоже начинают вести себя как магниты (например, притягивать другие магниты или кусочки железа). Вильям Гильберт первым серьезно подошел к изучению магнетизма. Самым большим его открытием было заключение, что Земля ведет себя как огромный магнит. Слово «магнетизм» произошло из названия округа Магнезия, расположенного в Азии, где были найдены одни из первых магнитных камней.

У электричества и магнетизма есть много общих черт. Например, у двух электрически заряженных стержней, также как и у двух магнитов, есть одноименные и разноименные концы. В магнитах эти концы называются южным (S) и северным (N) полюсами. Одноименные полюса отталкиваются, а разноименные притягиваются. В отличие от электрических зарядов магнитные полюса всегда располагаются парами, что можно доказать, разбив магнит на несколько кусков. Каждый кусок, вне зависимости от его размера, будет иметь северный и южный полюса. Это наводит на мысль, что причина магнетизма заключена либо в атомах, либо в их расположении, либо одновременно и в том, и другом.

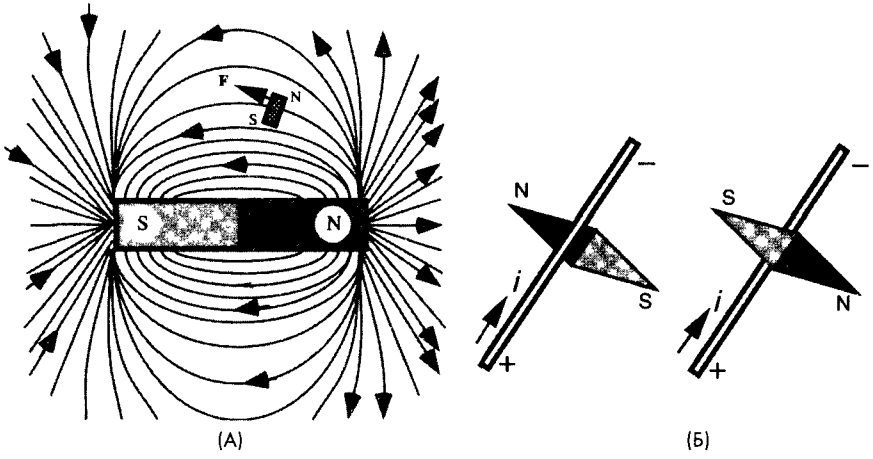


Рис. 3.10 А – поведение тестового магнита в магнитном поле, Б – стрелка компаса вращается в соответствии с направлением электрического тока

Если поместить магнит в какую-либо точку пространства, то в окрестности этой точки произойдут определенные изменения. Для демонстрации этого поднесем к магниту кусочек железа. При этом на него будет действовать некоторая сила, которая исчезнет при удалении магнита. Этот простой опыт доказывает, что в пространстве рядом с магнитом существует магнитное поле, которое действует на любые магнитные тела, попадающие в него. Если внесенное магнитное тело имеет форму

Рис. 3.11 Электрический ток является причиной возникновения магнитного поля вокруг проводника

стержня или иглы, можно убедиться в том, что магнитное поле обладает определенной направленностью. По определению направление магнитного поля в любой точке задается направлением силы, действующей на очень маленький (единичный) северный полюс. Согласно этому определению, силовые линии поля идут с севера на юг. На рис. 3.10А при помощи стрелок показаны направления силовых линий магнитного поля. Крошечный тестовый магнит, внесенный в поле, будет перемещаться в направлении вектора силы **F**. Естественно, что на южный полюс тестового магнита будет действовать почти такая же, но имеющая противоположное направление сила.

Вышеприведенное описание магнитного поля соответствует постоянному магниту. Однако магнитное поле не меняет своих свойств, если генерируется другими устройствами (например, при протекании электрического поля через проводник). Первым ученым, обнаружившим в 1820 году тот факт, что магнитное поле может существовать даже при отсутствии магнитов, был датский профессор физики Ганс Христиан Эрстед. Он проводил серию экспериментов, где ему требовался очень большой ток, для чего он использовал огромную батарею. Неожиданно ученый обнаружил, что стрелка компаса вблизи этого источника тока ведет себя очень странно. Дальнейшие исследования показали, что стрелка компаса всегда располагается под прямым углом по отношению к проводнику с током и меняет свою ориентацию на противоположную в двух ситуациях: либо когда ток начинает течь в другую сторону, либо компас располагается не под проводником, а над ним (рис. 3.10Б). Стационарные электрические заряды не оказывают никакого влияния на магнитный компас (в этом эксперименте роль тестового магнита выполняла стрелка компаса). Очевидно, что появление магнитного поля вызывают движущиеся электрические заряды. Можно показать, что линии магнитного поля вокруг проводника с током являются круговыми, а их направление зависит от направления электрического тока, т.е. от движения электронов (рис. 3.11). С двух сторон провода линии магнитного поля имеют противоположные направления. Именно поэтому стрелка компаса переворачивается, когда помещается снизу проводника.

Возникновение магнитного поля вокруг движущихся электрических зарядов (проводника с электрическим током) является основным свойством магнетизма. Зная это, стало возможным объяснить природу постоянных магнитов. На рис. 3.12А показана упрощенная модель процесса зарождения магнитного поля. Электрон находится в постоянном вихревом вращении внутри атома. Движение электрона создает круговой ток вокруг ядра атома, который является причиной возникновения очень маленького магнитного поля. Другими словами, вращающийся электрон формирует на атомном уровне постоянный магнит. Теперь представим себе ситуацию, при которой много таких атомных магнитов выстроятся в одном направлении (рис. 3.12Б). Это приведет к тому, что их магнитные поля сложатся, формируя одно большое магнитное поле. После таких рассуждений процесс магнетизма

становится более понятным: ничего не привносится извне, ничего не удаляется из материала, только происходит переориентация атомов. В некоторых материалах атомные магниты всегда имеют одинаковую ориентацию. Такие материалы, как правило, обладают кристаллической структурой и определенным химическим составом и называются *ферромагнетиками*.

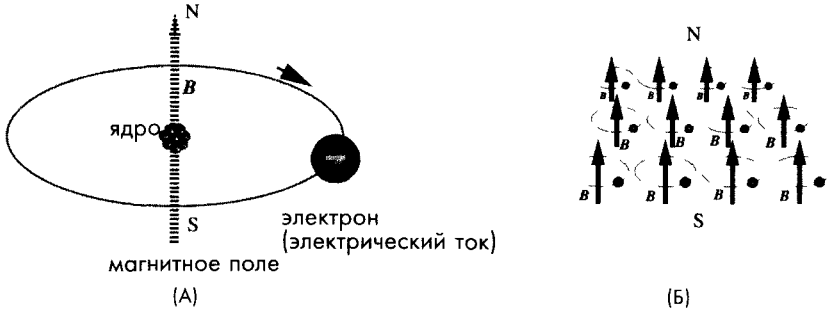


Рис. 3.12 А – движение электрона порождает магнитное поле, Б – сложение атомных магнитных полей приводит к образованию магнитного поля постоянного магнита

3.3.1 Закон Фарадея

М. Фарадей сам себе задал вопрос: «Если электрический ток способен породить магнитное поле, как использовать явление магнетизма для получения электричества?» Для ответа на этот вопрос ему потребовалось 9 или 10 лет. При движении электрического заряда через магнитное поле на него действует отклоняющая сила. Следует подчеркнуть, что на самом деле неважно, что движется: заряд или источник магнитного поля. Существенным здесь является их относительное смещение. Открытие того, что движущийся электрический заряд может изменить свою траекторию из-за действия на него магнитного поля, положено в основу всей электромагнитной теории. Отклонение электрических зарядов приводит к формированию электрического поля, которое, в свою очередь, вызывает появление разности потенциалов в проводящем материале, что означает, протекание в нем электрического тока.

Интенсивность магнитного поля в любой отдельно взятой точке определяется вектором **B,** касательным к силовой линии поля, проходящей через эту точку. Для лучшей наглядности будем считать, что количество силовых линий, проходящих через единицу площади поперечного сечения (перпендикулярного этим линиям), пропорционально модулю вектора **B**. Тогда можно утверждать, что там, где силовые линии расположены ближе друг к другу, плотность магнитного потока **B** больше, а там, где они значительно отстоят друг от друга, плотность меньше. (**B** часто называется магнитной индукцией).

Поток магнитного поля определяется следующим соотношением:

$$\Phi_B = \oint \mathbf{B} ds, \tag{3.28}$$

где интеграл взят по поверхности, для которой определена $\mathbf{F}_\mathbf{B}$.

Для определения вектора магнитной индукции **B** можно воспользоваться лабораторной методикой, где в качестве тестового объекта применяется элементарный положительный электрический заряд q_0. Пусть заряд перемещается в магнитном поле со скоростью **V**. При этом на заряд действует отклоняющая сила $\mathbf{F}_B$ (рис. 3.13А), направленная под прямым углом к вектору скорости. Следует отметить, что вектор **V** во время движения заряда в магнитном поле меняет свое направление. Это приводит к тому, что заряд перемещается по спиральной, а не по параболической траектории (рис. 3.13Б). Движение по спирали является причиной возникновения магниторезистивного эффекта, на основе которого можно реализовать магниторезистивные датчики. Отклоняющая сила $\mathbf{F}_B$ пропорциональна величине заряда, скорости его движения и магнитной индукции, т.е.

$$\mathbf{F}_B = q_0 \mathbf{V}\mathbf{B}. \tag{3.29}$$

Вектор $\mathbf{F}_B$ всегда направлен под прямым углом к плоскости, сформированной векторами **V** и **B**, т.е. он всегда перпендикулярен этим векторам. По правилу нахождения произведения векторов можно записать, что

$$F_B = q_0 \, vB \sin\phi, \tag{3.30}$$

где ϕ – угол между векторами **V** и **B**. Уравнение (3.30) часто применяется для выражения магнитной индукции через единицы заряда, скорости его движения и отклоняющей силы. Единица измерения B – (Ньютон/Кулон)/(метр/секунду). В системе СИ эта единица называется *тесла* (Тл). Поскольку Кулон/секунду = 1 Амперу, 1 Тл = 1Ньютон/(ампер×метр). Часто используется старая единица измерения магнитной индукции – Гаусс. Для перевода единиц из одной системы в другую можно воспользоваться соотношением: 1 Тл = 10^4 Гаусс.

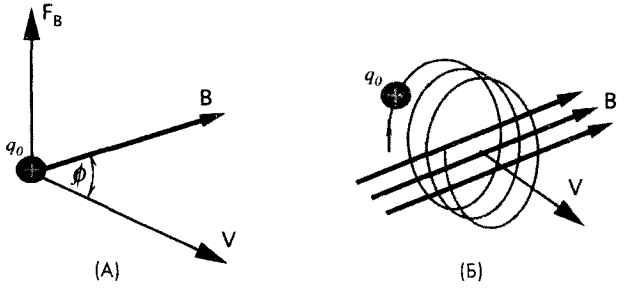


Рис. 3.13 А – положительный заряд при перемещении через магнитное поле подвергается действию отклоняющей силы, Б – спиральное движение электрического заряда в магнитном поле.

3.3.3 Соленоид

Устройство, применяемое на практике для формирования магнитного поля, называется *соленоидом*. Он представляет собой длинный провод, намотанный в форме спирали, по которому протекает электрический ток i. При этом длина спирали намного превышает ее диаметр. Магнитное поле соленоида является *векторной суммой* полей, образованных его отдельными витками.

Когда витки соленоида расположены на значительном расстоянии друг от друга, поля в проводниках стремятся взаимно уничтожить друг друга. В точках внутри соленоида, достаточно отдаленных от его витков, вектора **B** проходят параллельно его оси. Если витки расположены вплотную или очень близко друг к другу, соленоид представляет собой систему последовательно соединенных круговых витков одинакового радиуса, имеющих общую ось. Тогда для определения величины магнитной индукции внутри соленоида можно применить закон Ампера:

$$B = \mu_0 i_0 n, \tag{3.31}$$

где n – количество витков на единицу длины, i_0 – ток через соленоид, μ_0 – магнитная постоянная. Хотя эта формула справедлива только для соленоидов бесконечной длины, она достаточно хорошо работает для точек, расположенных рядом с его осью и достаточно удаленных от концов. Следует отметить, что величина B не зависит ни от диаметра, ни от длины соленоида, и поэтому является, практически, постоянной по всей площади поперечного сечения. Поскольку диаметр соленоида также не входит в уравнение (3.31), для увеличения магнитного поля можно применять многослойную намотку. Также надо отметить, что магнитное поле снаружи соленоида всегда слабее, чем внутри него.

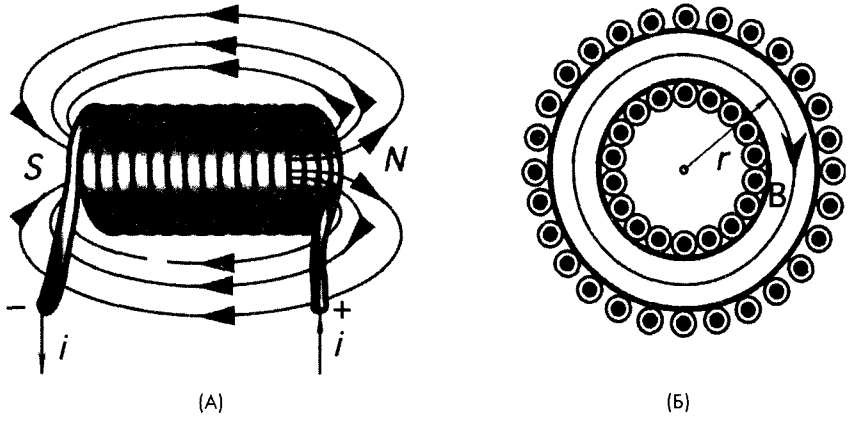


Рис. 3.14. А – соленоид, Б – тороид

3.3.4 Тороид

Другим устройством, применяемым для формирования магнитного поля, является тороид (рис. 3.14Б), который можно представить в виде соленоида, свернутого в кольцо. Магнитная индукция внутри тороида может быть найдена при помощи выражения:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{i_0 N}{r}, \tag{3.32}$$

где N – общее количество витков, r – радиус внутреннего круга, для точек которого определяется величина поля. В отличие от соленоида значение B не является постоянным в каждой точке поперечного сечения тороида.

Количество силовых линий (**B**), проходящих через заданную поверхность S, называется магнитным потоком Φ_B через эту поверхность. Выражение для Φ_B можно записать в виде:

$$\Phi_B = \int \mathrm{B}\, ds. \tag{3.33}$$

Интеграл берется по всей заданной поверхности, и если магнитное поле является постоянным, а его вектор **B** везде перпендикулярен этой поверхности, интеграл имеет следующее значение: $\Phi_B = BA$, где A – площадь поверхности. Поток магнитного поля аналогичен потоку электрического поля. В системе СИ единицей измерения магнитного потока является теслаxметр^2, которая называется *вебер* и обозначается *Вб*:

$$1\mathrm{B}б = 1\,Тл \times м^2. \tag{3.34}$$

3.3.5 Постоянные магниты

На основе постоянных магнитов часто строятся магнитные датчики для определения движения, перемещения, положения и т.д. При выборе магнита для того или иного применения необходимо учитывать следующие параметры:

- остаточную индукцию B в гауссах, показывающую силу магнита,
- коэрцетивную силу H (напряженность поля размагничивания) в эрстедах, характеризующую насколько хорошо магнит противостоит внешним магнитным силам,
- произведение BH в гауссxэрстедx10^6. Сильный магнит, устойчивый к внешним силам размагничивания, обладает высоким произведением BH. Такие магниты считаются наиболее хорошими и дорогостоящими,
- температурный коэффициент в %/°C, показывающий насколько B меняется с температурой.

Магниты изготавливаются из специальных сплавов (см. Приложение), например, из сплавов *кобальта с редкоземельными элементами* (пример таких элементов: самарий). Такие магниты считаются самыми хорошими, они обладают высоким произведением BH (около 16×10^6), однако, их очень сложно обрабатывать, и при формовке необходимо применять меры по их заземлению. Другим популярным сплавом является *Alnico*, состоящий из алюминия, никеля, кобальта, железа и еще нескольких компонентов. Их изготавливают методами литья или спекания из прессованной металлической пудры при высокой температуре. Метод спекания более пригоден для массового производства магнитов. *Керамические магниты* состоят из бария или феррита стронция (или других элементов данной группы) и керамических материалов, спеченных вместе. Они плохие проводники тепла и электричества, химически инертны и обладают высоким значением *H. Cunife* – еще один сплав для изготовления магнитов. Он состоит из меди, никеля и железа. Его можно штамповать, ковать, вытягивать или скручивать для при-

дания требуемой формы. Его произведение BH равно 1.4×10^6. *Магниты из железа и хрома* являются достаточно мягкими и допускают механическую обработку, по окончании которой проводится специальная процедура их отверждения. Их произведение BH составляет 5.25×10^6. *Пластмассовые и резиновые магниты* – это группа магнитов, состоящих из бария или феррита стронция, соединенных с пластиковыми материалами. Они имеют низкую стоимость, могут изготавливаться любой формы, их произведение BH равно $\approx1.2\times10^6$.

3.4. Индукция

В 1831 году, Майкл Фарадей в Англии и Джозеф Генри в США открыли фундаментальное явление электромагнетизма: способность изменяющегося магнитного поля индуцировать в проводнике электрический ток. При этом не важен способ получения магнитного поля – при помощи соленоида или постоянного магнита, эффект будет тем же самым. Пока магнитное поле будет меняться, электрический ток будет течь. В стационарном поле ток образовываться не будет. Закон Фарадея о магнитной индукции гласит, что индуцированное напряжение или электродвижущая сила (э.д.с.) в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока Φ_B, сквозь поверхность ограниченную этим контуром, т.е.

$$e = -\frac{d\Phi_B}{dt}. \tag{3.35}$$

Поскольку скорость изменения потока выражается в вебер/секунду, э.д.с. измеряется в вольтах. Знак минус показывает направление индуцированной э.д.с. При прохождении через соленоид переменного магнитного потока, полная э.д.с. получается из суммы э.д.с, индуцируемых в каждом витке. Если все витки соленоида имеют одинаковую площадь поперечного сечения, через них будут проходить равные магнитные потоки, тогда индуцированное напряжение можно найти по следующей формуле:

$$V = -N\frac{d\Phi_B}{dt}, \tag{3.36}$$

где N – число витков. Это уравнение можно переписать в виде:

$$V = -N\frac{d(BA)}{dt} \tag{3.37}$$

Это выражение имеет большее практическое применение при разработке датчиков. Оно означает, что навести напряжение в контуре можно, изменяя либо магнитную индукцию (B), либо площадь контура (A). Величина этого напряжения зависит от следующих факторов:

- Движения источника магнитного поля (магнита, катушки, провода и т.д.)
- Изменения тока в катушке или проводе, индуцирующего магнитное поле
- Изменения ориентации источника магнитного поля по отношению к контуру

- Изменения геометрии контура (например, его растяжения или сжатия, или изменения в нем числа витков)

Если электрический ток протекает через катушку, находящуюся в непосредственной близости от другой катушки, из закона Фарадея следует, что во второй катушке будет также индуцирована э.д.с. Однако магнитный поток проникнет не только во вторую катушку, но и в первую. Это означает, что в первой катушке магнитное поле также наведет э.д.с. Это явление называется *самоиндукцией*, а результирующее напряжение – *э.д.с. самоиндукции*. Закон Фарадея для центральной части соленоида можно записать как:

$$v = -\frac{d(n\Phi_B)}{dt}. \tag{3.38}$$

Значение в круглых скобках называется потокосцеплением и является очень важной характеристикой устройства. Для простой катушки, в окрестности которой нет никаких магнитных материалов, эта величина пропорциональна току, протекающему через нее:

$$n\Phi_B = Li, \tag{3.39}$$

где L – коэффициент пропорциональности, называемый *индуктивностью катушки*. Тогда уравнение (3.38) можно переписать в виде:

$$v = -\frac{d(n\Phi_B)}{dt} = -L\frac{di}{dt}. \tag{3.40}$$

Из этого уравнения получаем выражение для индуктивности:

$$L = -\frac{v}{di/dt}. \tag{3.41}$$

Таким образом, если в окрестности *индуктора* (устройства, обладающего индуктивностью) нет никаких магнитных материалов, его индуктивность определяется уравнением (3.41) и зависит только от геометрии устройства. В системе СИ индуктивность измеряется в (Вольт×секунда)/Ампер. Эта единица названа в честь американского физика Джозефа Генри (1797-1878): 1 Генри = 1 Вольт×секунду/Ампер и обозначается Гн.

Из уравнения (3.41) можно сделать несколько выводов:

- Индуцированное напряжение пропорционально скорости изменения тока через индуктор
- В случае постоянного тока индуцированное напряжение равно нулю
- Индуцированное напряжение линейно связано со скоростью изменения тока
- Полярность индуцированного напряжения будет разной при увеличении и уменьшении скорости тока, текущего в одном и том же направлении
- Индуцированное напряжение всегда противостоит изменению тока

Также как и в случае емкости на величину индуктивности влияют геометрические факторы. Для катушки с плотно намотанными витками справедливо:

$$L = \frac{n\Phi_B}{i}. \tag{3.42}$$

Если n – число витков на единицу длины, потокосцепление в катушке длиной l можно определить по формуле:

$$N\Phi_B = (nl)(BA), \tag{3.43}$$

где A – поперечное сечение катушки. Для соленоида $B = \mu_0 ni$, а индуктивность

$$L = \frac{N\Phi_B}{i} = \mu_0 n^2 lA. \tag{3.44}$$

Следует отметить, что lA – объем соленоида. Таким образом, индуктивность можно менять, изменяя только геометрию катушки, оставив количество витков неизменным.

При расчете электронной схемы индуктивность иногда представляют в виде комплексного сопротивления:

$$\frac{V}{i} = j\omega L, \tag{3.45}$$

где $j = \sqrt{-1}$, а i – это синусоидальный ток с частотой $\omega = 2\pi f$. Из этого выражения видно, что комплексное сопротивление индуктора увеличивается с ростом частоты. Уравнение (3.45) называется законом Ома для индукторов. Из него видно, что ток отстает от напряжения на 90°.

Если две катушки находятся в непосредственной близости друг от друга, одна из катушек наводит э.д.с. v_2 во второй катушке:

$$v_2 = -M_{21}\frac{di_1}{dt}, \tag{3.46}$$

где M_{21} – коэффициент взаимной индуктивности двух катушек. Вычисление взаимной индуктивности является очень непростой задачей, поэтому на практике ее часто определяют экспериментально. Однако для самых простых случаев существуют формулы для ее расчета. Например, для катушки из N витков, размещенной вокруг длинного соленоида (рис. 3.15А), имеющего n витков на единицу длины, выражение для взаимной индуктивности имеет вид:

$$M = \mu_0 \pi R^2 nN. \tag{3.47}$$

А для катушки, намотанной на тороид (рис. 3.15Б), взаимную индуктивность можно найти по формуле:

$$M = \frac{\mu_0 N_1 N_2 h}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right). \tag{3.48}$$

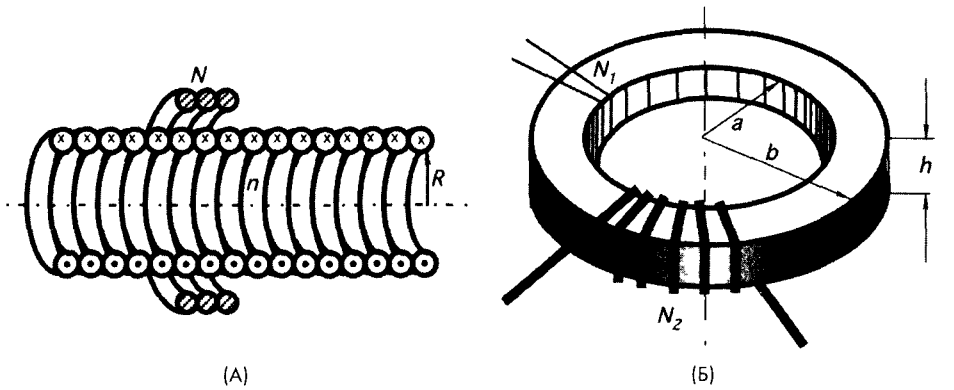


Рис. 3.15 Определение взаимной индуктивности: А – в соленоиде, Б – в тороиде

3.5. Сопротивление

В любых материалах движение электронов напоминает поведение газа в закрытом сосуде. Их общие черты: произвольное направление перемещения и одинаковая средняя концентрация электронов в любом месте (считается, что материал имеет однородную структуру). Рассмотрим стержень из произвольного материала длиной *l*. При подключении концов стержня к источнику напряжения *V* (рис. 3.16) внутри материала появится электрическое поле с напряженностью **E:**

$$E = \frac{V}{l}. \tag{3.49}$$

Пусть длина стержня равна 1 м, а напряжение источника – 1.5 В, тогда электрическое поле будет обладать напряженностью 1.5 В/м. Поле действует на свободные электроны, заставляя их двигаться против направления поля. Это означает, что через материал начинает течь электрический ток. Скорость потока электрических зарядов (количество зарядов в единицу времени) через поперечное сечение стержня называется электрическим током:

$$i = \frac{dq}{dt}. \tag{3.50}$$

В системе СИ единицей измерения электрического тока является Ампер (А): 1 А = 1 Кулон/секунду. В системе СИ ампер равен электрическому току, протекающему по двум бесконечно длинным параллельным проводникам, расположенным на расстоянии 1 м друг от друга, который создает силу, действующую на проводники (из-за появления магнитных полей вокруг них), равную 2×10^{-7} Н на каждый метр длины. Один ампер – это достаточно большая сила тока. В датчиках обычно используются гораздо меньшие токи, поэтому на практике часто применяются следующие его производные:

1 миллиампер (мА): ..... 10^{-3} А
1 микроампер (мкА): ..... 10^{-6} А
1 наноампер (нА): ..... 10^{-9} А
1 пикоампер (пА): ..... 10^{-12} А
1 фемтоампер (фА): ..... 10^{-15} А

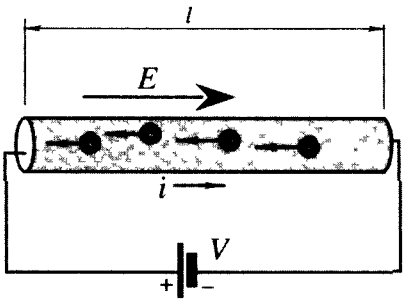


Рис. 3.16. Напряжение, приложенное к стержню, вызывает появление в нем электрического тока

Вне зависимости от поперечного сечения материала и его однородности величина тока всегда определяется только приложенным электрическим полем. Это подобно тому, как в системе последовательно соединенных трубок разного диаметра расход жидкости в любом сечении (количество жидкости, проходящей через поперечное сечение в единицу времени) будет всегда одинаковым, что означает ускорение потока в узких секциях и его замедление – в широких. Одним из фундаментальных законов физики является закон сохранения заряда, смысл которого заключается в том, что в стационарных условиях заряды в материале не могут ни возникать, ни исчезать. Другим словами, *сколько зарядов поступило, столько же должно и уйти*. В этом разделе не рассматриваются устройства, накапливающие электрические заряды (конденсаторы). Здесь речь идет о материалах, обладающих только *резистивными* свойствами.

В упрощенном виде механизм электрической проводимости можно представить следующим образом. Электропроводный материал, например, медь, моделируется в виде полужесткой упругой регулярной решетки из положительных ионов меди. Эти ионы удерживаются в решетке при помощи сильных электромагнитных сил. Каждый атом меди имеет по одному свободному электрону, способному передвигаться внутри решетки. Когда к материалу прикладывается электрическое поле $\mathbf{E}$, на каждый электрон действует сила $-e\mathbf{E}$ (e – заряд электрона). Электроны под действием этих сил начинают ускоряться. Однако, как правило, они успевают пролететь только очень короткое расстояние до столкновения с соседними атомами меди, интенсивность вибраций которых определяется температурой материала. При этом электроны передают свою кинетическую энергию решетке и часто поглощаются положительным ионом. В результате таких превращений образуется еще один свободный электрон, перемещающийся в электрическом поле до очередного столкновения с атомом меди. Среднее время между столкновениями обозначается τ. Оно зависит от типа материала, его структуры и чистоты. Например, при комнатной температуре в чистой меди электрон, обеспечивающий электропроводность материала, успевает пролететь между столкновениями среднее расстояние 0.04 мкм за время $\tau = 2.5\times10^{-14}$ с. Из этого механизма видно, что электроны, попадающие в материал со стороны отрицательного полюса источника напряжения, и электроны, втекающие в положительный полюс, не являются теми же самыми. Однако при этом через любое сечение материала проходит постоянный поток электронов. Столкновения электронов с атомами материала увеличивают внутреннюю атомную энергию, что повышает температуру вещества. Поэтому при прохождении электрического тока через резистивный материал происходит высвобождение, так называемого, Джоулева тепла.

Принято считать, что направление тока совпадает с направлением электрического поля (т.е. имеет *противоположное направление* к потоку электронов). В соответствии с этим говорят, что электрический ток течет от положительного полюса источника напряжения к отрицательному полюсу , в то время как электроны перемещаются в противоположном направлении.

3.5.1 Удельное сопротивление

Если изготовить два геометрически идентичных стержня из разных материалов (например, из меди и стекла) и приложить к ним равное напряжение, ток, протекающий по ним, не будет одинаковым. Для каждого материала есть характеристика, описывающая его способность пропускать электрический ток. Она называется *удельным сопротивлением*. При этом говорят, что материал обладает электрическим *сопротивлением*, которое можно определить по закону Ома:

$$R = \frac{V}{i}. \qquad (3\ 51)$$

Для чисто резистивных элементов (не обладающих ни емкостью, ни индуктивностью) напряжение и ток совпадают по фазе.

Любые материалы (кроме сверхпроводников, не рассматриваемых в данной книге), имеют удельное сопротивление, и поэтому называются *резисторами*. В системе СИ единицей измерения сопротивления является Ом: 1 Ом = 1 Вольту/1 Ампер. Часто применяются производные от этой единицы:

1 миллиом (мОм): ..... 10^{-3} Ом

1 килоом (кОм): ..... 10^{3} Ом

1 мегаом (МОм): ..... 10^{6} Ом

1 гигаом (ГОм) : ..... 10^{9} Ом

1 тераом (ТОм): ..... 10^{12} Ом

Если сравнить электрический ток с потоком воды, давление в трубопроводе (Па) будет соответствовать напряжению на резисторе (В), расход воды (л/с) – электрическому току (Кл/с), а сопротивление потоку воды в трубе – электрическому сопротивлению (Ом). Очевидно, что сопротивление потоку воды тем ниже, чем короче, шире и свободней трубопровод. Если в трубу установить, например, фильтр, сопротивление потоку воды существенно увеличится. Подобно этому из-за осаждения холестерина на внутренних частях сосудов ухудшается коронарный кровоток, в результате чего артериальное давление становится недостаточным для обеспечения нормального функционирования сердца, что может привести к сердечному приступу. Поведение электрических цепей подчиняется законам Кирхгофа, названным в честь немецкого физика Густава Роберта Кирхгофа (1824-1887). Первоначально эти законы были выведены для водопроводных сетей. Из вышеприведенных аналогий, очевидно, что они остались, практически, неизменными и для электрических цепей.

Сопротивление является характеристикой любого устройства. Его величина определяется как самим материалом, так и геометрией резистора. Материал, как правило, характеризуется величиной *удельного сопротивления* ρ:

$$\rho = \frac{E}{j}, \tag{3.52}$$

где j – плотность тока: $j=i/a$ (a – площадь поперечного сечения материала). В системе СИ единицей измерения удельного сопротивления является Ом×Метр. В Приложении приведены удельные сопротивления некоторых материалов. Достаточно часто используется величина, обратная удельному сопротивлению, называемая *удельной проводимостью* или *электропроводностью*: $\sigma = 1/\rho$, которая измеряется в сименсах (См).

Удельное сопротивление материала можно выразить через среднее время между столкновениями электронов с атомами вещества τ, заряд электрона e, его массу m и число электронов проводимости в единичном объеме n:

$$\rho = \frac{m}{ne^2\tau}. \tag{3.53}$$

Для нахождения сопротивления проводника можно воспользоваться следующей формулой:

$$R = \rho\frac{l}{a}, \tag{3.54}$$

где a – площадь поперечного сечения проводника, а l – его длина.

3.5.2 Температурная чувствительность

Проводимость материала зависит от изменений температуры t, и в сравнительно узком диапазоне она может быть выражена при помощи температурного коэффициента сопротивления (ТКС) α:

$$\rho = \rho_0\left[1+\alpha(t-t_0)\right], \tag{3.55}$$

где ρ_0 – удельное сопротивление материала при эталонной температуре t_0 (обычно равной либо 0°С, либо 25°С). В более широком диапазоне зависимость удельного сопротивления от температуры является нелинейной функцией.

На рис. 3.17 показано, как нелинейная зависимость удельного сопротивления вольфрама от температуры в широком диапазоне значений может быть заменена прямой линией с $\alpha = 0.0058\ °C^{-1}$, полученной методом наименьших квадратов. Такое приближение может быть использовано только для оценочных расчетов. Для случаев, где требуется большая точность, для моделирования удельного сопротивления применяют полиноминальную зависимость более высокого порядка. Например, удельное сопротивление вольфрама в широком температурном диапазона может быть найдено из уравнения второго порядка:

$$\rho = 4.45 + 0.0269t + 1.914\times10^{-6}t^2, \tag{3.56}$$

где t – температура в °С, а ρ – в Ом×м.

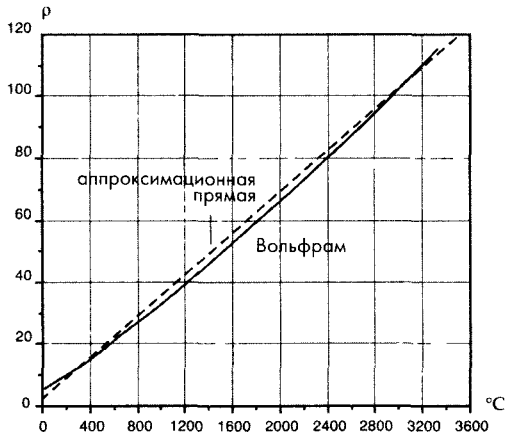


Рис. 3.17 Зависимость удельного сопротивления вольфрама от температуры

Металлы имеют положительный ТКС (ПТКС), а многие полупроводники и оксиды – отрицательный (ОТКС). Для резисторов, используемых в электронных схемах, желательно применять материалы с низким температурным коэффициентом, тогда как для построения температурных датчиков резисторы должны обладать высоким ТКС. Резистивные датчики температуры часто называются *термисторами* или *температурными детекторами* (РДТ) (раздел 16.1 главы 16). Наиболее популярным РДТ является платиновый детектор, работающий в широком температурном диапазоне: 200...600°С. Зависимость сопротивления Pt РТД от температуры показана на рис. 3.18. Для сопротивления, имеющего при температуре 0°С значение R_0, линейную зависимость, полученную методом наименьших квадратов, можно записать в виде:

$$R = R_0(1.00 + 36.79 \times 10^{-4} t), \qquad (3.57)$$

где t – температура в °С, а R – в Омах. Множитель при температуре (наклон прямой) называется чувствительностью датчика, которую можно записать как: +0.3679%/°С.

Из рисунка видна небольшая нелинейность кривой сопротивления. Если не произвести корректировку, в результатах может появиться значительная погрешность. Для получения более точной аппроксимации можно применить полиноминальную зависимость второго порядка, при этом точность станет лучше 0.01°С:

$$R = R_0\left(1 + 39.08 \times 10^{-4} t - 5.8 \times 10^{-7} t^2\right) Ом. \qquad (3.58)$$

Однако следует отметить, что коэффициенты в уравнениях (3.57) и (3.58) зависят от чистоты материалов и некоторых технологических факторов. Для сравнения точности линейной и полиноминальной аппроксимации, полученных для Pt РТД, рассмотрим следующий пример. Если Pt РТД при 0°С имел сопротивление R_0 = 100 Ом, при +150°С линейная аппроксимация позволяет получить значение:

$$R = 100(1.00 + 36.79 \times 10^{-4} \times 150) = 155.55 Ом,$$

тогда как по полиноминальной зависимости второго порядка это значение равно:

$$R = 100\left(1 + 39.08 \times 10^{-4} \times 150 - 5.8 \times 10^{-7} \times (150)^2\right) = 157.32 Ом.$$

Разница между этими значениями составляет 1.76 Ом, что эквивалентно ошибке –4.8°С при температуре +150°С.

Термисторы – это резисторы с большим значением либо положительного, либо отрицательного ТКС. Термисторы изготавливаются из керамических полупроводников, состоящих, как правило, из оксидов одного или нескольких следующих металлов: никеля, марганца, кобальта, титана, железа. Оксиды других металлов почти никогда не применяются. Сопротивления термисторов лежат в пределах от долей Ом до многих мегаОм. Термисторы бывают в форме диска, капли, трубки, пластины или тонкого слоя, нанесенного на керамическую подложку. Последние достижения в области тонкопленочных технологий позволяют изготавливать термисторы методом печатного монтажа на керамических подложках.

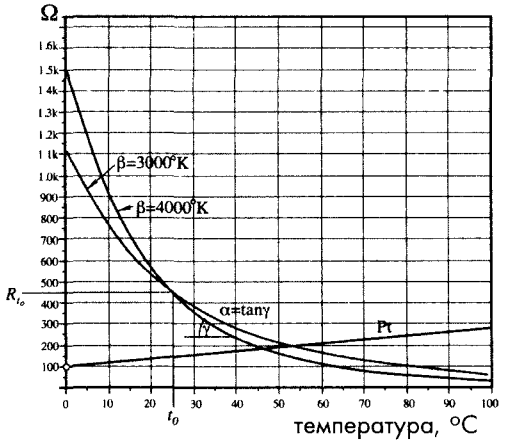


Рис. 3.18 Зависимости сопротивления от температуры для двух термисторов и Pt РТД. Термисторы откалиброваны при температуре t_0 =25°C, а РТД – при 0°C

Термисторы с отрицательным ТКС часто выполняют в форме бусинок. Обычно такие термисторы изготавливают из проводов из платины, спеченных с керамикой. Платина выбрана из-за комбинации сравнительно низкого электрического сопротивления и достаточно высокого теплового коэффициента. В процессе изготовления небольшие порции смеси оксидов металлов и соответствующего связующего вещества распределяются на паре проводов из платины, находящихся в слабом натяжении. После того как смесь равномерно осела, бусинки помещаются в печь для спекания. При этом оксиды металлов застывают вокруг проводов, формируя прочные соединения. Далее на термисторы могут быть нанесены покрытия из стекла или органических веществ.

Термисторы обладают нелинейной зависимостью сопротивления от температуры (рис. 3.18), которую можно аппроксимировать несколькими вариантами уравнений. Наиболее популярным среди них является экспоненциальное выражение:

$$R_t = R_{t0} e^{\beta(1/T - 1/To)}, \qquad (3.59)$$

где T_0 – калибровочная температура в Кельвинах, R_{t0} – значение сопротивления при температуре калибровки, а β – характеристическая температура материала, тоже в Кельвинах. Обычно β лежит в диапазоне 3000...5000 K, и в пределах узкой зоны может считаться независимой от температуры, что делает выражение (3.59) очень хорошей аппроксимацией. Если требуется более высокая точность, применяется полиноминальная аппроксимация. На рис. 3.18 показаны зависимости сопротивления от температуры для термисторов с коэффициентами β, равными 3000 и 4000K. Из рисунка видно, что Pt РТД обладает достаточно линейной температурной характеристикой с положительным наклоном, но гораздо меньшей чувствительностью по сравнению с термисторами, которые являются нелинейными устройствами с относительно высокой чувствительностью и отрицательным наклоном.

Традиционно термисторы тестируются при температуре $t_0 = 25°C$ ($T_0 = 298.15$ K), а РТД – при $t_0 = 0°C$ ($T_0 = 273.15$ K).

3.5.3 Тензочувствительность

Обычно при механической деформации материала его электрическое сопротивление изменяется. Это явление называется *пьезорезистивным эффектом*. С одной стороны, в некоторых случаях этот эффект является причиной возникновения погрешностей. С другой стороны, на его основе можно реализовать тензодатчики, реагирующие на механическое напряжение σ:

$$\sigma = \frac{F}{a} = E\frac{dl}{l}, \tag{3.60}$$

где E – модуль Юнга материала, а F – приложенная сила. В этом уравнении отношение $dl/l = e$ называется относительной *деформацией* материала.

На рис. 3.19 показан цилиндрический проводник (провод), растянутый при помощи силы F. Объем провода v остается постоянным, тогда как его длина увеличивается, а площадь поперечного сечения уменьшается. В результате уравнение (3.54) может быть переписано в виде:

$$R = \frac{\rho}{v}l^2 . \tag{3.61}$$

После дифференцирования получим выражение для определения чувствительности сопротивления к удлинению провода:

$$\frac{dR}{dl} = 2\frac{\rho}{v}l . \tag{3.62}$$

Из этого выражения можно сделать вывод, что чувствительность повышается при увеличении длины провода и его удельного сопротивления, а также при уменьшении поперечного сечения. Относительное изменение сопротивления провода является линейной функцией от деформации e и может быть выражено в виде:

$$\frac{dR}{R} = S_e e , \tag{3.63}$$

где S_e – *коэффициент тензочувствительности* или *чувствительность тензоэлемента*. Для металлических проводов он лежит в пределах 2...6, а для полупроводников – 40...200.

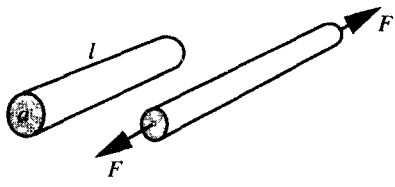


Рис. 3.19 Механическое напряжение приводит к изменению геометрии проводника и его сопротивления

Самыми первыми тензоэлементами были металлические нити, расположенные на диэлектрической пленке. В настоящее время они изготавливаются из фольги из константана (сплава меди и никеля) или монокристаллических полупроводниковых материалов (например, кремния, легированного бором). Для придания элементамм нужной формы используют методы либо механической обработки, либо фотохимического травления. При механическом воздействии на полупроводниковый тензоэлемент величина изменения его сопротивления определяется либо типом материала, либо концентрацией примеси (см. раздел 9.1 главы 9). Однако чувствительность полупроводниковых тензодатчиков довольно сильно зависит от температуры, что при работе в широком температурном диапазоне требует проведения соответствующей компенсации.

3.5.4 Влагочувствительность

При выборе материала для резистора необходимо учитывать его удельное сопротивление и восприимчивость к факторам окружающей среды. Одним из таких факторов является количество влаги, поглощаемое резистором. На основе гигроскопичных материалов, удельное сопротивление которых сильно зависит от концентрации поглощенных молекул воды, можно построить резисторы, реагирующие на изменение влажности. Такие резисторы применяются в резистивных датчиках влажности и называются *гигристорами*. Типовой гигристор состоит из подложки, на которую методом трафаретной печати нанесены два встречно-штыревых электрода, покрытые гигроскопичным электропроводным полупроводниковым гелем (рис. 3.20А). Гель, как правило, состоит из гидроксиэтилцеллюлозы, нонилфенилполиэтиленгликольэфира и других органических веществ с не менее экзотичными названиями с добавлением углеродного порошка[2]. Этот гель тщательно перемешивается до образования однородной массы. Другой тип гигристоров изготавливается из пленки из хлорида лития (LiCl) и связующего вещества. Подложка датчика погружается в гель с контролируемой скоростью до тех пор,

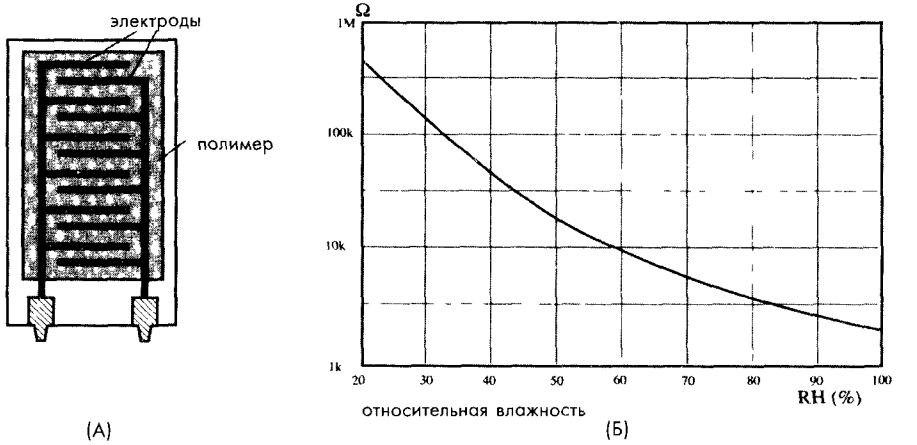


Рис. 3.20 А – схема гигристора, Б – его передаточная функция

пока гель не заполнит все пространство между электродами. Подложки с нанесенным покрытием подвергаются термоотверждению, проводимому при определенной температуре и влажности. Зависимость сопротивления гигристоров от влажности имеет нелинейный характер (рис. 3.20Б), что необходимо учитывать при проведении калибровки и обработки результатов измерений.

3.6. Пьезоэлектрический эффект

Пьезоэлектрический эффект заключается в образовании в кристаллическом материале электрических зарядов при приложении к нему механических напряжений. Этот эффект наблюдается в природных кристаллах, таких как кварц (химическая формула SiO_2), поляризованных керамических материалах и некоторых полимерах, например, в поливинилиденфториде. Говорят, что пьезоэлектрические материалы обладают ферроэлектрическими свойствами. Слово *пьезо* происходит из греческого *piezen*, означающего давление. Братья Кюри открыли пьезоэлектрический эффект в кварце еще в 1880 году, но долгое время это открытие не имело почти никакого практического применения. Только в 1917 году французский профессор П. Ланжевин использовал x-срез кварцевой пластины для возбуждения и детектирования звуковых колебаний в воде. Его открытие привело к созданию гидролокатора.

В 1927 году А. Мейснер [3] предложил упрощенную модель для объяснения пьезоэлектрического эффекта. Кристалл кварца в этой модели представлен в виде элементарных ячеек, состоящих из атомов Si и спаренных атомов O_2 (рис. 3.21). Кварцевый кристалл имеет срезы вдоль осей x, y и z. На рис. 3.21 показано поперечное сечение вдоль оси z. В элементарную монокристаллическую ячейку входят три атома кремния и шесть атомов кислорода. Каждый атом кремния обладает четырьмя положительными зарядами, а каждая пара атомов кислорода – четырьмя отрицательными (по два на атом). Поэтому без приложения механических напряжений кварцевая ячейка является электрически нейтральной. Когда вдоль оси x прикладывается внешняя сила F_x, кристаллическая решетка деформируется. На рис. 3.21Б показано, как сдавливающая сила сдвигает атомы кристалла таким образом, что положительный атом кремния перемещается на одну сторону решетки, а отрицательно заряженная пара атомов кислорода – на другую. В результате чего вдоль оси y наблюдается перераспределение зарядов. Если кристалл растянуть вдоль оси x (рис. 3.21В), в результате деформации растяжения заряды перераспределятся вдоль оси y в противоположном направлении. Эта упрощенная модель показывает, как на поверхности кристаллического материала могут образовываться электрические заряды в ответ на приложенное механическое воздействие. Подобное объяснение может быть дано пироэлектрическому эффекту, описанному в этом же разделе.

Для сбора электрических зарядов к кристаллу на противоположных сторонах от среза прикрепляют электроды (рис. 3.22). Построенный таким образом пьезоэлектрический датчик можно считать конденсатором, в котором в качестве диэлектрика выступает сам кристалл, работающий как генератор электрических зарядов, приводящих к появлению электрического напряжения V на электродах. Хотя заряд формируется только в местах приложения силы, металлические электроды выров-

нивают заряды вдоль всей их поверхности, лишая конденсатор избирательности. Однако, если форму электродов усложнить, можно определить точное место приложения внешней силы, детектируя сигналы с конкретных электродов.

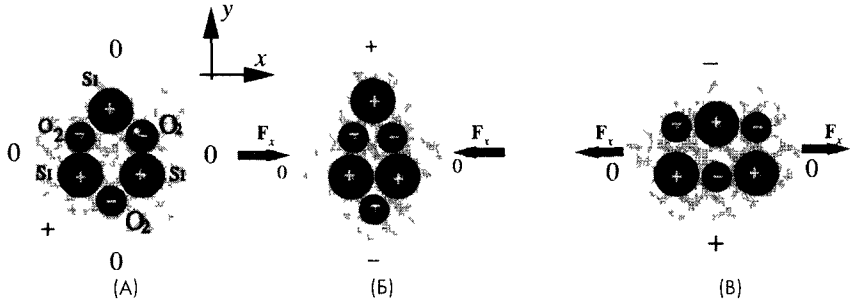


Рис. 3.21 Пьезоэлектрический эффект кварцевого кристалла

Пьезоэлектрический эффект является обратимым физическим явлением Это означает, что приложенное к кристаллу электрическое напряжение приводит к появлению механической деформации Если разместить на кристалле несколько электродов и на одну пару из них подать напряжение, на остальных парах электродов будет накапливаться заряд, сформированныи из-за возникшеи деформации Такой прием достаточно широко применяется в разных типах пьезоэлектрических преобразователей

Пьезоэлектрический эффект можно оценить через вектор поляризации [4]

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_{xx} + \mathbf{P}_{yy} + \mathbf{P}_{zz}, \qquad (3\ 64)$$

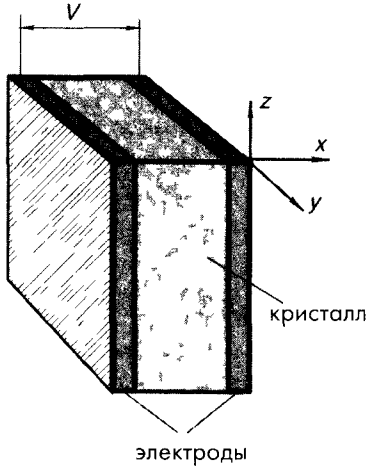


Рис. 3.22 Пьезоэлектрическии датчик, сформированныи при помощи электродов, нанесенных на поляризованныи кристалл

где x, y и z – координатные оси обычной ортогональной системы, совмещенные с осями кристалла Слагаемые этого выражения определяются в следующем виде (более полные формулы включают в себя также напряжение сдвига и соответствующие d-коэффициенты)·

$$\begin{aligned}
\mathbf{P}_{xx} &= d_{11}\sigma_{xx} + d_{12}\sigma_{yy} + d_{13}\sigma_{zz},\\
\mathbf{P}_{yy} &= d_{21}\sigma_{xx} + d_{22}\sigma_{yy} + d_{23}\sigma_{zz},\\
\mathbf{P}_{zz} &= d_{31}\sigma_{xx} + d_{32}\sigma_{yy} + d_{33}\sigma_{zz},
\end{aligned} \qquad (3\ 65)$$

где σ – осевое напряжение, d_{mn} – постоянные пьезоэлектрические коэффициенты вдоль ортогональных осей срезов кристалла Эти коэффициенты имеют размерность Кулон/Ньютон, т е единичный заряд на единицу силы

Для удобства вычислений были введены две дополнительные единицы. Первая из них называется g-коэффициентом и определяется как отношение соответствующей пьезоэлектрической константы и абсолютной диэлектрической постоянной:

$$g_{mn} = \frac{d_{mn}}{\varepsilon_0 \varepsilon_{mn}}. \tag{3.66}$$

Этот коэффициент показывает градиент напряжения на кристалле на каждую единицу приложенного давления. Его размерность:

$$\frac{Вольт}{метр} / \frac{Ньютон}{метр^2}.$$

Другой коэффициент, h, представляет собой произведение g-коэффициента на соответствуюший модуль Юнга для каждой оси кристалла. Его размерность:

$$\frac{Вольт}{метр} / \frac{метр}{метр}.$$

Пьезоэлектрические кристаллы являются прямыми преобразователями механической энергии в электрическую. Эффективность такого преобразования может быть выражена через, так называемый, *коэффициент связи* $к_{mn}$:

$$k_{mn} = \sqrt{d_{mn} h_{mn}}. \tag{3.67}$$

Эти коэффициенты являются очень важными характеристиками для случаев, где необходимо обеспечивать высокую эффективность передачи энергии, например, в акустических и ультразвуковых датчиках.

Величина заряда, генерируемого на поверхности пьезоэлектрического кристалла, пропорциональна силе, приложенной, например, в направлении оси x:

$$Q_x = d_{11} F_x. \tag{3.68}$$

Кристалл с нанесенными на него электродами представляет собой конденсатор, обладающий емкостью C. Напряжение на этом конденсаторе определяется следующим выражением:

$$V = \frac{Q_x}{C} = \frac{d_{11}}{C} F_x. \tag{3.69}$$

В свою очередь, емкость может быть представлена (см. уравнение 3.23) через площадь поверхности электрода a и толщину кристалла l (здесь учитывается площадь электродов, а не самого кристалла, поскольку пьезоиндуцированный заряд накапливается только на них):

$$C = k\varepsilon_0 \frac{a}{l}, \tag{3.70}$$

где ε_0 – электрическая постоянная, а κ – диэлектрическая проницаемость. Тогда выражение для напряжения принимает вид:

$$V = \frac{d_{11}}{C} F_x = \frac{d_{11}}{k\varepsilon_0 a} F_x. \tag{3.71}$$

Производство керамических пьезодатчиков из титаната цирконата свинца (PZT) начинается с подготовки порошков оксидов металлов очень высокой чистоты (оксида свинца, оксида циркония, оксида титана и др.). Порошки измельчаются до требуемого состояния и тщательно перемешиваются в строго определенной химической пропорции. В процессе прокаливания, проходящего при достаточно высокой температуре, компоненты полученной смеси вступают в реакцию друг с другом, образуя порошок, каждое зерно которого по химическому составу близко к требуемой композиции. Но на этой стадии порошок не имеет еще необходимой кристаллической структуры.

Следующий технологический этап – смешение прокаленного порошка с твердыми и/или жидкими органическими связующими компонентами (которые должны быть выжжены в процессе обжига) и построение из полученной смеси структуры, близкой по форме реализуемому сенсорному элементу. Для этого разработано несколько методов. Перечислим некоторые из них: прессование при помощи гидравлического пресса, литье (заливка вязких жидкостей в специальные формы и их отверждение), выдавливание через специальную форму или прокат через пару круглых валов для получения тонких листов и ленточное литье (нанесение вязких составов на гладкую движущуюся ленту).

После этого сформированная структура помещается в печь для обжига, который проводится под строгим температурным контролем. В результате этой процедуры все органические связующие компоненты выжигаются, а объем уменьшается приблизительно на 15%. Далее материал нагревается до температуры красного каления и поддерживается в этом состоянии некоторое время, называемое периодом выдержки, во время которого происходят окончательные химические реакции. После охлаждения материала кристаллическая структура считается сформированной. В зависимости от типа материала полное время температурной обработки может составлять порядка 24 часов. Далее на поверхность полученной структуры необходимо нанести контактные электроды. Это можно сделать несколькими методами. Наиболее распространенными способами являются: трафаретная печать при помощи смеси серебра и стекла с повторным обжигом, нанесение покрытия методом химического восстановления в специальных реакторах и напыление (обработка парами металлов в условиях низкого вакуума).

Кристаллиты (кристаллические элементарные ячейки) материала могут рассматриваться как электрические диполи. В некоторых материалах, таких как кварц, эти ячейки обычно ориентированы вдоль осей кристалла, поэтому такие структуры обладают достаточно высокой чувствительностью к механическому напряжению. В других материалах диполи ориентированы произвольным образом, и для того, чтобы такие структуры проявили свои пьезоэлектрические свойства, их необходимо предварительно поляризовать. Существуют несколько технологий поляризации.

Самой популярной из них считается тепловая поляризация, которая состоит из следующих этапов:

1. Кристаллический материал (керамическая или полимерная пленка), в котором диполи имеют произвольную ориентацию, медленно нагревается до температуры, не превышающей точку Кюри. Некоторые типы материалов (например, пленки из поливинилидин фторида (PVDF)) необходимо привести в напряженное состояние. Высокая температура приводит к возбуждению диполей, что помогает сравнительно легко их переориентировать в требуемом направлении.

2. Материалы помещаются в сильное электрическое поле **E** (рис. 3.23Б), в котором диполи выстраиваются вдоль силовых линии. При этом не происходит полного выравнивания, и многие диполи отклоняются от направления поля. Однако достигается статистически преобладающая одинаковая ориентация диполей

3. Материал охлаждается при одновременном воздействии на него электрического поля.

4 После охлаждения материала до требуемой температуры, электрическое поле устраняется, и процесс поляризации считается законченным. Пока поляризованный материал находится при температуре ниже температуры Кюри, он сохраняет свои поляризационные свойства Диполи поддерживают ориентацию, полученную при высокой температуре в электрическом поле (рис 3 23В).

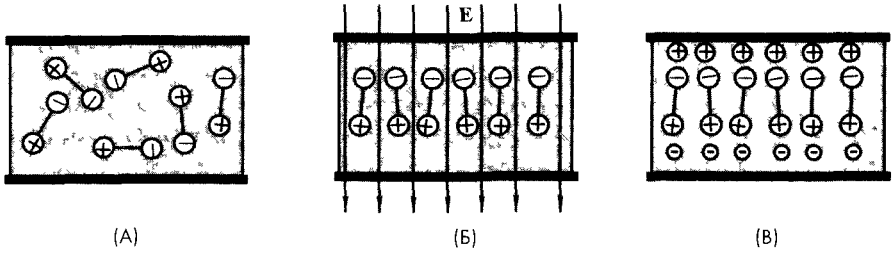


Рис. 3.23. Тепловая поляризация пьезоэлектрических и пироэлектрических материалов

Другим методом поляризации является метод коронного разряда, применяемый при производстве полимерных пьезо/пироэлектриков Полимерная пленка подвергается воздействию коронного разряда Величина разряда достигает несколько миллионов вольт на сантиметр толщины пленки, и его действие продолжается 40-50 секунд [5, 6] Это достаточно простои способ поляризации, который может проводиться при комнатной температуре.

Последними операциями при изготовлении чувствительного элемента являются придание ему требуемой формы и чистовая обработка, которые включают себя обрезку, механическую обработку и шлифование. По окончании последних процедур обработки чувствительный пьезо (пиро) элемент вставляется в корпус датчика, где его электроды соединяются с электрическими выводами и другими электронными компонентами.

После поляризации кристаллы становятся постоянно поляризованными, но электрически заряженными они остаются только сравнительно короткий промежуток

времени. Это объясняется тем, что в окружающей среде находится много заряженных ионов, а также достаточное количество свободных носителей зарядов содержится внутри самого материала, которые могут передвигаться под действием электрического поля, и эти свободные заряды, приближаясь к соответствующим концам диполей, нейтрализуют их (рис. 3.23В). Поэтому вскоре поляризованный пьезоматериал становится электрически разряженным и удерживается в этом состоянии в течение всего времени, пока находится в стационарных условиях. Однако когда к материалу прикладывается механическое напряжение, или он начинает обдуваться ветром (см. раздел 10.7 главы 10), состояние равновесия нарушается и на поверхности пьезоэлектрика появляется электрический заряд. Если механическое напряжение будет поддерживаться некоторое время, заряды в материале опять нейтрализуются за счет внутренних утечек. Таким образом, можно сделать вывод, что пьезоэлектрические сенсоры являются чувствительными только к изменениям тензоусилий, а не к их постоянному уровню. Другими словами, пьезоэлектрические датчики – это устройства переменного, а не постоянного тока.

Направленная чувствительность пьезоэлектриков (d-коэффициенты) зависит от температуры. Для некоторых материалов (например, кварца) чувствительность падает с ростом температуры со скоростью –0.016%/°С. Для других пьезоэлектриков таких как пленки PVDF и керамики, при температурах до 40°С d-коэффициенты уменьшаются, а при более высоких температурах – растут. В настоящее время самыми популярными материалами для изготовления пьезоэлектрических датчиков являются разные типы керамики [7-9]. Одним из самых первых ферроэлектрических керамических материалов был титанат бария, обладающий поликристаллической структурой и следующей химической формулой: $BaTiO_3$. Стабильность поляризации обеспечивается за счет действия коэрцитивных сил диполей. В некоторых материалах с течением времени происходит уменьшение поляризации. Для снижения этого эффекта в основной материал вводятся дополнительные добавки, цель которых заключается в «запирании» диполей в определенном положении [4]. И пьезоэлектрическая константа, и диэлектрическая проницаемость материала κ зависят от рабочей температуры. Поскольку эти величины входят в формулу (3.71): одна в числитель, другая в знаменатель, их изменения будут взаимно уничтожаться, что приведет к повышению стабильности выходного напряжения V в широком температурном диапазоне.

Пьезоэлектрические элементы могут использоваться либо в форме монокристалла, либо в виде многослойной структуры, в которой отдельные пластины соединяются вместе при помощи электродов, размещенных между ними. На рис. 3.24 показан двухслойный датчик силы. Когда к этому датчику прикладывается внешняя сила, одна из его частей расширяется, в то время как другая сжимается, что при корректном включении приводит к удвоению выходного сигнала. Двойные сенсоры могут включаться либо параллельно, как показано на рис. 3.25А, либо последовательно – рис. 3.25В. Электрическая эквивалентная схема пьезоэлектрического датчика представляет собой параллельное соединение сопротивления утечки r, емкости C и источника тока i, индуцированного механическим напряжением. В зависимости от типа соединения слоев эквивалентные схемы сдвоенных датчиков будут соответствовать рис. 3.25Б и рис. 3.25Г. Сопротивление утечки, как правило, является очень большим (порядка 10^{12}-10^{14} Ом),

это значит, что датчик обладает чрезвычайно высоким выходным импедансом. Поэтому для согласования с последующими электронными цепями необходимо использовать специальные интерфейсы, представляющие собой преобразователи заряда/гока в напряжение или усилители напряжения, имеющие высокие входные сопротивления.

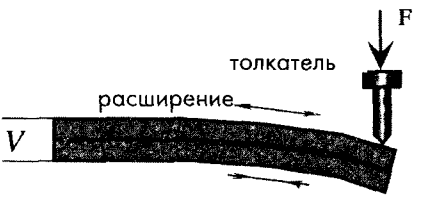


Рис. 3.24 Двухслойный пьезоэлектрический датчик

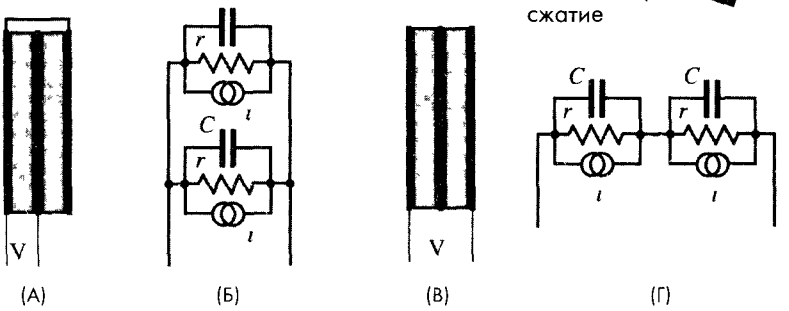


Рис. 3.25 Параллельное (А) и последовательное (В) соединения слоев в пьезоэлектрическом датчике и их соответствующие эквивалентные схемы (Б и Г)

3.6.1 Пьезоэлектрические пленки

В 1969 году японский ученый Каваи обнаружил сильный пьезоэлектрический эффект в PVDF пленках, а в 1975 году кампания Pioneer, Ltd выпустила первые громкоговорители и наушники, реализованные на основе PVDF [10]. PVDF – это полукристаллический полимер, степень кристаллизации которого составляет 50% [11]. Подобно другим полукристаллическим полимерам PVDF представляет собой слоевую структуру с аморфными зонами. Его химическая формула состоит из

повторяющихся звеньев CF_2-CH_2: $\left[\begin{array}{cc} H & F \\ C & C \\ H & F \end{array}\right]_n$.

Молекулярный вес PVDF равен около 10^5, что соответствует порядка 2000 повторяющихся звеньев. Пленка является практически прозрачной в видимом и ближнем ИК (инфракрасном) диапазонах и поглощает излучение дальней ИК области электромагнитного спектра. Ее плотность равна около 1780 кг/м^3. PVDF является механически прочным и гибким материалом. Для применения в пьезодатчиках

эту пленку обычно вытягивают в одном или сразу двух направлениях так, чтобы ее размеры увеличились в несколько раз. Коэффициенты упругости (такие как модуль Юнга) определяются величиной растяжения. Например, если пленка была растянута при температуре 140°С до соотношения 4:1, ее модуль Юнга равен 2.1 ГПа, а если до соотношения 6.8:1, модуль составляет 4.1 ГПа. Удельное сопротивление пленки зависит от величины ее относительного удлинения. Например, при небольшом удлинении удельное сопротивление равно 6.3×10^{15} Ом×см, в то время как при степени растяжения 7:1, оно составляет 2×10^{16}Ом×см.

Хотя пьезоэлектрические коэффициенты пленки из PVDF не такие высокие как у некоторых других пьезоматериалов, например, у $BaTiO_3$ и PZT, они обладают уникальным свойством сохранять поляризацию даже при воздействии на них очень сильных переменных электрических полей. Это означает, что, несмотря на то, что значение d_{31} пленки из PVDF почти в 10 раз меньше, чем у PZT, ее максимальная деформация может быть на порядок больше, чем у того же PZT, поскольку для PVDF предельно допустимая величина электрического поля в 100 раз превышает аналогичную характеристику для PZT. К тому же пленки из PVDF обладают очень хорошей временной стабильностью: при хранении при температуре 60°С они теряют за шесть месяцев только около 1-2% чувствительности.

В Приложении приведены сравнительные характеристики различных пьезоэлектрических материалов. Другим преимуществом пьезопленок над пьезокерамикой является их низкий акустический импеданс, который по значению близок к воде, человеческим тканям и другим органическим материалам. Например, акустический импеданс пьезопленки отличается от импеданса воды только в 2.6 раз, в то время как для пьезокерамики он, как правило, в 11 раз больше. Близкие значения импедансов позволяют осуществлять более эффективную передачу акустических сигналов в воде и тканях.

Пьезоэлектрические пленки обладают следующими уникальными свойствами:

- Широким частотным диапазоном: 0.001...10^9 Гц
- Большим динамическим диапазоном: 10^{8}...10^6 psi (фунтов на квадратный дюйм) или от мкТорр до Мбар
- Низким акустическим импедансом: близким к воде, человеческим тканям и клеевым составам
- Высокой упругой податливостью
- Высоким выходным напряжением: в 10 раз выше, чем у пьезокерамики при одинаковых приложенных силах
- Высокой электрической прочностью диэлектрика: выдерживают поля до 75 В/мкм, при которых большинство пьезокерамических материалов теряют поляризацию
- Высокой механической прочностью и ударостойкостью: 10^9...10^{10} пределов прочности
- Высокой стабильностью: устойчивостью к влажности (влагопоглощение менее 0.02%), большинству химических реактивов, окислителям, мощному ультрафиолетовому (УФ) и ядерному излучениям
- Из них можно получать структуры произвольной формы
- Их можно соединять обычными клеями.

В таблице 3.1 приведены основные свойства пьезоэлектрических пленок:

Таблица 3.1. Основные свойства пьезоэлектрических пленок

Обозначение	Параметр		PVDF	Сополимер	Единицы измерения
t	Толщина		9, 28, 52, 110	<1 1200	мкм
d_{31}	Пьезоэлектрические коэффициенты деформации		23	11	$10^{12}\frac{м/м}{В/м}$ или $\frac{Кл/м^2}{Н/м^2}$
d_{33}			-33	-38	
g_{31}	Пьезоэлектрические коэффициенты напряжений		216	162	$10^{3}\frac{В/м}{Н/м^2}$ или $\frac{м/м}{Кл/м^2}$
g_{33}			-330	-542	
κ_{31}	Электромеханические коэффициенты связи		12%	20%	
κ_t			14%	25-29%	
C	Емкость		380 при 28 мкм	68 при 100мкм	пФ/см^2 при 1 кГц
Y	Модуль Юнга		2-4	3-5	10^9 Н/м^2
V_0	Скорость звука	относительное удлинение	1 5	2 3	10^3 м/с
		толщина	2 2	2 4	
p	Пироэлектрический коэффициент		30	40	10^6 Кл/(м^2·°K)
ε	Диэлектрическая проницаемость		106-113	65-75	10^{12}Ф/м
$\varepsilon/\varepsilon_0$	Относительная диэлектрическая проницаемость		12-13	7-8	
ρ_m	Плотность массы		1 78	1 82	10^3 кг/м
ρ_e	Объемное удельное сопротивление		>10^{13}	>10^{14}	Ом·м
R	Удельное сопротивление металлизированной поверхности		<3 0	<3 0	Ом/площадь для NiAl
R			0 1	0 1	Ом/площадь для Ag красителей
$\tan\delta_e$	Тангенс угла потерь		0 02	0 015	1 кГц
	Предел текучести		45-55	20-30	10^6 Н/м^2 (осевое растяжение)
	Температурный диапазон		40 100(80)	40 145(115)	°C
	Влагопоглощение		<0 02	<0 02	%H_2O
	Максимальное рабочее напряжение		750(30)	750(30)	В/мил(В/мкм), постоянное напряжение, 25°C
	Напряжение пробоя		2000(80)	2000(80)	В/мил(В/мкм), постоянное напряжение, 25°C

Источник [12]

Как и другие ферроэлектрические материалы PVDF также обладает пироэлектрическими свойствами (см. раздел 3.7), т.е. на его поверхности образуется электрический сигнал в ответ на изменение температуры. Пленки из PVDF сильно поглощают ИК лучи в диапазоне длин волн 7...20 мкм. Этот диапазон соответствует спектру длин волн, излучаемых человеческим телом. Однако, несмотря на то, что сами пленки из PVDF могут поглощать тепловое излучение, в пироэлектрических датчиках они располагаются между двумя тонкими электродами, которые иногда довольно сильно отражают волны интересующего диапазона. В таких случаях электрод, расположенный ближе к источнику тепловых излучений, либо покрывают теплопоглощающим слоем, либо изготавливают из нихрома (сплава, обладающего высокой поглощающей способностью). На основе пленок из PVDF реализуют датчики перемещения людей, а также пироэлектрические датчики для более сложных устройств, таких как видеокамеры для ночного наблюдения и лазерные копировальные приборы. Не так давно была представлена ИК матрица на основе PVDF пленки, позволяющая идентифицировать отпечатки пальцев, использующая пироэффект, присущий полимерам. Новые сополимеры PVDF, разработанные в последние годы, нашли широкую сферу применения в пьезоэлектрических полимерных датчиках. Такие сополимеры используются при более высоких температурах (135°C), и из них можно получать новые формы датчиков: цилиндрические и полусферические. Из них можно изготавливать сенсоры, толщина которых превышает предельные значения для устройств на основе PVDF пленок: например, кремниевые датчики с ультратолстым (200 Å) покрытием и гидролокаторы с цилиндром, толщина стенок которого превышает 1200 мкм. Пьезоэлектрические кабели также реализуют из сополимеров.

В отличие от пьезокерамических преобразователей датчики на основе пьезоэлектрических пленок обладают более широкими динамическим и частотным диапазонами. Широкая полоса частот (практически от 0 до 2 ГГц) и низкая добротность могут быть объяснены мягкостью, присущей полимерам. В передатчиках звуковых сигналов пленочный пьезоэлемент, зафиксированный на двух концах, вибрирует на частоте, определяемой коэффициентом d_{31}. Такие датчики нашли широкое применение в ультразвуковой технике, работающей на частотах до 50 кГц. При использовании в ультразвуковых передатчиках (частота более 500 кГц) частота пьезодатчиков определяется коэффициентом d_{33}. Максимальный коэффициент передачи достигается на частоте резонанса по толщине. Основной полуволновой резонанс пленочного пьезоэлектрического сенсора толщиной 28 мкм наступает на частоте порядка 40 МГц. Частота резонанса всегда зависит от толщины пленки: она меняется от единиц МГц для толстых пленок (≈1000 мкм) до >100 МГц для тонких пленок (порядка мкм).

Датчики на пьезоэлектрических пленках имеют и ряд ограничений. Они обладают довольно слабым электромеханическим коэффициентом связи по сравнению с пьезокерамическими сенсорами, особенно на частоте резонанса и на низких частотах. Пленки из сополимеров могут использоваться и храниться при температурах, не превышающих 135°C, а PVDF пленки рекомендуется использовать при температурах до 100°C. Как только на пленку нанесены электроды, полученный сенсор становится чувствительным к электромагнитному излучению. Для защиты устройств от высокочастотных электромагнитных помех и от радиочастотных шумов необходимо применять методы экранирования. Из таблицы 3.1 и Приложения

видно, что пьезоэлектрические пленки обладают низкой плотностью, отличной чувствительностью и механической прочностью. Упругая деформация пьезопленок в 10 раз превышает аналогичную характеристику керамики. Пьезоэлектрические полимеры могут напрямую прикрепляться к тонкопленочным структурам, не мешая их механическому перемещению. Пьезопленки годятся для применения в датчиках деформации, которые должны обладать высокой чувствительностью в широком частотном диапазоне. Низкий акустический импеданс полимеров позволяет изготавливать преобразователи, эффективно передающие энергию в широкой полосе частот воздуху и другим газам.

В миниатюрных полупроводниковых датчиках пьезоэлектрический эффект является основным средством преобразования механической деформации в электрические сигналы и наоборот. Однако этот эффект применим для преобразования переменных входных сигналов и не годится для стационарных и медленно меняющихся внешних воздействий.

Поскольку кремний сам по себе не обладает пьезоэлектрическими свойствами, ему можно их придать при помощи нанесения кристаллических слоев пьезоматериалов. Для этой цели чаще всего используются следующие материалы: оксид цинка (ZnO), нитрид алюминия (AlN) и PZT ($Pb(Zr,Ti)O_3$). Для построения обычных пьезоэлектрических датчиков, в основном, применяются те же материалы.

Оксид цинка обладает не только пьезоэлектрическими свойствами, он также является пироэлектриком. Он часто используется для построения ультразвуковых акустических датчиков, устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ), микровесов и т.д. Основным достоинством оксида цинка является простота химического травления. ZnO часто наносится на кремний методом напыления.

Нитрид алюминия считается отличным пьезоэлектрическим материалом, благодаря высокой акустической проводимости и устойчивости к влажности и высокой температуре. Его пьезоэлектрический коэффициент несколько ниже, чем у оксида цинка, но выше, чем у других тонкопленочных пьезоматериалов, за исключением керамики. Акустические свойства нитрида алюминия позволяют использовать его в гигагерцовом частотном диапазоне. Тонкие пленки из AlN обычно изготавливаются по технологии химического осаждения из газовой фазы или методом реактивной эпитаксии. Недостаток этих способов – высокая температура нагрева подложки (до 1300°C).

Тонкие пленки из PZT обладают большим пьезоэлектрическим коэффициентом, чем AlN и ZnO, что делает их перспективными для использования в детекторах теплового излучения. Для формирования слоев из PZT существует большое количество методов, среди которых можно назвать электролучевое распыление [13], радиочастотное напыление [14], ионное осаждение [15], эпитаксиальное выращивание [16], магнетронное напыление [17], лазерное распыление [18] и золь-гелевая технология [19].

3.7. Пироэлектрический эффект

Пироэлектрики – это материалы с кристаллической структурой, в которых при воздействии на них тепловым потоком появляются электрические заряды. Пироэлектрический эффект очень близок к пьезоэлектрическому эффекту. Поэтому многое из того, что было изложено в предыдущем разделе, справедливо и для пироэлектриков.

Подобно пьезоэлектрикам пироэлектрики используются в виде тонких пленок, с противоположных сторон которых нанесены электроды для сбора индуцированных теплом зарядов (рис. 3.26). Пироэлектрический детектор можно представить в виде конденсатора, электрически заряжающегося от потока тепла. Такой датчик не нуждается ни в каких внешних сигналах возбуждения, ему только требуется соответствующая интерфейсная электронная схема для измерения заряда. В отличие от термопар (термоэлектрических устройств), на выходе которых появляется постоянное напряжение, когда два спая различных металлов находятся при стационарной, но разной температуре (см. раздел 3.9), в пироэлектриках формируется заряд в ответ на *изменение* температуры. Поскольку изменение температуры происходит при перемещении тепловых волн, пироэлектрические устройства являются детекторами *потока* тепла. Их иногда называют динамическими датчиками, что соответствует их физической природе. Когда пироэлектрический кристалл подвергается воздействию потока тепла (например, от источника ИК излучения), его температура повышается, и он также становится источником тепла. Поэтому с противоположной стороны кристалла возникает отток тепла, как показано на рис. 3.26.

Считается, что кристалл обладает пироэлектрическими свойствами, если при изменении температуры в нем появляется спонтанная поляризация. 21 из 32 типов кристаллов не обладают симметрией относительно центра, и только 10 из них проявляют пироэлектрические свойства. В дополнение к пироэлектрическим свойствам все эти кристаллы в той или иной степени являются пьезоэлектриками, т.е. в них появляются заряды в ответ на механическое напряжение.

Пироэлектричество было открыто в кристаллах турмалина еще в 18 веке (хотя есть сведения, что греки заметили этот эффект на 23 века раньше). Позже, в 19 веке, для изготовления пироэлектрических датчиков использовались кристаллы сегнетовой соли. После 1915 года в качестве пироэлектриков стали применяться следующие материалы: KDP (KH_2PO_4), ADP ($NH_4H_2PO_4$), $BaTiO_3$ и композиции $PbZrO_3$ и $PbTiO_3$, известные как PZT. В настоящее время известно более 1000 материалов, обладающих свойством обратимой поляризации. Они называются ферроэлектрическими кристаллами. Самыми интересными из них считаются триглицин сульфат (TGS) и танталат лития ($LiTaO_3$). В 1969 году ученый Каваи обнаружил, что неко-

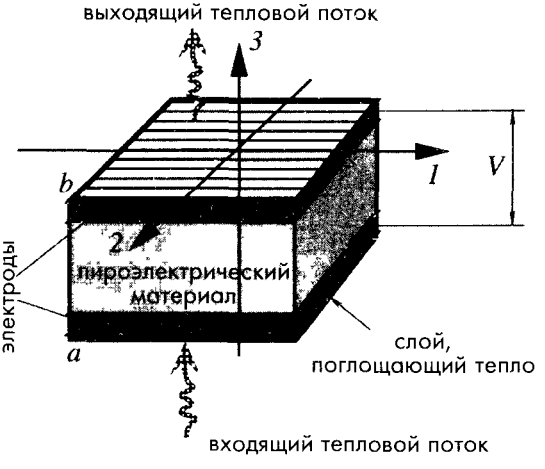


Рис. 3.26 Пироэлектрический датчик имеет два электрода, расположенных на противоположных сторонах кристалла. Тепло поступает снизу вдоль оси 3 и оттекает

торые пластмассы, например, поливинил фторид (PVF) и поливинилидин фторид (PVDF) [20], обладают сильными пьезоэлектрическими свойствами. Также оказалось, что эти материалы также являются и пироэлектриками.

Любой пироэлектрик можно представить в виде композиции большого числа кристаллитов, каждый из которых ведет себя как маленький электрический диполь. Все эти диполи имеют произвольную ориентацию (рис. 3.23А). При температуре, превышающей *точку Кюри*, у кристаллитов нет дипольного момента. Изготовление пироэлектриков аналогично производству пьезоэлектриков (см. раздел 3.6).

Существует несколько механизмов, объясняющих почему изменение температуры приводит к возникновению пироэлектричества. Изменение температуры может привести к удлинению или укорачиванию отдельных диполей. На ориентацию диполей может повлиять их возбуждение от повышения температуры. Эти явления получили название *первичного* пироэлектричества. Существует также *вторичное* пироэлектричество, которое в упрощенном виде можно считать следствием пьезоэлектрического эффекта (например, возникновение напряжения в материале из-за теплового расширения). На рис. 3.26 показан пироэлектрический датчик, имеющий одинаковую температуру T_0 в любой точке объема. Будучи электрически поляризованными, диполи ориентированы так, что одна сторона материала становится положительно заряженной, а вторая – отрицательной. Однако в стационарных условиях свободные носители зарядов (электроны и дырки) нейтрализуют заряды, возникшие вследствие поляризации, и конденсатор, образованный электродами и пироэлектриком, разряжается (рис. 3.23В), что приводит к появлению нулевого заряда на выходе датчика. Тепло на сенсор может поступать в виде теплового излучения, которое поглощается нижним электродом и распространяется по пироэлектрику, используя механизм теплопроводности. Нижний электрод иногда покрывают теплопоглощающим слоем из черненого золота или органического красителя. В результате поглощения тепла нижняя часть сенсора нагревается (его новая температура становится равной T_1), что приводит к его расширению, что, в свою очередь, вызывает изгиб датчика. Появившаяся деформация означает возникновение механического напряжения и, следовательно, изменение ориентации диполей. Поскольку материал сенсора также обладает и пьезоэлектрическими свойствами, его напряженное состояние приводит к появлению на электродах противоположных по знаку зарядов. Отсюда видно, что вторичный пироэлектрический эффект можно описать следующей последовательностью событии: тепловое излучение → поглощение тепла → механическое напряжение, индуцированное теплом → электрический заряд.

Дипольный момент M объемного пироэлектрического датчика можно найти по выражению:

$$M = \mu A h, \tag{3 72}$$

где μ – дипольный момент на единицу объема, A – площадь датчика, h – его толщина. Заряд Q_a, собранный на электродах, приводит к появлению в материале следующего дипольного момента:

$$M_0 = Q_a h. \tag{3.73}$$

M должен быть равен M_0, поэтому

$$Q_a = \mu A h. \tag{3.74}$$

Поскольку температура меняется, дипольный момент тоже не остается постоянным, что и приводит к индуцированию заряда.

Количество поглощенного тепла можно выразить через изменение дипольного момента, при этом μ зависит как от температуры T_a, так и от приращения тепловой энергии ΔW, поглощенной материалом:

$$\Delta Q_a = A\mu(T_a, \Delta W). \tag{3.75}$$

На рис. 3.27 показан пироэлектрический детектор, подсоединенный к резистору R_b, отображающему либо внутреннее сопротивление утечки, либо входное сопротивление интерфейсной схемы, подключенной к выходу датчика. В правой части рисунка показана эквивалентная электрическая схема такого сенсора. Она состоит из следующих трех компонентов: (1) источника тока i, приводящего к появлению тепла (необходимо помнить, что ток – это движение электрических зарядов), (2) емкости детектора C и (3) сопротивления утечки R_b.

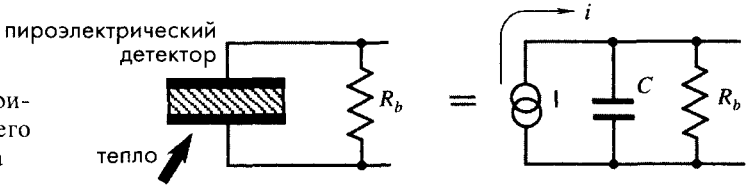


Рис.3.27 Пироэлектрический детектор и его эквивалентная схема

Выходным сигналом пироэлектрического детектора в зависимости от конкретного применения может быть либо заряд (ток), либо напряжение. Поскольку пироэлектрический датчик является конденсатором, он будет разряжаться через сопротивление R_b. Величина электрического тока через этот резистор и напряжение на нем соответствуют заряду, индуцированному тепловым потоком. Пироэлектрический эффект характеризуется двумя коэффициентами [21]:

$$P_Q = \frac{dP_s}{dT} - \textit{пироэлектрическим коэффициентом по заряду}$$
$$P_V = \frac{dE}{dT} - \textit{пироэлектрическим коэффициентом по напряжению}, \tag{3.76}$$

где P_s – спонтанная поляризация (другими словами, *электрический заряд*), E – напряженность электрического поля, а T – температура в Кельвинах. Отношение двух коэффициентов можно выразить через диэлектрическую проницаемость ε_r и электрическую постоянную ε_0:

$$\frac{P_Q}{P_V} = \frac{dP_s}{dE} = \varepsilon_r \varepsilon_0. \tag{3.77}$$

Поляризация зависит от температуры, и поэтому оба пироэлектрических коэффициента являются функциями температуры.

При воздействии источника тепла на пироэлектрик, его температура повышается на ΔT, при этом происходят соответствующие изменения заряда и напряжения:

$$\Delta Q = P_Q A \Delta T, \tag{3.78}$$

$$\Delta V = P_V h \Delta T. \tag{3.79}$$

Если емкость датчика выразить в следующем виде:

$$C_e = \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{h}, \tag{3.80}$$

из уравнений (3.78-3.80) можно вывести следующее соотношение:

$$\Delta V = P_Q \frac{A}{C_e} \Delta T = P_Q \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0}{h} \Delta T \quad . \tag{3.81}$$

Отсюда видно, что выходное напряжение датчика пропорционально росту температуры и пироэлектрическому коэффициенту по заряду и обратно пропорционально его толщине.

Когда пироэлектрический чувствительный элемент подвергается воздействию перепада температур, его поляризация (индуцируемый электрический заряд внутри кристалла) также меняется с температурой. На рис. 3.28 показана типовая зависимость поляризации от температуры. Пироэлектрический коэффициент по напряжению P_V соответствует наклону кривой поляризации. Приближаясь к точке Кюри, этот коэффициент резко возрастает, что объясняется исчезновением поляризации и потерей пироэлектрических свойств в этом температурном диапазоне. Предполагается, что нелинейность кривой поляризации объясняется увеличением чувствительности датчика с ростом температуры.

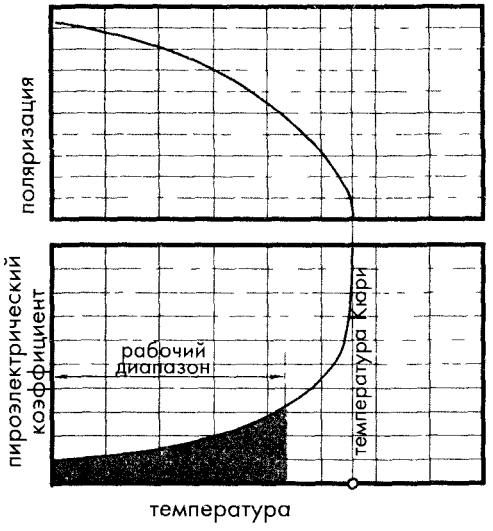


Рис. 3.28. Поляризация пироэлектрического кристалла. Датчик должен работать и храниться при температурах, значительно меньших точки Кюри

При выборе пироэлектрического материала необходимо учитывать эффективность преобразования тепловой энергии в электрическую, которую можно оценить по пироэлектрическому коэффициенту связи κ_p^2 [21, 22] (κ_p является аналогом пьезоэлектрического коэффициента связи κ). Этот коэффициент показывает во сколько раз пироэлектрическая эффективность ниже предельного значения Карно $\Delta T/T_a$. В Приложении приведены численные значения κ_p^2.

Из соответствующей таблицы Приложения видно, что кристаллы триглицин сульфата (TGS) являются самыми эффективными пироэлектрическими преобразователями. Но до недавнего времени из-за низкой температуры Кюри они редко применялись на практике. Поскольку если температура датчика превышает этот уровень, он теряет свои поляризационные свойства. К тому же оказалось, что TGS датчики обладают довольно низкой стабильностью даже при температурах ниже точки Кюри [23]. Однако было обнаружено, что при легировании TGS кристаллов *L*-аланином (Philips запатентовал название LATGS) в процессе выращивания не только повышается их стабильность, но и несколько увеличивается температура Кюри, которая после этого становится равной 60°C, и, значит, верхний предел рабочих температур возрастает до уровня 55°C, достаточного для многих практических применений.

Для производства пироэлектрических датчиков используются и другие материалы, например, танталат лития и пироэлектрические керамики. Довольно популярным стало применение полимерных пленок. В течение последних лет интенсивно разрабатывались технологии нанесения тонких пироэлектрических пленок. Особенно перспективным считается применение титаната свинца ($PbTiO_3$), который относится к классу ферроэлектрических керамических материалов и обладает высокими пироэлектрическим коэффициентом и температурой Кюри (около 490°C). Его основное достоинство – простота нанесения на кремниевые подложки золь-гелевым методом напыления [24].

На рис. 3.29 показаны временные диаграммы, построенные для пироэлектрического датчика при подаче на его вход ступенчатой тепловой функции. Из диаграмм видно, что электрический заряд достигает своего пикового значения практически мгновенно, а затем начинает уменьшаться с *тепловой постоянной времени* τ_T. Это можно объяснить следующим образом: при нагреве поляризация первоначально происходит в самых поверхностных слоях кристаллического материала толщиной в нескольких атомов, температура которых мгновенно повышается до максимального значения. При этом в материалах возникает высокий градиент температур, вызывающий максимальную поляризацию. После чего происходит распространение тепла по всему пироэлектрику, часть которого поглощается его массой пропорционально значению теплоемкости C, а другая часть отдается в окружающую среду через тепловое сопротивление R. Все это приводит к уменьшению первоначального заряда. Тепловая постоянная времени определяется произведением теплоемкости датчика на его тепловое сопротивление:

$$\tau_T = CR = cAhR, \tag{3.82}$$

где c – удельная теплоемкость чувствительного элемента. Тепловое сопротивление R является функцией всех тепловых потерь в окружающую среду через

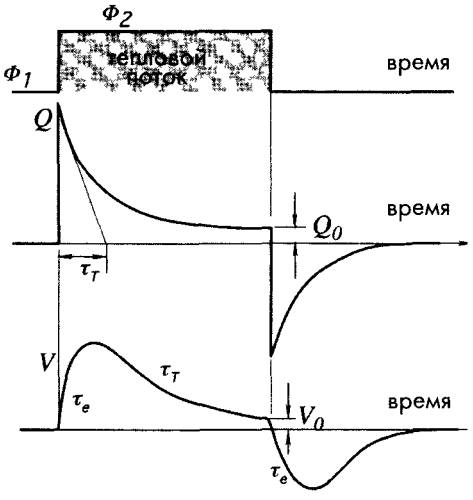


Рис. 3.29. Реакция пироэлектрического чувствительного элемента на тепловую ступенчатую функцию Значения заряда Q_0 и напряжения V_0 для ясности несколько увеличены

конвекцию, теплопроводность и тепловое излучение. В низкочастотных устройствах желательно использовать датчики с большой тепловой постоянной времени, тогда как в быстродействующих системах (например, в измерителях лазерных импульсов) τ_T должно быть значительно ниже. Для уменьшения τ_T пироэлектрики иногда покрывают теплоотводами (кусочками алюминия или меди).

Предполагается, что на пироэлектрический датчик воздействует источник тепла, обладающий очень высокой теплоемкостью, поэтому его собственной теплоемкостью можно пренебречь. Тогда температура среды T_b во время проведения измерений считается постоянной, в то время как температура датчика является функцией времени и определяется плотностью, удельной теплоемкостью и толщиной детектора. Если входной тепловой поток имеет форму ступенчатой функции, а датчик работает в воздушной среде, для выходного тока можно записать следующее аппроксимационное выражение:

$$i = i_0 e^{-t/\tau_T}, \qquad (3\ 83)$$

где i_0 – пиковое значение тока.

На рис. 3.29 показано, что заряд Q и напряжение V никогда не снижаются до нуля. Рассмотрим почему так происходит: пироэлектрик получает тепловую энергию со стороны датчика *a* (рис. 3.26), за счет которой увеличивается температура материала. Рост температуры приводит к скачку заряда в датчике, уменьшающегося с постоянной времени τ_T. Однако датчик имеет еще одну сторону – *b*, контактирующую с более холодной средой, через которую происходит потеря тепловой энергии, т.е. охлаждение датчика. Поскольку стороны *a* и *b* чувствительного элемента подвергаются воздействию разной температуры, через пироэлектрик постоянно проходит тепловой поток. Электрический ток на выходе пироэлектрического датчика всегда повторяет форму теплового потока, проходящего через него. Проводя точные измерения, можно убедиться в том, что выходное напряжение пироэлектрического сенсора равно постоянному значению V_0, пропорциональному величине теплового потока.

3.8. Эффект Холла

Холл открыл это физическое явление в 1879 году. Первоначально этот эффект применялся для изучения электропроводности металлов, полупроводников и других токопроводящих материалов. В настоящее время датчики Холла используются

для обнаружения магнитных полей и определения положения и перемещения объектов [25, 26].

Эффект Холла основан на взаимодействии между движущимися носителями электрического заряда и внешним магнитным полем. В металлах носителями зарядов являются электроны. При движении электронов в магнитном поле на них действует отклоняющая сила:

$$\mathbf{F} = q\nu\mathbf{B}, \tag{3.84}$$

где q = 1.6×10 ^{19}Кл – величина заряда электрона, ν – его скорость, а **B** – магнитная индукция. Выделенный шрифт указывает на то, что **F** и **B** являются векторами. Направление силы и ее величина зависят от пространственного расположения магнитного потока и направления движения электрона. Единицей измерения **B** является тесла: 1 Тесла = 1 Ньютон/(ампер×метр) = 10^4 Гаусс.

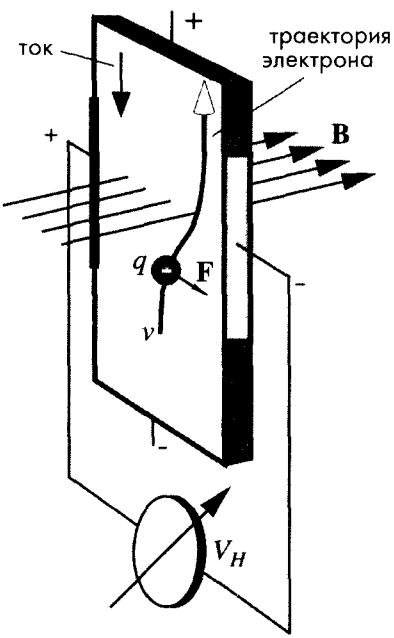


Рис. 3.30. Датчик Холла. Магнитное поле отклоняет движущиеся электрический заряд

Предположим, что электроны двигаются внутри электропроводной пластины, помещенной в магнитное поле **B** (рис. 3.30). На две стороны пластины нанесены дополнительные электроды, подключенные к вольтметру. Еще два электрода расположены сверху и снизу пластины, они подсоединены к источнику электрического тока. Из-за действия внешнего магнитного поля возникает отклоняющая сила, смещающая электроны ближе к правому краю пластины, поэтому эта сторона становится более отрицательно заряженной, чем левая. Очевидно, что вследствие взаимодействия магнитного поля и электрического тока возникает *поперечная разность потенциалов*, получившая название *напряжение Холла* V_H. Знак и амплитуда этого напряжения зависят как от величины, так и направления магнитного и электрического полей. При фиксированной температуре оно определяется выражением:

$$V_H = hiB \sin \alpha \tag{3.85}$$

где α – угол между вектором магнитного поля и плоскостью пластины Холла (рис. 3.31), а h – полная чувствительность датчика, на значение которой влияют тип материала пластины, ее геометрия (площадь активной зоны) и температура.

Полная чувствительность датчика Холла зависит от *коэффициента Холла*, который определяется градиентом поперечного электрического потенциала на единицу интенсивности магнитного поля и на единицу плотности тока. В соответствии с теорией свободных электронов в металлах, коэффициент Холла можно найти при помощи выражения:

$$H = \frac{1}{Ncq}, \tag{3 86}$$

где N – число свободных электронов в единице объема, а c – скорость света. В зависимости от кристаллической структуры материала заряды могут быть либо электронами (отрицательными), либо дырками (положительными). Поэтому и эффект Холла бывает либо положительным, либо отрицательным

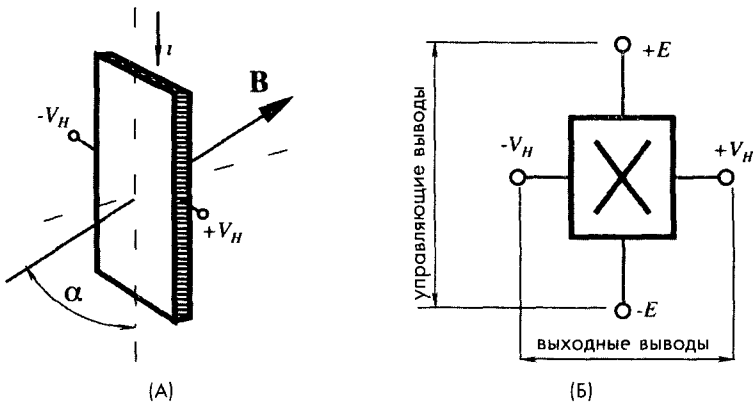


Рис. 3.31. А – выходной сигнал датчика Холла зависит от угла между вектором магнитного поля и плоскостью пластины, Б – четыре вывода датчика Холла

Линейный датчик Холла обычно размещается в корпусе с четырьмя выводами. Два вывода для подключения тока управления называются *управляющими выводами*, а сопротивление между ними – *сопротивлением управляющей цепи* R_I. Выводы для измерения выходного напряжения называются *дифференциальными выходами*, а сопротивление между ними – *выходным дифференциальным сопротивлением* R_0. Эквивалентную схему датчика Холла (рис. 3.32) можно представить в виде узлового соединения 4-х резисторов и двух источников напряжения, включенных последовательно с выходными выводами. Знак ⊗ на рис. 3.31Б и 3.32 указывает на то, что вектор **B** направлен от наблюдателя.

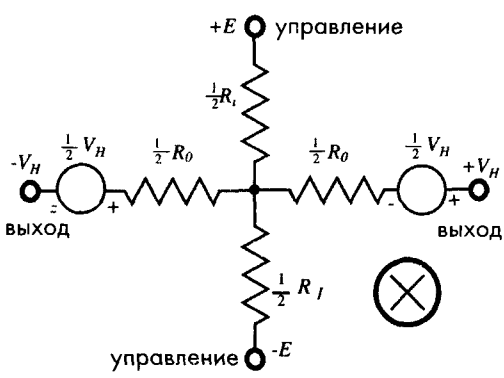


Рис. 3.32 Эквивалентная схема датчика Холла

Датчик характеризуется следующими параметрами: сопротивлениями R_I и R_0, напряжением смещения при отсутствии магнитного поля, чувствительностью и температурным коэффициентом чувствительности.

Большинство датчиков Холла изготавливаются из кремния, и их можно разделить на две основные категории: простые и интегрированные. Для построения чувствительных элементов на основе эффекта Холла применяются InSb, InAs, Ge и GaAs. Кремниевые сенсоры могут быть интегрированы на одной подложке с интерфейсными электронными схемами. Такая интеграция особенно важна при построении прецизионных датчиков, поскольку напряжение Холла обычно довольно мало. В таблице 3.2 приведены основные характеристики простого кремниевого линейного датчика Холла UGN-3605K, выпускаемого кампанией Sprague.

Таблица 3.2. Типовые характеристики линейного датчика Холла

Управляющий ток	3 мА
Сопротивление управляющей цепи	2 2 кОм
Температурный коэффициент чувствительности сопротивления управляющей цепи	+0 8%/°C
Дифференциальное выходное сопротивление	4 4 кОм
Выходное напряжение смещения	5 0 мВ (при B = 0 Гс)
Чувствительность	60 мкВ/Гс
Температурный коэффициент чувствительности	+0 1%/°C
Полная чувствительность	20 В/(Ом×кГс)
Максимальная плотность магнитного потока	ограничений нет

Источник [27]

Встроенная интерфейсная схема может иметь в своем составе пороговый детектор, превращающий датчик в устройство с двумя положениями: его выходной сигнал будет равен нулю, когда магнитное поле ниже порогового значения, и единице – когда плотность магнитного потока становится значительной.

Поскольку кремний обладает пьезорезистивными свойствами, датчики, реализованные на его основе, реагируют на механические напряжения, поэтому необходимо минимизировать нагрузки на корпус датчика и на подводящие провода. Датчики Холла также являются чувствительными к колебаниям температуры, приводят к изменению сопротивления сенсорных элементов. Если чувствительный элемент подключен к источнику напряжения, изменения температуры будут влиять на значение сопротивления, а, следовательно, и на ток в цепи управления.

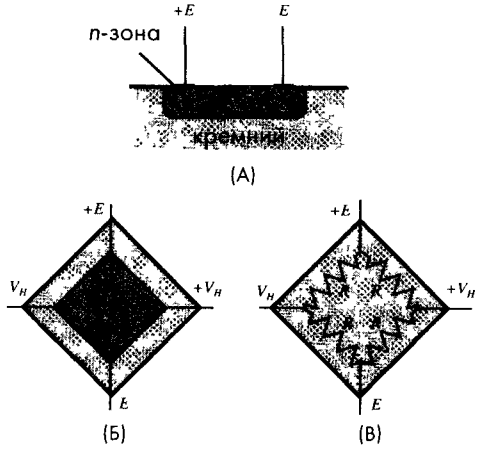


Рис. 3.33. А и Б – кремниевый датчик Холла с n-зоной, В – его эквивалентная схема в виде резистивного моста

Поэтому предпочтительнее управляющие выводы подключать к источнику тока, а не источнику напряжения.

На рис. 3.33А приведена схема датчика Холла, реализованного на кремниевой подложке *p*-типа с зоной *n*-типа, полученной методом ионной имплантации. Электрические контакты обеспечивают подсоединение к источнику питания и формируют выходные выводы датчика. Элемент Холла представляет собой квадрат с углублением с четырьмя электродами, включенными по диагоналям (рис. 3.33Б). На рис. 3.33В приведена его эквивалентная схема в виде резистивного моста. Поскольку мосты являются самыми популярными электрическими цепями с хорошо проработанными методами расчета (раздел 5.7 главы 5), они чаще всего используется на практике.

3.9 Эффекты Зеебека и Пельтье

В 1821 году физик Т. Зеебек (1770-1831), родившийся в Эстонии, а учившийся в Германии, изучая тепловые эффекты в гальванических устройствах, соединил полукруглые элементы, изготовленные из висмута и меди [28]. Неожиданно стрелка компаса, случайно лежавшего рядом, отклонилась (рис. 3.34А). Он проверил этот эффект на других соединениях металлов при разных температурах и обнаружил, что каждый раз получается различная напряженность магнитного поля. Однако, Зеебек не догадался, что при этом через элементы течет электрический ток, поэтому назвал это явление термомагнетизмом [29].

Если взять проводник, и один его конец поместить в холодное место, а другой – в теплое, от теплого участка к холодному будет передаваться тепловая энергия. Интенсивность теплового потока при этом пропорциональна теплопроводности проводника. В дополнение к этому градиент температур приводит к появлению в проводнике электрического поля, обусловлено эффектом Томсона (В. Томпсон открыл этот эффект приблизительно в 1850 году. Он заключается в поглощении или высвобождении тепла линейно пропорционально току, проходящего через однородный проводник, имеющий градиент температуры вдоль его длины. При этом тепло поглощается, если ток и тепловой поток направлены в противоположных направлениях, и выделяется – когда они имеют одинаковое направление). Индуцированное электрическое поле приводит к появлению разности потенциалов:

$$dV_a = \alpha_a \frac{dT}{dx} dx, \tag{3.87}$$

где dT – градиент температуры на небольшом участке длины dx, а α_a – *абсолютный коэффициент Зеебека* материала [30]. Если материал однородный, α_a не зависит от его длины, и уравнение (3.87) принимает вид:

$$dV_a = \alpha_a dT. \tag{3.88}$$

Уравнение (3.88) является основным математическим выражением для термоэлектрического эффекта. На рис. 3.34Б показан проводник с неравномерным распре-

делением температуры T вдоль его длины x. Градиент температуры между произвольно расположенными точками определяет термо э.д.с между ними. Другие значения температур (например, T_3, T_4 и T_5) не влияют на значение э.д.с. между точками 1 и 2. Для измерения э.д.с. вольтметр подсоединяется к проводнику, как показано на рис. 3.34 Б. Это не так просто, как может показаться на первый взгляд. Для измерения термо э.д.с. надо соответствующим образом подключить щупы вольтметра. Однако щупы вольтметра часто изготовлены из проводников, отличающихся от исследуемого проводника. Рассмотрим простой контур для измерения термо э.д.с. (рис. 3.35 А). В таком контуре измеритель включается последовательно с проводником. Если контур выполнен из одинакового материала, то тока в цепи не будет, даже при неравномерной температуре вдоль его длины. Поскольку в этом случае две половины контура создадут токи равной величины, но противоположного направления, которые взаимно уничтожат друг друга. Термо э.д.с. возникает в любом проводнике с неравномерной температурой, но ее часто невозможно измерить напрямую.

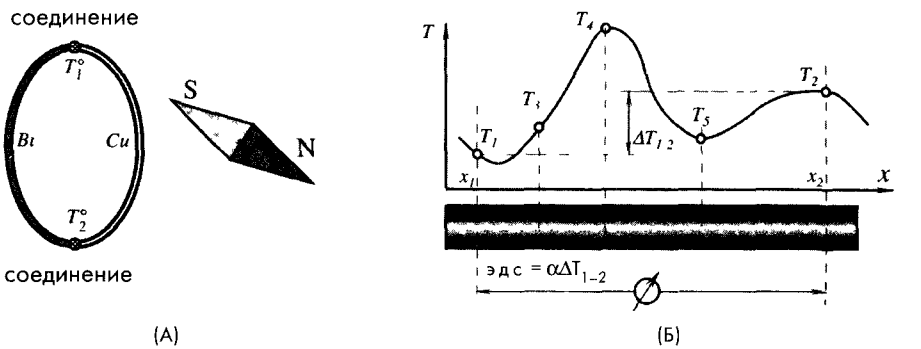


Рис. 3.34. А – опыт Зеебека, Б – переменная температура вдоль проводника является причиной возникновения термо э.д.с

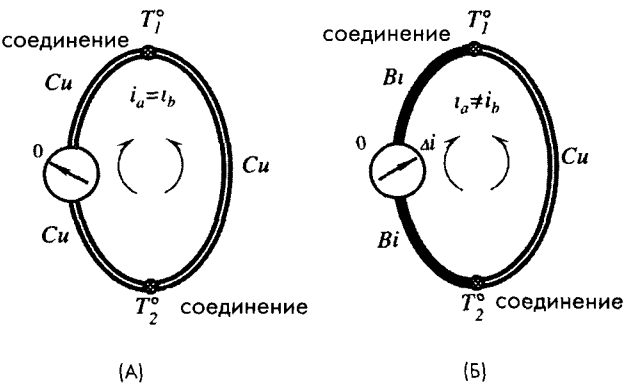


Рис. 3.35. Термоэлектрический контур: А – соединение идентичных металлов не приводит к появлению тока при любой разности температур, Б – соединение разных металлов индуцирует ток Δi.

Для исследования *термоэлектричества* необходимо иметь контур, составленный из двух *разных* материалов (или из одинаковых материалов, но находящихся при различных условиях, например, один – в напряженном состоянии, а другой нет).

Только тогда возможно определить разницу их термоэлектрических свойств. На рис. 3.35Б показан контур, состоящий из двух различных металлов, в котором возникает разность токов: $\Delta i = i_a - i_b$. Величина Δi зависит от многих факторов, включая форму и размер проводников. Если вместо тока измерять напряжение на разомкнутом проводнике, разность потенциалов будет определяться *только* типом материалов и их температурой и не будет зависеть ни от каких других факторов. Индуцированная теплом разность потенциалов называется *напряжением Зеебека*.

Что происходит, когда два проводника соединяются друг с другом? Свободные электроны в металле ведут себя как идеальный газ. Кинетическая энергия электронов определяется температурой материала. Однако в разных металлах энергия и плотность свободных электронов не являются одинаковыми. Когда два разных материала, находящихся при равной температуре, соприкасаются друг с другом, свободные электроны за счет диффузии перемещаются через место соединения [30]. Электрический потенциал материала, принявшего электроны, становится более отрицательным, а материал, отдавший электроны, – более положительным. Разные концентрации электронов с двух сторон соединения формируют электрическое поле, уравновешивающее процесс диффузии, в результате чего устанавливается некоторое равновесие. Если контур является замкнутым, и оба соединения находятся при одинаковой температуре, электрические поля около них взаимно уничтожаются, чего не происходит, когда места соединений имеют разную температуру.

Последующие исследования показали [40], что эффект Зеебека является электрическим по своей природе. Можно утверждать, что термоэлектрические свойства проводников – это такие же объемные свойства материалов, как электро- и теплопроводность, а коэффициент α_a – уникальная характеристика материала. При комбинировании двух разных материалов (А и В) всегда требуется определять напряжение Зеебека. Это можно сделать при помощи *дифференциального* коэффициента Зеебека:

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B. \tag{3.89}$$

Тогда напряжение на соединении равно:

$$dV_{AB} = \alpha_{AB}\, dT. \tag{3.90}$$

Уравнение (3.90) иногда применяется для определения дифференциального коэффициента:

$$\alpha_{AB} = \frac{dV_{AB}}{dT}. \tag{3.91}$$

Например, функцию напряжения от градиента температуры для термопары Т-типа можно с достаточной степенью точности аппроксимировать при помощи уравнения второго порядка:

$$V_{AB} = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 = -0.0543 + 4.094 \times 10^{-2} T + 2.874 \times 10^{-5} T^2. \tag{3.92}$$

Тогда выражение для дифференциального коэффициента Зеебека принимает следующий вид:

$$\alpha_T = \frac{dV_{AB}}{dT} = a_1 + 2a_2T = 4.094\times10^{-2} + 5.748\times10^{-5}T \qquad (3.93)$$

Из уравнения видно, что коэффициент является линейной функцией от температуры. Иногда он называется *чувствительностью* термопарного соединения. Эталонное соединение, которое, как правило, находится при более холодной температуре, называется *холодным спаем*, а второе соединение – *горячим спаем*. Коэффициент Зеебека не зависит от физической природы соединения: металлы могут быть скручены, сварены, спаяны и т.д. Имеет значение только температура спаев и свойства металлов. Эффект Зеебека является прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую.

В Приложении приведены значения термоэлектрических коэффициентов и объемных удельных сопротивлений для некоторых типов материалов. Из соответствующей таблицы видно, что наилучшая чувствительность получается при соединении двух металлов, имеющих противоположные знаки коэффициентов α при их максимально возможных значениях.

В 1826 году А. Беккерель предложил использовать эффект Зеебека для измерения температуры. Однако первая конструкция термопары была разработана Генри Ле-Шателье почти шестьюдесятью годами позже [31]. Ему удалось обнаружить, что соединение проводов из платины и сплава платины и родия позволяет получить наибольшее термонапряжение. Ле-Шателье изучил и описал термоэлектрические свойства многих комбинаций металлов. Полученные им данные до сих пор используются при проведении температурных измерений. В Приложении приведены значения чувствительности некоторых наиболее распространенных типов термопар, соответствующие температуре 25°C, а на рис. 3.36 показаны напряжения Зеебека для стандартных термопар в широком температурном диапазоне. Следует отметить, что термоэлектрическая чувствительность не является постоянной во всем интервале температур, и термопары обычно сравниваются при 0°C. Эффект Зеебека также используется в *термоэлементах*, которые, по существу, представляют собой несколько последовательно соединенных термопар. В настоящее время термоэлементы часто применяются для детектирования тепловых излучений (раздел 14.6.2 главы 14). Первые термоэлементы, изготовленные из проводов, были разработаны Джеймсом Джоулем (1818-1889) для увеличения выходного напряжения измерительного устройства[32].

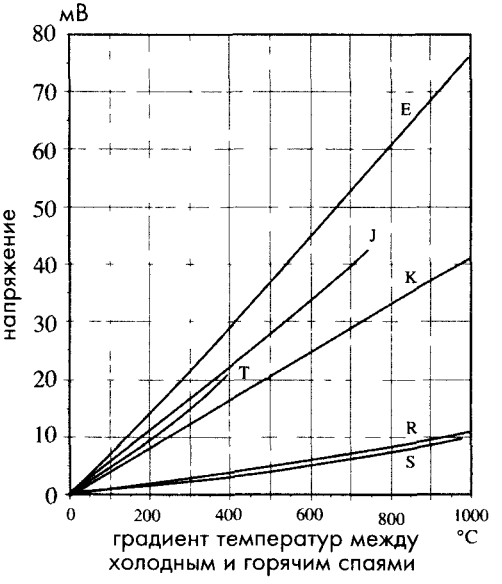


Рис. 3.36. Зависимость выходного напряжения стандартных термопар от градиента температур между холодным и горячим спаями

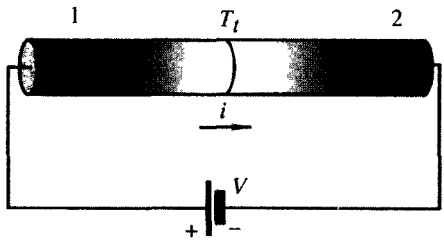


Рис. 3.37. Эффект Пельтье

В настоящее время эффект Зеебека применяется в интегрированных датчиках, в которых соответствующие пары материалов наносятся на поверхность полупроводниковых подложек. Примером таких датчиков является термоэлемент для обнаружения тепловых излучений. Поскольку кремний обладает достаточно большим коэффициентом Зеебека, на его основе изготавливаются высокочувствительные термоэлектрические детекторы. Эффект Зеебека связан с температурной зависимостью энергии Ферми E_F, поэтому коэффициент Зеебека для кремния n-типа можно аппроксимировать функцией от электрического удельного сопротивления в интересующем температурном диапазоне (для датчиков при комнатной температуре):

$$\alpha_a = \frac{mk}{q} \ln\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right), \tag{3.94}$$

где $\rho_0 \approx 5 \times 10^{-6}$ Ом×м и $m \approx 2.5$ являются константами, κ – постоянная Больцмана, а q – электрический заряд. При помощи легирующих добавок получают материалы с коэффициентами Зеебека порядка 0.3...0.6 мВ/К. В Приложении приведены значения коэффициентов Зеебека для некоторых металлов и кремния. Из соответствующей таблицы видно, что коэффициенты Зеебека для металлов гораздо меньше, чем для кремния, и что влияние алюминиевых выводов на микросхемы незначительное из-за высокого значения коэффициента Зеебека для кремния.

В начале девятнадцатого века французский часовщик, в последствии ставший физиком, Жан Шарль Атанас Пельтье (1785-1845) обнаружил, что при прохождении электрического тока из одного материала в другой, в месте их соединения происходит либо выделение, либо поглощение тепла [33], что зависит от направления тока:

$$dQ_P = \pm p i \, dt, \tag{3.95}$$

где i – сила тока, а t – время. Коэффициент p имеет размерность напряжения и определяется термоэлектрическими свойствами материала. Следует отметить, что количество тепла не зависит от температуры других соединений.

Эффект Пельтье – это выделение или поглощение тепла при прохождении электрического тока через соединение двух различных металлов. Это явление характерно и для случаев, когда ток поступает от внешних источников, и когда он индуцируется в спае термопары из-за эффекта Зеебека.

Эффект Пельтье используется в двух ситуациях: когда надо либо подвести тепло к месту соединения материалов, либо отвести его, что осуществляется изменением направления тока. Это свойство нашло свое применение в устройствах, где требуется осуществлять прецизионный контроль за температурой. Считается, что эффекты Пельтье и Зеебека имеют одинаковую природу. Однако следует хорошо понимать, что тепло

Пельтье и Джоуля отличаются друг от друга. Тепло Пельтье в отличие от джоулева тепла *линейно* зависит от силы тока. (Тепло Джоуля выделяется при прохождении электрического тока любого направления через проводник, имеющий конечное сопротивление. Высвобождаемая при этом тепловая энергия пропорциональна квадрату тока: $P = i^2/R$, где R – сопротивление проводника). Величина и направленность тепловой энергии Пельтье не зависит от физической природы соединения двух различных материалов, а полностью определяется их объемными термоэлектрическими свойствами. Эффект Пельтье используется для построения термоэлектрических охладителей, применяемых для снижения температуры детекторов фотонов, работающих в дальнем ИК диапазоне спектра (раздел 14.5 главы 14), а также охлаждаемых зеркальных гигрометров (раздел 13.6 главы 13).

Необходимо помнить, что в любом месте схемы, где соединяются два или более различных металла, имеющих разную температуру, всегда возникает термоэлектрический ток. Эта разность температур всегда сопровождается явлением теплопроводности Фурье, а при прохождении электрического тока выделяется тепло Джоуля. В то же самое время протекание электрического тока всегда связано с эффектом Пельтье: выделением или поглощением тепла в местах соединения различных металлов, при этом разность температур также вызывает появление эффекта Томпсона: нагрев или охлаждение проводников вдоль их длины. Эти два тепловых эффекта (Томпсона и Пельтье) выражаются в виде четырех составляющих в выражении для э.д.с. Зеебека:

$$E_{\text{э}} = p_{AB}\big|_{T_2} - p_{AB}\big|_{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} \sigma_A dT - \int_{T_1}^{T_2} \sigma_B dT = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{AB}\, dT, \qquad (3.96)$$

где σ – величина, называемая коэффициентом Томпсона, которую сам Томсон называл удельной теплоемкостью электричества, проводя аналогию между σ и обычной удельной теплоемкостью c, принятой в термодинамике. Величина σ показывает с какой скоростью происходит выделение или высвобождение тепла на единицу разности температур и на единицу массы [34, 35].

3.10. Звуковые волны

Звуковыми волнами называются периодические сжатия и расширения среды (твердых тел, жидкостей и газов), происходящие с определенной частотой. Компоненты среды совершают колебательные движения в направлении распространения волны, поэтому такие волны называются продольными механическими волнами. Название *звуковые* связано с диапазоном восприятия человеческого слуха, который приблизительно составляет интервал 20...20000 Гц. Продольные механические волны ниже 20 Гц называются *инфразвуковыми*, а выше 20 кГц – *ультразвуковыми*. Если бы классификация волн велась бы относительно других животных, например, собак, диапазон звуковых волн был бы значительно шире.

Детектирование инфразвуковых волн применяется при исследовании строительных конструкций, предсказании землетрясений и изучении других объектов, обладающих большими геометрическими размерами. Люди ощущают инфразвуковые волны большой амплитуды, даже если их не слышат, при этом у них появ-

ляются такие психологические явления, как паника, страх и т.д. Примерами волн звукового диапазона являются колебания струн (струнные музыкальные инструменты), вибрации столба воздуха (духовые музыкальные инструменты), звучание пластин (некоторые ударные инструменты, голосовые связки, громкоговоритель). Какова бы ни была природа возникновения звуков, всегда происходит попеременное сжатие и разрежение воздуха, при этом волны распространяются во все стороны. Спектр звуковых волн может быть весьма различным: от простых однотонных звуков метронома и трубы органа до богатых мелодий скрипки. Шум, как правило, обладает очень широким спектром. Он может иметь равномерное распределение плотности или присутствовать только на частотах определенных гармоник.

На стадии сжатия среды ее объем изменяется от V до V-ΔV. Отношение изменения давления Δp к относительному изменению объема называется объемным модулем упругости среды:

$$B = -\frac{\Delta p}{\Delta V / V} = \rho_0 v^2, \tag{3.97}$$

где ρ_0 – плотность вне зоны сжатия, а v – скорость звука в среде. Отсюда скорость звука определяется следующим образом:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho_0}} \tag{3.98}$$

Следовательно, скорость звука зависит от упругости (B) и инерционных свойств среды (ρ_0). Поскольку обе переменные являются функциями от температуры, скорость звука также зависит от температуры. Это свойство положено в основу акустических термометров (раздел 16.5 главы 16). Для твердых тел продольная скорость может быть определена через модуль Юнга E и коэффициент Пуассона W:

$$v = \sqrt{\frac{E(1-W)}{\rho_0(1+W)(1-2W)}}. \tag{3.99}$$

В Приложении приведены скорости распространения продольных волн в некоторых средах. Следует отметить, что скорость звука зависит от температуры, что всегда должно учитываться при разработке конкретных датчиков.

Рассмотрим распространение звуковой волны в трубе органа, где каждый маленький объемный элемент воздуха совершает колебательные движения вокруг состояния равновесия. Для чистой гармоники смещение элементарного объема относительно состояния равновесия можно описать следующим выражением:

$$y = y_m \cos\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt), \tag{3.100}$$

где x – положение равновесия, y – смещение от положения равновесия, y_m – амплитуда, а λ – длина волны. На практике бывает более удобно рассматривать изменение давления в звуковой волне:

$$p = (k\rho_0 v^2 y_m)\sin(kx - \omega t), \tag{3.101}$$

где $\kappa=2\pi/\lambda$ – порядок волны, ω – угловая частота, а члены в первой круглой скобке соответствуют амплитуде p_m звукового давления Следует отметить, что sin и cos в уравнениях (3 100) и (3 101) указывают на то, что фазы волн смещения и давления различаются на 90°

Давление в любой заданной точке среды не является постоянным Разность между мгновенным и средним значениями давления называется *акустическим давлением P* Во время распространения волны вибрирующие частицы воздуха совершают колебательные движения вокруг положения равновесия с мгновенной скоростью ξ Отношение акустического давления и мгновенной скорости (не путать со скоростью волны[1]) называется акустическим импедансом

$$Z=\frac{P}{\xi}, \tag{3 102}$$

который является комплексной величиной, характеризующейся амплитудой и фазой Для идеальной среды (в которой нет потерь), Z – действительное число, связанное со скоростью волны соотношением

$$Z=\rho_0 v \tag{3 103}$$

Интенсивность I звуковой волны определяется как мощность, переданная через единичную площадь Также ее можно выразить через величину акустического импеданса

$$I=P\xi=\frac{P^2}{Z} \tag{3 104}$$

Однако на практике звук чаще характеризуется не интенсивностью, а параметром β, называемым уровнем звука, определенным относительно стандартной интенсивности $I_0=10^{-12}$ Вт/м^2

$$\beta=10\log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right) \tag{3 105}$$

Такая величина I_0 выбрана потому, что она соответствует нижней границе слуха человеческого уха Единицей измерения β является децибел (дБ), названный в честь Александра Белла При $I=I_0$, $\beta=0$

Уровни давления также могут быть выражены через децибелы

$$\text{П}=20\log_{10}\left(\frac{p}{p_0}\right), \tag{3 106}$$

где $p_0=2\times10^{-5}$ Н/м^2 (0 0002 мкбар)=2 9×10^{-9} psi

В таблице 3 3 приведены уровни некоторых звуков Поскольку человеческое ухо неодинаково реагирует на звуки разных частот, уровни звука обычно приводятся для интенсивности I_0, соответствующей частоте 1 кГц, где чувствительность слуха максимальна

Таблица 3.3. Уровни звуков β при I_0, соответствующей 1000 Гц

Источник звука	дБ
Ракетный двигатель на расстоянии 50 м	200
Переход звукового барьера	160
Гидравлический пресс на расстоянии 1 м	130
Болевой порог	120
10-Вт Hi-Fi громкоговоритель на расстоянии 3 м	110
Мотоцикл без глушителя	110
Рок-н-рол	100
Поезд метрополитена на расстоянии 5 м	100
Пневматическая дрель на расстоянии 3 м	90
Ниагарский водопад	85
Загруженная автодорога	80
Автомобиль на расстоянии 5 м	75
Посудомоечная машина	70
Разговор на расстоянии 1 м	60
Расчетное бюро	50
Городская улица (без транспорта)	30
Шепот на расстоянии 1 м	20
Шелест листьев	10
Слуховой порог	0

3.11. Температурные и тепловые свойства материалов

Человеческое тело способно ощущать температуру, что не является точным методом измерения внешнего тепла. Ощущения человека являются не только нелинейными, но и относительными, поскольку основаны на предшествующем опыте. Однако люди без труда обнаруживают разницу между холодными и теплыми объектами. Почему же эти объекты воспринимаются по-разному?

Каждая частица нашей вселенной находится в постоянном движении. Можно считать, что температура является мерой кинетической энергии колеблющихся частиц. Чем быстрее движение, тем выше температура частицы. Конечно же, молекулы и атомы в заданном объеме материала двигаются не с одинаковой скоростью, поскольку на микроскопическом уровне все они находятся при разной температуре. Средняя кинетическая энергия большого количества двигающихся частиц определяет *макроскопическую* температуру объекта. Эти процессы изучаются в статистической механике. В этой книге будут рассмотрены методы и устройства измерения макроскопической средней кинетической энергии частиц материала, которая, в свою очередь, определяет температуру материала. Поскольку температура зависит от движения молекул, она тесно связана с давлением, которое равно силе, приложенной к молекулам на единице площади.

Когда различные материалы соприкасаются, атомы и молекулы, двигающиеся в них, взаимодействуют друг с другом. Более того, каждый колеблющийся атом ведет себя как микроскопический передатчик, посылающий электромагнитное

излучение в окружающее пространство. Все это и позволяет осуществлять передачу тепла от теплых объектов к холодным. Чем интенсивнее движение атомов, тем выше температура и тем сильнее электромагнитное излучение. Для измерения температуры используются специальные устройства, называемые *термометрами*, которые либо контактируют с объектом, либо принимают его электромагнитное излучение и вырабатывают на выходе физический сигнал. Именно этот сигнал и является мерой температуры объекта.

Слово *термометр* впервые появилось в литературе в 1624 году в книге J.Leurechon "La Recreation Mathematique" [30]. Автор описал устройство стеклянного термометра, заполненного водой, деление шкалы которого составляло 8 градусов. Первый термометр, независимый от давления, был изготовлен герцогом Тоскании Фердинандом II в 1654 году. Он представлял собой герметично запаянную трубку, заполненную спиртом.

Тепловая энергия, часто называемая теплом, измеряется в *калориях* (калория, измеряющая калорийность пищи, в действительности равна 1000 физических калорий и называется килокалорией). Одна калория (кал) равна количеству тепла, необходимому для нагрева 1 грамма воды на 1 градус при нормальном атмосферном давлении. В США часто используется английская единица тепла: БТЕ (Британская тепловая единица). 1 БТЕ = 252.02 кал.

3.11.1 Температурные шкалы

Существует несколько температурных шкал. Первая нулевая температура была установлена в 1664 году Робертом Гуком в точке замерзания дистиллированной воды. В 1694 году Карл Ренальди из Падуи предложил использовать две точки: точку таяния льда и точку кипения воды, в качестве двух реперных точек на линейной температурной шкале. Он разделил весь интервал температур на 12 равных частей. К сожалению, его предложение было забыто почти на 50 лет. В 1701 году Ньютон также предложил использовать две фиксированные точки для задания температурной шкалы. Для первой точки он выбрал температуру плавления льда (нулевая точка), а для второй – температуру подмышкой здорового англичанина, которую назвал точкой 12. По шкале Ньютона вода кипела в точке 34. Даниэль Фаренгейт, датский изобретатель инструментов, в 1706 году для своего термометра в качестве нулевой точки выбрал холодную температуру смеси воды, льда и поваренной соли. В качестве второй точки он выбрал температуру 96 градусов, определяемую «температурой крови здорового человека» (На самом деле, для Фаренгейта число 96 было просто удобным, поскольку оно хорошо делилось на 2, что позволяло легко наносить деления. Однако Фаренгейт не учитывал, что температура крови зависит от национальности человека и многих других факторов. Сейчас уже доказано, что температура здорового человека находится в пределах 97...100° F (36...37.7°C), но во времена датского изобретателя лучшего термостата, чем человеческое тело еще не существовало). На его шкале точка плавления льда равнялась 32°, а кипения воды – 212°. В 1742 году профессор астрономии Андреас Цельсий предложил шкалу, в которой нуль – это точка таяния льда, а 100 – температура кипения воды.

В настоящее время в научных и технических разработках обычно применяются две шкалы: Цельсия и Кельвина. Шкала Кельвина базируется на, так называемой,

тройной точке воды, соответствующей давлению 4.58 мм ртутного столба, при котором вода одновременно находится в трех состояниях: в виде пара, жидкости и льда. Температура тройной точки воды равна 273.16 K (Кельвин) или ≈0°C. Шкала Кельвина является линейной, где нулевая точка (0 K) соответствует температуре, при которой кинетическая энергия всех двигающихся частиц равна нулю. Эту точку невозможно реализовать на практике, она является чисто теоретической величиной, называемой *абсолютным нулем*. Между шкалами Кельвина и Цельсия существует разница в 0.01°, вызванная тем, что нуль градусов Цельсия определяется не тройной точкой воды, а температурой, при которой лед и насыщенный влагой воздух при атмосферном давлении находятся в динамическом равновесии. Эти две шкалы имеют одинаковый наклон (т.е. 1°C = = 1K, а 0 K= -273.15°C):

$$^{\circ}\mathrm{C} = ^{\circ}\mathrm{K} - 273.15^{\circ} \tag{3.107}$$

Температура кипения воды равна 100°C = 373.15 K. Шкала Фаренгейта имеет более крутой наклон, поскольку 1°C = 1.8°F. Шкалы Цельсия и Фаренгейта пересекаются при температуре -40°C и °F. Для перевода значений из одной шкалы в другую используют выражение:

$$^{\circ}\mathrm{F} = 32 + 1.8^{\circ}\,\mathrm{C}, \tag{3.108}$$

которое означает, что при 0°C, температура по шкале Фаренгейта составит +32°F.

3.11.2 Тепловое расширение

Все твердые объекты с ростом температуры увеличиваются в объеме, что происходит в результате колебательного движения атомов и молекул. При увеличении температуры среднее расстояние между атомами растет, что приводит к расширению всего твердого тела. Изменение любого линейного размера (длины, ширины или высоты) называется *линейным расширением*. Длина объекта l_2 при температуре T_2 связана с первоначальной длиной l_1, соответствующей температуре T_1, следующим соотношением:

$$l_2 = l_1\left[1 + \alpha\left(T_2 - T_1\right)\right], \tag{3.109}$$

где α называется коэффициентом линейного расширения. Для разных материалов значения α неодинаковые. Этот коэффициент определяется как:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l}\frac{1}{\Delta T}, \tag{3.110}$$

где $\Delta T = T_2 - T_1$. В Приложении приведены значения коэффициентов линейного расширения для различных материалов (более точно тепловое расширение можно описать при помощи полиномов высокого порядка: $l_2 = l_1[1+\alpha_1(T_2-T_1) + \alpha_2 (T_2-T_1)^2+\alpha_3(T_2-T_1)^3+...]$; однако на практике линейной аппроксимации обычно бывает достаточно). Строго говоря, коэффициент α зависит от действительной температуры. Однако для большинства практических применений небольшими изменениями α можно пренебречь. Для, так называемых, *изотропных*

материалов, коэффициенты расширения в любом направлении равны. Небольшие изменения площади объекта и его объема с высокой степенью точности можно выразить при помощи следующих выражений·

$$\Delta A = 2\alpha A \Delta T, \tag{3 111}$$

$$\Delta V = 3\alpha V \Delta T \tag{3 112}$$

Тепловое расширение – очень полезное физическое явление, на основе которого реализовано много датчиков, которые либо измеряют тепловую энергию, либо используют ее в качестве сигнала возбуждения. Рассмотрим многослойную структуру, состоящую из двух пластин X и У, склеенных друг с другом (рис.3.38А). Пластины имеют одинаковые толщину и площадь поверхности и идентичные модули упругости, но разные коэффициенты теплового расширения· α_1 и α_2 ($\alpha_1 > \alpha_2$). Пластины прикреплены с левой стороны к опорной стене. При нагреве пластин, т.е. изменении их температуры с T_1 до T_2, пластина X увеличится больше, чем пластина У. Зона скрепления двух пластин не позволит пластине X расширяться равномерно, одновременно, заставляя пластину У, увеличиваться больше, чем требует ее коэффициент α. Все это приводит к возникновению внутреннего напряжения, в результате которого структура прогибается вниз. И, наоборот, в случае охлаждения пластин вся структура изогнется вверх. Радиус изгиба можно оценить при помощи выражения [36]:

$$r \approx \frac{2j}{3(\alpha_X - \alpha_Y)(T_2 - T_1)} \tag{3 113}$$

В результате изгиба максимальное отклонение наблюдается на свободном конце конструкции. Это отклонение может служить мерой изменения температуры. Предполагается, что при калибровочной температуре структура занимает горизонтальное положение; хотя это не всегда так, поскольку форма структуры при калибровке диктуется условиями конкретной задачи Фактически, биметаллическая структура является преобразователем температуры в перемещение.

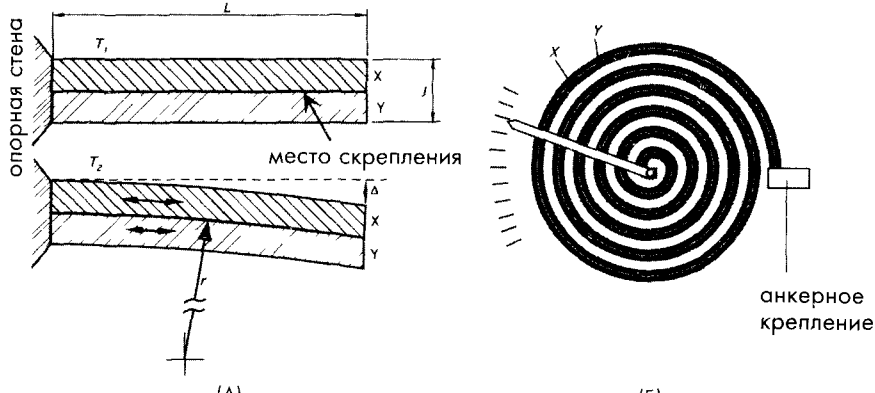


Рис. 3.38 А – изгиб двухслойной структуры, в которой каждый слой имеет свой собственный коэффициент расширения, Б – биметаллическая спираль, используемая как датчик температуры

Большинство таких преобразователей выполняются в виде биметаллических пластин из сплавов железа-никеля-хрома. Они хорошо себя зарекомендовали в температурном диапазоне –75...+600°С. Однако для измерения небольших температурных изменений биметаллические пластины не подходят, поскольку имеют очень большой радиус изгиба (несколько метров) и, следовательно, очень маленькие отклонения конца структуры. Отклонение конца биметаллической пластины можно определить при помощи формулы:

$$\Delta = r\left[1-\cos\left(\frac{180L}{\pi r}\right)\right], \tag{3.114}$$

где r находится из уравнения (3.113), а L соответствует длине пластины. Например, для биметаллической пластины, выполненной из латуни ($\alpha = 20\times10^{-6}$) и хрома ($\alpha = 6\times10^{-6}$), у которой L = 50 мм, а толщина j = 1 мм, при увеличении температуры на 10°С отклонение составляет $\Delta \approx 0.26$ мм. Такое отклонение очень трудно заметить невооруженным взглядом, поэтому в промышленных термометрах биметаллическая пластина изготавливается в форме спирали (рис. 3.38Б). Это позволяет значительно увеличить длину L, а, следовательно, и величину отклонения Δ. Для вышеприведенного примера при L = 200 мм, отклонение становится равным 4.2 мм, что значительно больше предыдущего значения. В современных датчиках биметаллические структуры изготавливаются методами микротехнологий.

3.11.3 Теплоемкость

Когда объект нагревается, его температура повышается. Под нагревом подразумевается передача объекту определенного количества тепла или тепловой энергии. Тепло в объекте накапливается в виде кинетической энергии вибрации атомов. Можно провести аналогию между максимально возможным количеством воды в резервуаре и количеством тепла, которое может поглотить объект. Естественно, что количество воды в резервуаре не может превышать его объем, называемый емкостью резервуара. Подобно этому, любой объект можно характеризовать теплоемкостью, которая зависит как от материала объекта, так и от его массы m:

$$C = cm, \tag{3.115}$$

где c – константа, определяемая тепловыми свойствами материала. Она называется *удельной теплоемкостью*, и для нее справедливо следующее соотношение:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}. \tag{3.116}$$

Удельная теплоемкость описывает сам материал, в то время как теплоемкость является характеристикой объекта, сделанного из этого материала. Строго говоря, удельная теплоемкость не является постоянной величиной во всем температурном диапазоне, включая все состояния материала. Она может существенно меняться при изменении состояния материала, например, при переходе от твердой фазы

к жидкой. На микроскопическом уровне удельная теплоемкость отражает структурные изменения материала. Например, в температурном диапазоне 0...100°С (жидкая фаза) удельная теплоемкость воды является почти постоянной. Почти, но не совсем: она становится несколько выше в окрестности температуры замерзания и несколько ниже – в районе 35°С и в интервале 38...100°С. Также было отмечено, что самая низкая удельная теплоемкость воды соответствует 37°С: биологически оптимальной температуре всех теплокровных животных.

В Приложении приведены значения удельных теплоемкостей различных материалов либо в кал/(г×°С), либо в единицах системы СИ: Дж/(г ×°С). Для перевода единиц из системы в систему можно использовать соотношение:

$$1\frac{Дж}{г\times °C} = 0.2388\frac{кал}{г\times °C} \qquad (3\ 117)$$

Можно отметить, что, как правило, чем тяжелее материал, тем ниже его удельная теплоемкость.

3.12. Теплопередача

Существуют два фундаментальных свойства теплоты, которые необходимо знать:

1) У тепла нет никаких специфических характеристик; это означает, что оно может иметь разную физическую природу, его можно измерить, но при этом его невозможно различить
2) Тепло невозможно ограничить, это означает, что оно свободно передается от теплых частей системы к холодным.

Тепловая энергия может быть передана от объекта к объекту тремя способами. теплопроводностью, конвекцией и излучением. Один из объектов, получающий или отдающий тепло, может быть детектором тепла. Его функция заключается в измерении количества тепла, поглощаемого или выделяемого объектом, для получения определенной информации об этом объекте Такой информацией может быть температура объекта, теплота химических реакций, расположение или перемещение объектов и т.д.

Рассмотрим многослойную структуру в виде сэндвича, где каждый слой выполнен из разного материала. При прохождении тепла через слои температурный профиль структуры будет определяться толщиной каждого слоя и его теплопроводностью На рис. 3.39 показана трехслойная

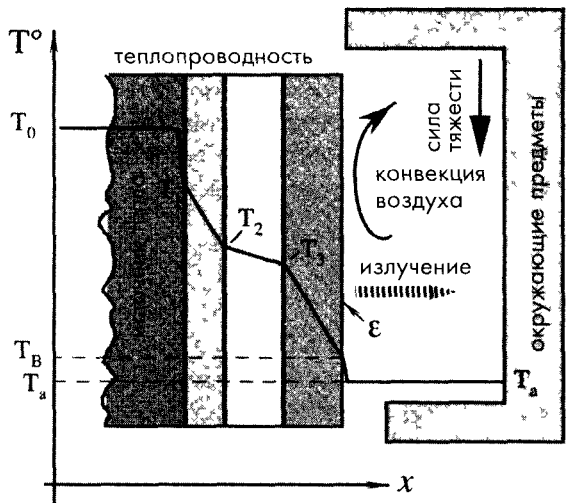


Рис. 3.39. Температурный профиль многослойной структуры

структура, в которой первый слой контактирует с источником тепла (устройством, обладающим бесконечной теплоемкостью и высокой теплопроводностью). Одним из самых подходящих твердых объектов, который ведет себя как «бесконечный» источник тепла, считается медное тело большого объема с контролируемой температурой. Температура внутри источника тепла постоянная и высокая, за исключением очень узкой зоны, расположенной рядом со слоевой структурой. Тепло передается от материала к материалу через механизм теплопроводности. Скорость падения температуры внутри каждого слоя определяется тепловыми свойствами материала. Последний слой отдает тепло в воздух через механизм конвекции и окружающим объектам при помощи ИК излучения. Таким образом, рис. 3.39 иллюстрирует все три возможных способа передачи тепла от одного объекта к другому.

3.12.1 Теплопроводность

Для передачи тепла через механизм теплопроводности необходимо обеспечить контакт между двумя объектами. Термически возбужденные частицы теплого тела совершают энергичные колебательные движения и передают кинетическую энергию частицам более холодного тела, которые при этом переходят в возбужденное состояние. В результате теплый объект теряет тепло, а холодный – поглощает его. Передача тепла по механизму теплопроводности аналогична потоку воды или электрическому току. Например, прохождение тепла через стержень описывается выражением, похожим на закон Ома. Скорость теплового потока через поперечное сечение площадью A (тепловой «ток») пропорциональна градиенту температуры (тепловому «напряжению») по длине стержня (dT/dx):

$$H = \frac{dQ}{dt} = -kA\frac{dT}{dx}, \tag{3.118}$$

где k называется *коэффициентом теплопроводности* материала. Знак минус означает, что тепло течет в направлении уменьшения температуры. Хорошие проводники тепла обладают высокими коэффициентами k (большинство металлов), в то время как хорошие теплоизоляторы – низкими. Коэффициент теплопроводности материалов считается константой, хотя, на самом деле, он несколько увеличивается с ростом температуры. Для вычисления тепловых потерь за счет теплопроводности, например, через провод, необходимо знать температуру на обоих его концах: T_1 и T_2:

$$H = kA\frac{T_1 - T_2}{L}, \tag{3.119}$$

где L – длина провода. На практике часто вместо коэффициента теплопроводности используется тепловое сопротивление, определяемое как:

$$R = \frac{L}{k}. \tag{3.120}$$

В этом случае уравнение (3.119) принимает вид:

$$H = A\frac{T_1 - T_2}{R}. \tag{3.121}$$

В Приложение приведены значения коэффициентов теплопроводности для некоторых материалов.

На рис. 3.39 показан идеальный температурный профиль внутри многослойной структуры, состоящей из материалов с разной теплопроводностью. Но в реальной жизни теплопередача через соединение двух материалов может происходить совсем по-другому. Если соединить вместе два материала и понаблюдать за распространением тепла в такой конструкции, полученный температурный профиль может выглядеть, как показано на рис. 3.40А. Если боковые поверхности соединяемых объектов имеют хорошую изоляцию, в стационарных условиях тепловые потоки в обоих материалах должны быть равны. Резкое падение температуры в зоне контакта, площадь которого равна a, объясняется наличием теплового *переходного сопротивления*. Передачу тепла через двухслойную структуру можно описать следующим выражением:

$$H = \frac{T_1 - T_3}{R_A + R_C + R_B}, \tag{3.122}$$

где R_A и R_B – тепловые сопротивления двух материалов, а R_C – переходное сопротивление:

$$R_C = \frac{1}{h_C a}. \tag{3.123}$$

Величина h_C называется переходным коэффициентом. Для некоторых типов датчиков, в которых есть механические соединения элементов из двух разных материалов, этот коэффициент играет большое значение. Под микроскопом зона соединения может выглядеть, как показано на рис. 3.40Б. Поскольку реальные поверхности никогда не бывают идеально гладкими, все неровности на них влияют на величину переходного сопротивления.

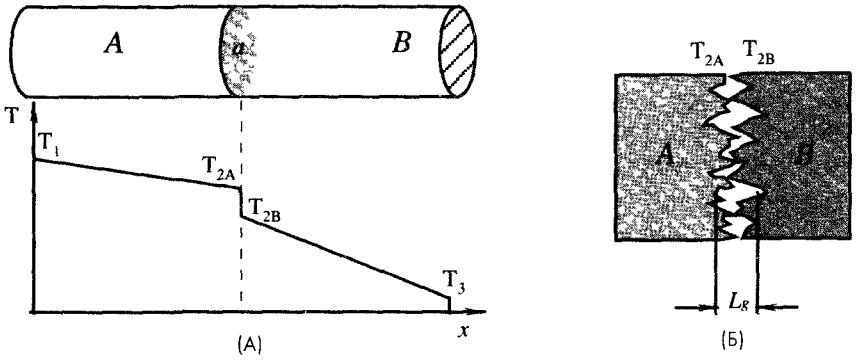


Рис. 3.40. А – температурный профиль в зоне контакта двух объектов, Б – вид поверхности контакта под микроскопом

Передача тепла в зоне контакта определяется следующими факторами:

1. Теплопроводностью реального физического соединения двух материалов
2. Теплопроводностью газов (воздуха) в порах, созданных неровностями поверхностей

Поскольку теплопроводность газов, как правило, гораздо меньше теплопроводности твердых материалов, газ в порах и создает наибольшее сопротивление при передаче тепла. Поэтому выражение для переходного коэффициента можно записать в виде:

$$h_C = \frac{1}{L_g}\left(\frac{a_c}{a}\frac{2k_A k_B}{k_A + k_B} + \frac{a_v}{a}k_f\right), \qquad (3.124)$$

где L_g – толщина пористой зоны, κ_f – коэффициент теплопроводности газов, заполняющих поры, a_C и a_v – площади зон контактов и пор, а κ_A и κ_B – коэффициент теплопроводности соответствующих материалов. Эту формулу довольно сложно применять на практике из-за трудности экспериментального определения площадей a_C и a_v и расстояния L_g. Однако, анализируя формулу (3.124), можно сделать следующий вывод: переходное сопротивление увеличивается при уменьшении давления окружающих газов. С другой стороны, переходное сопротивление уменьшается с ростом давления в зоне соединения, что связано с деформацией высоких выступов на контактных поверхностях, из-за чего происходит увеличение a_c, а, значит, и создание большей площади контакта между материалами. Для уменьшения теплового сопротивления следует избегать сухого контакта между элементами системы., поэтому перед соединением двух поверхностей их рекомендуется покрывать жидкостью, имеющей низкое тепловое сопротивление. Для этой цели часто применяется силиконовая смазка.

3.12.2 Тепловая конвекция

Другим способом передачи тепла является конвекция. Для нее требуется промежуточный агент (жидкость или газ), которыи забирает тепло у теплого объекта, переносит его до холодного объекта, отдает тепловую энергию и после этого возвращается (а может и нет) к теплому объекту за новой порцией тепла. Передача тепла от твердого тела подвижному агенту или внутри подвижного агента также называется конвекцией. Конвекция может быть естественнои (под деиствием сил тяжести) или искусственной (выполняемои механическим путем). При естественной конвекции воздуха на его молекулы деиствуют две силы. сила тяжести и выталкивающая сила. Теплый воздух поднимается вверх, унося с собои тепло от горячих поверхностеи. Более холодный воздух опускается вниз к теплым объектам. Искусственная конвекция воздуха осуществляется при помощи фена или вентилятора. Она также организуется в жидкостных термостатах для поддержания требуемого уровня температуры внутри устройства. Эффективность передачи тепла конвективным способом определяется скоростью движения промежуточного агента, градиентом температуры, площадью поверхности объекта и тепловыми свойствами окружающей среды. Объект, температура которого отличается от внешней температуры, будет получать или отдавать тепло, что можно описать при помощи уравнения, похожего на выражение передачи тепла по механизму теплопроводности:

$$H = \alpha A (T_1 - T_2), \tag{3.125}$$

где α – коэффициент конвекции, определяемый удельной теплоемкостью текучей среды (жидкости или газа), ее вязкостью и скоростью движения. Этот коэффициент зависит не только от силы тяжести, но и от градиента температур. Для пластины, расположенной горизонтально в воздухе, значение α можно оценить при помощи следующей формулы:

$$\alpha = 2.49 \sqrt[4]{T_1 - T_2}, \frac{Bm}{м^2 \cdot K}, \tag{3.126}$$

а для пластины, расположенной вертикально, формула принимает вид:

$$\alpha = 1.77 \sqrt[4]{T_1 - T_2}, \frac{Bm}{м^2 \cdot K}. \tag{3.127}$$

Следует отметить, что эти выражения годятся только для одной стороны пластины, здесь предполагается, что пластина представляет собой поверхность бесконечного источника тепла (т.е. ее температура не зависит от потерь тепла), а окружающая среда имеет постоянную температуру. Если объем воздуха мал, например, воздушный зазор между двумя поверхностями разной температуры, движение молекул газа становится очень ограниченным, тогда конвективной передачей тепла можно пренебречь. В этом случае передача тепла осуществляется через теплопроводность воздуха и излучение.

3.12.3 Тепловое излучение

Как было отмечено ранее, любой объект, атом и молекула совершают колебательные движения. Средняя кинетическая энергия вибрирующих частиц связана с абсолютной температурой. По законам термодинамики движущийся электрический заряд вызывает появление переменного электрического поля, которое приводит к образованию переменного магнитного поля. В свою очередь, в результате изменений в магнитном поле происходят перемены и в связанном с ним электрическом поле и т.д. Таким образом, вибрирующие частицы являются источниками электромагнитного поля, подчиняющегося законам оптики и распространяющегося со скоростью света. Электромагнитные волны могут отражаться, фильтроваться, фокусироваться и т.д. На рис. 3.41 показан полный спектр электромагнитного излучения: от γ-лучей до радиоволн.

Длина волны связана с частотой ν и скоростью света в конкретной среде c:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}. \tag{3.128}$$

Зависимость между длиной волны и температурой подчиняется закону Планка, открытому в 1901 году (в 1918 году немецкий физик Планк был удостоен Нобелевской Премии за открытие энергии кванта). Планк установил зависимость между плотностью потока излучения W_λ, длиной волны λ и абсолютной температурой T. Плотность потока излучения – это мощность электромагнитного потока на единицу длины волны:

$$W_\lambda = \frac{\varepsilon(\lambda) C_1}{\pi \lambda^5 \left(e^{C_2/\lambda T} - 1\right)}, \qquad (3.129)$$

где $\varepsilon(\lambda)$ – излучающая способность объекта, C_1=3.74×10 ^{12} Вт×см^2 и C_2=1.44 см×K – константы, а e – основание натурального логарифма.

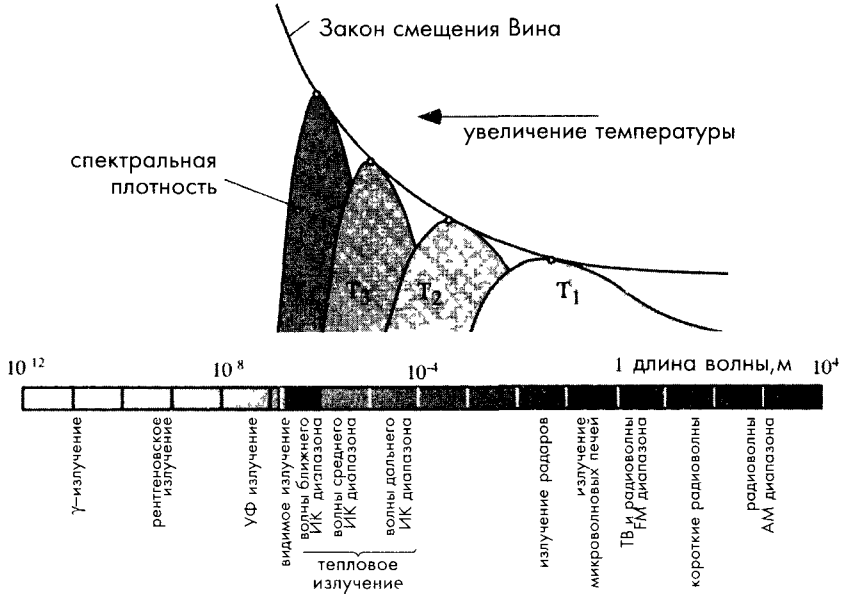


Рис. 3.41. Спектр электромагнитного излучения

Температура – это результат осреднения кинетических энергий огромного количества вибрирующих частиц. Однако не все частицы вибрируют с одинаковой частотой и амплитудой. Разрешенные частоты (а также длины волн и энергии) расположены очень близко друг к другу, поэтому количество частот, на которых могут излучать различные материалы, является практически бесконечной величиной. Длины излучаемых волн бывают любыми: от очень длинных до очень коротких. Поскольку температура является статистическим выражением средней кинетической энергии, она определяет наиболее вероятную частоту и длину волны колеблющихся частиц. Наиболее вероятная длина волны определяется законом Вина (в 1911 году немецкому ученому Вильгельму Вину была присуждена Нобелевская премия за открытие законов теплового излучения). Для ее нахождения надо приравнять нулю первую производную от уравнения (3.129). В результате вычислений можно получить длину волны, в окрестностях которой происходит наибольшая мощность излучений:

$$\lambda_m = \frac{2898}{T}, \qquad (3.130)$$

где λ_m измеряется в мкм, а T – в Кельвинах Закон Вина утверждает, что чем выше температура, тем короче становиться длина волны излучений (рис. 3.41). С учетом уравнения (3.128) можно сделать вывод, что наиболее вероятная частота излучения пропорциональна абсолютной температуре.

$$\nu_m = 10^{11} T, \quad Гц \tag{3 131}$$

Например, при нормальной комнатной температуре большая часть ИК энергии излучается от объектов с частотой около 30 ТГц (30×10^{12} Гц). Частота излучения и длина волны определяются только температурой, тогда как амплитуда излучения еще зависит и от излучающей способности поверхности $\varepsilon(\lambda)$

Теоретически, частотный диапазон тепловых излучений является бесконечным Однако при детектировании тепловых излучений необходимо учитывать характеристики реальных датчиков, которые способны измерять только ограниченный диапазон излучений. Для того чтобы определить полную мощность излучения в конкретном интервале длин волн, необходимо проинтегрировать уравнение (3 129) внутри указанного диапазона. от λ_1 до λ_2

$$\Phi_{b0} = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\varepsilon(\lambda) C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \tag{3 132}$$

На рис. 3.42 показана плотность потока излучений идеального излучателя (λ_1=0; λ_2=∝) для трех разных температур. Из рисунка видно, что мощность излучения распределяется в спектральном диапазоне очень неравномерно, а ее максимум соответствует максимуму, определенному по закону Вина Горячий объект излучает значительную часть своей энергии в видимом диапазоне, а мощность, излучаемая более холодными объектами, смещается в ИК и дальний ИК диапазоны спектра.

Уравнение (3 132) очень сложное, и его практически невозможно решить аналитически. Решение может быть получено либо численными методами, либо при помощи аппроксимаций Аппроксимация в широкой полосе спектра (когда λ_1 и λ_2 охватывают более 50% всей излучаемой мощности) в виде параболы четвертого порядка известна под названием *закона Стефана-Больцмана*·

$$\Phi_{b0} = A\varepsilon\sigma T^4 \tag{3 133}$$

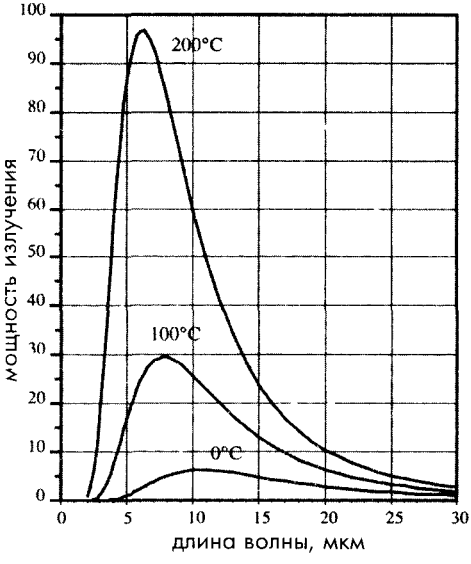


Рис. 3.42. Спектральная плотность потока излучений для трех температур, полученная для идеального излучателя, окруженного бесконечно холодным пространством

Здесь $\sigma = 5.67\times10^{-8}$Вт/м^{2}K^4 – постоянная Стефана-Больцмана, A – площадь излучающей поверхности, а ε считается независимой от длины волны [37].

В то время как длина волны излучаемого света зависит от температуры, амплитуда излучения является функцией от *излучающей способности* поверхности, часто называемой *коэффициентом излучения* ε, которая изменяется в диапазоне 0...1. Этот коэффициент является отношением потока излучений, исходящего от поверхности, к потоку излучений от идеального излучателя при той же самой температуре. Было выведено фундаментальное соотношение, связывающее коэффициент излучения ε, коэффициент отражения ρ и коэффициент пропускания γ:

$$\varepsilon + \gamma + \rho = 1, \tag{3.134}$$

В 1860 году Кирхгоф обнаружил, что излучающая и поглощающая способности являются одной и той же физической величиной. Поэтому для абсолютно черного тела (γ=0) выражение (3.134) может быть записано в виде:

$$\rho = 1 - \varepsilon.$$

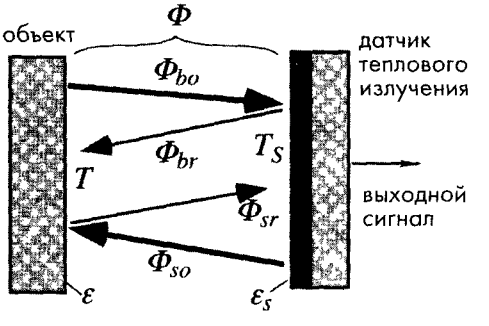


Рис. 3.43. Теплообмен межлу объектом и датчиком тепловых излучений

Закон Стефана-Больцмана определяет мощность излучения, испускаемого поверхностью с температурой T в бесконечно холодное пространство с температурой, равной абсолютному нулю. При детектировании тепловых излучений тепловыми датчиками (здесь обсуждаются только *тепловые* датчики, которые отличаются от квантовых детекторов, рассматриваемых в главе 13), необходимо также учитывать излучение от датчика к объекту. Тепловые датчики способны определять только полезную мощность теплового излучения (т.е. мощность излучения объекта минус мощность излучения самого датчика). Поверхность датчика, направленная в сторону объекта, обладает излучающей способностью ε_s, и, следовательно, его отражающая способность равна: ρ_s=1-ε_s. Поскольку датчик только частично поглощает излучение, не вся мощность излучения Φ_{b0} является полезной. Часть мощности Φ_{ba} поглощается датчиком, а другая часть Φ_{br} отражается обратно к объекту (рис. 3.43). В этих рассуждениях предполагается, что в окрестности датчика нет других объектов излучения. Отраженный поток излучений пропорционален коэффициенту отражения датчика:

$$\Phi_{br} = -\rho_s \Phi_{b0} = -A\varepsilon(1-\varepsilon_s)\sigma T^4. \tag{3.135}$$

Знак минус указывает на то, что отраженный поток направлен навстречу основному потоку излучений. В результате полезная мощность излучения объекта может быть найдена из выражения:

$$\Phi_b = \Phi_{b0} + \Phi_{br} = A\varepsilon\varepsilon_s \sigma T^4. \quad (3.136)$$

В зависимости от температуры собственной поверхности T_s датчик излучает собственный тепловой поток по направлению к объекту:

$$\Phi_s = -A\varepsilon\varepsilon_s \sigma T_s^4. \quad (3.137)$$

Эти два потока, направленные в противоположные стороны, формируют полезный поток, действующий между двумя поверхностями:

$$\Phi = \Phi_b + \Phi_s = A\varepsilon\varepsilon_s \sigma(T^4 - T_s^4) \quad (3.138)$$

Это выражение описывает работу теплового датчика, который преобразует полезную мощность теплового излучения в выходной электрический сигнал. Оно также устанавливает связь между тепловым потоком Ф, поглощенным датчиком, и абсолютными температурами объекта и датчика.

3.12.3.1 Излучающая способность

Излучающая способность среды является функцией ее диэлектрической проницаемости и, следовательно, коэффициента преломления *n*. Максимальная излучающая способность равна 1. Она соответствует, так называемому, черному телу – идеальному источнику электромагнитных излучений. Причиной такого названия является внешний вид объектов при нормальной комнатной температуре. Если тело является непрозрачным (γ=0) и ничего не отражает (ρ = 0), то согласно уравнению (3.134) оно представляет собой идеальный источник и поглотитель электромагнитных излучений (поскольку α = ε). Однако следует отметить, что излучающая способность объекта, как правило, зависит от длины волны излучений (рис. 3.44). Например, белый листок бумаги в видимом диапазоне спектра обладает очень хорошей отражающей способностью и почти не излучает видимого света. Однако в дальнем ИК диапазоне его отражающая способность значительно уменьшается, а излучающая способность наоборот возрастает до 0.92, что делает белую бумагу хорошим источником ИК излучений. Полиэтилен, широко используемый для изготовления линз дальнего ИК диапазона, сильно поглощает (излучает) волны очень узкого диапазона: в окрестностях длин волн, равных 3.5, 6.8 и 13 мкм, а в других областях спектра он является прозрачным (неизлучающим) материалом.

Часто излучающую способность в сравнительно узком спектральном диапазоне тепловых излучений (например, от 8 до 16 мкм) считают постоянной величиной. Однако для прецизионных измерений, когда тепловое излучение необходимо определять с точностью лучше 1%, излучающая способность поверхности должна быть либо заранее известна, либо надо использовать двухдиапазонный ИК детектор (Этот детектор проводит измерение потока ИК излучений в двух узких спектральных диапазонах Далее по отношению двух сигналов определяют температуру объекта. В процессе вычислений коэффициент излучения и другие мультипликативные составляющие сокращаются).

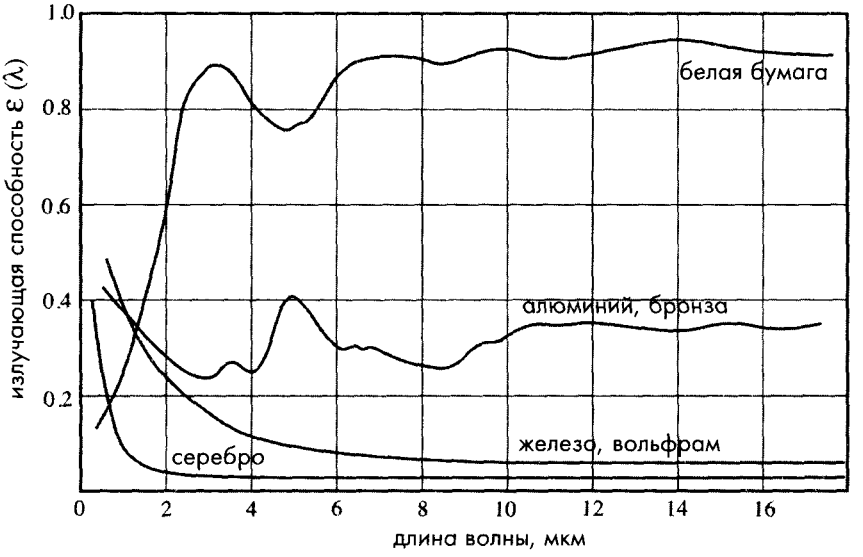


Рис. 3.44. Зависимость излучающей способности от длины волны

Для неполяризованного света дальнего ИК диапазона, направленного перпендикулярно поверхности, можно записать следующее выражение для коэффициента излучения:

$$\varepsilon = \frac{4n}{(n+1)^2}. \tag{3.139}$$

Все неметаллические материалы являются очень хорошими источниками диффузионного теплового излучения, обладающими практически постоянной излучающей способностью в пределах телесного угла ±70°, определяемой уравнением (3.139). За границами этого угла вплоть до 90° коэффициент излучения стремительно падает. В окрестности 90° он равен практически 0. На рис. 3.45А показана типичная для неметаллических материалов диаграмма направленности излучений в воздухе. Следует подчеркнуть, что все вышесказанное справедливо только для длин волн дальнего ИК диапазона спектра, и совсем несправедливо для волн видимого света.

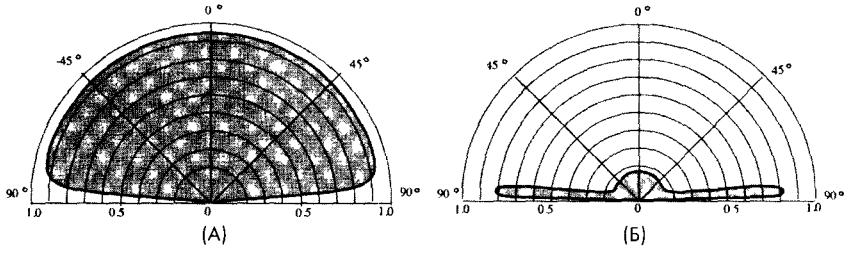


Рис. 3.45. Диаграммы направленности излучений для неметаллических материалов (А) и полированных металлов (Б)

Металлы ведут себя совсем по-другому. Их излучающая способность сильно зависит от способа обработки поверхности. Как правило, хорошо отшлифованные металлы плохо излучают в пределах телесного угла ±70°, а при больших углах их излучающая способность значительно возрастает (рис. 3.45Б). Это означает, что даже очень хорошие зеркала плохо отражают при углах в окрестности 90° от нормали. В Приложении приведены типичные значения коэффициентов излучения некоторых материалов для температур в диапазоне 0...100°С.

В отличие от большинства твердых тел газы во многих случаях являются прозрачными для теплового излучения. Они поглощают и испускают излучения только определенного узкого спектрального диапазона. Некоторые газы, такие как O_2, N_2 и другие, состоящие из симметричных неполярных молекулярных структур, пропускают электромагнитные волны только при низких температурах, тогда как CO_2, H_2O и углеводородные газы излучают и поглощают волны в более широком диапазоне. При попадании ИК света в слой газа его поглощающая способность падает по экспоненте, подчиняясь *закону Ламберта-Бера*:

$$\frac{\Phi_x}{\Phi_0} = e^{-\alpha_\lambda x}, \tag{3.140}$$

где Φ_0 – падающий тепловой поток, Φ_x – поток на глубине x, а α_λ – спектральный коэффициент поглощения. Это отношение также называется монохроматическим коэффициентом пропускания (проницаемостью) γ_λ определенной длины волны λ. Если отражающая способность газа равна нулю, его коэффициенг излучения определяется в виде:

$$\varepsilon_\lambda = 1 - \gamma_\lambda = 1 - e^{-\alpha_\lambda x}. \tag{3.141}$$

Следует подчеркнуть, что поскольку газы поглощают излучения только в узком спектральном диапазоне, коэффициенты излучения и пропускания соответствуют конкретным длинам волн. Например, водяной пар имеет высокий коэффициент поглощения на длинах волн 1.4, 1.8 и 2.7 мкм и является практически прозрачным на длинах волн 1.6, 2.2 и 4 мкм.

При использовании ИК-датчиков для бесконтактного измерения температуры необходимо знать излучающую способность объекта (см. уравнение (3.138)). Для калибровки бесконтактного термометра или для проверки его точности необходимо использовать лабораторные эталонные источники тепла. Для таких источников надо знать их излучающую способность, а также желательно, чтобы их коэффициент излучения был близок к единице. Несоблюдение этого условия приводит к большим отражениям сигнала (уравнение (3.134)), что может значительно увеличить погрешность детектирования потока ИК излучений. Но, к сожалению, не существует такого материала, коэффициент излучения которого был бы равен 1. Поверхность, моделирующую абсолютно черное тело, можно получить используя *резонаторы*.

3.12.3.2 Резонансный эффект

При измерении электромагнитного излучения из углубления, называемого резонатором, наблюдается интересный эффект. Резонатор представляет собой полость произвольной формы внутри тела с равномерной температурой по всей поверхности внутренних стенок (рис. 3.46А). Излучающая способность апертуры резонатора (но не его внутренней части!) по сравнению с плоской поверхностью значительно возрастает, а на некоторых длинах волн приближается к единице. Этот эффект еще более усиливается, если внутренние стенки резонатора обладают достаточно высоким коэффициентом излучения. Рассмотрим поверхность неметаллического резонатора. Все неметаллы являются диффузионными излучателями. Предположим, что температура и излучающая способность резонатора являются одинаковыми в любой его внутренней точке. Идеальный объект, чей коэффициент излучения равен единице, называется *черным телом*. Черное тело испускает с площади поверхности *a* поток ИК фотонов, равный:

$$\Phi_0 = a\sigma T_b^4$$

Однако реальный объект имеет коэффициент излучения ε_b, поэтому с точно такой же площади его поверхности испускается меньшии поток:

$$\Phi_r = \varepsilon_b \Phi_0$$

Поток, излучаемый другими частями объекта такой же площади *a*, тоже равен Φ_r (поскольку температура объекта считается везде одинаковой, пространственное распределение потока не учитывается). Значительная часть падающего потока Φ_r поглощается поверхностью площади *a*, в то время как меньшая часть диффузионно отражается :

$$\Phi_\rho = \rho\Phi_r = (1-\varepsilon_b)\varepsilon_b\Phi_0 \qquad (3\ 142)$$

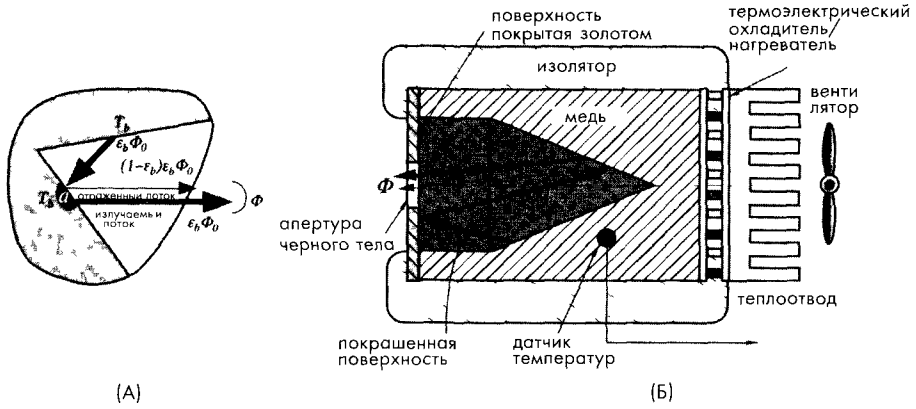


Рис. 3.46. А – усиление излучающей способности при помощи резонатора, Б – конструкция модели черного тела, применяемая на практике

Сложив излучаемый и отраженный потоки с площади a, получим:

$$\Phi = \Phi_r + \Phi_\rho = \varepsilon_b \Phi_0 + (1-\varepsilon_b)\,\varepsilon_b \Phi_0 = (2-\varepsilon_b)\,\varepsilon_b \Phi_0 \qquad (3.143)$$

Отсюда находим выражение для эффективной излучающей способности:

$$\varepsilon_e = \frac{\Phi}{\Phi_0} = (2-\varepsilon_b)\varepsilon_b. \qquad (3.144)$$

Из уравнения (3.144) видно, что при однократном отражении излучающая способность резонатора увеличивается в $(2 - \varepsilon_b)$ раза по сравнению с излучением ровной поверхности. Но в резонаторе может происходить несколько переотражений, поэтому поток излучений, падающий на площадку a, представляет собой сумму излучений и отражений от многих частей резонатора. Интенсивность результирующего потока, как правило, превышает интенсивность исходного потока излучений Φ_r.

Для эффективной работы резонатора необходимо четко определять место расположения его выходного отверстия и положение самого датчика. Если датчик находится слишком глубоко в резонаторе, он будет собирать излучение от всех его стен напрямую, поэтому может получиться так, что резонансный эффект пропадет, и эффективная излучающая способность станет равной излучению от внутренней поверхности полости резонатора, которая всегда ниже, чем в системе с переотражениями.

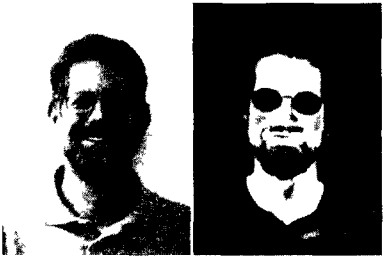


Рис. 3.47. Фотографии в видимом свете и в ИК излучении. Отметим, что более яркие области (кажущиеся более теплыми) в складках кожи возле носа объясняются резонансным эффектом. Очки на ИК фотографии выглядят черными (холодными), поскольку стекло не пропускает лучи среднего и дальнего ИК диапазона и , следовательно, задерживает тепловое излучение от лица. (Фотографии напечатаны с разрешения Infrared Training Center, www.infraredtraining.com)

Резонансный эффект меняет реальный коэффициент излучения, что всегда необходимо учитывать для предотвращения возникновения ошибок при оценке излучающей мощности. Рис. 3.47 иллюстрирует это. На нем показаны две фотографии: одна сделана в потоке видимого света, другая – в лучах среднего ИК диапазона(тепловое излучение). Из рисунка видно, что области в районе ноздрей носа выглядят несколько ярче, а значит и теплее, хотя температура этих участков практически не отличается от соседних. Две складки возле усов появились в результате резонансного эффекта, который увеличил излучающую способность кожи в этих местах от 0.96 до более высоких значений. Это усилило интенсивность отраженного теплового потока и создало иллюзию более теплой кожи.

Изготовление лабораторных черных тел является непростой задачей. Для получения значительного резонансного эффекта площадь поверхности полости

резонатора должна быть гораздо больше его апертуры, а его форма должна обеспечивать множественные внутренние переотражения до того, как тепловой поток доберется до выходного отверстия При этом температура стенок должна быть одинаковой по всей внутренней поверхности резонатора На рис 3 46Б показана конструкция резонатора, обладающего излучающей способностью выше 0 999 [38] Такой резонатор изготавливается из твердой меди и может иметь произвольную форму (предпочтительнее конусную) В него встраивается датчик температуры и термоэлектрический нагреватель/охладитель со схемой управления (на рисунке не показана), которые все вместе представляют собой термостат для поддержания заданного уровня температуры (выше или ниже окружающей температуры) Внутренние стенки резонатора окрашиваются органическими красителями любого цвета, который никак не влияет на отражающую способность в ИК спектральном диапазоне Самая проблематичная зона резонатора находится рядом с апертурой, поскольку здесь сложно поддерживать температуру, равной температуре внутренних участков, и обеспечивать ее независимость от окружающей среды Для уменьшения влияния окружающей температуры и увеличения эффективной площади резонатора внутреннюю поверхность его передней стенки хорошо полируют и на нее наносят слой золота Таким образом снижают излучающую способность передней стенки резонатора, что уменьшает проблему поддержания температуры в этой зоне В дополнение к этому поверхность отражает лучи, испускаемые от внутренних стен резонатора, что усиливает резонансный эффект Наружная поверхность резонатора покрывается теплоизоляционным слоем Следует отметить, что поверхностью черного тела считается апертура, которая, по существу, является полостью

3.13 Световое излучение

Световое излучение – очень эффективная форма энергии, по изменению которои можно судить о многих внешних воздействиях расстоянии, движении, температуры, химическом составе и т д Свет имеет электромагнитную природу Его можно рассматривать, как распространение энергии квантов или электромагнитных волн Разным зонам спектра даны свои определенные названия УФ излучение, видимый свет, дальний, средний и ближний ИК диапазоны излучений, микроволны, радиоволны и т д Название «свет» соответствует электромагнитному излучению с длинами волн в диапазоне 0 1 100 мкм Излучение с длиной волны, меньшей длины самой короткои волны видимого диапазона (фиолетовой), получило название ультрафиолетового, а, большей самой длиной волны света (красной), – инфракрасного Инфракрасный диапазон, в свою очередь, разделен еще на три поддиапазона ближнего (0 9 1 5 мкм), среднего (1 5 4 мкм) и дальнего (4 100 мкм) ИК излучении

Различные области спектра электромагнитных излучении изучаются в разных разделах физики На рис 3 41 приведен весь спектр от самых коротких волн (γ-лучей) до самых длинных (радиоволн) В этом разделе будут кратко рассмотрены свойства излучении, которые, в основном, характерны для областей видимого и ближнего ИК излучений электромагнитного спектра Тепловое излучение (среднего и дальнего ИК диапазонов) было описано в разделе 3 12

Скорость света в вакууме c_0 не зависит от длины волны и может быть выражена через магнитную постоянную свободного пространства $\mu_0=4\pi\times10^{-7}$Гн/м и его электрическую постоянную $\varepsilon_0=8\,854\times10^{-12}$Ф/м

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = 299\,792\,458\ 7 \pm 1\ 1\ ,м/с \qquad (3\ 145)$$

Частота световых волн в вакууме или любой другой среде связана с их длиной волны уравнением (3 128), которое можно переписать в виде

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \qquad (3\ 146)$$

где c – скорость света в среде

Энергия фотона связана с его частотой

$$E = h\nu, \qquad (3\ 147)$$

где $h = 6\ 63\times10^{-34}$Дж с или $4\ 13\times10^{-15}$эВ с называется постоянной Планка Энергия E измеряется в электрон вольтах (эВ) 1 эВ= $1\ 602\times10^{-19}$Дж

Фотоны ультрафиолетового и видимого излучений обладают довольно высокими энергиями, поэтому детектировать их несложно Однако при переходе длины волны в зону ИК спектра энергия фотонов уменьшается (например, энергия фотона ближнего ИК диапазона при длине волны 1 мкм составляет 1 24 эВ), что значительно осложняет работу оптических квантовых детекторов Чем больше увеличивается длина волны, тем сильнее снижается энергия излучений Кожа человека при 37°С излучает фотоны ближнего и дальнего ИК диапазонов, обладающие энергией порядка 0 13 эВ, что на порядок ниже энергии излучения красного света, делая их трудными для обнаружения По этой причине маломощные излучения чаще определяются тепловыми, а не квантовыми детекторами

Электромагнитные волны (теперь отойдем от квантовых характеристик света) обладают дополнительным свойством *поляризацией* (более точно *плоскостной поляризацией*) Это означает, что вектора напряженности переменного электрического поля в любой точке волны параллельны друг другу Вектора магнитного поля при этом также параллельны друг другу, но в данном случае нас больше интересует электрическая поляризация, поскольку детекторы электромагнитных излучений чаще всего чувствительны к изменениям электрических полей На рис 3 48А показана картинка, иллюстрирующая явление поляризации Волны на ней перемещаются в направлении оси x В этом случае говорят, что волна поляризована в направлении оси y, поскольку вектора электрического поля параллельны именно этой оси Плоскость, определяемая направлением распространения волны (ось x) и направлением поляризации (ось y), называется *плоскостью колебаний* В поляризованном свете не существует других направлений для векторов поля

На рис 3 48Б показан свет с произвольной поляризацией, источником которого может быть либо солнце, либо различные лампы накаливания, однако луч лазера является строго поляризованным Если неполяризованный свет направить на поляризационный фильтр, через него пройдут не все волны, и на выходе будет получено

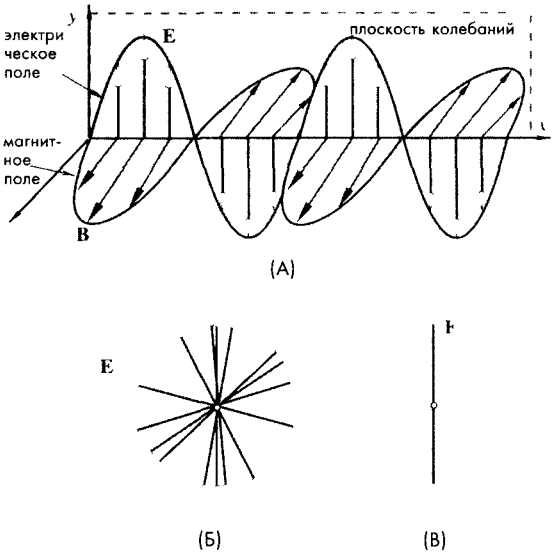


Рис. 3.48. А – распространяющаяся электромагнитная волна характеризуется векторами магнитного и электрического полей, Б – неполяризованное электрическое поле, наблюдаемое вдоль оси *x* (вектора магнитного поля не показаны, но они всегда присутствуют), В – вертикально поляризованное электрическое поле

электрическое поле, показанное на рис. 3.48Б. Поляризационный фильтр пропускает только те компоненты волн, векторы электрических полей которых колеблются параллельно направлению ориентации фильтра, и поглощает те, плоскость колебаний которых ориентирована под углом к этому направлению. Проходящий через фильтр свет имеет поляризацию, совпадающую с ориентацией фильтра. Направление поляризации фильтра задается в процессе его изготовления. Для этого в гибкие листы пластмассы встраивают определенные длиноцепочечные молекулы и подвергают их растяжению, в результате которого молекулы выстраиваются параллельно друг другу. Поляризационные фильтры наиболее широко используются в жидкокристаллических матрицах и во многих оптических датчиках, что будет описано в соответствующих разделах этой книги.

3.14 Динамические модели чувствительных элементов

Для определения динамических характеристик датчиков на их вход необходимо подавать переменные внешние сигналы и следить за реакцией на выходе. В общем виде, тестовые внешние сигналы могут быть любой формы, определяемой только практическими потребностями. Например, для определения собственной частоты акселерометра, лучшими тестовыми сигналами являются синусоидальные колебания переменной частоты, а для термисторного щупа тестовый сигнал должен представлять собой ступенчатую функцию температуры. Для других случаев чаще всего применяются ступенчатая или импульсная функции. Ступенчатые функции обладают теоретически бесконечным частотным спектром, что является причиной их использования для определения динамических характеристик датчиков, поскольку позволяют проводить тестирование одновременно на всех частотах.

Математически поведение датчика может быть описано дифференциальным уравнением, порядок которого зависит от физической природы чувствительного элемента и конструкции всей системы. Существует несколько типов зависимостей между входным сигналом *s* и выходной реакцией *S*: нулевого порядка, первого порядка и второго порядка.

Уравнение *нулевого порядка* является статическим или независящим от времени:

$$S(t) = Gs(t), \tag{3.148}$$

где G – постоянная передаточная функция. Это выражение можно записать в нескольких видах (см. уравнения 2.1-2.4). Важным здесь является то, что G не зависит от времени, поэтому выходной сигнал системы нулевого порядка на входную ступенчатую в ответ на ступенчатое входное воздействие будет также ступенчатым.

Уравнение *первого порядка* имеет вид:

$$a_1 \frac{dS(t)}{dt} + a_0 S(t) = s(t), \tag{3.149}$$

где a_1 и a_0 – константы. Это уравнение описывает поведение датчиков, сначала накапливающих энергию, а потом ее отдающих. Пример таких датчиков – датчик температуры, обладающий теплоемкостью и связанный с окружающей средой через тепловое сопротивление. Выходной сигнал такой системы в ответ на входную ступенчатую функцию носит экспоненциальный характер:

$$S(t) = S_0(1 - e^{-t/\tau}), \tag{3.150}$$

где S_0 – статическая реакция датчика, а τ - постоянная времени, характеризующая инерционность системы. Типичная реакция системы первого порядка показана на рис. 2.9Б во второй главе.

Перейдем к уравнениям *второго порядка*:

$$a_2 \frac{d^2 S(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dS(t)}{dt} + a_0 S(t) = s(t). \tag{3.151}$$

Такие дифференциальные уравнения соответствуют датчикам или системам, в состав которых входят по два энергонакопительных элемента – например, катушка индуктивности и конденсатор или датчик температуры и конденсатор. Поскольку в состав датчиков второго порядка часто входят элементы, совершающие колебательные движения, это может приводить к неустойчивости всей системы. На рис. 2.11Е во второй главе показана типичная форма выходного сигнала устройства второго порядка в ответ на ступенчатую входную функцию. Динамическая ошибка в таких системах определяется несколькими факторами: частотой ω_0 и коэффициентом затухания b, связанных с независимыми коэффициентами уравнения (3.151) следующими соотношениями:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}}, \tag{3.152}$$

$$b = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}}. \tag{3.153}$$

Критическое демпфирование системы (см. рис. 2.10 главы 2) соответствует коэффициенту затухания $b = 1$. При $b > 1$ наступает передемпфирование, а при $b < 1$ – недодемпфирование. Для получения более подробной информации о динамических характеристиках надо обратиться к специализированной литературе, например, [39].

Математическое моделирование датчика является мощным инструментом для прогнозирования его характеристик. Моделирование бывает двух типов: статическое и динамическое. Статические модели обычно используют передаточную функцию датчика в том виде, как она представлена во второй главе. В этой главе дано краткое описание способов оценки динамических характеристик системы. В состав динамических моделей могут входить несколько независимых переменных, одной из которых всегда является время. Рассматриваемые модели соответствуют представлению датчиков в виде систем с сосредоточенными параметрами. В этом разделе все математические модели строятся на применении законов физики к отдельным элементам системы. Другими словами, при разработке модели датчик разбивается на отдельные элементы, и каждый элемент рассматривается отдельно. После этого математические описания индивидуальных элементов объединяются в единую модель, описывающую поведение всей системы в целом.

3.14.1 Механические элементы

Динамический механический элемент можно представить в виде массы (инерционного компонента), соединенной с пружиной и демпфирующим устройством. При вязкостном демпфировании и прямолинейном перемещении удерживающая сила пропорциональна скорости движения. Аналогично этому и при круговом движении удерживающая сила всегда пропорциональна угловой скорости. Поэтому сила или крутящий момент, формируемые штоком или пружиной, как правило, также пропорциональны перемещению. В таблице 3.4 приведены основные уравнения для некоторых механических элементов.

Таблица 3.4. Механические, тепловые и электрические аналогии

механические	тепловые	электрические	
масса M	емкость C	катушка индуктивности L	емкость
$F=M\frac{d(v)}{dt}$	$Q=C\frac{dT}{dt}$	$V=L\frac{di}{dt}$	$i=C\frac{dV}{dt}$
пружина k	емкость C	конденсатор C	катушка индуктивности L
$F=k\int v dt$	$T=\frac{1}{C}\int Q dt$	$V=\frac{1}{C}\int i dt$	$i=\frac{1}{L}\int V dt$
демпфер b	сопротивление R	R резистор	R резистор
$F=bv$	$Q=\frac{1}{R}(T_2-T_1)$	$V=Ri$	$i=\frac{1}{R}V$

Самый простой способ вывода уравнений движения – выделение каждого инерционного элемента (массы) и рассмотрение его как свободного тела. При этом предполагается, что все свободные компоненты начинают свое движение из положения равновесия, а удерживающие силы или моменты, возникающие при перемещении, возвращают их снова на исходную позицию. При выполнении этих условий к каждому элементу можно применить второй закон Ньютона и вывести из него уравнение движения.

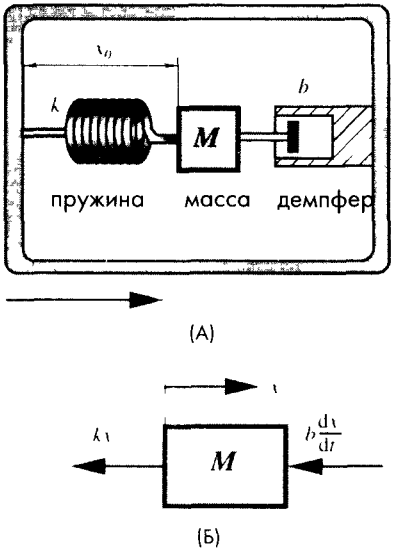


Рис. 3.49. А – механическая модель акселерометра, В – диаграмма сил, действующих на свободное тело массы М

Для прямолинейного движения и совместимых систем единиц измерения второй закон Ньютона формулируется следующим образом: *сумма сил, действующих на тело, равна произведению его массы на ускорение.* В системе СИ сила измеряется в ньютонах (Н), масса в килограммах (кг), а ускорение в м/с^2.

Для вращательного движения закон Ньютона гласит, что *сумма моментов сил, действующих на тело, равна произведению его момента инерции на угловое ускорение.* Момент сил измеряется в Ньютон×метр (Н×м), момент инерции в килограммах на метр квадратный (кг·м^2), а угловое ускорение – в радианах на секунду в квадрате (рад/с^2).

Рассмотрим одноосевой акселерометр, состоящий из инерционного элемента, чье движение преобразуется в электрический сигнал. Для этого, например, можно применить пьезоэлектрический преобразователь. На рис. 3.49А показана механическая модель такого акселерометра. Масса M удерживается пружиной, обладающей коэффициентом жесткости k. Движение массы демпфируется успокоительным устройством, обеспечивающим коэффициент затухания b. Инерционный элемент может перемещаться в корпусе акселерометра только в горизонтальном направлении. Во время движения на устройство действует ускорение d^2x/dt^2, а выходной сигнал пропорционален отклонению массы на расстояние x_0.

Поскольку инерционный элемент может перемещаться только в одном направлении, акселерометр имеет только одну степень свободы. На рис. 3.49Б показана диаграмма сил, действующих на свободное тело массы M. Отметим, что x_0 равно сумме смещения тела от равновесного состояния x и некоторого фиксированного расстояния. Применяя второй закон Ньютона, получаем следующее соотношение:

$$Mf = -kx - b\frac{dx}{dt}, \tag{3.154}$$

где f – ускорение инерционной массы с учетом ускорения свободного падения:

$$f = \frac{d^2x}{dt^2} - \frac{d^2y}{dt^2}. \tag{3.155}$$

Подставив это выражение в уравнение (3.154), получим требуемое уравнение движения:

$$M\frac{d^2x}{dt^2}+b\frac{dx}{dt}+kx=M\frac{d^2y}{dt^2}. \qquad (3.156)$$

Отметим, что каждый член в уравнении (3.156) имеет размерность ньютон (Н). Это выражение является дифференциальным уравнением второго порядка, что означает, что на выходе акселерометра могут появиться нежелательные колебания. На практике, регулируя коэффициент затухания b, добиваются состояния критического демпфирования.

3.14.2 Тепловые элементы

Тепловые элементы – это радиаторы, нагревательные элементы, теплоизоляторы, отражатели и поглотители тепла. При изучении тепловых характеристик датчик рассматривается как составная часть измерительной системы, при этом учитываются: теплопередача через корпус устройства и монтажные элементы, конвекция воздуха, обмен тепловыми излучениями с остальными объектами и т.д.

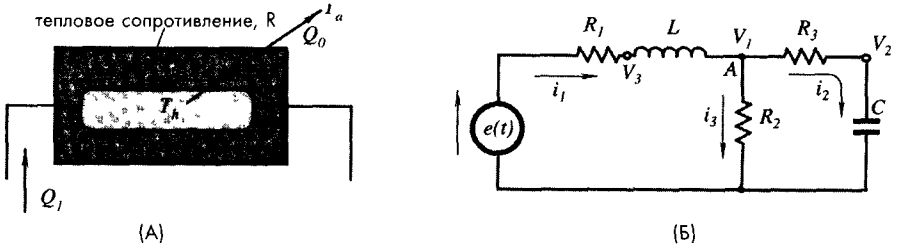


Рис. 3.50. А – тепловая модель нагревательного элемента, Б – электрическая схема с резистивными, емкостными и индуктивными элементами

Вспомним, что тепло передается тремя способами: через теплопроводность, естественную и принудительную конвекцию и тепловое излучение (раздел 3.12). При построении простой модели с сосредоточенными параметрами для определения изменения температуры объекта можно воспользоваться первым законом термодинамики, по которому скорость изменения внутренней энергии тела равна разности втекающего и вытекающего потоков тепла, что очень напоминает задачу об уровне воды в резервуаре, когда в одну трубу вода заливается, а из другой сливается. Тогда тепловой баланс можно выразить в виде уравнения:

$$C\frac{dT}{dt}=\Delta Q, \qquad (3.157)$$

где $C = M \times c$ – теплоемкость тела (Дж/К), T – температура (К), ΔQ – интенсивность теплового потока (Вт), M – масса тела (кг), а c – удельная теплоемкость материала (Дж/(кг×К). Интенсивность теплового потока, проходящего через тело, является функцией теплового сопротивления тела, которая на практике часто считается линейной:

$$\Delta Q = \frac{T_1 - T_2}{R}, \tag{3.158}$$

где R – тепловое сопротивление (К/Вт), а T_1-T_2 – градиент температуры на элементе, теплопроводность которого рассматривается.

Для иллюстрации этого проанализируем нагревательный элемент, имеющий температуру T_h (рис.3.50А). Элемент покрыт слоем теплоизоляционного материала. Температура окружающей среды равна T_a. Q_1 – это тепло, приложенное к элементу, Q_0 – тепловые потери. Из уравнения (3.157) следует, что

$$C\frac{dT_h}{dt} = Q_1 - Q_0, \tag{3.159}$$

а из уравнения (3.158):

$$Q_0 = \frac{T_h - T_a}{R}. \tag{3.160}$$

Объединив эти два выражения, получим дифференциальное уравнение:

$$\frac{dT_h}{dt} + \frac{T_h}{RC} = \frac{Q_1}{C} + \frac{T_a}{RC}. \tag{3.161}$$

Это уравнение первого порядка является типичным для тепловых систем. Тепловые элементы очень стабильны по своей природе, если только не входят в состав устройств с контуром обратной связи. Выходная реакция простого теплового элемента на ступенчатое внешнее воздействие характеризуется постоянной времени, равной произведению теплоемкости на тепловое сопротивление: $\tau_T = CR$. Постоянная времени измеряется в секундах, и для пассивных охлаждающих элементов она равна времени, за которое выходной сигнал достигает уровня 37% от начального температурного градиента.

3.14.3 Электрические элементы

Существуют три основных электрических элемента: конденсатор, катушка индуктивност и резистор. В таблице 3.4 приведены основные уравнения, описывающие поведение идеальных элементов. Эти уравнения получены из законов Кирхгофа, выведенных из закона сохранения энергии:

Первый закон Кирхгофа: Полный ток, втекающий в узел, равен сумме токов, вытекающих из него (т.е. алгебраическая сумма токов в узле всегда равна нулю)

Второй закон Кирхгофа: В замкнутой электрической цепи алгебраическая сумма напряжений на всех участках цепи равна величине приложенной э.д.с.

Предположим, что датчик можно представить в виде схемы, показанной на рис. 3.50Б. Для нахождения уравнения этой схемы воспользуемся первым законом Кирхгофа, который часто называют законом токов. Для узла схемы и каждого тока можно записать следующие выражения:

$$i_1 - i_2 - i_3 = 0, \tag{3 162}$$

$$i_1 = \frac{e - V_3}{R_1} = \frac{1}{L}\int (V_3 - V_1)dt, \quad i_2 = \frac{V_1 - V_2}{R_3} = C\frac{dV_2}{dt}, \quad i_3 = \frac{V_1}{R_2}. \tag{3 163}$$

После подстановки уравнений (3.163) в выражение (3.162) получим искомое соотношение:

$$\frac{V_3}{R_1} + \frac{V_1 - V_2}{R_3} + 2\frac{V_1}{R_2} + C\frac{dV_2}{dt} - \frac{1}{L}\int (V_3 - V_1)\,dt = \frac{e}{R_1} \tag{3 164}$$

В уравнении (3.164) отношение e/R_1 – входной ток, а V_1, V_2 и V_3 – измеряемые выходные напряжения Для получения уравнения (3.164) надо определить значения трех переменных: i_1, i_2 и i_3 и вывести три динамических уравнения. Применяя выражение (3.162), можно свести эти три уравнения в одно Отметим, что каждый элемент в этом уравнении имеет размерность тока – Ампер (А).

3.14.4 Аналогии

В предыдущих разделах механические, тепловые и электрические элементы рассматривались по отдельности. Однако, если посмотреть на динамические уравнения этих элементов, можно заметить их схожесть. Поэтому возможно, например, взять механический или тепловой элемент, построить для него эквивалентную электрическую схему и анализировать ее при помощи законов Кирхгофа. В таблице 3.4 приведены сосредоточенные элементы механических, тепловых и электрических схем совместно с уравнениями, описывающими их поведение. Для механических компонентов использовался второй закон Ньютона, а для тепловых – закон охлаждения Ньютона.

В первой колонке таблицы 3.4 даны линейные механические элементы и их уравнения, выраженные через силу (F). Во второй колонке приведены линейные тепловые элементы и их уравнения, выраженные через тепло (Q) А в третьей и четвертой колонках даны электрические аналоги элементов, приведенных в первых двух столбцах. Эти аналоги (конденсатор, индуктор и резистор) описаны с помощью выражений для напряжения и тока. Приведенные аналоги могут применяться при оценке параметров датчиков, а также промежуточных тепловых и механических элементов между объектом и окружающей средой.

Литература

1 Halliday, D and Resnick, R *Fundamentals of Physics,* 2nd ed John Wiley & Sons, New York, 1986
2 Crotzer, D R and Falcone, R Method for manufacturing hygristors U S patent 5,273,777, 1993
3 Meissner, A Uber piezoelectrische Krystalle bei Hochfrequenz Z *Tech Phys* 8(74), 1927
4 Neubert, H K R Instrument transducers An introduction to their performance and design, 2nd ed Clarendon Press, Oxford, 1975
5 Radice, R F Corona discharge poling process, U S patent 4,365, 283, 1982
6 Southgate, *P D ,Appl Phys Lett* 28, 250, 1976
7 Jaffe, B , Cook, W R , and Jaffe, H *Piezoelectric Ceramics* Academic Press, London,1971

8 Mason, W P *Piezoelectric Crystals and Their Application to Ultrasonics* Van Nostrand, New York, 1950
9 Megaw, H D *Ferroelectricity in Crystals* Methuen, London, 1957
10 Tamura, M , Yamaguchi, T , Oyaba, T , and Yoshimi, T J *Audio Eng Soc* 23(31) 1975
11 Elliason, S Electronic properties of piezoelectric polymers Report TRITA-FYS 6665 from Dept of Applied Physics, The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1984
12 *Piezo Film Sensors Technical Manual* Measurement Specialties, Inc , Fairfield, NJ, 1999, available from www msiusa com
13 Oikawa, A and Toda, K Preparation of Pb(Zr,Ti)03 thin films by an electron beam evaporation technique *Appl Phys Lett* 29, 491, 1976
14 Okada, A Some electrical and optical properties of ferroelectric lead-zirconite-lead-titanate thin films 7 *Appl Phys* , 48, 2905, 1977
15 Castelano, R N and Feinstein, L G Ion-beam deposition of thin films of ferroelectric lead-zirconite titanate (PZT) *J Appl Phys* , 50, 4406, 1979
16 Adachi, H , et al Ferroelectric (Pb, La)(Zr, Ti)03 epitaxial thin films on sapphire grown by RF-planar magnetron sputtering *J Appl Phys* 60, 736, 1986
17 Ogawa, T , Senda S , and Kasanami, T Preparation of ferroelectric thin films by RF sputtering *J Appl Phys* 28-2, 11-14, 1989
18 Roy, D , Krupanidhi, S B , and Dougherty, J Excimer laser ablated lead zirconite titanate thin films *J Appl Phys* 69, 1, 1991
19 Yi, G, Wu, **Z.,** and Sayer, M Preparation of PZT thin film by sol-gel processing electrical, optical, and electro-optic properties *J Appl Phys* 64(5), 2717-2724, 1988
20 Kawai, H The piezoelectricity ofpoly(vinylidene fluoride) *Jpn J of Appl Phys* 8,975-976,1969
21 Meixner, H , Mader, G, and Kleinschmidt, P Infrared sensors based on the pyro-electric polymer polyvinylidene fluoride (PVDF) *Siemens Forsch Entwicl Ber Bd* 15(3), 105-114, 1986
22 Kleinschmidt, P Piezo- und pyroelektrische Effekte In *Sensork* W Heyward Springer, Heidelberg, 1984, Chap 6
23 *Semiconductor Sensors Data Handbook* Philips Export B V, Eindhoven, 1988
24 Ye, C , Tamagawa, T , and Polla, D L Pyroelectric PbTiOs thin films for mi-crosensor applications In *Transducers'91 International conference on Solid-State Sensors and Actuators Digest of Technical Papers,* Schooley, J , ed IEEE, New York, 1991, pp 904-907
25 Beer, A C *Galvanomagnetic Effect in Semiconductors Solid State Physics* F Seitz and D Turnbull, eds Academic Press, New York, 1963
26 Putlye, E H *The Hall Effect and Related Phenomena* Semiconductor monographs , Hogarth, ed Butterworths, London, 1960
27 Sprague *Hall Effect and Optoelectronic Sensors Data Book* SN-500, 1987
28 Williams, J Thermocouple measurement In *Linear applications handbook* Linear Technology Corp , 1990
29 Seebeck, T , Dr Magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temper-aturDifferenz *Abhaandulgen der Preussischen Akademic der Wissenschaften,* pp 265-373, 1822-1823
30 Benedict, R P *Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements,* 3rd ed John Wiley & Sons, New York, 1984
31 LeChatelier, *H Copt Tend* , 102, 1886
32 Carter, E F ed *Dictionary of Inventions and Discoveries* Crane, Russak and Co , New York, 1966
33 Peltier, J C A Investigation of the heat developed by electric currents in homogeneous materials and at the junction of two different conductors, *Ann Phys* Chem ,56,1834
34 Thomson, W On the thermal effects of electric currents in unequal heated conductors *Proc R Soc* VII, 1854
35 *Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement* ASTM, Philadelphia, 1981
36 Doebelin, E O *Measurement Systems Application and Design,* 4th ed McGraw-Hill, New York, 1990
37 Holman J P *Heat Transfer,* 3rd ed McGraw-Hill, New York, 1972
38 Fraden, J Blackbody cavity for calibration of infrared thermometers U S patent 6447160,2002
39 Thompson, S *Control Systems Engineering & Design* Longman Scientific & Technical, Essex, UK, 1989
40 MacDonald, D K C Thermoelectricity an introduction to the principles John Wiley & Sons, New York, 1962

ГЛАВА 4

ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ ДАТЧИКОВ

«Там где заканчивается телескоп, начинается микроскоп. Какой из этих двух приборов имеет больший обзор?»
Виктор Гюго

Свет может преломляться, отражаться, поглощаться, интерферировать, поляризоваться и распространяться. Все эти явления могут использоваться для построения разнообразных датчиков. Для управления светом применяются специальные оптические устройства, которые описываются в этой главе с точки зрения геометрической оптики. Это значит, что свойства света, подробно изучаемые в квантовой механике и квантовой электродинамике, здесь рассматриваться не будут. Волновые свойства света будут также игнорироваться. Свет в этой главе представляется в виде движущейся фронтальной поверхности или в виде луча, перпендикулярного этой поверхности. Для того чтобы эти допущения были справедливы, оптические элементы, геометрические размеры которых намного меньше длины волны, учитываться не будут. Например, если в оконном стекле есть небольшие включения субмикронного размера, они будут полностью проигнорированы в ходе всех геометрических вычислений в любом диапазоне длин волн. Другим примером является дифракционная решетка. Ее поведение не может быть описано методами геометрической оптики. В таких случаях необходимо применять методы квантовой электродинамики. В этой главе рассматриваются только те оптические элементы, которые наиболее часто используются для построения датчиков. Более подробную информацию по вопросам геометрической оптики можно найти в специальной литературе (например, [1]).

Перед тем как управлять светом, его сначала надо получить. Есть несколько способов генерации света. Существуют естественные источники света, некоторые из них могут быть встроены в измерительные устройства. Самыми большими естественным световыми источниками являются астрономические объекты, такие как Солнце, Луна, звезды и т.д. К естественным источникам света также относятся все материальные объекты, излучающие то или иное количество тепловой энергии, зависящее от их температуры (см. третью главу). К таким объектам относится пла-

мя, экзотермические химические реакции, живые организмы и другие естественные источники тепла, температура которых отличается от окружающей, и чье тепловое излучение может избирательно детектироваться оптическими приборами. Искусственные источники света – это нити накаливания электрических ламп, светоизлучающие диоды (СИД), газоразрядные лампы, лазеры, лазерные диоды, нагреватели и охладители.

На рис. 4.1 показано несколько примеров систем управления светом в датчиках. Большинство этих методов основаны на изменении направления света, другие – на избирательной фильтрации определенных длин волн (рис. 4.1А). Изменение направления света осуществляется за счет таких физических явлений как *отражение* при помощи зеркал, дифракционных решеток, оптических волноводов и оптоволокон и *отклонение* при пропускании лучей через линзы, призмы, химические растворы, кристаллы, органические материалы и биологические объекты. При прохождении света через такие объекты из-за воздействия внешних факторов может произойти изменение некоторых его параметров, таких как: интенсивность, направление распространения, поляризация, спектральный состав, и даже таких как: скорость света и фаза его волны. Задача разработчиков датчиков заключается в том, чтобы научиться определять количественное изменение этих параметров и соотносить полученные результаты с величиной внешних воздействий.

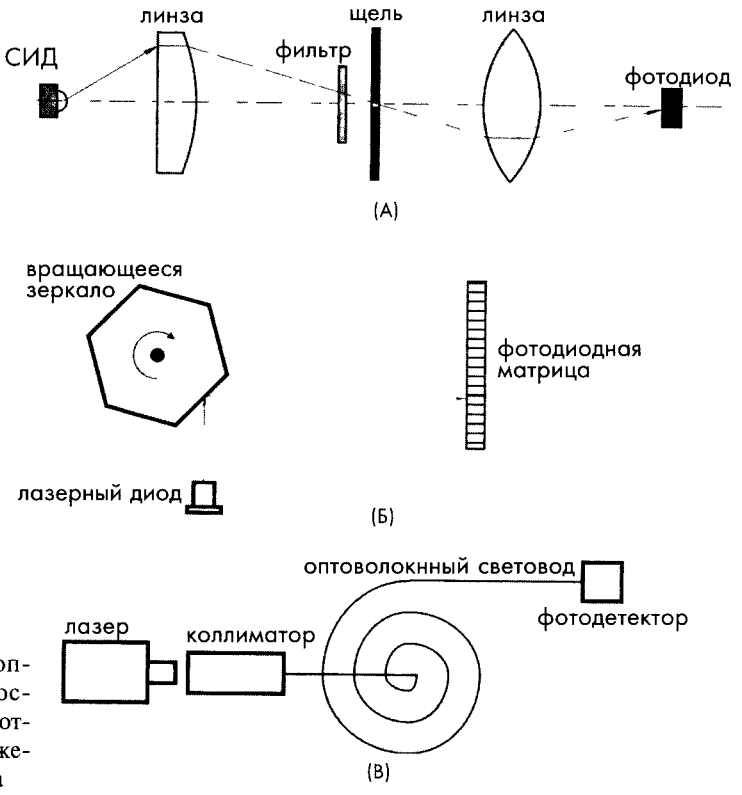


Рис. 4.1. Примеры оптических систем, построенных на основе: отклонения (А) и отражения (Б, В) лучей света

4.1. Радиометрия

Рассмотрим прохождение света через трехслойную структуру, каждый слой которой изготовлен из разного материала, называемого средой. На рис. 4.2 показана траектория луча при его распространении через все слои структуры. Часть падающего света отражается от плоской границы между первыми двумя средами. Из *закона отражения*, исторически приписанного Евклиду, известно, что:

$$\theta_1 = \theta'_1, \tag{4.1}$$

Часть света, уже под другим углом проходит дальше – во вторую среду. Величина нового угла θ_2 определяется *законом преломления*, открытым в 1621 году В. Снеллом (1580-1626):

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 , \tag{4.2}$$

где n_1 и n_2 – коэффициенты преломления двух сред.

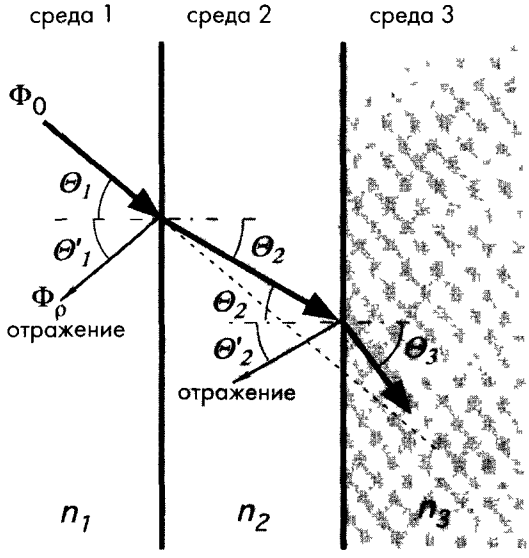


Рис. 4.2 Прохождение света через материалы с разными коэффициентами преломления

Во всех средах свет распространяется гораздо медленнее, чем в вакууме. *Коэффициент преломления* – это отношение скорости света в вакууме c_0 к скорости света в среде c:

$$n = \frac{c_0}{c}, \tag{4.3}$$

Поскольку $c < c_0$, коэффициент преломления среды всегда больше единицы. Скорость света в среде зависит от диэлектрической проницаемости среды ε_r, которая,

в свою очередь, определяет коэффициент преломления:

$$n = \sqrt{\varepsilon_r} \ . \tag{4.4}$$

Как правило, n также является и функцией длины волны. Зависимость коэффициента преломления от длины волны особенно четко проявляется в призме. Одну из таких призм использовал Исаак Ньютон в своих экспериментах при изучении спектра света. В видимом диапазоне спектра коэффициент преломления n часто определяется при длине волны 0.58756 мкм, соответствующей желто-оранжевой линии гелия. В Приложении приведены коэффициенты преломления некоторых материалов.

Зависимость коэффициента преломления от длины волны называется дисперсией. Изменение n с увеличением длины волны обычно происходит очень плавно и часто незаметно, если только длина волны не приближается к области, где материал перестает быть прозрачным. На рис. 4.3 показаны зависимости коэффициентов пропускания различных оптических материалов от длины волны.

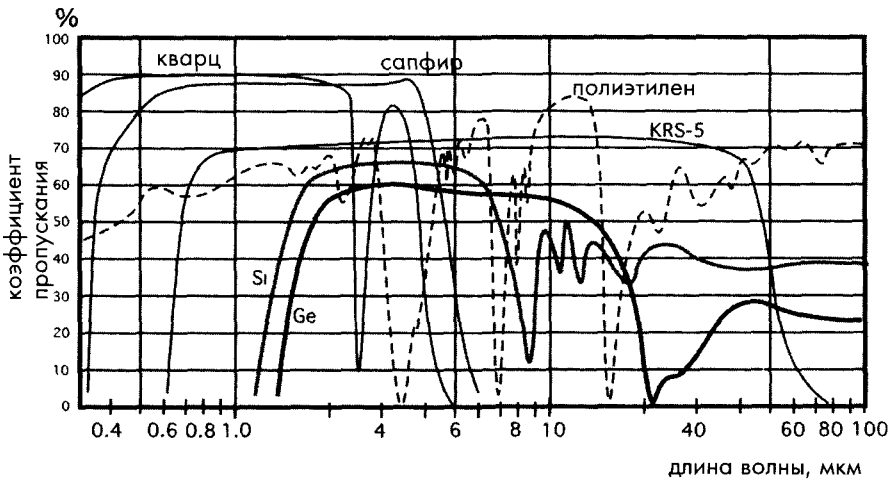


Рис. 4.3 Характеристики пропускания света различными оптическими материалами

Доля света, отраженного от границы под углом θ'_1, зависит от скорости света в двух смежных средах. Отношение потока отраженного света Φ_ρ к потоку падающего света Φ_0 называется *коэффициентом отражения* ρ, который можно выразить через коэффициенты преломления двух сред:

$$\rho = \frac{\Phi_\rho}{\Phi_0} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 . \tag{4.5}$$

Уравнения (3.139) и (4.5) показывают, что коэффициенты отражения и поглощения (излучения) зависят только от коэффициентов преломления материала на определенной длине волны.

Если световой поток входит в объект с коэффициентом преломления n из воздуха, уравнение (4.5) значительно упрощается:

$$\rho = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 . \qquad (4.6)$$

Как только свет достигает границы среды с коэффициентом преломления n_3 (рис. 4.2), часть его отражается от нее под углом θ'_2. Оставшаяся часть света входит в третью среду под углом преломления θ_3, также определяемого законом Снелла. Если среды 1 и 3 с обоих сторон пластины из второго материала (например, стекла) являются одинаковыми (например, воздушными), выполняются следующие условия: $n_1 = n_3$, $\theta_1 = \theta_3$ (этот случай проиллюстрирован на рис. 4.4). Из уравнения (4.5) следует, что коэффициенты отражения не зависят от направления пересечения светом границы двух сред: из зоны с более низким коэффициентом преломления в зону с более высоким преломлением или наоборот.

Суммарный коэффициент отражения от двух поверхностей пластины может быть найден по упрощенной формуле:

$$\rho_2 \approx \rho_1(2-\rho_1), \qquad (4.7)$$

где ρ_1 – коэффициент отражения от одной поверхности. В реальной жизни свет, отраженный от второй границы, снова отражается от первой границы по направлению ко второй и т.д. Таким образом, если в материале не происходит поглощения света, то зная коэффициент преломления материала, можно определить суммарные потери на отражение внутри пластины:

$$\rho_2 = 1 - \frac{2n}{n^2+1} . \qquad (4.8)$$

Отражение усиливается при большой разности между коэффициентами преломления. Например, если видимый свет из воздуха проходит без поглощения через пластину из флинта (оптического стекла) и попадает снова в воздух, два отражения приводят к потерям порядка 11%, в то время как при прохождении света по траектории: воздух-германий-воздух (в дальнем ИК спектральном диапазоне) аналогичные потери на отражение составляют около 59%. Для уменьшения потерь на оптические материалы часто наносят антиотражающие покрытия, коэффициенты преломления и толщина которых определяются конкретной длиной волны.

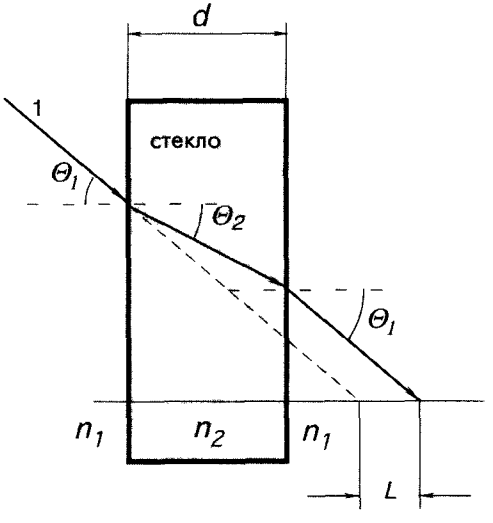


Рис. 4.4. Прохождение света через оптическую пластину

Уравнение баланса энергии излучения (3.134) для этого случая будет иметь вид:

$$\rho_2 + \alpha + \gamma = 1. \tag{4.9}$$

Здесь α – коэффициент поглощения (излучения), а γ – коэффициент пропускания. В зоне полной прозрачности, где отсутствует поглощение света, т.е. $\alpha \approx 0$, выражение коэффициента пропускания принимает вид:

$$\gamma = 1 - \rho_2 \approx \frac{2n}{n^2 + 1}. \tag{4.10}$$

Уравнение (4.10) определяет теоретический максимум коэффициента пропускания оптической пластины. Для вышеприведенного примера коэффициент пропускания стеклянной пластины в видимом спектральном диапазоне составляет 88.6%, а для германиевой пластины этот коэффициент в дальней ИК области спектра равен 41%. В видимом диапазоне пропускная способность германия равна нулю. Это означает, что в нем отражается и поглощается 100% света. На рис. 4.5 показаны зависимости коэффициентов отражения и пропускания от коэффициента преломления в тонкой пластине. Здесь под пластиной подразумевается оптическое устройство (например, линза или диафрагма), работающее в пределах присущего ему спектрального диапазона, в котором малы потери на поглощение, т.е. $\alpha \approx 0$.

На рис. 4.6 показано распределение энергии внутри оптической пластины, при попадании на ее поверхность потока света Φ_0. Часть падающего потока Φ_ρ отражается назад, другая часть Φ_α поглощается материалом пластины, третья часть Φ_γ проходит ее насквозь. Часть поглощенного света превращается в тепло и увеличивает температуру пластины, а другая его часть ΔP теряется в опорной конструкции и окружающей среде через механизмы теплопередачи и конвекции. В ряде случаев, например, когда речь идет о диафрагме мощного лазера, такое повышение температуры необходимо учитывать. В других случаях увеличение температуры, например, в инфракрасных детекторах, может стать серьезной проблемой. Это связано с тем, что рост температуры приводит к появлению дополнительного потока: $\Phi_\varepsilon = \Phi_\alpha - \Delta P$, называемого вторичным излучением. Естественно, что диапазон этого излучения определяется температурой материала и находится в дальней ИК области спектра. Спектральное распределение вторичного излучения соответствует распределению поглощенной энергии в материале, поскольку поглощение и излучение являются одной и той же физической величиной.

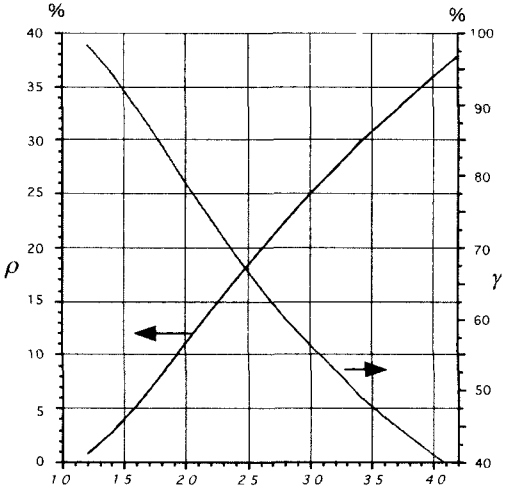


Рис. 4.5 Пропускная и отражающая способность толстой пластины как функция от коэффициента преломления

Для материалов с низкой поглощающей способностью выражение для коэффициента поглощения имеет вид:

$$\alpha = \frac{mc}{\Phi\gamma}\frac{2n}{n^2+1}\left(\frac{dT_g}{dt}+\frac{dT_L}{dt}\right)T_0, \quad (4\ 11)$$

где m и c – масса и удельная теплоемкость оптического материала, T_g и T_L – наклоны возрастающего и убывающего участков температурной кривой материала при тестовой температуре T_0. Строго говоря, потери света в материалах объясняются не только его поглощением, но и рассеянием. Суммарные потери в материале могут быть выражены через, так называемый, *коэффициент ослабления* g и толщину образца h. Тогда уравнение для коэффициента пропускания (4.10) с учетом ослабления преобразуется к виду:

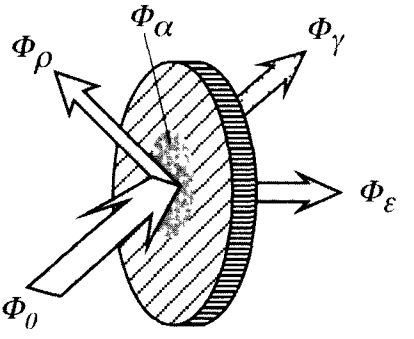


Рис. 4.6. Распределение энергии излучений в оптической пластине

$$\gamma \approx (1-\rho_2)e^{-gh} \quad (4\ 12)$$

Коэффициент ослабления (затухания) g обычно определяется производителями оптических материалов.

4.2. Фотометрия

При использовании светочувствительных приборов (фотодетекторов) необходимо учитывать фотометрические характеристики (спектральный диапазон излучений, излучающую способность, яркость и освещенность и т.д.) как датчиков, так и источников света. В некоторых случаях источник света является независимым устройством, в других – он является частью, измерительной системы.

Для измерения интенсивности излучений и яркости были введены специальные единицы. Поток излучении (количество энергии, излучаемой в единицу времени) в видимом диапазоне спектра назвали световым потоком. Введение этого понятия связано с неспособностью человеческого глаза различать уровни мощности излучений разных длин волн видимой области спектра. Например, синий и красный свет одинаковой интенсивности человеком воспринимаются по-разному, красный цвет ему кажется намного ярче. Поэтому для сравнения яркости света разных цветов была введена специальная единица *люмен* (лм) . Один люмен соответствует световому потоку от эталонного источника излучений из расплавленной платины, изготовленного в форме черного тела и наблюдаемого через определенную апертуру, образованную телесным углом, равным одному стерадиану. Телесный угол ω равен отношению площади поверхности A, вырезаемой на сфере конусом с вершиной в центре сферы, к квадрату ее радиуса r:

$$\omega = \frac{A}{r^2} \tag{4 13}$$

Когда $A = r^2$, $\omega = 1$ стерадиану (ср) (см таблицу 1 7)

Освещенность определяется как

$$E = \frac{dF}{dA} \tag{4 14}$$

Таким образом, под освещенностью понимается отношение светового потока F к площади освещаемой поверхности A Единицей освещенности в системе СИ является люкс (лк) = лм/м^2

Сила света определяется как отношение потока света к телесному углу, в пределах которого он распространяется

$$I_L = \frac{dF}{d\omega} \tag{4 15}$$

Единицей силы света является кандела, равная люмену на стерадиан (1 кд = лм/ср) Если сила света постоянна в пределах угла излучения, уравнение (4 15) принимает вид

$$I_L = \frac{F}{\omega} \tag{4 16}$$

При изменении длины волны для сохранения постоянноы освещенности мощность излучения в ваттах необходимо также изменять Для каждого конкретного значения частоты существует своя зависимость между освещенностью и мощнос тью излучения В справочной литературе за точку отсчета обычно выбирают длину волны 0 555 мкм, поскольку именно она соответствует пику спектральной чувствительности человеческого глаза На этой длине волны 1 ватт мощности излучения эквивалентен 680 люменам Для удобства читателей в таблице 4 1 приведена наиболее часто используемая терминология

Таблица 4.1 Радиометрическая и фотометрическая терминология

Описание	Радиометрия	Фотометрия
Суммарный поток	поток излучения (F) в Вт	световой поток (F) в люменах
Плотность потока излучения на поверхности источника	излучающая способность (W) в Вт/см^2	излучающая способность (L) в люмен/см^2 или в люмен/фт^2
Интенсивность точечного источника излучений	сила излучения (I_r) в Вт/ср	сила света (I_l) в канделах (люмен/ср)
Интенсивность пространственного источника излучений	энергетическая яркость (B_r) в Вт/ср/см^2	яркость (B_l) в люмен/ср/см^2 (ламбертах)
Плотность потока падающего света на поверхность премника	энергетическая освещенность (H)в Вт/см^2	освещенность (E) в люмен/см^2 (канделах) или в люмен/фт^2(фут-канделах)

Источник [2]

При выборе электрооптических датчиков необходимо учитывать конструктивные особенности источников света. В зависимости от соотношения между размерами источника и расстоянием между ним и детектором источники света могут быть либо *точечными*, либо *пространственными*. Источник считается точечным, если его диаметр составляет менее 10% расстояния между ним и детектором. На практике желательно так располагать фотодетектор, чтобы плоскость его поверхности была касательной к сфере, в центре которой находится источник. Хотя небольшие отклонения от этого правила тоже допускаются. При выполнении этих условий плотность падающего потока (энергетическая освещенность) будет обратно пропорциональна косинусу угла наклона φ:

$$H = \frac{I_r}{\cos\varphi}, \tag{4.17}$$

а освещенность определяться выражением:

$$E = \frac{I_L}{r^2 \cos\varphi}. \tag{4.18}$$

Источники считаются пространственными, если их диаметр составляет более 10% расстояния от них до детектора. Особым случаем является ситуация, при которой радиус источника света R намного больше расстояния до датчика. В этом случае:

$$H = \frac{B_r A_s}{r^2 + R^2} \approx \frac{B_r A_s}{R^2} \tag{4.19}$$

где A_s – площадь источника света, а B_r – энергетическая яркость. Поскольку площадь источника равна $A_S = \pi R^2$, энергетическая освещенность определяется выражением:

$$H \approx B_r \pi = W \tag{4.20}$$

Это значит, что плотности излучаемого и падающего потоков равны. Если площади детектора и источника одинаковы, а $R>>r$, полная энергия падающего потока будет приблизительно равна излучаемой энергии (т.е. коэффициент связи между источником и детектором будет равен 1). Когда в состав оптической системы входят разветвители, коллиматоры и фокусирующие компоненты, необходимо учитывать их эффективность, а, следовательно, и их коэффициенты связи. В таблицах 4.2 и 4.3 приведены важные соотношения для точечных и пространственных источников света.

Таблица 4.2. Полезные соотношения для точечных источников света

Описание	Радиометрия	Фотометрия
Интенсивность точечного источника	I_r, Вт/ср	I_L, лм/ср
Плотность падающего потока	Энергетическая освещенность, $H = I_r / r^2$, Вт/м^2	Освещенность, $E = I_L / r^2$, лм/м^2
Полный выходной поток точечного источника	$P = 4\pi I_r$, Вт	$F = 4\pi I_L$, лм

Источник [2]

Таблица 4.3. Полезные соотношения для пространственных источников света

Описание	Радиометрия	Фотометрия
Интенсивность пространственного источника	B_r, Вт/(см^2 ср)	B_L люмен/(см^2 ср)
Плотность излучаемого потока	$W = \pi B_r$, Вт/см^2	$L = \pi B_L$, лм/см^2
Плотность падающего потока	$H = \dfrac{B_r A_s}{r^2 + R^2}$ Вт/см^2	$E = \dfrac{B_L A_s}{r^2 + R^2}$ лм/см^2

Источник [2]

4.3. Светопропускающие окна

Основная цель окон – защита внутренних частей датчиков и детекторов от окружающей среды Хорошее окно должно передавать световые лучи в определенном диапазоне длин волн с минимальными искажениями Поэтому окна необходимо изготавливать из материалов, обладающих определенными характеристиками, диктуемыми конкретными условиями Например, для оптического детектора, работающего под водой, окна должны обладать прочностью, чтобы выдерживать давление воды, полосой пропускания, соответствующей требуемому диапазону длин волн, и подходящим коэффициентом преломления, значение которого желательно иметь близким к преломлению воды Самыми подходящими для этого случая являются сферические окна, способные выдерживать высокое давление воды (рис 4 7) Для снижения оптических искажении сферических окон необходимо соблюдение следующих условий апертура D (самое большое расстояние) не должна превышать радиус R_1 сферы окна, а толщина d должна быть равномерной по всей поверхности и гораздо меньшей этого же радиуса При невыполнении этих условий окно превращается в концентрическую сферическую линзу

При оценке рабочих характеристик оптических датчиков необходимо учитывать отражательную способность поверхности окон Для снижения оптических потерь на одну или на две поверхности окна иногда наносится специальное противоотражающее покрытие Такие покрытия имеют голубоватый или желтый оттенок и часто применяются при изготовлении фотографических линз и фильтров Из-за преломления в материале окна (рис 4 4) проходящий луч смещается на расстояние L, которое для малых углов θ_1 может быть найдено из формулы

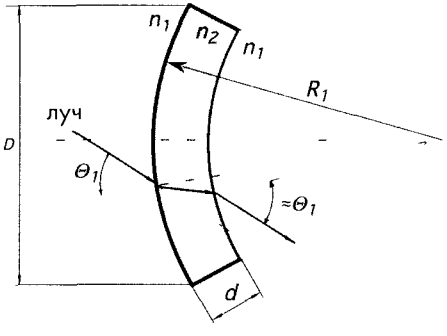


Рис. 4.7. Сферическое окно

$$L = d\frac{n-1}{n}, \tag{4.21}$$

где n – коэффициент преломления материала окна.

Для датчиков, работающих в дальнем ИК диапазоне, требуются специальные окна: светонепроницаемые в видимом и УФ спектральных диапазонах и почти прозрачные в требуемых интервалах длин волн. На рис. 4.3 показана спектральная пропускная способность некоторых материалов. При выборе материала для окна датчика дальнего ИК диапазона необходимо очень внимательно подходить к его коэффициенту преломления, поскольку от него зависят отражательная, поглощающая, а, значит, и пропускная способности. На рис. 4.8 показаны диаграммы спектральной пропускной способности двух кремниевых окон разной толщины. Все излучение (100%), попавшее на окно, делится на три части: отраженный свет (около 50% от полного спектрального диапазона), поглощенный свет (зависит от длины волны) и прошедший через окно свет (то, что осталось после отражения и поглощения). Поскольку все окна характеризуются определенной спектральной пропускной способностью, они часто называются *фильтрами*.

4.4. Зеркала

Зеркало – это самый старый оптический инструмент из всех когда-либо разработанных или использованных. При прохождении света из одной среды в другую всегда происходит его отражение. При изготовлении зеркал на переднюю (лицевую) или заднюю поверхности стеклянной пластины с двумя параллельными плоскостями или на подложку любой формы наносится однослойное или многослойное отражающее покрытие. Зеркала с лицевой отражающей поверхностью обычно более четкие. В зеркалах с задней отражающей поверхностью свету приходится проходить через пластину, коэффициент преломления которой обычно отличается от преломления во внешней среде.

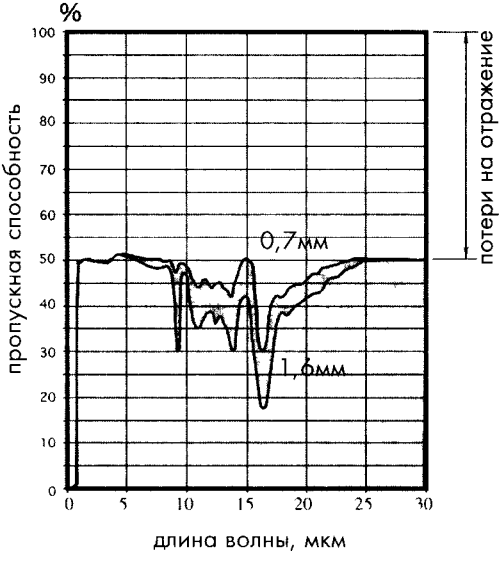


Рис. 4.8. Спектральная пропускная способность кремниевого стекла. Отметим, что большая часть потерь связана с отражением от двух поверхностей

При рассмотрении зеркал с задней отражающей поверхностью необходимо учитывать несколько явлений. Во-первых, из-за того, что пластина обладает коэффициентом преломления n, отражающая поверхность кажется ближе (рис. 4.9). Виртуальная (кажущаяся) толщина зеркала d для небольших углов θ_1 может быть найдена при помощи простой формулы:

$$d \approx \frac{L}{n}. \qquad (4.22)$$

Во-вторых, передняя плоскость зеркала с задней отражающей поверхностью может также отражать некоторое количество света, что называется паразитным отражением. Например, стеклянная пластина отражает около 4% видимого света. В дополнение к этому материал пластины может обладать достаточно высокой поглощающей способностью на рабочей длине волны. Поэтому если зеркало предназначено для работы в дальнем ИК спектральном диапазоне, одну из его поверхностей необходимо металлизировать, а подложку следует изготавливать из ZnSe или других материалов, прозрачных для излучения больших длин волн. Такие материалы, как Si или Ge, обладают слишком сильной отражающей способностью, что затрудняет их использование для производства зеркал с задней отражающей поверхностью.

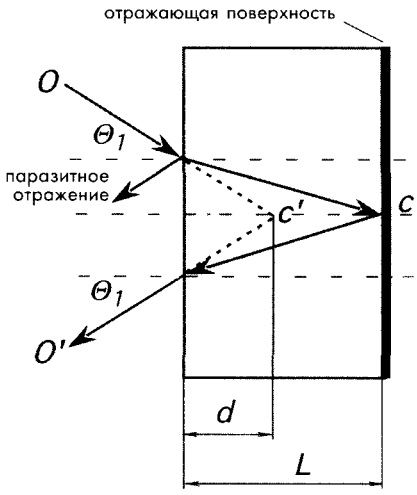


Рис. 4.9. Зеркало с задней отражающей поверхностью

В качестве отражающих покрытий, наносимых на поверхности зеркал, работающих в видимом и ближнем ИК диапазонах, применяются серебро, алюминий, хром и родий. Для устройств, используемых в дальней ИК области спектра, лучше всего подходит золото. При выборе соответствующих покрытий можно реализовать практически любой коэффициент отражения: от 0 до 1 (рис. 4.10).

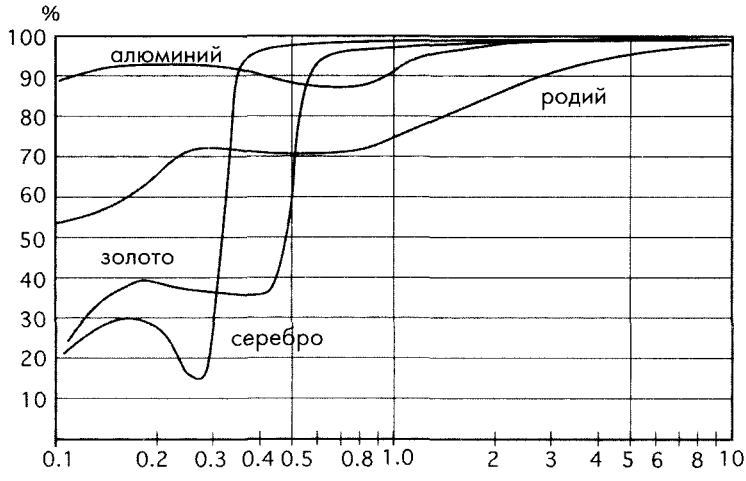


Рис. 4.10. Спектральная отражающая способность зеркал с различными покрытиями

Самые хорошие зеркала, используемые в широком спектральном диапазоне, изготавливаются на подложках из стекла или сплавленного кварца, на которые электролитическим способом или методом вакуумного напыления наносятся отражающие покрытия из чистого металла. Перед нанесением отражающих слоев для лучшего выравнивания поверхности зеркала иногда формируются вспомогательные подслои из меди, молибдена или из сплава циркония и меди.

Существует другой тип отражающих устройств, в которых не требуется нанесения отражательных слоев. Такими отражателями являются призмы, использующие эффект *полного внутреннего отражения*. В таких устройствах угол полного отражения является функцией коэффициента преломления:

$$\theta_0 = \arcsin\left(\frac{1}{n}\right). \tag{4.23}$$

Отражатели данного типа наиболее эффективны в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра, поскольку их коэффициент отражения здесь близок к единице. На принципе полного внутреннего отражения построены оптические волоконные линии.

Для получения требуемой траектории луча света отражательным поверхностям придают необходимую форму. В оптических системах при помощи кривых зеркал достигается эффект, аналогичный эффекту от линз. К тому же зеркала обладают рядом преимуществ:

1. Более высоким коэффициентом передачи, особенно в спектральном диапазоне больших длин волн, где линзы становятся менее эффективными из-за высоких потерь на поглощение и отражение;
2. Отсутствием искажений на преломляющих поверхностях из-за дисперсии;
3. Меньшими размерами и весом по сравнению со многими типами линз.

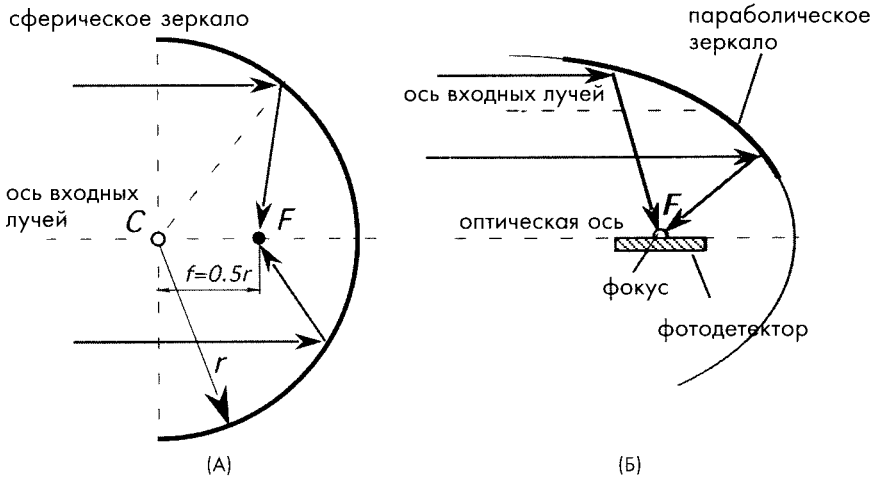


Рис. 4.11. Зеркала с передней отражающей поверхностью: А – сферическое, Б – параболическое

Сферические зеркала применяются там, где свет необходимо собрать и сфокусировать (термин *фокус* произошел от латинского слова, обозначающего понятие *очаг* – место сбора всех членов семьи в доме). Однако сферические зеркала подходят только для случаев параллельных или почти параллельных лучей света, падающих на поверхность зеркал под углами, близкими к прямому. Такие зеркала могут искажать отображаемое изображение, что называется явлением аберрации. На рис. 4.11А показано сферическое зеркало с центром кривизны в точке *C*. Точка фокуса расположена на расстоянии, равном половине радиуса от поверхности зеркала. Сферическое зеркало обладает астигматизмом; это означает, что все непараксиальные лучи света будут фокусироваться за пределами фокальной точки. Тем не менее такие зеркала нашли широкое применение в детекторах, где не требуется высокого качества отображения, например, в ИК датчиках движения, подробно рассматриваемых в разделе 6.5 главы 6.

Параболические зеркала применяются для фокусировки непараксиальных лучей света. При таком использовании все отраженные лучи попадают в фокальную область, как показано на рис. 4.11Б.

4.5. Линзы

Слово «*линза*» произошло от латинского названия чечевицы, поскольку ее семена – плоские и круглые, выгнутые наружу с двух сторон – напоминают форму выпуклой линзы. В датчиках и детекторах линзы применяются для изменения направления световых лучей. На рис. 4.12 показана плосковыпуклая линза, одна поверхность которой является плоской, а вторая – сферической. Такая линза имеет два фокуса: F и F′, расположенные от нее на равном расстоянии $-f$ и $+f$. Когда лучи света от объекта G попадают на линзу, они по закону Снелла меняют свое направление.

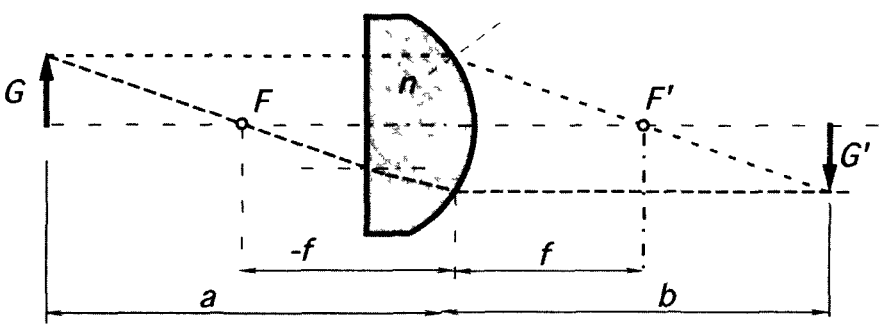


Рис. 4.12. Геометрия плосковыпуклой линзы

Для определения размера и положения изображения, полученного при помощи линзы надо провести два луча: один – параллельно оптической оси, которая проходит через центр кривизны сферы, другой – через точку фокуса F. После выхода из линзы первый луч проходит через точку фокуса, а второй – параллельно оптической оси. Для тонкой линзы, радиус кривизны которои

намного больше толщины линзы, фокусное расстояние f находится из следующего выражения:

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right), \tag{4.24}$$

где r_1 и r_2 – радиусы кривизны линзы. Изображение G´ формируется на расстоянии b от линзы в перевернутом виде. Это расстояние можно определить из уравнения для тонкой линзы:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}. \tag{4.25}$$

Для толстых линз, толщина t которых соразмерима с радиусом кривизны, фокусное расстояние находится из выражения:

$$f = \frac{nr_1r_2}{(n-1)\left|n(r_1 + r_2) - t(n-1)\right|}. \tag{4.26}$$

Из нескольких линз можно собрать более сложную систему. Для двух линз, расположенных на расстоянии d друг от друга, фокальное расстояние равно:

$$f = \frac{f_1f_2}{f_1 + f_2 - d}. \tag{4.27}$$

4.6. Линзы Френеля

Линзы Френеля – это оптические элементы, имеющие ступенчатую поверхность. Они широко используются в датчиках, где не требуется высокого качества фокусировки: в световых конденсорах, увеличителях и устройствах фокусировки детекторов присутствия. Линзы Френеля изготавливаются из стекла, акрила (для видимого и ближнего ИК диапазона) и полиэтилена (для дальнего ИК диапазона). История линз Френеля началась в 1748 году, когда граф Буффо предложил вытачивать внутри стеклянных линз концентрические круглые ступеньки. Это позволило уменьшить толщину линз и снизить потери энергии. Однако в таких линзах преломление света происходит только на поверхности, поскольку внутри них лучи проходят строго по прямым линиям. Идея графа Буффо была модифицирована в 1822 году Августином Френелем (1788-1827), сконструировавшим линзы, кривизна различных колец которых зависит от расстояния до центра, в связи с чем, в таких устройствах практически отсутствует сферическая аберрация.

На рис. 4.13 проиллюстрирована концепция линз Френеля на примере плосковыпуклых линз, разрезанных на несколько концентрических колец. После разрезки все кольца остаются линзами, направляющими падающие лучи в точку общего фокуса, положение которого определяется уравнением (4.24). При изменении кривизны поверхности меняется угол преломления лучей. Части колец,

показанные на рисунке буквами «х», не вносят никакого вклада в фокусирование лучей. При удалении этих секций (рис. 4.13Б) фокусирующие свойства линзы останутся прежними. Если теперь оставшиеся кольца сместить относительно друг друга до образования плоской поверхности (рис. 4.13В) , получится линза Френеля, фокусирующие свойства которой будут почти такие же, как у исходной плосковыпуклой линзы. Все концентрические элементы линз Френеля направляют падающие световые лучи в общую точку фокуса.

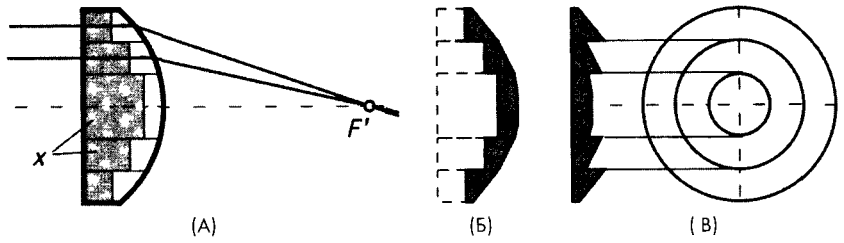


Рис. 4.13 Концепция линз Френеля

Линзы Френеля обладают рядом достоинств по сравнению с обычными линзами: небольшим весом, малой толщиной, способностью менять кривизну (справедливо для пластиковых линз), и, самое главное, низкими потерями на поглощение светового потока Последнее свойство особенно важно при изготовлении линз для среднего и дальнего ИК диапазонов, где поглощение в материалах может быть очень значительным. По этой причине почти все детекторы движения, работающие в дальнем ИК диапазоне, построены на основе линз Френеля.

В настоящее время широко применяются линзы Френеля двух типов: с постоянным шагом (рис. 4.14А) и с постоянной глубиной (рис. 4.14Б). На практике бывает очень трудно изготовить линзы с одинаковой крутизной поверхности каждой ступени, поэтому все ступеньки выполняют с плоским профилем Чтобы не ухудшать фокусирующие свойства линзы, все ступени должны располагаться, как можно, ближе друг к другу.

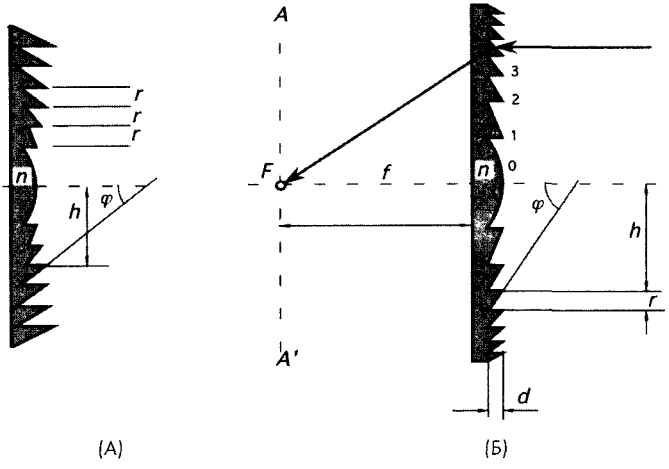


Рис. 4.14. Линзы Френеля А – с постоянным шагом, Б – с постоянной глубиной

В линзах с постоянным шагом угол наклона φ каждого зубца зависит от расстояния h до оптической оси, поэтому по мере удаления от центра глубина зубцов возрастает. Если диаметр линзы, по крайней мере, в 20 раз меньше фокусного расстояния, ее центральная часть может быть плоской. Для более коротких фокусных расстояний центральная часть должна быть сферической. Угол наклона каждой ступени может быть определен по следующей формуле, справедливой только для малых значений h:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{hn}{f(n-1)}\right), \tag{4.28}$$

где f – фокусное расстояние.

В линзах с постоянной глубиной при увеличении расстояния от центра меняются и угол наклона φ, и расстояние между зубцами r. При расчете линз могут потребоваться следующие уравнения. Расстояние от зубца до центра может быть найдено по его порядковому номеру ξ (считается, что центр имеет нулевой порядковый номер):

$$h = \sqrt{2f(n-1)\xi d - \xi^2 d^2}\ , \tag{4.29}$$

а угол наклона зубца по формуле:

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{h}{(n-1)f}\right). \tag{4.30}$$

Полное количество ступеней в линзе может быть найдено через апертуру (максимальный размер) *линзы* D:

$$\Gamma = \frac{(n-1)f - \sqrt{f^2(n-1)^2 - D^2}}{d}. \tag{4.31}$$

Линзы Френеля могут быть слегка изогнутыми, если этого требует конструкция датчика. Однако это может привести к смещению точки фокуса. Если линза изгибается внутрь радиуса кривизны, фокусное расстояние уменьшается.

Поскольку линзы со сферической поверхностью страдают от явлений аберрации, в устройствах, где требуется осуществлять фокусировку с высокой точностью, непрерывная поверхность линзы, контур которой определяется концентрическими зубцами, не должна быть сферической. На практике часто используется коническая поверхность с осевой симметрией относительно оси z, описываемая стандартным уравнением (рис. 4.15):

$$Z = \frac{CY^2}{1+\sqrt{1-(K+1)C^2Y^2}}\ , \tag{4.32}$$

где Z и Y – координаты поверхности, C – вершина кривизны, а K – коническая константа. Вершина кривизны и коническая константа определяются требуемыми

характериками линз, а контур каждого зубца задается уравнением (4.23). C и K определяются несколькими факторами: необходимым фокусным расстоянием, коэффициентом преломления и особенностями конструкции устройства, для которого предназначена линза.

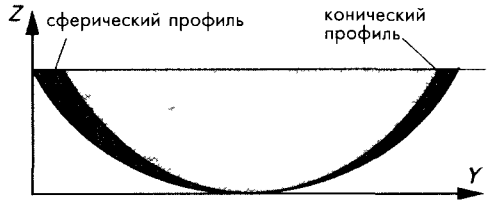


Рис. 4.15. Сравнение профилей сферической и несферической линз

4.7. Оптические волокна и волноводы

Несмотря на то, что лучи света не могут заворачивать за угол преграды, при помощи волноводов их можно направить по сложной траектории. Для работы в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра волноводы, как правило, изготавливаются из стекла. А для средних и дальних ИК областей применяются волноводы в виде полых трубок с сильно отражающими внутренними поверхностями. Работа волноводов основана на принципе внутренних отражений, когда лучи света распространяются по зигзагообразному маршруту. Оптические волокна используются для переноса световой энергии в недоступные зоны без передачи тепла от источника света. Поверхности и концы волокон всегда тщательно отполированы, а их поперечное сечение может быть не только круглым. Иногда оптоволокна покрываются специальной оболочкой (плакировкой). Нагретые стеклянные волокна могут быть закручены по радиусу кривизны, в 20-50 раз превышающему диаметр поперечного сечения, а в холодном состоянии этот радиус увеличивается до 200-300 диаметров. Пластиковые волокна изготавливаются из полиметил метакрилата, и их можно изгибать по гораздо меньшему радиусу, чем стеклянные волокна. Коэффициент затухания в типовых полимерных оптоволоконах диаметром 0.25 мм составляет порядка 0.5 дБ на метр длины. Свет распространяется по волокну за счет полного внутреннего отражения, как показано на рис. 4.16Б. Из уравнения (4.23) следует, что угол полного внутреннего отражения определяется коэффициентом преломления среды n, в которую свет попадает из воздуха. В общем виде, при прохождении света через границу двух сред с коэффициентами преломления n и n_1 выражение (4.23) принимает вид:

$$\theta_0 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n}\right) \qquad (4\ 33)$$

На рис. 4.16А показан профиль коэффициента преломления волокна с плакировкой. Для достижения полного внутреннего отражения на границе слой плакировки должен иметь более низкий коэффициент преломления. Например, кварцевое волокно со слоем плакировки может иметь следующее соотношение коэффициентов преломления: у сердцевины $n = 1.5$, а у плакировки – 1.485. Для защиты от внешних воздействий на такое волокно обычно наносится пластиковое или резиновое покрытие. Такой тип волокна называется многослойным оптоволоконным кабелем со ступенчатым профилем коэффициента преломления.

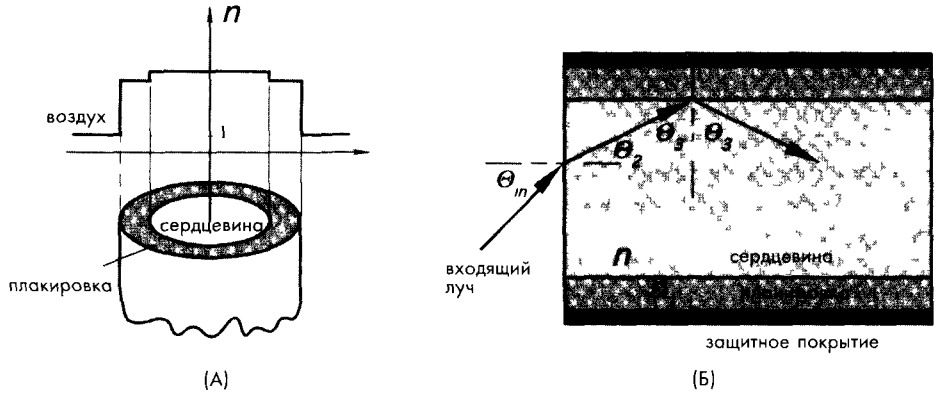


Рис. 4.16. Оптические волокна А – многослойное волокно со ступенчатым профилем коэффициента преломления, Б – определение максимального угла входа

При использовании оптоволоконных кабелей очень важно определять максимальный угол входа света в волокно, поскольку этот параметр влияет на полное внутреннее отражение (рис 4.16Б) Если минимальный угол внутреннего отражения $\theta_0 = \theta_3$, максимальный угол θ_2 находится по закону Снелла

$$\theta_{2(\max)} = \arcsin\left(\frac{\sqrt{n^2 - n_1^2}}{n}\right) \qquad (4\ 34)$$

Применив закон Снелла еще раз и считая, что для воздуха $n \approx 1$, получим.

$$\sin\theta_{in(\max)} = n_1 \sin\theta_{2(\max)} \qquad (4\ 35)$$

Объединив уравнения (4 34) и (4 35), найдем выражение для максимального угла входа света в волокно относительно нормали к поверхности конца оптоволокна, при котором обеспечивается полное внутреннее отражение в его сердцевине

$$\theta_{in(\max)} = \arcsin\left(\sqrt{n^2 - n_1^2}\right) \qquad (4\ 36)$$

Лучи света, попадающие в волокно под большими углами, чем угол $\theta_{in(max)}$, проходят через защитное покрытие и теряются, что является весьма нежелательным при передаче данных Однако специальные оптоволоконные датчики используют модуляцию интенсивности света, вызванную изменениями угла входа

Иногда величина $\theta_{in(max)}$ называется цифровой апертурой оптоволокна Снижение интенсивности света может происходить из-за изменения свойств волокна, его изгибов и скруток, но при этом она никогда не падает до нуля резко, а постепенно спускается до нулевого уровня по мере приближения к углу $\theta_{in(max)}$ На практике цифровая апертура определяется в виде угла, при котором интенсивность света

уменьшается на какую-то конкретную величину, например, на –10 дБ от максимального значения.

Одним из главных достоинств оптоволоконных датчиков является то, что им можно придать практически любую геометрическую форму, диктуемую условиями применения. Оптоволокна широко применяются в миниатюрных оптических датчиках, измеряющих давление, температуру, химическую концентрацию и т.д. Почти все такие датчики построены на модуляции одной или нескольких характеристик света в оптоволокне при изменении внешних воздействий с последующей оптической демодуляцией сигнала обычными методами. Внешние сигналы могут либо непосредственно влиять на волокно, либо воздействовать на компоненты, соединенные с его наружной поверхностью или его отполированными концами. Цель таких воздействий – получение оптически детектируемых сигналов.

Для получения химического датчика к оптическому волокну может подсоединяться специальная ячейка с реагентом. Реагент вступает в реакцию с исследуемым веществом, в результате чего изменяются оптические свойства волокна, например, происходит модуляция коэффициента преломления или коэффициента поглощения. Существует еще один способ построения химических датчиков. Плакировка оптоволокна может быть изготовлена из химических веществ, коэффициент преломления которых меняется в присутствии некоторых жидкостей [3]. При изменении полного внутреннего отражения оптоволокна интенсивность света также изменяется.

Оптоволокна могут использоваться двумя способами. В первом случае (рис. 4.17А) для передачи сигнала возбуждения и для приема ответного оптического сигнала используется один и тот же световой канал. Во втором – функции возбуждения (освещения) и сбора информации разделены, для чего применяются два или более независимых канала (рис. 4.17Б).

В большинстве оптоволоконных датчиков определяется интенсивность света, модулированная внешними сигналами [4]. На рис. 4.18 показан датчик перемещений, в котором через оптоволоконный волновод передается свет в сторону отражающей поверхности. Свет проходит вдоль волокна и выходит в форме конуса, направленного к отражателю. Чем ближе отражающая поверхность расположена к концу волокна, тем больше фотонов света возвращается назад в детектор, что означает более высокую интенсивность отраженного излучения. Таким образом, по величине этой интенсивности можно судить о перемещении отражающего объекта. Благодаря кони-

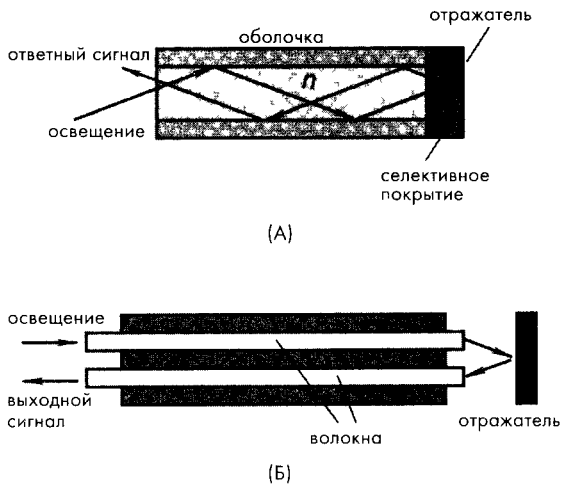


Рис. 4.17. Оптические датчики: А – одноволоконный, В – двухволоконный.

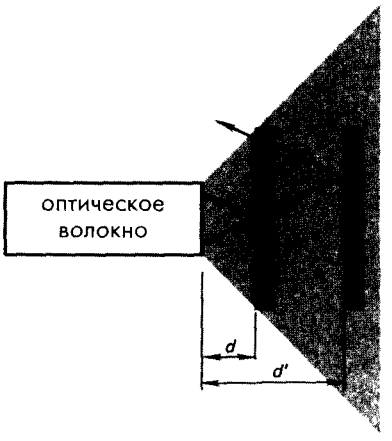


Рис. 4.18. Оптоволоконный датчик перемещений, использующий модуляцию интенсивности отраженного света

ческому профилю испускаемого света в ограниченном пространстве удается получить квазилинейную зависимость между интенсивностью возвращенного излучения и расстоянием между концом волокна и отражателем.

На рис. 4.19А показан датчик изгибных деформаций, состоящий из оптического волокна, зажатого между двумя деформирующими устройствами. Внешняя сила, приложенная к верхнему устройству, изменяет положение внутренней отражающей поверхности волокна. Поэтому луч света, который в ненагруженном состоянии отразился бы от нижней части волокна в направлении x, в нагруженном состоянии поменяет свое направление, и выйдет через стенку волокна вдоль линии y, поскольку угол его распространения стал меньше угла полного внутреннего отражения θ_0 (см. уравнение (4.33). Чем больше внешняя сила, тем ближе деформирующие устройства приближаются друг к другу и больше света уходит наружу, что означает снижение интенсивности выходящего из волокна излучения.

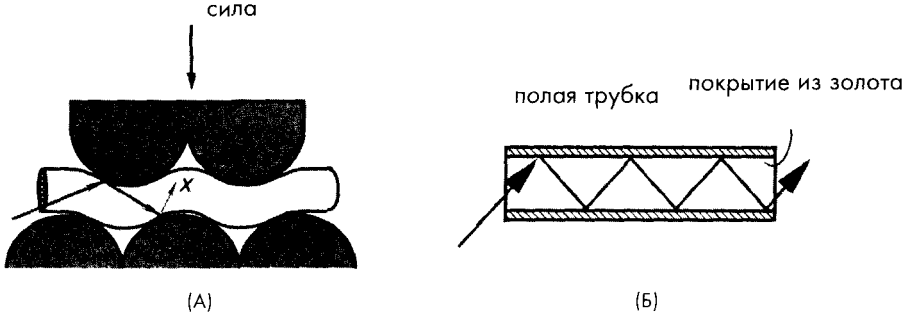


Рис. 4.19. А – оптоволоконный датчик изгибных деформаций, Б – волновод для излучений дальнего ИК диапазона

В спектральном диапазоне, в котором происходят значительные потери в оптоволокнах, в качестве световодов используются полые трубки (рис. 4.19Б). Внутренняя поверхность трубок тщательно полируется и покрывается отражающим слоем металла. Например, для передачи теплового излучения трубка может изготавливаться из латуни и покрываться двумя слоями: из никеля – для выравнивания поверхности и из золота – толщиной 500-1000 Å, обладающего отличными оптическими характеристиками. Полые волноводы способны изгибаться по радиусу, равному 20 и более диаметрам. Хотя почти вся волоконная оптика основана на явлении полного внутреннего отражения, трубчатые вол-

новоды используют принцип отражения от внешних зеркальных поверхностей, которое всегда меньше 100%. Поэтому потери в полых волноводах зависят от количества отражений: чем меньше диаметр и длиннее трубка, тем больше в ней потери. Полый волновод становится неэффективным, когда отношение его длины к диаметру становится больше 20.

4.8. Концентраторы

В оптических детекторах часто встает проблема, увеличения плотности потока фотонов, ударяющихся об их поверхность. Во многих случаях, когда важно определять только интенсивность излучения и нет необходимости проводить фокусировку и формирование изображений, можно использовать специальные устройства, называемые коллекторами или концентраторами [5], обладающие свойствами как волноводов, так и оптических элементов, таких как линзы и кривые зеркала. Самой важной характеристикой концентраторов является отношение площадей входной и выходной апертуры, называемое коэффициентом концентрации *C*. Этот коэффициент всегда больше единицы, поскольку концентратор собирает свет с большей площади и направляет ее к меньшей (рис. 4.20А), где располагается чувствительный элемент. Теоретический максимум для коэффициента *C* можно найти при помощи выражения:

$$C_{\max} = \frac{1}{\sin^2 \theta_i}, \qquad (4.37)$$

где θ_i – половина максимального входного угла. При выполнении этого условия лучи света могут выходить из концентратора под любыми углами вплоть до 90° относительно нормали к выходному отверстию. Это значит, что диаметр выходной апертуры будет меньше диаметра входного отверстия в $\sin \theta_i$ раз. Входные лучи, попадающие в концентратор под углом θ, создают на его выходе излучение в виде конуса. Угол выхода каждого луча определяется местоположением его точки входа.

Концентраторы могут изготавливаться с отражающими (зеркальными) или преломляющими поверхностями, а также быть комбинированными. На рис. 4.20Б показана форма отражающего параболического концентратора. Интересно отметить, что конические рецепторы света в сетчатке человеческого глаза имеют такие же очертания [6].

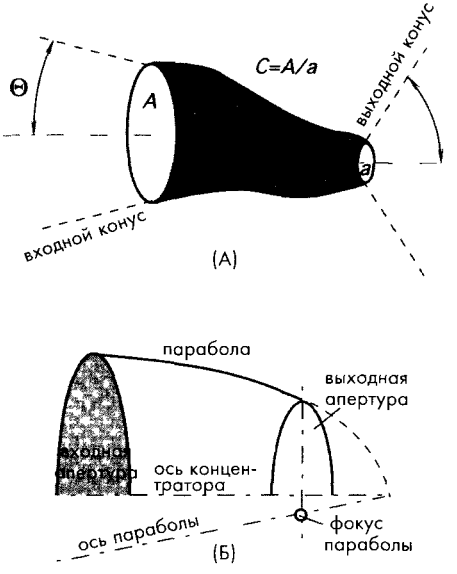


Рис. 4.20. Концентраторы: А – основная схема, Б – концентратор с параболическим профилем

Наклонные параболические концентраторы обладают очень высокой эффективностью (Предполагается, что отражающая способность внутренней поверхности концентратора является идеальной). Они могут собирать и концентрировать свыше 90% входящего излучения. Если приемлема меньшая эффективность, применяются конические концентраторы в которых некоторая часть входящих лучей возвращается назад после нескольких отражений внутри конуса. Полная эффективность конических концентраторов, как правило, не превышает 80%. Поскольку конические концентраторы изготавливать проще, чем параболические, они получили более широкое распространение.

4.9. Покрытия, поглощающие тепловое излучение

Все датчики тепловых излучений, как активные, так и пассивные, построены на принципе поглощения или излучения электромагнитных волн в дальней ИК области спектра. Кирхгоф обнаружил, что коэффициент поглощения α и коэффициент излучения ε, по существу, являются одной и той же физической величиной (см. раздел 3.12.3 главы 3). Для эффективной работы датчиков значения этих коэффициентов стремятся делать максимальными, т.е. как можно ближе к единице. Чтобы достичь этого, либо специальным образом обрабатывают поверхность датчика для повышения его коэффициента излучения, либо с той же целью на нее наносят покрытие, обладающее высокой излучающей способностью. У таких покрытий должна быть хорошая теплопроводность и очень низкая теплоемкость; это значит, что их следует изготавливать очень тонкими.

Существует несколько методов повышения излучающей способности поверхности датчиков: нанесение тонких металлических пленок (например, нихромовых), обладающих достаточно высоким коэффициентом излучения, гальваническое осаждение пористой платиновой черни [7] и напыление металла в азотной атмосфере при низком давлении [8]. Наиболее эффективным способом создания материала с высокой поглощающей (излучающей) способностью является формирование на нем пористой поверхности [9], поскольку частицы размером, гораздо меньшим длины волны, как правило преломляют или поглощают лучи света. Материалы с пористой поверхностью обладают высокой излучающей способностью в широком спектральном диапазоне, однако с увеличением длины волны она значительно снижается. Пленка из золотой черни с плотностью 500 мкг/см^2, в ближнем, среднем и дальнем ИК диапазоне обладает излучающей способностью 0.99.

Для формирования электролитическим методом слоя из пористой платиновой черни можно воспользоваться следующим рецептом [10]:

Хлорид платины H_2PtCl_6 ..... 2 г

Ацетат свинца $Pb(OOCH_3)$ $3{\cdot}H_2O$ ..... 16 мг

Вода ..... 58 г

В таком гальваническом растворе выращиваются пленки на кремниевых подложках с подслоем из золота. Процесс идет при комнатной температуре и плотности тока 30 мА/см^2. Для получения поглощающей способности выше 0.95, необходимо нанести пленку с плотностью 1.5 г/см^2.

Процесс формирования слоя из черни золота методом напыления проводится в термической камере в азотной атмосфере под давлением 100 Па. Газ поступает в камеру через редуктор. Источник золота, расположенный на расстоянии 6 см от поверхности, нагревается за счет электрического тока, протекающего по проводу из вольфрама. Из-за столкновений с молекулами азота испарившиеся атомы золота теряют свою кинетическую энергию, и когда они достигают поверхности, их скорость и энергия уже настолько малы, что они остаются на ней, формируя при этом игольчатые структуры с линейными размерами около 25 нм. Полученный слой похож на структуру хирургической ваты. Для достижения наилучших результатов плотность покрытия должна быть в пределах 250...500 мкг/см^2.

Другим широко распространенным способом повышения излучающей способности поверхности является образование на ней слоя из оксида металла, что достигается методом окисления нанесенной металлической пленки в условиях низкого вакуума.

Существует еще один метод улучшения излучающей способности – окраска поверхности органическими красителями (видимый цвет здесь совсем не важен), обладающими коэффициентом излучения 0.92...0.97. Однако органические материалы обладают низкой теплопроводностью, и их трудно нанести толщиной менее 10 мкм, из-за чего может значительно снизиться быстродействие датчиков. В микродатчиках часто используется следующий прием: на верхнюю поверхность наносится слой из стекла, который не только обеспечивает защиту от негативных воздействий окружающей среды, но и обладает в дальней ИК области спектра коэффициентом излучения, равным 0.95.

4.10. Электрооптические и акустикооптические модуляторы

Для большинства оптических датчиков важной характеристикой является их способность изменять параметры светового излучения (например, интенсивность) под действием управляющих сигналов, которая называется модуляцией света. Управляющие сигналы могут иметь различную природу. Приведем некоторые из них: температура, химические вещества с разными коэффициентами преломления, электрические поля, механическое напряжение и т.д. В этом разделе будет рассматриваться модуляция света под действием электрических сигналов и акустических волн.

Коэффициент преломления в некоторых кристаллах зависит от приложенного электрического поля [11]. Это объясняется природой распространения лучей света внутри кристалла. Обычно допустимые направления поляризации света определяются симметрией кристалла. Приложенное к кристаллу внешнее электрическое поле может изменить эту симметрию, и, следовательно, привести к модуляции интенсивности света. Одним из часто используемых материалов в электрооптических устройствах является ниобат лития ($LiNbO_3$). На рис. 4.21 показан электрооптический модулятор, состоящий из кристалла, расположенного между двумя поляризационными фильтрами, ориентированными под углом 90° друг к другу. Входной поляризатор ориентирован под углом 45° к оси кристалла [12].

На поверхность кристалла прикреплены два электрода, при изменении напряжения на которых происходит изменение поляризации падающего света на втором поляризаторе, что, в свою очередь, ведет к модуляции интенсивности выходного излучения

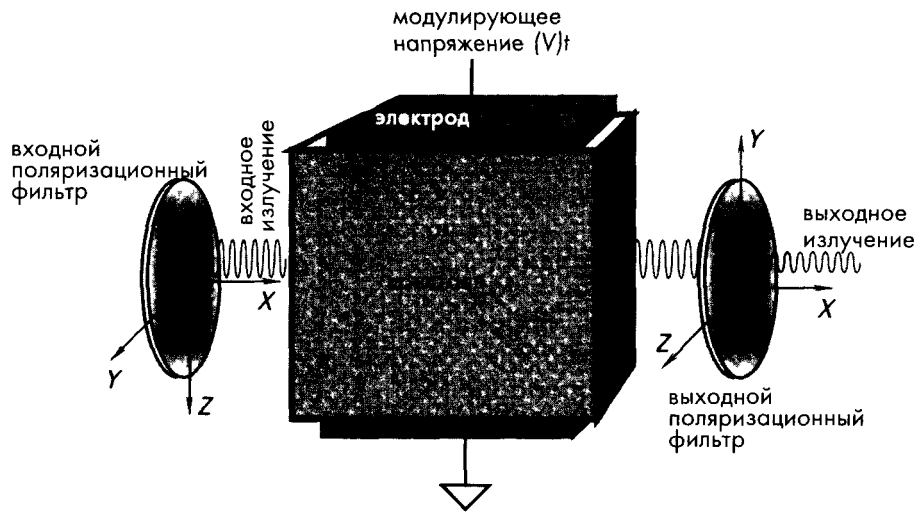


Рис. 4.21. Электрооптический модулятор, состоящий из двух поляризационных фильтров и кристалла

Подобный эффект можно наблюдать, когда кристалл подвергается воздействию механических сил, особенно, акустических волн [11, 13]. Однако акустико-оптические устройства используются в оптоволоконной технике, в основном, в качестве оптических фазовращателей и сравнительно редко как модуляторы интенсивности излучений Акустические волны, проходя через кристалл, вследствие эффекта фотоупругости вызывают в нем механические напряжения, линейно изменяющие его коэффициент преломления. Это, в свою очередь, при определенных условиях приводит к отклонению выходящих оптических лучей, также проходящих через этот кристалл (рис. 4.22) Таким образом, акустические волны создают для лучей света как бы дифракционную решетку. Акустикооптические устройства часто

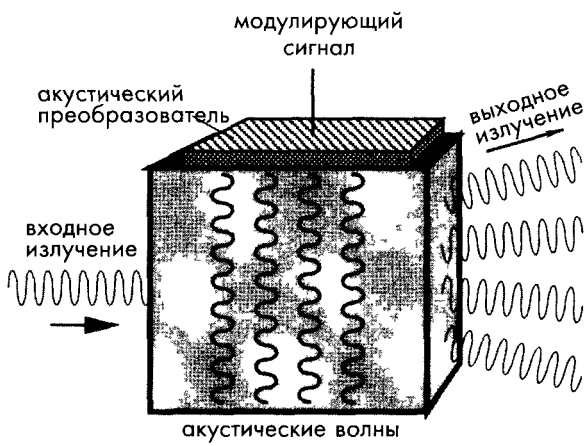


Рис. 4.22. Акустикооптический модулятор, создающий множество лучей

изготавливаются из ниобата лития и кварца, которые способны работать с акустическими волнами в широком частотном диапазоне: от десятков МГц до нескольких ГГц. Скорость звука через ниобат лития составляет порядка 6×10^3м/с, поэтому 1-ГГц акустическая волна, имеющая длину волны 6 мкм, сравнима с излучением в ИК спектральном диапазоне.

4.11. Интерферометрическая оптоволоконная модуляция

В оптоволоконной технике в качестве выходного сигнала часто используется модуляция интенсивности излучения. На рис. 4.23 показан оптический волновод, состоящий из двух каналов [13]. Волновод изготовлен внутри подложки из ниобата лития, легированного Ti для увеличения коэффициента преломления, стандартным фотолитографическим методом. Для этого сначала на подложку была нанесена фотомаска. Затем при помощи электронного пучка на материал напылен слой Ti. После чего растворителем удален фоторезист, выходящий за границы маски. В процессе последующей температурной обработки атомы Ti проникли внутрь подложки [11]. В результате этой технологической цепочки был получен профиль с переменным коэффициентом преломления с разностью значений на поверхности и глубине, равной около 0.1% (на поверхности коэффициент преломления выше). Свет попадает в волновод через полированные концы. Управляющие электроды располагаются параллельно волноводам. Напряжение, поданное на эти электроды, приводит к значительному сдвигу фаз в световых волн.

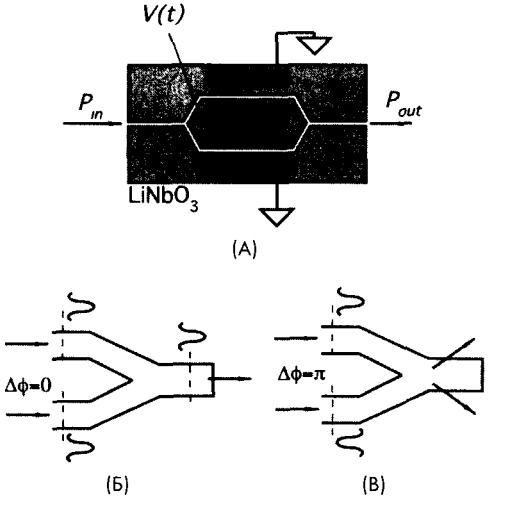


Рис. 4.23. А – канальный интерферометрический модулятор интенсивности излучений, Б – сдвиг фаз равен нулю, выходное излучение двух ветвей суммируется, В – при сдвиге фаз, равному π, все излучение уходит в подложку, и выходное излучение равно нулю. (Рисунок взят из [12])

Коэффициент оптического пропускания такого модулятора зависит от сдвига фаз $\Delta\phi$ между сигналами в двух каналах, который управляется напряжением $V(t)$:

$$\frac{Pout}{Pin} = \frac{1}{2}\left\{1+\cos\left[\frac{\pi V(t)}{V\pi}+\theta_B\right]\right\}, \qquad (4.38)$$

где $V\pi$ – перепад напряжения, необходимый для получения полного диапазона модуляции, а θ_B – константа, регулирующая оптимальное положение рабочей точки. Когда разность фаз в двух ветвях волновода равна нулю, выходные излучения

суммируются на выходе волновода. Когда сдвиг фаз равен π, весь свет уходит в подложку. Хорошо сконструированные модуляторы имеют высокий коэффициент контрастности, порядка 30 дБ.

Литература

1 Begunov, B N , Zakaznov, N P, Kiryushin, S I ,and Kuzichev, V I Optical Instrumentation Theory and Design *Mir Publishers, Moscow, 1988*

2 Applications of Phototransistors in Electro-optic Systems *Motorola, 1988*

3 *Giuliani, J F Optical waveguide chemical sensors In* Chemical Sensors and Mi-croinstrumentation *Murray, R W et al (eds) American Chemical Society, Washington, DC, 1989, Chap 24*

4 *Mitchell G L Intensity-based and Fabry-Perot interferometer sensors In* Fiber Optic Sensors An Introduction for Engineers and Scientists *E Udd, ed , John Wiley & Sons, New York, 1991, Chap 6*

5 *Welford, W T , and Winston, R* High Collection Nonimaging Optics *Academic Press, San Diego, CA, 1989*

6 *Winston, R , and Enoch, J M Retinal cone receptor as an ideal light collector* J Opt Soc Am *61, 1120-1121, 1971*

7 *von Hevisy, G and Somiya, T Uberplatinschwarz* Zeitschr Phys ChemieA *171, 41, 1934*

8 *Harris, L , McGinnes, R , and Siegel, B* J Opt Soc Am *38, 7, 1948*

9 *Persky, M J Review of black surfaces for space-borne infrared systems* Rev Sci Instrum *70(5) 2193-2217, 1999*

10 *Lang, W , Kuhl, K , and Sandmaier, H Absorption layers for thermal infrared detectors In* Transducers'91 International Conference on Solid-state Sensors and Actuators Digest of Technical Papers *IEEE, New York, 1991, pp 635-638*

11 *Yariv, A Optical electronics, 3rd ed Holt, Reinhart and Winston, New York, 1985*

12 *Johnson, L M Optical modulators for fiber-optic sensors In* Fiber Optic Sensors Introduction for Engineers and Scientists *E Udd, ed John Wiley & Sons, New York 1991*

13 *Haus, H A* Waves and Fields in Optoelectronics *Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984*

ГЛАВА 5

ИНТЕРФЕЙСНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ

5.1. Входные характеристики интерфейсных схем

Если датчик не оснащен встроенной электронной схемой, формирующей выходной сигнал в определенном формате, его практически никогда не удается напрямую подключить к процессору, монитору или другой регистрирующей аппаратуре. Обычно сигнал на выходе датчика бывает либо слишком зашумленным, либо очень слабым, либо содержит нежелательные составляющие. В дополнение к этому его формат может не соответствовать формату системы приема данных. Для подключения датчика к процессорному устройству, как правило, требуется промежуточное согласующее устройство. Другими словами, выходной сигнал необходимо преобразовать к определенному виду (кондиционировать) перед тем как подать в устройство обработки данных (подключить к нагрузке). Для нагрузки входным сигналом обычно является либо ток, либо напряжение. Схема согласования сигналов часто называется интерфейсом между датчиком и последующими устройствами. Ее основная цель – преобразование сигнала датчика в формат, совместимый с нагрузкой. На рис. 5.1 показан внешний сигнал, действующий на датчик, подключенный к нагрузке через интерфейсную схему. Для эффективной работы интерфейсу приходится быть «слугой двух господ»: датчика и нагрузочного устройства. Его входные характеристики должны быть совместимы с выходными параметрами датчика, а выходные – с входным форматом нагрузки. Поскольку эта книга посвящена датчикам, в ней будут рассмотрены только входные цепи интерфейсных схем.

Входная часть интерфейсной схемы характеризуется несколькими стандартными параметрами, показывающими насколько точно схема может преобразовать сигнал датчика и какой вклад она внесет в общую погрешность.

Входной импеданс показывает насколько сильно интерфейс нагружает датчик. Он может быть выражен в комплексном виде:

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}}, \tag{5.1}$$

где V и I – комплексные числа, соответствующие напряжению и току через входной импеданс. Например, если входную часть интерфейсной схемы представить в виде параллельного соединения входного сопротивления R и входной емкости C (рис. 5.2А), входной импеданс в комплексном виде можно записать как:

$$\mathbf{Z} = \frac{R}{1 + j\omega RC}, \tag{5.2}$$

где ω – круговая частота, а $j=\sqrt{-1}$ – мнимая единица. На очень низких частотах схема обладает относительно небольшой входной емкостью, и ее входной импеданс определяется сопротивлением R, поэтому можно считать, что в этом случае $Z \approx R$. Следовательно, реактивная часть уравнения (5.2) становится очень маленькой, т.е. выполняется следующее соотношение:

$$RC << \frac{1}{\omega}. \tag{5.3}$$

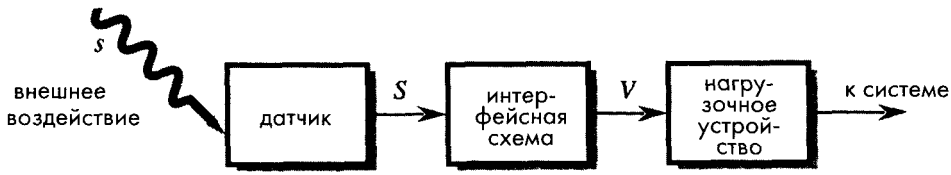


Рис. 5.1. Интерфейсная схема согласует форматы сигналов датчика и нагрузочного устройства.

При рассмотрении входного импеданса интерфейсной схемы всегда необходимо учитывать выходной импеданс датчика. Например, если датчик имеет емкостную природу, для определения частотных характеристик входной части интерфейса емкость датчика должна быть подсоединена параллельно его входной емкости. В формуле (5.2) предполагается, что входной импеданс является функцией частоты внешнего сигнала. С увеличением скорости изменения сигнала входной импеданс уменьшается.

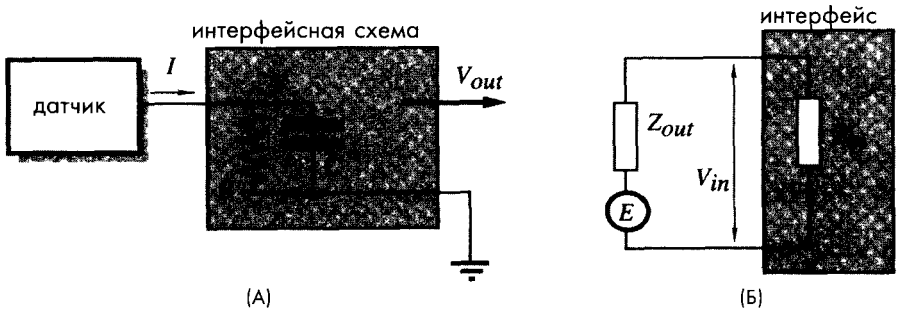


Рис. 5.2. А – комплексный входной импеданс интерфейсной схемы, Б – эквивалентная схема датчика с выходным сигналом в виде напряжения

На рис. 5.2В показана эквивалентная схема датчика с выходным сигналом в виде напряжения. В состав схемы входят два импеданса: выходной импеданс датчика Z_{out} и

входной импеданс интерфейса Z_{in}. Выходной сигнал датчика представлен в виде источника напряжения E, соединенного последовательно с выходным импедансом. Для некоторых типов датчиков выходной сигнал удобнее представлять в виде источника тока, включенного параллельно с выходным импедансом датчика. Оба эти варианта идентичны. В этой книге будет рассматриваться представление выходного сигнала через источник напряжения. С учетом двух импедансов входное напряжение интерфейсной схемы можно записать в виде:

$$V_{in} = E\frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_{out}}. \tag{5.4}$$

Для каждого конкретного случая необходимо определять свою собственную эквивалентную схему датчика. Это требуется для исследования частотных характеристик и фазовых задержек комбинации двух устройств: датчик-интерфейс. Например, емкостной детектор можно представить в виде конденсатора, соединенного параллельно входному импедансу интерфейса, а пьезоэлектрический датчик – в виде параллельного соединения резистора с очень большим сопротивлением (порядка 10^{11}Ом) и конденсатора с емкостью порядка 10 пФ.

Для иллюстрации необходимости определения входного импеданса схемы согласования рассмотрим чисто резистивный датчик, подсоединенный ко входу интерфейса, показанный на рис. 5.2А. Входное напряжение схемы зависит от частоты, что можно описать выражением:

$$V = \frac{E}{\sqrt{1 + (f / f_c)^2}}, \tag{5.5}$$

где $f_c = (2\pi RC)^{-1}$ – частота перегиба АЧХ, т.е. частота, при которой амплитуда уменьшается на 3 дБ. Если требуется определить амплитуду сигнала с точностью 1%, частота входного сигнала, подаваемого на вход схемы, не должна превышать следующего значения:

$$f_{\max} \approx 0.14 f_c \quad или \quad f_c \approx 7 f_{\max} \tag{5.6}$$

Это значит, что входной импеданс интерфейсной схемы должен обеспечивать получение достаточно высокого значения частоты перегиба. Например, если максимальная частота внешнего сигнала составляет 100 Гц, частота перегиба должна быть не менее 700 Гц. На практике стремятся реализовать f_c как можно выше, чтобы не вносить дополнительных ограничений по частоте для последующих схем.

При разработке согласующих схем необходимо анализировать быстродействие их входных элементов. Обычно на входе интерфейсов стоят операционные усилители (ОУ), имеющие ограниченную частотную полосу пропускания. Существуют, так называемые, программируемые ОУ с регулируемым током смещения, позволяющие управлять входными частотными характеристиками схемы. Чем больше ток, тем выше быстродействие.

На рис. 5.3 показана более подробная эквивалентная схема входных цепей пассивного интерфейса, состоящего, например, из ОУ или АЦП (здесь слово *пассивный*

Рис. 5.3 Эквивалентная схема, учитывающая источники помех во входных цепях интерфейса

означает, что согласующая схема не генерирует никаких сигналов возбуждения). Схема состоит из входного импеданса Z_{in} и нескольких генераторов, представляющих напряжения и токи, формируемые внутри схемы. Все эти сигналы являются паразитными и, если их не компенсировать, могут причинить много проблем. К тому же они меняют свои значения в зависимости от температуры.

Напряжение e_0 называется входным *напряжением смещения*. При закороченных входных выводах друг на друга это напряжение соответствует величине постоянной составляющей сигнала на входе схемы. Следует отметить, что источник напряжения смещения подключен последовательно ко входу схемы, что указывает на независимость этой погрешности от величины выходного импеданса датчика.

Ток i_0 называется *током смещения*. Для многих биполярных транзисторов его величина довольно велика, для полевых транзисторов с управляемым *p-n* переходом она гораздо ниже, а для КМОП схем – совсем незначительна. Этот ток может привести к серьезным проблемам в случаях, когда в состав датчиков и интерфейсов входят компоненты, обладающие высоким импедансом, поскольку, проходя через входные цепи интерфейса и выходные цепи датчика, он вызывает паразитное падение напряжения. Это напряжение будет тем выше, чем больше импеданс этих цепей. В некоторых случаях оно может быть довольно значительным. Например, если пьезоэлектрический датчик подсоединить к схеме с входным сопротивлением 1 ГОм (10^9 Ом), при токе смещения 1 нА (10^{-9} А) паразитное напряжение на входе интерфейса составит: 1 ГОм×1 нА = 1 В, что довольно существенно. В отличие от напряжения смещения, ток смещения приводит к появлению ошибки, пропорциональной выходному импедансу датчика. Эта погрешность незначительна для датчиков с низким выходным сопротивлением. Например, индуктивные детекторы нечувствительны к величине или изменениям тока смещения.

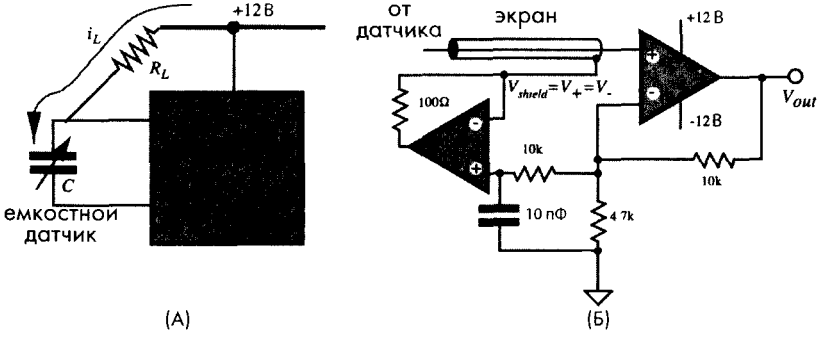


Рис. 5.4. А – ток утечки, возникающий на плате, приводит к изменению характеристик входных цепей интерфейса, Б – активное экранирование входных цепей

При работе с высокоимпедансными схемами к большим погрешностям может привести *ток утечки*, возникающий из-за низкого поверхностного сопротивления печатных плат. Источниками возникновения тока утечки могут быть: плохое качество материала плат, загрязнение поверхности остатками припоя (плохо очищенные платы), влага и плохое покрытие. На рис. 5.4А показан путь тока утечки: через шину питания, сопротивление платы R_L и выходной импеданс датчика. Если датчик имеет емкостную природу, ток утечки очень быстро зарядит его выходную емкость. Паразитный ток утечки не только приводит к появлению погрешности, но и может вывести датчик из строя.

Существует несколько способов снижения токов утечки. Один из них – правильная разводка платы, когда высоковольтные проводники отделены от высокоимпедансных компонентов. Погрешностями, вызванными утечками по толщине многослойных плат, на практике можно пренебречь. Другой способ – самый старый – электрическая защита. Так называемое, активное экранирование является довольно эффективной защитой входных цепей. Для этого входные цепи окружаются проводящим экраном, подсоединенным к точке, потенциал которой равен потенциалу на входе интерфейса. Такая защита позволяет поглощать токи утечки, возникающие на разных участках платы, и значительно уменьшать токи, способные достичь входных выводов. Для более эффективной защиты с двух сторон печатной платы иногда формируют активные экранирующие контуры.

Всегда надо стремиться располагать интерфейсные схемы, обладающие высоким импедансом, как можно ближе к датчикам. Однако избежать соединительных линий не всегда удается. В таких случаях рекомендуется использовать коаксиальные кабели с хорошей изоляцией [1]. Самой лучшей считается изоляция из полиэтилена или первичного (непереработанного) тефлона. Также необходимо помнить, что даже очень короткие отрезки кабеля могут значительно сократить ширину полосы пропускания. Этого можно избежать, используя цепь обратной связи, компенсирующую влияние экранированного кабеля. На рис. 5.4Б показан повторитель напряжений, соединенный с инвертирующим входом усилителя. Повторитель управляет потенциалом на экране кабеля, что позволяет снизить емкость кабеля, токи утечки и паразитные напряжения, возникающие вследствие изгибов в кабеле. Конденсатор небольшой емкости, подключенный к неинвертирующему входу повторителя, улучшает его стабильность.

Также следует избегать подсоединения ко входу усилителя любых компонентов, помимо самих датчиков, поскольку они являются потенциальными источниками помех. Например, для подавления высокочастотных помех на вход интерфейса или в цепь обратной связи входных устройств часто ставятся фильтрующие конденсаторы. Если в целях экономии либо денег, либо пространства разработчик решит использовать для этого керамический конденсатор, он может столкнуться с неожиданным эффектом. Многие конденсаторы (особенно керамические) обладают, так называемым, эффектом «памяти». Если такой конденсатор подвергается воздействию всплеска напряжения: либо от датчика, либо от блока питания, либо от внешнего источника помех, он быстро заряжается, а для разряда ему может потребоваться время от нескольких секунд до многих часов. Пока этого не произойдет, он будет вести себя как маленькая батарейка, напряжение от которой будет складываться с сигналом датчика, что может привести к значительным ошибкам в

результатах измерений. Если избежать использования конденсаторов во входных цепях невозможно, надо вместо керамических применять пленочные конденсаторы, в которых эффект памяти практически отсутствует.

5.2. Усилители

Большинство пассивных датчиков обладают очень слабыми выходными сигналами. Их величина часто не превышает нескольких микровольт или пикоампер. С другой стороны входные сигналы стандартных электронных устройств обработки данных, таких как АЦП, частотные модуляторы, различные регистраторы и т.д. должны быть гораздо выше: порядка вольт или миллиампер. Поэтому для подключения датчиков к таким устройствам требуются промежуточные усилители с коэффициентами усиления по напряжению до 10 000, а по току до 1 000 000. Усилители, как правило, являются одной из составных частей интерфейсных схем. Существует несколько стандартных схем усилителей для подключения различных типов датчиков, реализованных на дискретных компонентах: транзисторах, резисторах, конденсаторах и катушках индуктивности. Но в настоящее время чаще всего используются усилители, построенные на основе ОУ и пассивных дискретных компонентах.

Следует понимать, что назначение усилителей не ограничивается только функцией увеличения амплитуды сигнала. Они могут также использоваться для согласования устройств по импедансу, для улучшения соотношения сигнал/шум, в качестве фильтров и изоляторов между входами и выходами.

5.2.1 Операционные усилители

Составной частью практически всех современных усилительных схем являются *операционные усилители* (ОУ), которые могут быть интегрированными (монолитными) или гибридными (состоящими из монолитных и дискретных частей). В состав интегрированного ОУ входят сотни транзисторов, резисторов и конденсаторов. Разработчики аналоговых устройств, меняя подключение дискретных компонентов к выводам ОУ, реализовали большое количество полезных схем (не только усилительных). На основе ОУ строятся специализированные ИС, часто называемые интегральными схемами прикладной ориентации (ASIC). В последующих разделах будут приведены типовые схемы интерфейсных устройств, реализованные на ОУ, часто применяемые для подключения различных датчиков.

На рис. 5.5 показано схематичное представление ОУ. Типовой ОУ, как правило, обладает следующими характеристиками:

- Двумя входами: инвертирующим (-) и неинвертирующим (+)
- Высоким входным сопротивлением (порядка сотен МОм и даже ГОм)
- Низким выходным сопротивлением (доли Ома)
- Способностью работать с емкостной нагрузкой
- Низким входным напряжением смещения e_0 (несколько мВ и даже мкВ)
- Низким входным током смещения i_0 (несколько пА и даже меньше)
- Очень высоким коэффициентом усиления при разомкнутой цепи обратной связи (ОС) A_{OL} (10^4 ...10^6 и даже выше). Этот коэффициент показывает во сколько раз ОУ увеличивает разность напряжений между двумя входами.

- Высоким коэффициентом ослабления синфазного сигнала (КОСС). КОСС показывает насколько эффективно ОУ подавляет синфазные сигналы одинаковой амплитуды V_{CM}, одновременно поданные на оба входа
- Низким коэффициентом собственного шума
- Широким рабочим частотным диапазоном
- Низкой чувствительностью к помехам по шине питания
- Высокой стабильностью характеристик при изменении параметров окружающей среды

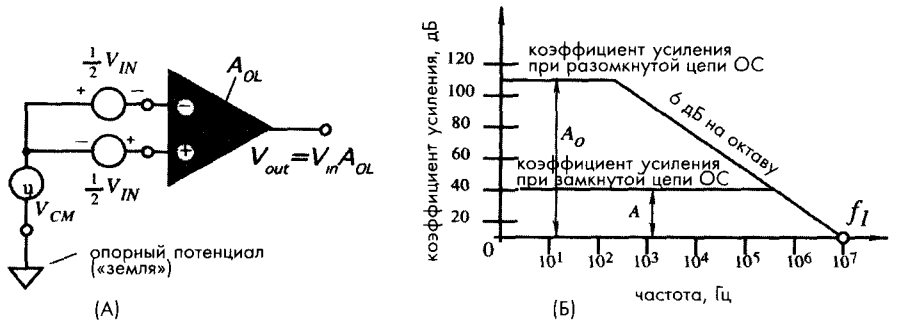


Рис. 5.5. А – основное символьное обозначение ОУ, Б – зависимость коэффициента усиления ОУ от частоты

Для получения более подробной информации и рекомендаций по применению ОУ следует обращаться к специализированным справочникам, в которых даны подробные описания характеристик каждого типа выпускаемых ОУ. Часто в такой литературе ОУ сгруппированы по следующим критериям: ОУ с низким напряжением смещения, ОУ с низким током смещения, малошумящие ОУ и т.д.

На рис. 5.5А показан ОУ без цепи ОС. Такой усилитель часто называют ОУ с разомкнутым контуром ОС. В справочниках приводятся значения коэффициентов усиления ОУ без ОС, которые не являются постоянными во всем частотном диапазоне. Зависимость этих коэффициентов от частоты показана на рис. 5.5Б. На значения коэффициентов усиления ОУ также влияют сопротивление нагрузки, температура окружающей среды и флуктуации напряжения питания. Для многих ОУ без ОС температурная чувствительность коэффициента усиления составляет порядка 0.2...1%/°С, а чувствительность к изменению напряжения питания – порядка 1%/%. ОУ без ОС практически никогда не используются, поскольку высокий коэффициент усиления приводит к нестабильной работе схемы, сильному температурному дрейфу характеристик, повышенному шуму и т.д. Например, при коэффициенте усиления ОУ без ОС, равном 10^5, входной дрейф напряжения в 10 мкВ вызовет дрейф выходного напряжения порядка 1 В.

Произведение коэффициента усиления на ширину полосы пропускания характеризует способность ОУ усиливать высокочастотные сигналы малой амплитуды. Это произведение равно частоте f_1, при которой коэффициент усиления ОУ становится равным 1, т.е. ОУ перестает усиливать сигнал. На рис. 5.6А показан неинвертирующий усилитель. В этом усилителе цепь ОС сформирована двумя резисторами: R_1 и R_2. Результирующий

коэффициент усиления такого усилителя с ОС равен: $A = 1 + R_2/R_1$. Он будет постоянным в более широком частотном диапазоне (см. рис. 5.5Б), но ограничивающая частота f_1 останется такой же, как и в ОУ без ОС. Глубина ОС определяет такие параметры этой схемы, как линейность, стабильность коэффициента усиления и выходной импеданс, которые теперь в основном зависят от характеристик компонентов ОС. Для получения высокой точности необходимо обеспечить выполнение следующего правила: коэффициент усиления ОУ без ОС должен быть, по крайней мере, в 100 раз больше коэффициента усиления ОУ с ОС на самой высокой рабочей частоте. Для более высокой точности это отношение должно быть равно 1000 и даже больше.

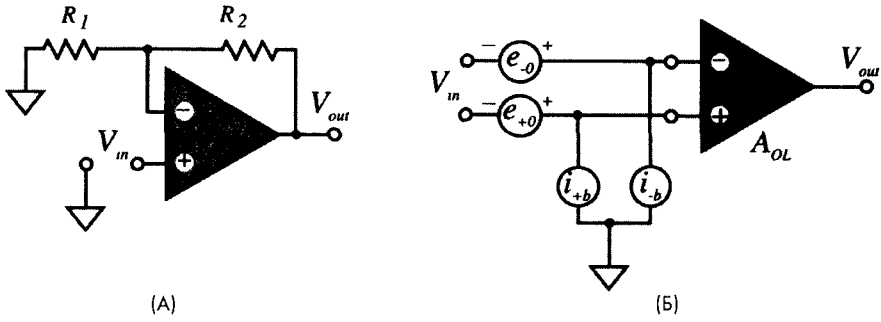


Рис. 5.6. А – неинвертирующий усилитель, Б – генераторы, подсоединенные ко входам ОУ, представляют напряжения и токи смещения

ОУ усиливают не только полезные сигналы, но и паразитные напряжения и токи, попадающие на их входы (рис. 5.6Б). Поэтому в справочной литературе для них обычно приводятся технологические допуски на значения токов и напряжений смещения.

Из-за напряжений и токов смещения выходной сигнал интерфейсной схемы при нулевом входном сигнале практически никогда не бывает равным нулю. В схемах, работающих с постоянными или медленно меняющимися сигналами, серьезной проблемой является освобождение полезного сигнала от этих нежелательных компонентов. На практике величину напряжения смещения регулируют двумя способами: непосредственно на ОУ (если в нем предусмотрены регулировочные выводы) или при помощи независимых внешних компенсационных цепей.

Величину выходного напряжения смещения можно определить из выражения:

$$V_0 = A(e_0 + i_0 R_{eqv}), \tag{5.7}$$

где R_{eqv} – эквивалентное входное сопротивление, состоящее из выходного сопротивления датчика и входного сопротивления усилителя; e_0 – входное напряжение смещения, а i_0 – входной ток смещения. Величина смещения тока и напряжений зависит от температуры. В схемах, где ОУ работает с большим коэффициентом усиления, выходное напряжение смещения может служить источником серьезных погрешностей. Существует несколько способов решения этой проблемы. Одним

из них является выбор ОУ с низким значением тока и напряжения смещения, а также высоким входным сопротивлением. Для эффективного снижения напряжения смещения также применяются усилители постоянного тока с модуляцией и демодуляцией сигнала.

5.2.2 Повторители напряжения

Назначение повторителя напряжений (рис. 5.7) – преобразование импеданса от высокого уровня к низкому. Повторитель, как правило, обладает высоким входным импедансом (высоким входным сопротивлением и низкой входной емкостью) и низким выходным сопротивлением (выходная емкость не имеет никакого значения). Хороший повторитель имеет близкий к единице коэффициент усиления по напряжению (обычно 0.999 на низких частотах) и высокий коэффициент усиления по току. По существу, повторитель напряжения является усилителем тока и преобразователем импеданса. Высокий входной и низкий выходной импеданс повторителей делает их незаменимыми элементами при согласовании датчиков с устройствами обработки сигналов.

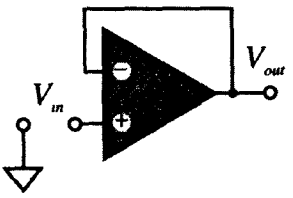


Рис. 5.7. Повторитель напряжений, реализованный на ОУ

Повторитель, подключенный к выходу датчика, не оказывает практически никакого влияния на работу последующих цепей, поэтому его часто называют буферным устройством между сенсором и нагрузкой. При разработке повторителей следует придерживаться следующих рекомендаций:

- При подключении к датчикам с токовым выходом входной ток смещения повторителя должен быть, по крайней мере, в 100 раз меньше тока датчика
- Если невозможно полностью компенсировать входное напряжение смещения, оно не должно превышать величину младшего значащего разряда (МЗР)
- Температурный коэффициент тока и напряжения смещения не должен приводить к появлению погрешности, превышающей 1 МЗР во всем температурном диапазоне

5.2.3 Измерительный усилитель

Измерительный усилитель (ИУ) имеет два входа и один выход. В отличие от ОУ он обладает конечным коэффициентом усиления (его величина обычно не более 100) и возможностью подключения источников сигнала одновременно на два входа. Это означает, что все компоненты цепи ОС подключаются не к инвертирующему и неинвертирующему входам, а к другим выводам ИУ. Основная функция ИУ – формирование выходного сигнала, пропорционального разности напряжений на его входах:

$$V_{out} = A(V_+ - V_-) = A\Delta V, \tag{5.8}$$

где V_+ и V – напряжения на инвертирующем и неинвертирующем входах, а A – коэффициент усиления. Измерительные усилители могут быть реализованы на основе ОУ по интегральной или гибридной технологиям. Важным свойством ИУ

является высокое сопротивление по обоим входам, что позволяет ему выступать в роли дифференциального усилителя и эффективно подавлять синфазные аддитивные помехи (см. раздел 5.9). Примером высококачественного ИУ является усилитель INA 118 фирмы Burr-Brown/Texas Instruments (www.ti.com). Он обладает низким напряжением смещения (50 мкВ) и высоким коэффициентом ослабления синфазных сигналов (110 дБ). Коэффициент усиления такого ИУ задается одним резистором.

Хотя в настоящее время можно приобрести промышленно выпускаемые ИУ в интегральном исполнении, на практике многие применяют ИУ, реализованные из дискретных компонентов. На рис. 5.8 показана наиболее часто используемая схема ИУ. Падение напряжения на резисторе R_a настраивается равным входной разности ΔV, тогда ток, протекающий через него, будет равен: $I = \Delta V / R_a$. Выходные напряжения ОУ: U_1 и U_2 равны друг другу по амплитуде, но имеют разную полярность. Первая стадия усиления входной разности напряжений проходит на ОУ: U_1 и U_2, которые можно представить в виде одного усилителя, имеющего дифференциальные входы и дифференциальные выходы. Вторая стадия усиления осуществляется на ОУ U_3, преобразующем дифференциальный входной сигнал в униполярный выходной. Полный коэффициент усиления ИУ можно найти из выражения:

$$A = \left(1 + \frac{2R}{R_a}\right)\frac{R_3}{R_2} . \qquad (5.9)$$

Величина коэффициента ослабления синфазного сигнала (КОСС) зависит от того, насколько точно в этой схеме подобраны резисторы. Как правило, при использовании резисторов 1% точности КОСС не превышает значения 100, тогда как для резисторов 0.1% точности КОСС имеет на порядок более высокие значения.

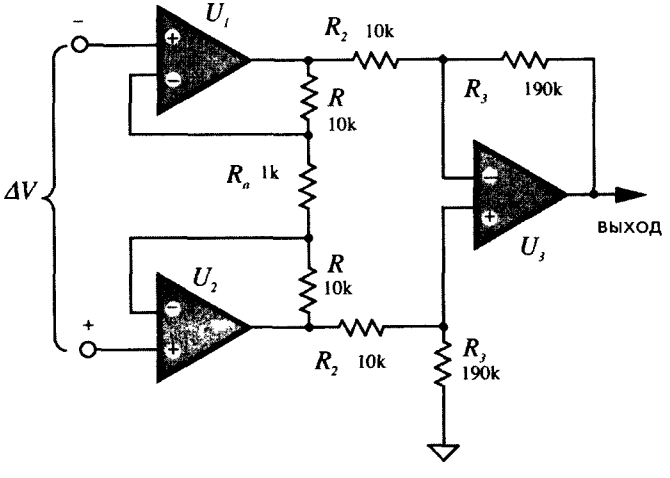


Рис. 5.8. Измерительный усилитель на трех ОУ с точно подобранными резисторами

Хороший и экономически эффективный ИУ можно реализовать на двух одинаковых ОУ и нескольких прецизионных резисторах (рис. 5.9А). Для обеспечения низких уровней шума и тока смещения в схеме используются ОУ, входные каскады которых построены на полевых транзисторах. ОУ U_1 работает как неинвертирующий усилитель, а U_2 – как инвертирующий. Поскольку все входы ОУ обладают высоким импедансом, датчики к ним можно подключать напрямую, без всяких согласующих элементов. Цепи ОС каждого ОУ настраиваются так, чтобы напряжение на резисторе R_a, отвечающего за величину коэффициента усиления ИУ, было равно входной разности ΔV. Коэффициент усиления такого ИУ равен:

$$A \approx 2\left(1+\frac{R}{R_a}\right). \tag{5.10}$$

Следовательно, коэффициент усиления в рассматриваемой схеме может меняться в пределах от 2 (если пренебречь сопротивлением R_a) до значения коэффициента усиления ОУ без ОС (когда R_a=0). Для показанного на рисунке ИУ коэффициент усиления равен 100. Но всегда следует помнить, что входное напряжение смещения будет увеличиваться с тем же коэффициентом усиления. Поэтому и в этой схеме необходимо тщательно подбирать резисторы R. На очень низких частотах рассогласование резисторов связано с КОСС обратной зависимостью, т.е. при рассогласовании сопротивлений 0.01%, КОСС будет равен 10 000 (-80 дБ). На более высоких частотах более существенным становится несоответствие импедансов. Регулирование импеданса может осуществляться при помощи подстроечного резистора и конденсатора C_1. Также следует помнить, что ИУ, как правило, используют биполярный источник питания.

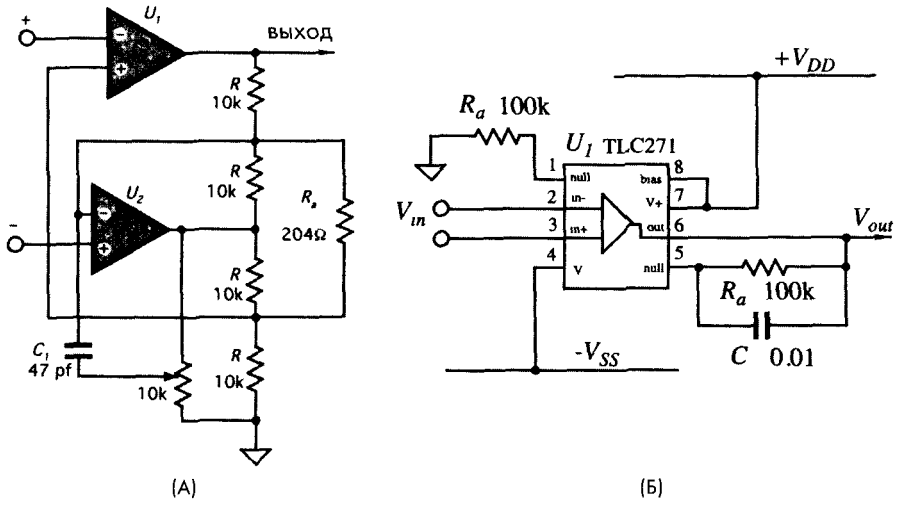


Рис. 5.9. А – измерительный усилитель на двух ОУ, Б – недорогой измерительный усилитель на одном ОУ

В случаях, когда высокая точность не требуется, а стоимость становится решающим фактором, используют простой ИУ на одном ОУ и двух резисторах (рис. 5.9Б). В этой схеме резистор R_a, стоящий в цепи ОС, подсоединяется к выводу балансировки нуля ОУ. Глубина ОС такого ИУ зависит от параметров конкретного ОУ и используемых компонентов. Например, при использовании ОУ TLC271 (Texas Instruments) коэффициент усиления ИУ может быть определен по формуле:

$$A \approx 1 + \frac{R_a}{2\,кОм} \quad (R_a \text{ в кОм}). \tag{5.11}$$

Для номиналов, приведенных на рисунке, коэффициент усиления равен 50. Внешние соединения и значения параметров дополнительных компонентов определяются типом используемого ОУ. Следует также отметить, что для применения в такой схеме подходят не все ОУ.

5.2.4 Усилители заряда

Характерной чертой усилителей заряда (УЗ) является очень низкий ток смещения. Такие усилители используются для преобразования в напряжение сигналов от емкостных датчиков, квантовых детекторов, пироэлектрических чувствительных элементов и других устройств, имеющих на выходе либо очень маленькие заряды (порядка пикокулон, пКл), либо очень маленькие токи (порядка пикоампер, пА). Поэтому УЗ по своей сути является преобразователем заряда в напряжение. На рис. 5.10А показана принципиальная схема УЗ. В цепи ОС ОУ стоит конденсатор C, сопротивление утечки которого r должно быть значительно большим его импеданса на самой низкой рабочей частоте. В УЗ можно использовать только хорошие пленочные конденсаторы. Также необходимо уделять большое внимание качеству печатных плат и равномерному покрытию всех их компонентов.

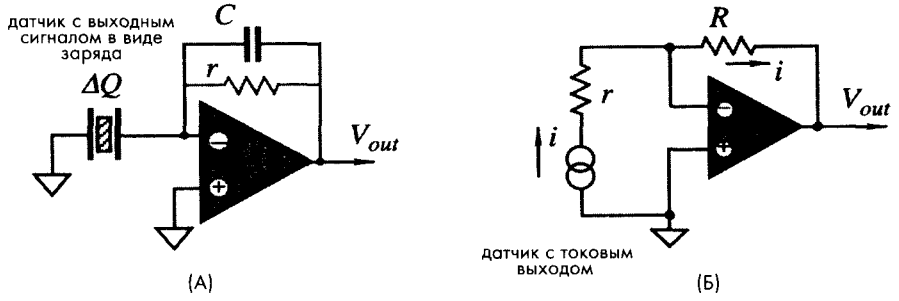


Рис. 5.10. А – преобразователь заряда в напряжение, Б – преобразователь тока в напряжение

Передаточную функцию УЗ можно представить в виде:

$$V_{out} = -\frac{\Delta Q}{C}. \tag{5.12}$$

В случаях, где требуется очень высокая точность преобразований, может применяться специальный гибридный предусилитель заряда, примером которого может служить схема DN630, выпускаемая фирмой ThermOptics, Inc (www.thermoptics.com). Такой усилитель работает с емкостями менее 1 пФ. Встроенный конденсатор номиналом 1 пФ настраивает значение коэффициента усиления, соответствующее чувствительности 1 В/пКл. Этот коэффициент может быть снижен при помощи подключения одного или нескольких внутренних конденсаторов ко входу усилителя. Такой усилитель обладает низким уровнем шума, а время нарастания и спада сигналов в нем составляет 5 нс.

Многие датчики могут быть представлены в виде конденсаторов. Часть емкостных датчиков, таких как микрофоны, емкостные датчики силы и давления, а также детекторы влажности, являются активными устройствами, т.е. для работы им требуется сигнал возбуждения. Другая часть емкостных датчиков являются пассивными устройствами, напрямую преобразующими внешнее воздействие в электрический заряд или ток. Примерами таких датчиков могут быть пьезоэлектрические и пироэлектрические детекторы. Существуют также неемкостные датчики, которые можно рассматривать как генераторы тока. Фотодиод – представитель этой группы.

Датчик с токовым выходом можно представить в виде сопротивления утечки r, соединенного параллельно с генератором тока, обладающим бесконечно большим внутренним сопротивлением (рис. 5.11). Датчик вырабатывает ток i, который может течь в двух направлениях: через сопротивление r внутри датчика (ток i_0) и через интерфейсную схему с входным импедансом Z_L (ток i_{out}). Поскольку ток i_0 по своей сути является паразитным, следует стремиться к тому, чтобы сопротивление утечки датчика было намного больше импеданса интерфейса.

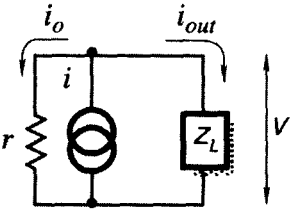


Рис. 5.11. Эквивалентная схема датчика с токовым выходом

Из закона Ома следует, что для преобразования электрического тока i_{out} в напряжение ток должен пройти через нагрузку с определенным импедансом, тогда падение напряжения на этой нагрузке будет пропорционально величине этого тока. На рис. 5.10Б показана принципиальная схема преобразователя тока в напряжение, в которой датчик с токовым выходом подключен к инвертирующему входу ОУ, играющему роль виртуальной земли. В этой схеме напряжение на инвертирующем входе почти равно напряжению на неинвертирующем заземленном входе ОУ. Следовательно, датчик работает при почти нулевой разности потенциалов на своих выводах, а ток, протекающий через него определяется выходным напряжением ОУ:

$$V_{out} = -iR. \tag{5.13}$$

Для устойчивости работы схемы r должно быть намного меньше R. На высоких частотах ОУ работает практически с разомкнутой цепью ОС, т.е. с очень большим коэффициентом усиления, что может привести к возникновению колебаний. Это особенно важно помнить при использовании датчиков с низким сопротивлением утечки. Преимуществом схем с виртуальной землей является независимость выходного

сигнала от емкости датчика. Напряжение на выходе такой схемы сдвинуто по фазе на 180° по отношению к току. На рис. 5.12А показана неинвертирующая схема преобразователя тока в напряжение, быстродействие которой определяется как емкостью датчика, так и величиной резистора R_1. Реакцию такого преобразователя на ступенчатую функцию можно описать следующим выражением:

$$V_{out} = iR_b\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)\left(1-e^{-t/rC}\right) . \qquad (5.14)$$

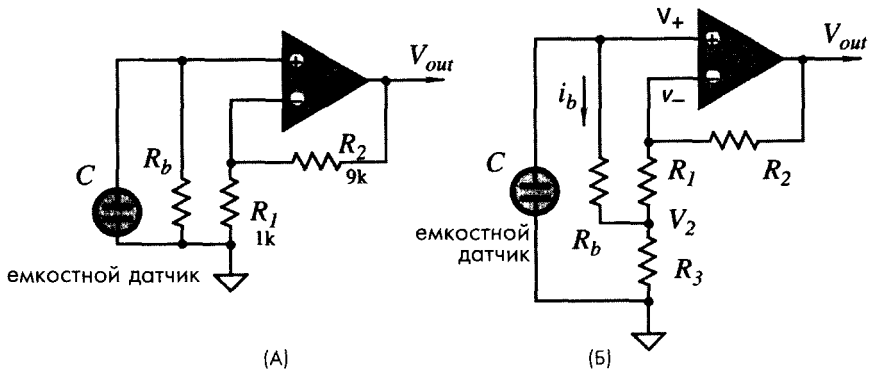


Рис. 5.12. А – неинвертирующий преобразователь тока в напряжение, Б – резистивный умножитель

При работе с пьезоэлектрическими и пироэлектрическими датчиками сопротивление резистора R_b (R на рис. 5.10Б) может достигать значений десятков и даже сотен ГОм. На практике резисторы таких номиналов используются крайне редко: во-первых, они достаточно редки; во-вторых, они обладают плохой стабильностью при изменении условий окружающей среды. В таких случаях высокоомный резистор часто заменяют схемой, известной под названием умножителя сопротивлений, реализованной на основе ОУ с положительной ОС (рис. 5.12Б). Благодаря высокому коэффициенту усиления ОУ, напряжения на инвертирующем и неинвертирующем входах усилителя практически равны друг другу: $V_+ \approx V_-$. Резисторы R_1 и R_3 формируют резистивный делитель, напряжение V_2 на котором определяется следующим соотношением:

$$V_2 = V_- \frac{R_3}{R_1+R_3} \approx V_+ \frac{R_3}{R_1+R_3} , \qquad (5.15)$$

Зная падение напряжения на резисторе R_b, можно найти ток, протекающий через него:

$$I_b = \frac{\Delta V}{R_b} = \frac{V_+ - V_2}{R_b} = \frac{V_+}{R_b}\frac{R_1}{R_1+R_3} . \qquad (5.16)$$

Из этого уравнения получим зависимость входного напряжения от входного тока и сопротивлений:

$$V_+ = I_b R_b \left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right). \tag{5.17}$$

Из последнего выражения видно, что значение резистора R_b как бы увеличивается в $(1+R_3/R_1)$ раз. Это значит, что если R_b = 10 МОм, а коэффициент $(1+R_3/R_1) \approx 5$, эта схема является виртуальным сопротивлением 50 МОм. Однако такой умножитель сопротивлений следует применять очень аккуратно, поскольку нельзя забывать, что шумы, ток и напряжение смещения будут усиливаться в такое же $(1+R_3/R_1)$ число раз, и это может быть неприемлемым в ряде практических случаев. Этой схеме присуща еще одна отрицательная черта: неустойчивость, обусловленная положительной ОС. Поэтому на практике никогда не используют умножитель сопротивлений с коэффициентом увеличения более 10.

5.3. Схемы возбуждения

Активным датчикам для работы требуется дополнительная внешняя энергия. Примерами активных датчиков являются датчики температуры (термисторы и резистивные детекторы температуры), датчики давления (пьезорезистивные и емкостные) и датчики перемещений (электромагнитные и оптические). Внешняя энергия может подаваться на датчики в различной форме: либо в виде постоянного тока или напряжения, либо в виде синусоидального или импульсного токов. Иногда она поступает в датчики в виде света или ионизационного излучения. Такие виды внешней энергии называются сигналами возбуждения. Часто стабильность и точность датчиков напрямую связана со стабильностью и точностью сигналов возбуждения. Поэтому схемы возбуждения всегда должны выдавать сигналы, не приводящие к ухудшению характеристик всей измерительной системы. В следующих разделах будут рассматриваться электронные схемы, вырабатывающие сигналы, необходимые для нормального функционирования различных датчиков.

5.3.1 Генераторы тока

Генераторы тока должны вырабатывать ток для подачи в цепи датчика, значение которого в заданных пределах не зависит ни от свойств чувствительного элемента, ни от величины внешнего сигнала, ни от факторов окружающей среды. Другими словами, токовый генератор – это устройство, вырабатывающее электрический ток, величина которого не зависит от импеданса нагрузки, т.е. амплитуда выходного сигнала генератора должна оставаться постоянной даже при изменении импеданса нагрузки.

Способность токовых генераторов выдавать ток возбуждения точно заданной амплитуды и формы является причиной их широкого использования в составе активных датчиков. При работе с датчиками желательно, чтобы генератор тока не только вырабатывал сигнал, независящий от импеданса нагрузки, но и управляемый от внешнего источника сигналов (генератора сигналов специальной

формы), имеющего, как правило, выходной сигнал в виде напряжения. Хороший тактовый генератор должен вырабатывать на выходе ток в строгом соответствии с управляющим сигналом, который не должен зависеть от нагрузки при значительном изменении ее импеданса.

Основными характеристиками генераторов тока являются: выходное сопротивление и предельное напряжение. На практике желательно иметь, как можно, более высокое выходное сопротивление. Предельное напряжение – это максимальное напряжение на нагрузке, при котором не происходит изменения выходного тока. Из закона Ома следует, что для поддержания заданного уровня тока при увеличении сопротивления нагрузки требуется более высокое напряжение. Например, при максимальном импедансе нагрузки $Z_L \approx 10$ кОм и уровне тока $i = 10$ мА предельное напряжение должно быть не менее 100 В. Далее будут описаны схемы генераторов тока с высоким предельным напряжением, в которых уровень выходного токового сигнала задается внешними сигналами.

Однополярный токовый генератор называют либо *источником тока* (в случае вытекающего тока), либо *стоком тока* (в случае втекающего тока). В этой книге под однополярным токовым генератором подразумевается устройство, вырабатывающее ток, способный течь только в одну сторону, обычно по направлению к заземлению. Принцип многих генераторов тока основан на использовании вольтамперных характеристик транзисторов. Современные источники тока, управляемые напряжением, часто строятся на ОУ (рис. 5.13А). В приведенной схеме уровень выходного тока i_{out} задается прецизионным и стабильным резистором R_1. Цепь ОС ОУ поддерживает напряжение на этом резисторе постоянным, что обеспечивает постоянство тока, протекающего через него. Для получения более высокого тока при предельном напряжении падение напряжения на резисторе R_1 должно быть, как можно, меньшим. Фактически, можно считать, что выходной ток равен отношению V_1/R_1. Для улучшения работы схемы необходимо максимально снизить ток, протекающий через базу выходного транзистора. Поэтому в этой схеме предпочтительнее использовать полевой, а не биполярный транзистор.

Из теории электротехники известно, что коллекторный ток транзистора почти не зависит от напряжения на коллекторе. На этом свойстве транзисторов построена схема, часто называемая токовым зеркалом. Такая схема всегда имеет один токовый вход и, по крайней мере, один токовый выход. Характерной особенностью токового зеркала является то, что его выходной ток управляется током на его входе. Входной ток заданного значения подается от внешнего источника. На рис. 5.13Б показана схема, так называемого, токового зеркала Вильсона, в которой входной ток i_{in} определяется напряжением V_1 и сопротивлением R_1. Выходной транзистор Q_1 играет роль резистора, управляемого током, регулирующего величину выходного тока i_{out}. При этом i_{out} поддерживается равным i_{in}. Если в приведенной схеме использовать многоэмитерный транзистор (рис. 5.13В), можно увеличить выходной ток в несколько раз. Кампания Texas Instruments серийно выпускает такую схему, обозначаемую TLC014A. Предельное напряжение схемы TLC014A равно 35 В, а выходное сопротивление варьируется в зависимости от тока в пределах 2–200 МОм.

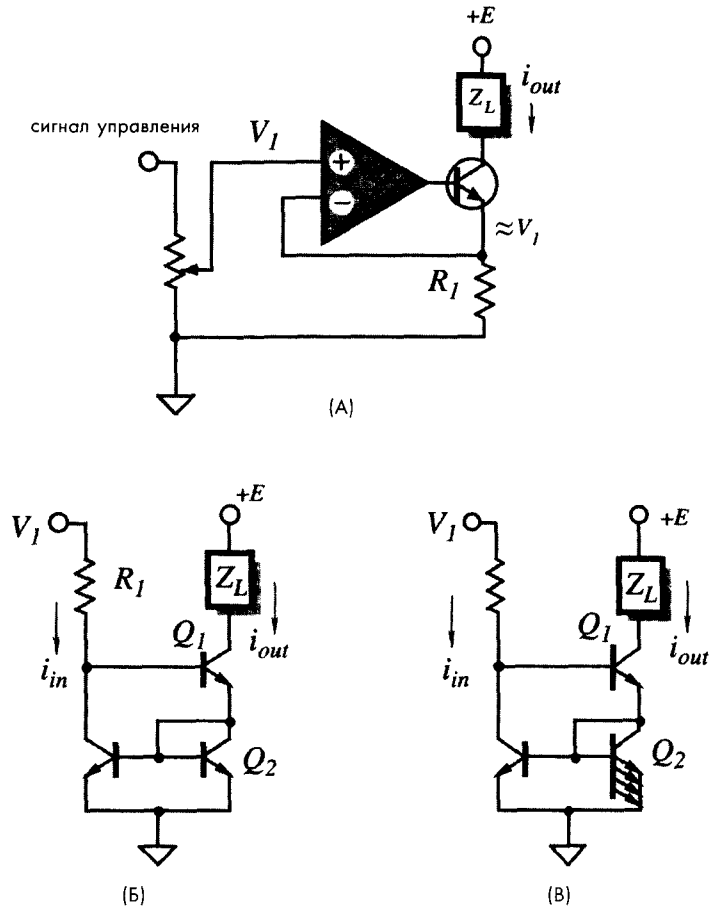


Рис. 5.13. Источники тока: А – на ОУ, Б – токовое зеркало, В – токовое зеркало с умножением тока

На практике часто бывают ситуации, когда требуются *биполярные* генераторы тока. Такие генераторы подают на датчик ток возбуждения, который может менять свое направление. На рис. 5.14 показаны схемы инвертирующего и неинвертирующего генераторов тока, реализованные на основе ОУ, в которых нагрузка включена в цепь ОС. Ток в нагрузке Z_L определяется напряжением V_1 и резистором R_1 и не зависит от импеданса нагрузки. Ток нагрузки в рабочем диапазоне ОУ всегда соответствует напряжению V_1. Существенным недостатком этой схемы является то, что нагрузка не подсоединена ни к шине заземления, ни к любому другому опорному потенциалу. Такой способ подключения нагрузки подходит далеко не для всех случаев. Для некоторых датчиков можно применять схему, показанную на рис. 5.14Б, в которой на одном из выводов импеданса нагрузки поддерживается потенциал, близкий потенциалу заземления, поскольку неинвертирующий вход ОУ является виртуальной землей. Тем не менее, даже при таком способе подключения нагрузка остается изолированной от шины заземления, что может усиливать шумы и, следовательно, вносимые погрешности.

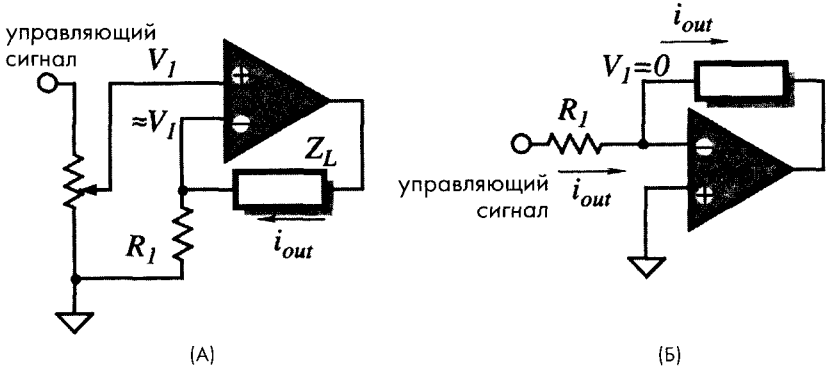


Рис. 5.14. Биполярные генераторы тока с плавающей нагрузкой А – неинвертирующая схема, Б – инвертирующая схема

В случаях, когда датчик должен быть обязательно заземлен, можно использовать схему токового генератора, разработанного Бредом Холендом (рис 5 15А) Этот генератор реализован на основе ОУ, окруженного цепями положительной и отрицательной ОС Нагрузка в этой схеме включена в цепь положительной ОС [2] Ток через нагрузку определяется следующим выражением

$$I_{out} = \frac{R_2}{R_1}\frac{(V_1 - V_2)}{R_5} \qquad (5\ 18)$$

Переменный резистор Р необходим для настройки схемы таким образом, чтобы выполнялось соотношение

$$R_3 = R_1\frac{R_4 + R_5}{R_2} \qquad (5\ 19)$$

В этой схеме каждый резистор может иметь довольно большое сопротивление (100 кОм и даже выше), но величина резистора R_5 должна быть сравнительно небольшой Выполнение этого условия позволяет повысить эффективность работы генератора Холенда, поскольку, чем меньше падение напряжения на R_5, тем меньший ток будет протекать через резисторы R_3 и R_4 Эта схема обладает достаточно высокои стабильностью при работе практически с любой резистивной нагрузкои, но, тем не менее, для увеличения устойчивости генератора рекомендуется включить в цепь положительной ОС конденсатор C, обладающий емкостью несколько пФ Повысить устойчивость схемы также может конденсатор, включенный между положительным входом ОУ и шинои заземления В случае индуктивной нагрузки для отслеживания быстрых изменений управляющего сигнала может потребоваться бесконечно большое предельное напряжение Из-за невозможности выполнения этого условия ток на выходе генератора имеет ограниченную скорость нарастания К тому же индуктивная нагрузка является причиной возникновения всплесков тока на выводах генератора, что может привести к выходу из строя ОУ При

работе с большой индуктивной нагрузкой рекомендуется ставить ограничительные диоды.

На рис. 5.15Б показана схема эффективного токового генератора, реализованного на двух ОУ и четырех прецизионных резисторах. Выходной ток такого генератора определяется выражением·

$$i_{out} = \frac{V_1 - V_2}{R_s}. \qquad (5.20)$$

Достоинством этой схемы является возможность выбора довольно больших значений резисторов R.

На рис. 5.16 показан токовый генератор, формирующий на выходе постоянный ток низкого уровня, построенный на основе интегральной схемы источника опорного напряжения на 2.5 Б. Источник опорного напряжения управляется выходным током повторителя напряжений U_1. Регулятор напряжений поддерживает падение напряжения на резисторе R_s, равным точно 2.5 Б, поэтому ток через этот резистор, а следовательно, и через нагрузку будет также постоянным:

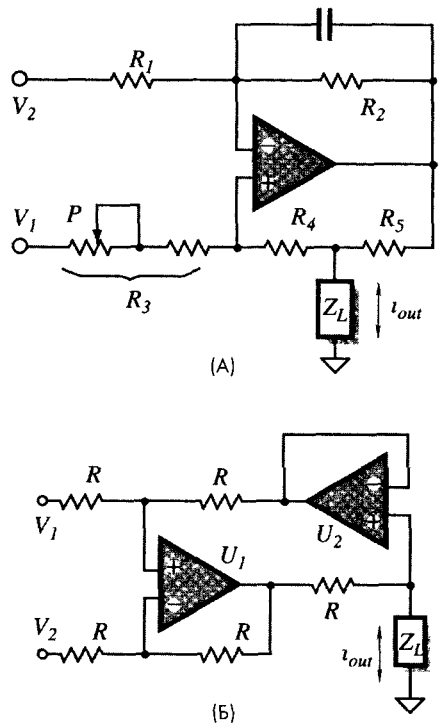


Рис. 5.15. Генератор тока для подключения заземленной нагрузки А – токовый генератор Холенда, В – токовый генератор на двух ОУ

$$i_{out} = \frac{2.5\ B}{R_s} \qquad (5.21)$$

5.3.2. *Источники опорного напряжения*

Источник опорного напряжения – это устройство, вырабатывающее стабилизированное напряжение, на величину которого не влияют ни колебания сигнала блока питания, ни температурные изменения, ни нагрузка, ни старение и никакие другие факторы. Хотя источники опорного напряжения в настоящее время широко выпускаются в интегральном исполнении, в бытовой аппаратуре часто применяются простые устройства, получившие название *стабилитроны*.

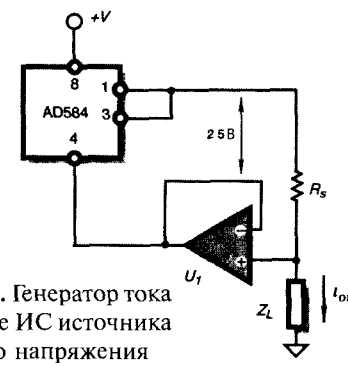


Рис. 5.16. Генератор тока на основе ИС источника опорного напряжения

При повышении напряжения внутри схемы падение напряжения на стабилитроне всегда остается постоянным при неизменном токе в цепи нагрузки. Стабилитрон реализуется на основе обратно смещенного полупроводникового p-n перехода. При прямом смещении диода (p-область более положительно заряжена по отношению к n-области) ток проходит через него практически беспрепятственно. На самом деле поведение прямо смещенного стабилитрона мало отличается от обычного полупроводникового диода (рис. 5.17А). При обратном смещении диода (на катоде плюс, а на аноде минус), если приложенное напряжение не превышает напряжение стабилизации V_z, через стабилитрон течет очень маленький ток. Этот ток вызывается утечками в стабилитроне и практически не зависит от приложенного напряжения. При приближении обратного напряжения к напряжению пробоя V_z, ток начинает быстро расти и, если он ничем не ограничен, может произойти перегрев и выход стабилитрона из строя. По этой причине в цепь стабилитронов обычно ставятся токоограничивающие компоненты, например, резисторы, термисторы с положительным температурным коэффициентом и источники тока. На рис. 5.17Б показана наиболее распространенная схема включения стабилитрона. В ней стабилитрон ставится параллельно нагрузке, поэтому такая схема часто называется шунтирующим стабилизатором. Поскольку ток i разделяется по двум ветвям: на нагрузку и на стабилитрон, он должен быть довольно значительным. Следует помнить, что при увеличении температуры полупроводникового перехода, напряжение стабилизации падает.

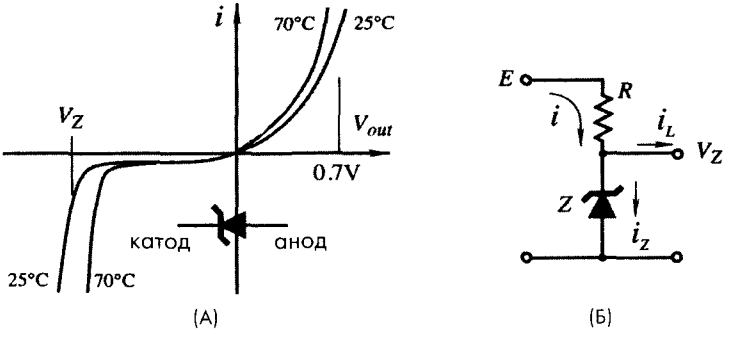


Рис. 5.17. Стабилитрон А – вольтамперная характеристика, Б – стабилизатор шунтирующего (параллельного) типа

Стабилитроны можно разделить на три группы: стабилизационные диоды, опорные стабилитроны и гасители переходных колебаний напряжения. Стабилизационные диоды обычно применяются в блоках питания, где требуется обеспечивать практически постоянныи уровень выходного напряжения при значительных изменениях входного напряжения или импеданса нагрузки. Выпуск таких стабилитронов, рассчитанных на работу при разных напряжениях и мощностях, налажен очень хорошо, поэтому они нашли широкое распространение в современных электронных устройствах. Однако стабилизационные диоды имеют серьезный недостаток: они являются температурно зависимыми. Поэтому в случаях, когда на выходное напряжение наложены очень строгие допуски, и оно должно оставаться постоянным при изменениях входного напряжения, тока в нагрузке и температуры, используются стабилизационные диоды с температурной компенсацией, называемые опорными стабилитронами.

Кремниевый p-n переход обладает разными температурными характеристиками при прямом и обратном смещении На основе этого свойства реализован ряд датчиков В разделе 16 3 главы 16 описан кремниевый стабилитрон, имеющий отрицательный температурный коэффициент, равный –2 мВ/°С, при прямом смещении, а при обратном смещении температурная чувствительность того же стабилитрона меняется в пределах 2 6 мВ/°С в зависимости от тока и типа диода Поэтому, объединяя прямо и обратно смещенные переходы, можно построить устройство с очень низкой температурнои чувствительностью во всем рабочем диапазоне (рис 5 18) При этом изменения напряжения на двух переходах будут равны и направлены в противоположные стороны только для одного значения тока Для любых других значений тока получить идеальную температурную компенсацию не удается Тем не менее, даже простое включение двух стабилитронов, направленных в разные стороны, позволяет значительно улучшить температурную стабильность схемы в широком диапазоне токов и температур В схемах с таким соединением стабилитронов напряжение стабилизации будет выше, чем в схемах с одним стабилитроном Кампания Motorola серийно выпускает такие стабилизаторы под маркировкой 1N821

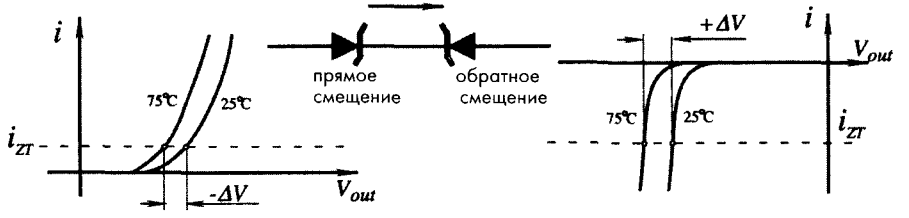


Рис. 5.18. Температурная компенсация стабилитронов

В настоящее время стабилизаторы часто заменяют на устройства опорного напряжения с межзональными переходами Они, как правило, обладают более низким выходным импедансом, чем низковольтные стабилитроны, а их рабочие напряжения стабилизации лежат в интервале 1 2 10 В В целом, сейчас нет проблем с качественными стабилизаторами напряжений, поскольку их выпускают много производителей на разные рабочие напряжения

5.3.3 Генераторы

Генераторы – это устройства, вырабатывающие переменные электрические сигналы Любой генератор состоит из усилительного блока, нелинейного элемента и цепи положительной ОС Генераторы в отличие от усилителей являются нестабильными устройствами, чьи временные характеристики должны быть либо постоянными, либо меняться в соответствии с заранее заданной функцией Генератор второго типа иногда называется *модулятором* В зависимости от используемых времязадающих компонентов, генераторы делятся на три группы RC-генераторы, LC-генераторы и кварцевые генераторы В RC-генераторах рабочая частота задается конденсаторами и резисторами, в LC-генераторах – емкостными и индуктивными

элементами, а в кварцевых генераторах – механическим резонансом определенных срезов пьезоэлектрических кристаллов, обычно кварцевых или керамических.

Существует большое количество схем генераторов, и, конечно же, в этом разделе будут описаны только некоторые из них: например, те, которые могут напрямую подключаться к датчикам, и несколько недорогих схем.

На основе логических схем, таких как ИЛИ-НЕ, И-НЕ и двоичные инверторы, можно реализовать различные виды мультивибраторов. Для этой же цели часто используются компараторы и ОУ, обладающие высоким коэффициентом усиления без ОС. Во всех генераторах такого типа сначала происходит заряд конденсатора, напряжение на котором сравнивается либо с постоянным, либо изменяющимся по определенному закону напряжением. Момент равенства этих напряжений детектируется компаратором. Компаратор представляет собой устройство с двумя входами, сигнал на выходе которого появляется только при равенстве входных напряжений. Компаратор по определению является нелинейным элементом, поскольку его выходное напряжение даже при небольшом рассогласовании входных сигналов всегда находится на уровне насыщения, что связано с высоким коэффициентом усиления. Сигнал на выходе компаратора, свидетельствующий о равенстве входных напряжений, запускает процесс перезарядки конденсатора, в результате которого напряжение на его пластинах становится противоположным первоначальному. В момент равенства напряжений на входах компаратора опять происходит его срабатывание, и начинается новый цикл перезарядки конденсатора. Из этого описания видно, что схема такого генератора должна, как минимум, содержать конденсатор, цепь заряда и пороговое устройство (компаратор). Разные фирмы выпускают несколько типов таких релаксационных генераторов, наиболее популярные из них реализованы на ИС 555 таймера, способного работать как в режиме одновибратора, так и мультивибратора. В литературе, например, в [3], описано много видов таких схем, здесь для иллюстрации всего вышесказанного приведем два примера генераторов прямоугольных импульсов, реализованных на основе дискретных компонентов (рис. 5.19).

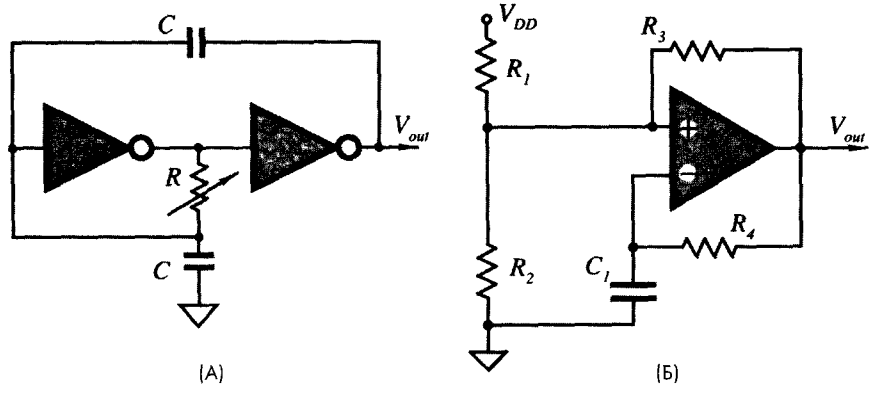


Рис. 5.19. Генераторы прямоугольных импульсов: А – на двух логических инверторах, Б – на основе компаратора или ОУ

На рис. 5.19А показан простой генератор прямоугольных импульсов, построенный на двух логических инверторах (например, КМОП элементах), имеющих порог срабатывания, приблизительно равный половине напряжения питания. Когда напряжение на входе инвертора превышает пороговый уровень, на его выходе появляется сигнал противоположной полярности. Если входной сигнал имеет форму пилы, то каждый раз при его достижении уровня половины напряжения питания, напряжение на выходе генератора будет менять свою направленность. Временные характеристики такой схемы определяются значениями резистора R и конденсаторов C. Оба конденсатора должны быть абсолютно одинаковыми. Стабильность генератора определяется, в основном, стабильностью R и C.

На рис. 5.19Б показана схема другого популярного генератора, реализованного на ОУ или компараторе напряжений (Компаратор напряжений отличается от ОУ более высоким быстродействием и устройством выходных цепей, которые совместимы с ТТЛ и КМОП логическими элементами). В этом генераторе ОУ имеет две цепи ОС: одну отрицательную (подключенную к инвертирующему входу), другую положительную (подключенную к неинвертирующему входу). Положительная ОС через резистор R_3 задает пороговый уровень напряжения, а отрицательная ОС через резистор R_4 определяет время заряда и разряда конденсатора C_1. Частоту генератора можно найти из выражения:

$$f = \frac{1}{R_4 C_1}\left[\ln\left(1 + \frac{R_1 \| R_2}{R_3}\right)\right]^{-1}, \qquad (5.22)$$

где $R_1 \| R_2$ – эквивалентное сопротивление параллельного соединения этих резисторов.

На рис. 5.20 показаны две схемы генераторов синусоидальных сигналов, реализованных на основе n-p-n транзисторов, используемых в качестве усилителей, и LC-цепочки, отвечающей за частоту колебаний. Схема Б часто применяется в измерительных преобразователях линейных перемещений, где линейный дифференциальный трансформатор напряжения (ЛДТН) является частью колебательного контура.

В состав емкостных датчиков присутствия, используемых для обнаружения людей в зоне действия антенны, входит радиочастотный генератор (рис. 5.21) (см. раздел 7.3 главы 7). Антенна представляет собой катушку, которая совместно с конденсатором C_2 определяет частоту генерации. Изменение распределенной емкости окружающей среды, вызванной движением человека в рабочей зоне антенны, приводит к уменьшению частоты колебаний. Выход генератора соединен с резонатором (обычно LC-цепью), настроенным на основную частоту (около 30 МГц). Появление человека снижает частоту, а следовательно, и уменьшает амплитуду выходного напряжения резонатора. Высокочастотный сигнал выпрямляется пиковым детектором, и полученное напряжение поступает на компаратор, где сравнивается с заданным пороговым уровнем. Частота данной схемы модулируется при помощи чувствительной антенны. Если антенну заменить на индуктор, получится генератор стабильных синусоидальных сигналов.

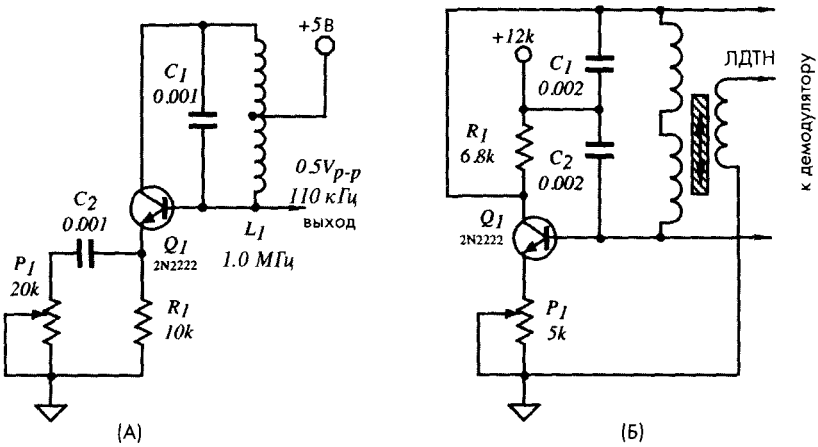


Рис. 5.20. *LC*-генераторы синусоидальных сигналов

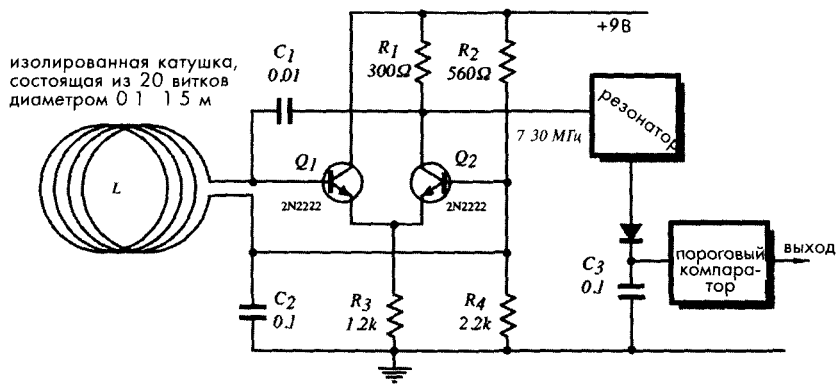


Рис. 5.21. LC-радиочастотный генератор, входящий в состав емкостного детектора присутствия

5.3.4 Задающие устройства

В отличие от генераторов тока задающие устройства вырабатывают напряжение, не зависящее от величины выходного тока в широком интервале рабочих частот и при разных нагрузках. При подсоединении к чисто резистивной нагрузке функция задающего устройства заключается в обеспечении датчиков необходимым током. В случае реактивной нагрузки, включающей индуктивные и емкостные элементы, схемы задающих устройств значительно усложняются.

Даже когда датчик является чисто резистивным, при его подключении к другим устройствам в системе неизбежно появляются паразитные емкостные компоненты. Например, так происходит, если подсоединение выполняется длинными проводами или коаксиальными кабелями. Было обнаружено, что если на рабочей частоте f длина кабеля меньше 1/4 длины волны, коаксиальный кабель ведет себя как конденсатор,

включенный между центральным проводником и его экранирующим покрытием. Максимальную длину кабеля можно найти из эмпирического соотношения:

$$L \le 0.0165\frac{c}{f}, \tag{5.23}$$

где c – скорость света в изоляторе коаксиального кабеля.

Например, на частоте f = 100 кГц, длина кабеля L не должна превышать $0.0165(3\cdot10^8/10^5) = 49.5$ м. Это значит, что коаксиальный кабель, длина которого меньше 49.5 метров, ведет себя как конденсатор, подключенный параллельно нагрузке (рис. 5.22А). Например, для кабеля R6-58A/U емкость этого конденсатора составляет 95 пФ/м. Величина этой емкости влияет на быстродействие и стабильность всей системы в целом. Нестабильность может возникнуть из-за сдвига фаз, вызванного выходным сопротивлением R_0 задающего устройства и емкостью нагрузки C_L:

$$\varphi = \arctan(2\pi f R_0 C_L). \tag{5.24}$$

Например, при R_0 = 100 Ом и C_L = 1000 пФ на частоте f = 1 МГц сдвиг фаз φ приблизительно равен 32°. Такой сдвиг значительно снижает запас по фазе в цепи ОС, что может привести к существенному искажению выходного сигнала и создать проблемы при работе с емкостными датчиками. Неустойчивым может стать только задающее устройство, но иногда колебательный режим охватывает всю систему. Для борьбы с неустойчивостью ставят либо большой развязывающий конденсатор (порядка 10 мкФ) параллельно источнику питания, либо так называемый модулятор добротности, состоящий из последовательного соединения резистора номиналом 3...10 Ом и дискового керамического конденсатора, включенных между шиной питания ИС задающего устройства и выводом заземления.

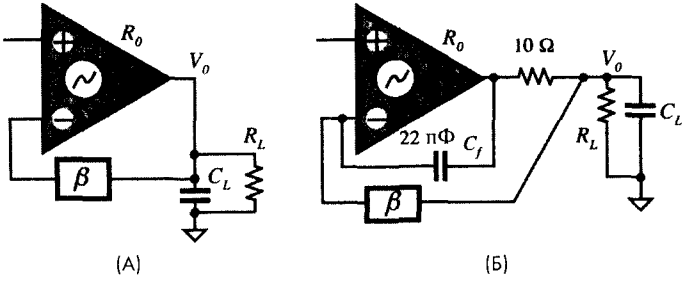


Рис. 5.22. Управление емкостной нагрузкой: А – конденсатор нагрузки подключается ко входу задающего устройства через цепь ОС, Б – цепь развязки от емкостной нагрузки

Для повышения устойчивости задающего устройства при работе с емкостной нагрузкой иногда используют небольшой резистор, включенный, как показано на рис. 5.22Б. Небольшая емкость в цепи ОС (C_f), соединенная с инвертирующим входом ОУ, и 10-ти омный резистор позволяют работать с достаточно большой емкостной нагрузкой, порядка 0.5 мкФ. Однако в каждом конкретном случае номиналы резистора и конденсатора рекомендуется подбирать экспериментально.

5.4. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП)

5.4.1. Принципы построения АЦП

АЦП бывают разных типов: из дискретных компонентов, в виде ИС, высокопроизводительных гибридных схем, модулей и даже блоков. Также АЦП изготавливаются в виде стандартных ячеек для применения в специализированных ИС. АЦП – это преобразователи, конвертирующие аналоговые данные, обычно напряжение в эквивалентный цифровой сигнал, совместимый с цифровыми устройствами обработки данных. Основными характеристиками АЦП являются: абсолютная и относительная погрешность, линейность, разрешающая способность, скорость преобразования, стабильность, способность не пропускать коды и стоимость. Довольно часто, особенно когда цена АЦП имеет решающее значение, применяют преобразователи, реализованные из дискретных компонентов и в виде монолитных ИС. Наиболее популярными являются АЦП, построенные на принципе последовательного приближения, которые дают возможность найти хороший компромисс между быстродействием и точностью. Когда не требуется высокая скорость преобразований, часто применяются интегрирующие АЦП и преобразователи напряжения в частоту. В настоящее время методы проектирования АЦП хорошо отработаны. В этом разделе будут даны краткие описания наиболее распространенных архитектур АЦП. Более подробную информацию об АЦП можно найти в специализированной литературе, например, [4].

Таблица 5.1. Простой двоичный и дробный двоичный коды

десятичные дроби	двоичные дроби	СЗР x 1/2	разряд1 x 1/4	разряд2 x 1/6	разряд3 x 1/16	простой двоичный код	десятичное число
0	0 0000	0	0	0	0	0000	0
1/16 (МЗР)	0 0001	0	0	0	1	0001	1
2/16=1/8	0 0010	0	0	1	0	0010	2
3/16=1/8+1/16	0 0011	0	0	1	1	0011	3
4/16=1/4	0 0100	0	1	0	0	0100	4
5/16=1/4+1/16	0 0101	0	1	0	1	0101	5
6/16=1/4+1/8	0 0110	0	1	1	0	0110	6
7/16=1/4+1/8 + 1/16	0 0111	0	1	1	1	0111	7
8/16= 1/2 (СЗР)	0 1000	1	0	0	0	1000	8
9/16=1/2+1/16	0 1001	1	0	0	1	1001	9
10/16=1/2+1/8	0 1010	1	0	1	0	1010	10
11/16=1/2+1/8 + 1/16	0 1011	1	0	1	1	1011	11
12/16=1/2+1/4	0 1100	1	1	0	0	1100	12
13/16=1/2+1/4+1/16	0 1101	1	1	0	1	1101	13
14/16=1/2+1/4+1/8	0 1110	1	1	1	0	1110	14
15/16= 1/2+ 1/4+ 1/8+1/16	0 1111	1	1	1	1	1111	15

Самым известным цифровым кодом является *двоичный* (т.е. код с основанием 2). Наиболее часто двоичный код используется для представления целых чисел.

При этом целое число в простом двоичном коде имеет вид n-разрядного слова, в котором вес младшего значащего разряда (МЗР) равен 2^0 (т.е. единице), вес следующего разряда -2^1 (т.е. 2) и так далее до старшего значащего разряда (СЗР), вес которого определяется значением 2^{n-1} (т.е $2^n/2$). Значение целого числа получается при сложении весов всех ненулевых разрядов. В двоичном виде можно представить любые целые числа в интервале $0...2^n-1$. Добавление дополнительных разрядов позволяет значительно увеличивать максимальное значение целого числа, которое можно представить двоичным словом.

Таблица 5.2. Веса двоичных разрядов и разрешающая способность

разряд	2^{-n}	$1/2^n$ дробный двоичный код	дБ	$1/2^n$ десятичное число	%	одна миллионная часть (ppm)
Максимум	2^0	1	0	1 0	100	1,000,000
СЗР	2^{1}	1/2	-6	0 5	50	500,000
2	2^{-2}	1/4	-12	0 25	25	250,000
3	2^{3}	1/8	-18 1	0 125	12 5	125,000
4	2^{4}	1/16	-24 1	0 0625	6 2	62,500
5	2^{5}	1/32	-30 1	0 03125	3 1	31,250
6	2^{-6}	1/64	-36 1	0 015625	1 6	15,625
7	2^{7}	1/128	-42 1	0 007812	0 8	7,812
8	2^{8}	1/256	-48 2	0 003906	0 4	3,906
9	2^{9}	1/512	-54 2	0 001953	0 2	1,953
10	2^{10}	1/1,024	-60 2	0 0009766	0 1	977
11	2^{11}	1/2,048	-66 2	0 00048828	0 05	488
12	2^{-12}	1/4,096	-72 2	0 00024414	0 024	244
13	2^{-13}	1/8,192	-78 3	0 00012207	0 012	122
14	2^{-14}	1/16,384	-84 3	0 000061035	0 006	61
15	2^{-15}	1/32,768	-90 3	0 0000305176	0 003	31
16	2^{-16}	1/65,536	-96 3	0 0000152588	0 0015	15
17	2^{-17}	1/131,072	-102 3	0 00000762939	0 0008	7 6
18	2^{-18}	1/262,144	-108 4	0 000003814697	0 0004	3 8
19	2^{19}	1/524,288	-114 4	0 000001907349	0 0002	1 9
20	2^{-20}	1/1,048,576	-120 4	0 0000009536743	0 0001	0 95

При преобразовании сигналов аналоговых датчиков удобнее пользоваться *дробным* двоичным кодом [4]. Для того чтобы простой двоичный код преобразовать в дробный, все целые значения необходимо разделить на 2^n. Тогда вес СЗР должен равняться 1/2 (поскольку $2^n\ ^1/2^n=2^{\ 1}$), вес следующего бита – 1/4 (т.е. $2^{\ 2}$) и так далее до МЗР, вес которого будет равен $1/2^n$(т.е. $2^{\ n}$). Сумма нормализованных разрядов может быть равна любому из 2^n значений в интервале $0...(1-2^{\ n})$, что составляет полную шкалу датчика.

Дополнительные разряды повышают разрешение датчика, не оказывая никакого влияния на его диапазон измерений. В таблице 5.1 приведен список 16 значений пятиразрядного слова, лежащих в интервале 0...1, и их двоичные веса. Здесь

также показаны эквиваленты чисел, выраженных в десятичном, простом двоичном и дробном десятичном кодах.

Когда все разряды простого двоичного кода равны «1», ему соответствует значение в дробном двоичном коде $1-2^{-n}$. Строго говоря, это число надо записать как 0.1111 (=1 – 0.0001). Но на практике это число чаще всего обозначается, как 1111 (т.е. 15), но все при этом понимают, что речь идет о числе 15/16 или 1111/(1111+1).

В таблице 5.2 приведен список весов двоичных разрядов в двоичных числах, разрядность которых меняется в диапазоне 1...20 разрядов. Однако на практике разрядность датчиков редко превышает число 16.

Вес, соответствующий МЗР, является разрешающей способностью *n*-разрядных преобразователей. Числа в колонке, выраженной в дБ, равны десятичным логарифмам отношения МЗР к полной шкале измерения (т.е. 1), умноженным на 20. Каждая последующая степень числа 2 соответствует изменению чисел на 6.02 дБ (или 20lg2), что часто называют изменением 6 дБ на октаву.

5.4.2. Преобразователи напряжения в частоту (ПНЧ)

Достоинством ПНЧ является высокая разрешающая способность преобразований, поэтому они часто используются с датчиками, обладающими большим временем интегрирования (от секунд до нескольких лет), в преобразователях цифрового значения в частоту (в цифроаналоговых преобразователях (ЦАП)), в частотных модуляторах, делителях и умножителях. На входы ПНЧ поступает аналоговый сигнал датчика, который может быть либо напряжением, либо током (в последнем случае это уже будет преобразователь тока в частоту). В некоторых случаях датчик является частью АЦП (см. раздел 5.5). В данном разделе будут рассмотрены только ПНЧ, в которых величина напряжения определяется количеством прямоугольных импульсов в единицу времени. Частота может рассматриваться цифровым сигналом, поскольку всегда можно подсчитать импульсы в заданном интервале времени и представить полученное число в двоичном коде. Все ПНЧ являются преобразователями интегрирующего типа, поскольку их выходным сигналом является *частота* (количество импульсов в секунду), пропорциональная *среднему* значению входного напряжения.

На основе ПНЧ реализуются самые простые и экономичные АЦП. Время, требуемое на преобразование напряжения в цифровое значение, определяется максимальной частотой ПНЧ и необходимым уровнем разрешения. Как правило, ПНЧ обладают сравнительно невысоким быстродействием по сравнению с АЦП последовательного приближения, однако они подходят для совместной работы с подавляющим большинством датчиков. Когда ПНЧ используется в качестве АЦП, он подключается к счетчику, тактируемому с заданной частотой отсчетов. Например, если верхний предел частоты преобразователя равен 32 кГц, а счетчик включается 8 раз в секунду, максимальное количество импульсов, посчитанных за один счетный период, составит 4000, что приблизительно соответствует разрешающей способности 12-ти разрядного АЦП (см. таблицу 5.2). Используя ту же самую комбинацию компонентов (ПНЧ и счетчик), можно реализовать интегрирующее устройство, применяемое в случаях, когда необходимо проводить измерения внешних сигналов в определенном интервале времени. В этом случае счетчик

будет подсчитывать количество импульсов в течение заданного промежутка времени, а не среднее число импульсов за цикл счета.

Другое полезное свойство ПНЧ – простота передачи импульсов по линиям связи. Импульсные сигналы обладают большей помехоустойчивостью по сравнению с аналоговыми сигналами, имеющими высокое разрешение. В идеальном случае выходная частота преобразователя f_{out} пропорциональна входному напряжению V_{in}, т.е. выполняется соотношение:

$$\frac{f_{out}}{f_{FS}} = \frac{V_{in}}{V_{FS}}, \tag{5.25}$$

где f_{FS} и V_{FS} – максимальная частота и входное напряжение ПНЧ. Для линейного преобразователя отношение $f_{FS}/V_{FS}=G$, являющееся постоянной величиной, называется коэффициентом преобразования. Тогда

$$f_{out} = GV_{in}. \tag{5.26)0}$$

Существует несколько типов ПНЧ. Самые популярные из них построены на основе мультивибратора и схемы с уравновешиванием заряда.

ПНЧ мультивибраторного типа, показанный на рис. 5.23, реализован на основе асинхронного генератора прямоугольных импульсов, в котором ток заряда и разряда времязадающего конденсатора определяется входным сигналом. Входное напряжение V_{in} усиливается дифференциальным усилителем (например, измерительным усилителем), выходной сигнал которого используется для управления транзисторами U_1 и U_2, являющимися преобразователями напряжения в ток. Прецизионный мультивибратор поочередно подключает времязадающий конденсатор С к обоим токовым преобразователям. В результате чего, конденсатор половину периода заряжается током i_a через транзистор U_1, а вторую половину периода разряжается через транзистор U_2 током i_b. Поскольку величина токов i_a и i_b определяется входным сигналом, напряжение на конденсаторе во время заряда и разряда будет меняться с одинаковой скоростью, но с противоположным знаком. При этом на выходе мультивибратора формируется сигнал, частота которого пропорциональна

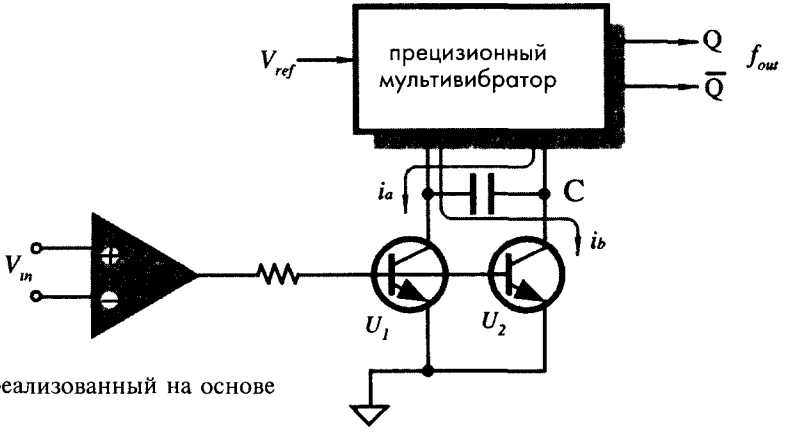


Рис. 5.23. ПНЧ, реализованный на основе мультивибратора.

входному напряжению. Достоинства этой схемы – простота и относительно низкая потребляемая мощность. Однако она обладает низким подавлением высокочастотных шумов, поэтому в случаях, где требуется высокая помехоустойчивость лучше применять схемы с уравновешиванием заряда.

В состав *ПНЧ с уравновешиванием заряда* входит аналоговый интегратор и компаратор напряжений (рис. 5.24). Достоинства этой схемы – высокое быстродействие, линейность и хорошее шумоподавление. Ряд фирм выпускают такие схемы в интегральном исполнении: например, ADVFC32 и AD650 (Analog Devices), а также LM331 (National Semiconductors). Такой ПНЧ работает следующим образом. Входное напряжение V_{in} поступает на вход интегратора через резистор R_{in}. Интегрирующий конденсатор включен в цепь ОС ОУ, выходной сигнал которого сравнивается с небольшим отрицательным пороговым напряжением –0.6 В. На выходе интегратора формируется пилообразное напряжение (рис. 5.26). В момент равенства напряжения интегратора и уровня порогового сигнала на выходе компаратора появляется перепад напряжения, запускающий одновибратор, вырабатывающий на своем выходе прямоугольный сигнал фиксированной длительности t_{os}. Прецизионный источник тока вырабатывает постоянный сигнал, который попеременно подключается то ко входу интегратора, то к его выходу. Ключ S_1, выполняющий операцию переключения, управляется выходным сигналом одновибратора. При подсоединении источника тока ко входу ОУ интегрирующий конденсатор C_{in} получает постоянный заряд $\Delta Q = i \times t_{os}$. На тот же самый конденсатор через резистор R_{in} поступает и входной ток I_{in}. В результате заряд на конденсаторе определяется суммой этих токов.

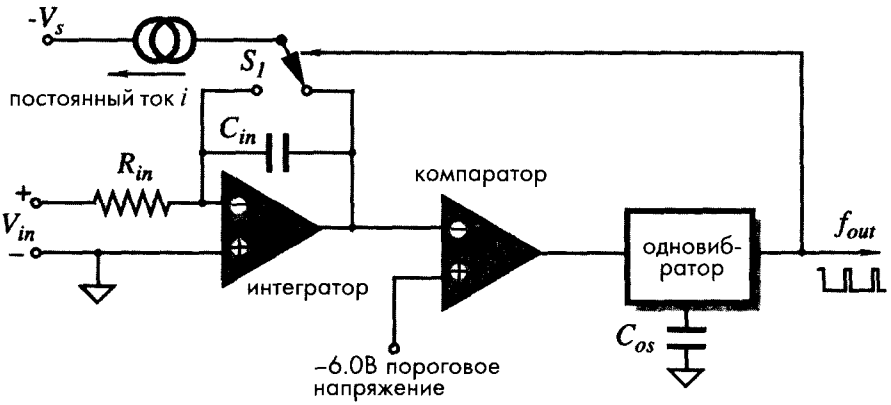


Рис. 5.24. ПНЧ с уравновешиванием заряда

Когда выходное напряжение интегратора сравнивается с пороговым напряжением, запускается одновибратор и ключ S_1 меняет свое положение, т.е. начинается стадия восстановления (рис. 5.25Б). Во время этой стадии ко входу интегратора одновременно подключены и источник тока, и источник входного напряжения. Полный перепад напряжения на выходе интегратора за время стадии восстановления определяется длительностью импульса одновибратора:

$$\Delta V = t_{os}\frac{dV}{dt} = t_{os}\frac{i - I_{in}}{C_{in}}. \qquad (5.27)$$

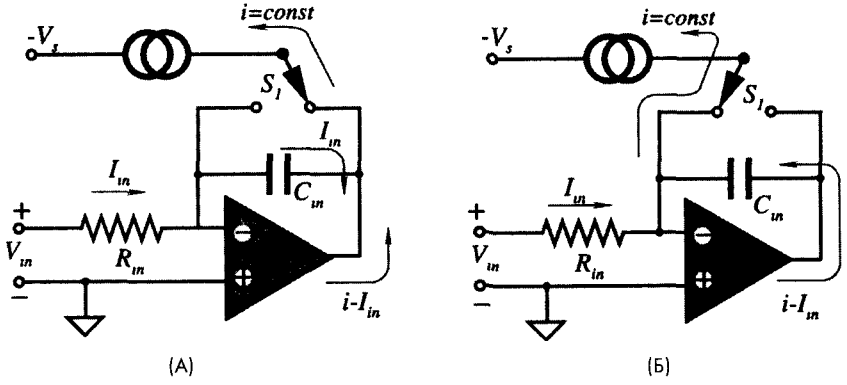


Рис. 5.25. Две стадии работы ПНЧ с уравновешиванием заряда: интегрирования и восстановления.

По окончании импульса одновибратора ключ S_1 подключает ток i к выходу интегратора. Теперь этот ток никак не влияет на конденсатор C_{in}, однако при этом ток на входе компаратора уменьшается. Эта стадия называется стадией интегрирования (рис. 5.25А и 5.26). Во время этой стадии происходит разряд конденсатора положительным входным током: $I_{in} = V_{in}/R_{in}$ со скоростью, пропорциональной величине напряжения V_{in}. Время, за которое напряжение на входе компаратора сравнивается с пороговым напряжением, находится из уравнения:

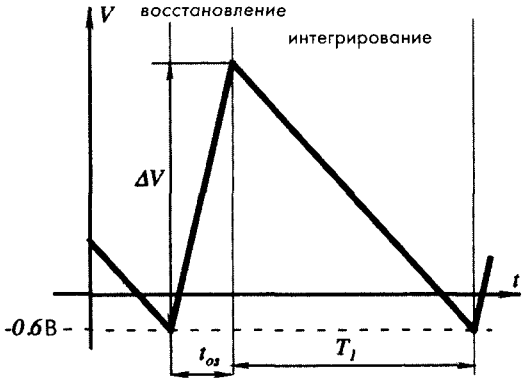


Рис.5.26. Выходной сигнал интегратора ПНЧ с уравновешиванием заряда

$$T_1 = \frac{\Delta V}{dV/dt} = t_{os}\frac{i - I_{in}}{C_{in}}\frac{1}{I_{in}/C_{in}} = t_{os}\frac{i - I_{in}}{I_{in}}. \qquad (5.28)$$

Из этой формулы видно, что величина конденсатора никак не влияет на длительность стадии интегрирования. Частота выходного сигнала определяется выражением:

$$f_{out} = \frac{1}{t_{os} + T_1} = \frac{I_{in}}{t_{os} i} = \frac{V_{in}}{R_{in}}\frac{1}{t_{os} i}. \qquad (5.29)$$

Следовательно, частота импульсов одновибратора пропорциональна входному напряжению и зависит от качества интегрирующего резистора, стабильности генератора тока и одновибратора. При выполнении точного расчета можно реализовать ПНЧ такого типа, обладающий в диапазоне частот 1 Гц...1 МГц погрешностью нелинейности 10×10^{-4}.

Основным достоинством преобразователей интегрирующего типа является их способность подавления аддитивных шумов, поскольку при выполнении процедуры интегрирования уровень помех значительно снижается. Счетчик выполняет подсчет импульсов от преобразователя в течение заданного интервала времени T. Счетчик ведет себя как фильтр с передаточной функцией вида:

$$H(f)=\frac{\sin\pi fT}{\pi fT}, \tag{5.30}$$

где f – частота импульсов. На низких частотах значение этой передаточной функции близко к единице. Это значит, что преобразователь совместно со счетчиком выполняют корректные измерения. Однако на частоте $1/T$ передаточная функция равна 0, что означает полное подавление сигналов этих частот. Например, при интервале счета $T=20$ мсек, соответствующем частоте 50 Гц (частоте напряжения сети, которая часто является источником существенных помех во многих датчиках), 50-ти Гц шумы будут полностью устранены. Более того импульсы с частотами, кратными 50 Гц (100 Гц, 150 Гц,...), будут также подавлены.

5.4.3. АЦП двойного интегрирования

АЦП двойного интегрирования являются очень популярными преобразователями. Они используются практически во всех цифровых вольтметрах и других портативных устройствах, не требующих высокого быстродействия. АЦП данного типа выполняют косвенное преобразование входного напряжения . Сначала они преобразуют V_{in} в функцию от времени, которую затем при помощи счетчика импульсов конвертируют в цифровой код. Хотя АЦП двойного интегрирования и являются довольно медленными преобразователями, но благодаря своей простоте, невысокой стоимости, помехоустойчивости и сравнительно высокой разрешающей способности они часто применяются в случаях, где нет быстрых изменений внешних сигналов. Рис. 5.27 поясняет принцип действия таких АЦП. Также как и ПНЧ с уравновешиванием зарядов АЦП двойного интегрирования состоят из интегратора и порогового компаратора. В данном случае пороговое напряжение устанавливается равным нулю (соответствующий вывод заземляется), правда, в некоторых случаях оно задается равным некоторому постоянному напряжению. При помощи переключателя S_1 к интегратору поочередно подключается то входное, то эталонное напряжение. В рассматриваемой упрощенной схеме входное напряжение является отрицательным, а эталонное – положительным. Однако при добавлении к входному сигналу постоянной составляющей при помощи дополнительного ОУ, т.е. при его смещении вдоль вертикальной оси, данная схема может работать и с биполярными сигналами. Когда выходное напряжение интегратора пересекает нулевой уровень, компаратор срабатывает и посылает сигнал в логический блок,

управляющий переключателями S_1 и S_2. Ключ S_2 используется для разряда интегрирующего конденсатора C_{in}.

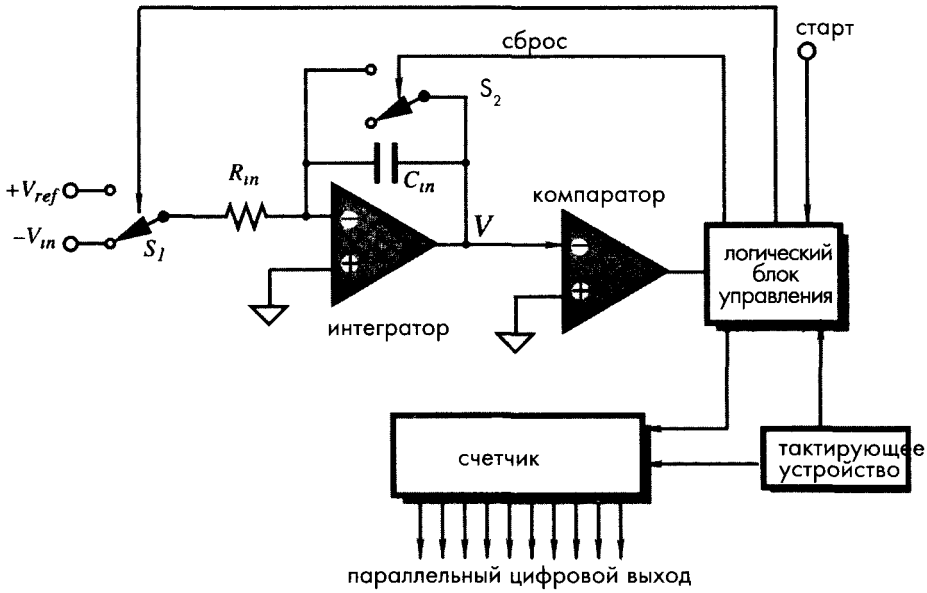


Рис. 5.27. АЦП двойного интегрирования

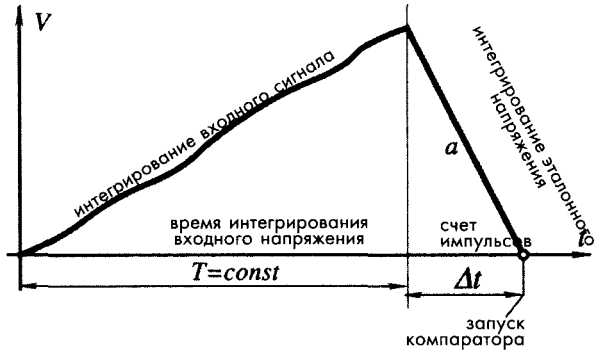


Рис. 5.28. Выходной сигнал АЦП двойного интегрирования

В начале преобразований, когда на вход «старт» приходит разрешающий сигнал, ключ S_1 подает на интегратор входное напряжение, и блок управления запускает таймер, установленный на фиксированный интервал времени T, в течение которого напряжение на выходе интегратора линейно возрастает (рис. 5.28). Любые изменения входного сигнала в процессе интегрирования усредняются. По истечение времени T напряжение на выходе интегратора становится равным следующему значению:

$$V_m = \overline{V}_{in} \frac{T}{R_{in} C_{in}}, \tag{5.31}$$

где $\overline{V}_{in}$ – среднее значение входного сигнала за промежуток времени T. В этот момент ключ S_1 подключает на вход интегратора эталонное напряжение, имеющее противоположную входному сигналу полярность. Наступает фаза интегрирования эталонного напряжения, в течение которой выходное напряжение интегратора линейно уменьшается до нуля со скоростью:

$$a = -\frac{V_{ref}}{R_{in} C_{in}}. \tag{5.32}$$

Во время интегрирования эталонного напряжения счетчик считает импульсы, поступающие от тактирующего устройства. Счет прекращается в момент, когда напряжение интегратора становится равным нулю. По сигналу компаратора, фиксирующего переход нулевого уровня, блок управления переключает ключ S_2, разряжающий конденсатор C_{in}. Заряд на конденсаторе, полученный в течение интегрирования входного сигнала, точно равен заряду, потерянному за время интегрирования эталонного напряжения. Поэтому справедливо следующее соотношение:

$$\overline{V}_{in} \frac{T}{R_{in} C_{in}} = V_{ref} \frac{\Delta t}{R_{in} C_{in}}, \tag{5.33}$$

из которого выводится выражение:

$$\frac{\overline{V}_{in}}{V_{ref}} = \frac{\Delta t}{T}. \tag{5.34}$$

Следовательно, отношение среднего входного и эталонного напряжений можно заменить на отношение двух временных интервалов. Далее счетчик выполняет следующую процедуру: он конвертирует временной интервал Δt в цифровой код, определяя количество тактовых импульсов, поступающих в течение данного промежутка времени. Посчитанное количество импульсов и будет соответствовать среднему входному напряжению. Необходимо помнить, V_{ref} и T должны быть постоянными величинами.

АЦП двойного интегрирования имеет такие же преимущества, что и ПНЧ с уравновешиванием зарядов:

- Они оба подавляют шумы с частотой $1/T$. Следует отметить, что при $T = 200$ мс происходит подавление как 50-ти, так и 60-ти герцовых помех, что защищает АЦП от сетевых наводок.
- Точность преобразования в обоих преобразователях не зависит от стабильности тактовой частоты, поскольку одно и то же тактирующее устройство задает интервал счета T и вырабатывает счетные импульсы.

- Разрешающая способность преобразователей ограничивается только их разрядностью. Поэтому для представления сигнала иногда используется большее количество разрядов, чем это требуется для обеспечения заданного уровня точности.
- Интегрирование входного напряжения обеспечивает подавление высокочастотных помех и усреднение всех выбросов сигнала в течение заданного интервала T.
- Пропускная способность АЦП двойного интегрирования ограничивается величиной, равной $1/2T$ преобразований в секунду.

Иногда для уменьшения погрешностей, вносимых аналоговой частью схемы (интегратором и компаратором), вводят еще одну стадию преобразований, во время которой конденсатор заряжается сигналом дрейфа нуля. Для компенсации этого явления полученное при этом значение напряжения вычитается при интегрировании входного сигнала. Существует еще один способ уменьшения статической погрешности, заключающийся в запоминании результатов счета, полученных на стадии заряда конденсатора сигналом дрейфа нуля, с последующим их вычитанием цифровыми методами.

АЦП двойного интегрирования часто дополняются аналоговыми компонентами (ОУ, ключами, резисторами и конденсаторами) и микроконтроллером, управляющим тактирующим устройством, логическим блоком и счетчиком. Иногда аналоговая часть такого АЦП выполняется в виде отдельной ИС. Примером этого может служить модуль TS500 фирмы Texas Instruments.

5.4.4. АЦП последовательного приближения

АЦП такого типа обладают высоким быстродействием (их пропускная способность может составлять до 1 МГц) и хорошей разрешающей способностью (до 16 разрядов). Они выпускаются в виде ИС и широко используются со многими типами датчиков. Их время преобразования постоянно и не зависит от входного сигнала. Все преобразования уникальны, поскольку внутренние логические схемы и регистры обнуляются после каждого из них, что делает АЦП последовательного приближения пригодными для многоканального мультиплексирования. АЦП, показанный на рис. 5.29А, состоит из прецизионного компаратора напряжений; модуля, включающего в себя сдвиговые регистры и логический блок управления; и цифроаналогового преобразователя (ЦАП), выполняющего роль цепи ОС, связывающей цифровые выходы со входом аналогового компаратора.

Метод преобразования заключается в сравнении неизвестного входного напряжения V_{in} с прецизионным напряжением V_a или током, генерируемым ЦАП. Этот метод похож на процесс взвешивания при помощи набора из n эталонных гирь, соответственно равных 1/2 кг, 1/4 кг, 1/8 кг, 1/16 кг и т.д. (Общий вес всех гирь при этом составляет 1 кг).

Перед началом цикла преобразования все регистры очищаются, а на выходе компаратора устанавливается ВЫСОКИЙ уровень напряжения. На входах ЦАП задается код, равный СЗР (1/2 максимального значения). При этом на выходах ЦАП формируется, соответствующее этому коду аналоговое напряжение V_a, равное половине максимального входного сигнала. Если при этом входное напряжение больше напряжения ЦАП, уровень на выходе компаратора остается ВЫСОКИМ, и в соответствующем разряде регистра формируется

значение, равное «1». После этого к СЗР добавляется следующий по значимости разряд (2/8 = 1/4 максимального значения). Если и в этом случае входной сигнал остается больше напряжения ЦАП, к ним добавляется следующий бит и т.д. Так происходит до тех пор, пока входной сигнал не станет меньше напряжения ЦАП. В рассматриваемом примере это произошло на втором шаге. При этом выходной сигнал компаратора сразу же переключается на НИЗКИЙ уровень, а в соответствующем разряде регистра устанавливается значение «0». После чего подключается очередной (третий) разряд. Процесс такого сравнения продолжается до тех пор, пока не будет использован последний МЗР. После чего на линии состояния выставляется «1», информирующая об окончании цикла преобразования, и данные могут быть считаны из регистра. Код, сформированный в выходном регистре, соответствует цифровому представлению входного сигнала.

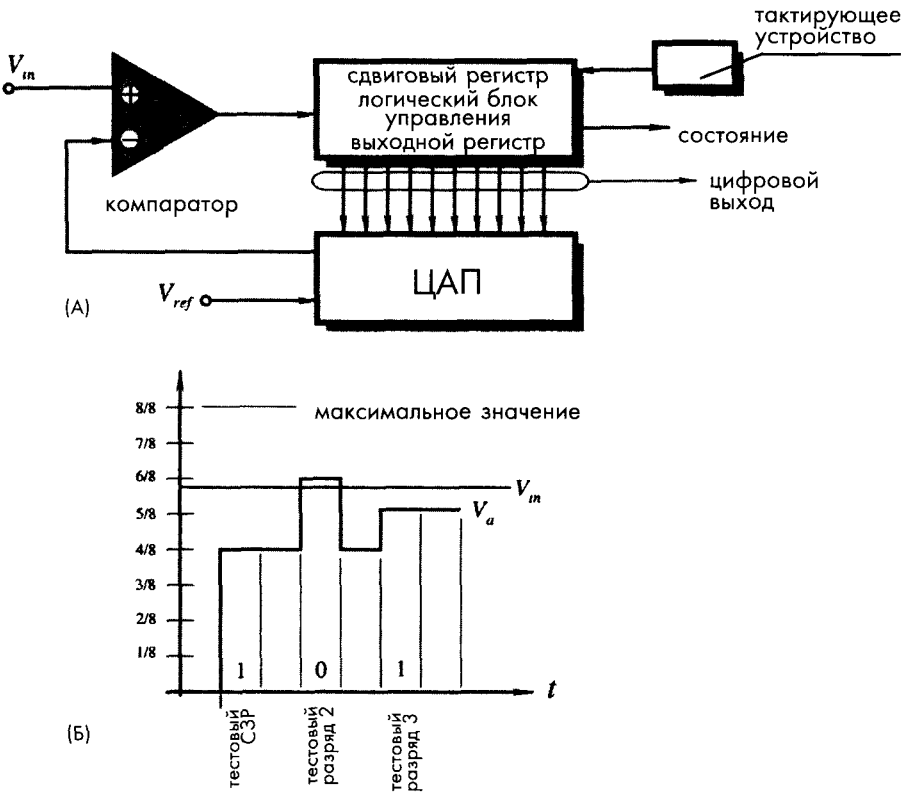


Рис. 5.29. АЦП последовательного приближения: А – блок-схема, Б – временная диаграмма, поясняющая процесс 3-х разрядного взвешивания

Для получения достоверных данных входной сигнал не должен меняться в течение всего цикла преобразований. Невыполнение этого условия может привести к возникновению ошибок. Для обеспечения постоянства входного напряжения в состав АЦП последовательного приближения, как правило, входит схема выборки и хранения, являющаяся аналоговым устройством, запоминающим входной сигнал в начале цикла и хранящим это значение до окончания всех преобразований .

5.4.5. Улучшение разрешающей способности систем сбора данных

В типовой системе сбора данных в состав ИС микроконтроллера часто входит АЦП, разрешающая способность которого ограничивается, как правило, 8-мью, редко 10-тью разрядами. При более высоком разрешении, когда число разрядов достигает 12 и даже 14, либо стоимость устройства становится несоразмеримо большой, либо характеристики встроенного АЦП не удовлетворяют требованиям системы. На практике для большинства задач 8-10 разрядов бывает достаточно для корректного преобразования внешних воздействий. Существуют два метода улучшения разрешающей способности системы: использование АЦП двойного интегрирования, чья разрешающая способность ограничивается только скоростью счета и быстродействием компаратора (не следует путать разрешение с точностью), и применение АЦП (например, последовательного приближения) совместно с устройством расширения разрешающей способности, дающего возможность повысить разрешение на несколько разрядов (например, с 8 до 12). На рис. 5.30 показана принципиальная схема такого устройства. В дополнение к обычному 8-ми разрядному АЦП в ее состав включены ЦАП, вычитающее устройство и усилитель с коэффициентом усиления A. В специализированных ИС или схемах из дискретных компонентов ЦАП может входить в состав АЦП (см. рис. 5.29А).

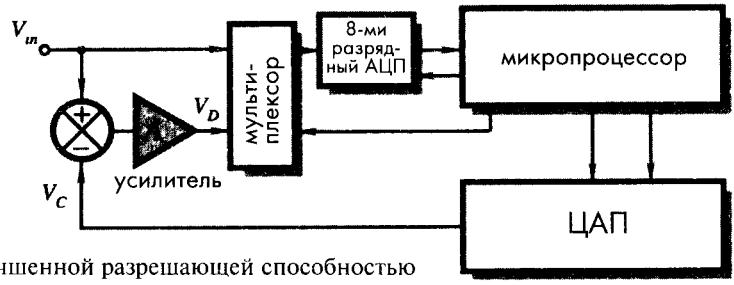


Рис. 5.30. Схема с улучшенной разрешающей способностью

При максимальном уровне входного сигнала V_{in}, равном E, исходная разрешающая способность 8-ми разрядного преобразователя выражаемая в вольт/разряд, равна:

$$R_0 = \frac{E}{2^8 - 1} = \frac{E}{255}, \tag{5.35}$$

Например, при $E = 5$ В, разрешение 8-ми разрядного АЦП будет равно 19.6 мВ/разряд. В исходном состоянии мультиплексор подсоединяет ко входу АЦП входное напряжение. При этом выходной сигнал АЦП в цифровом виде равен M. Микропроцессор передает это значение на вход ЦАП, с выхода которого снимается аналоговое напряжение V_c, приблизительно равное входному сигналу. На вычитающем устройстве определяется разность напряжений V_{in} и V_c, которая затем усиливается ОУ до значения:

$$V_D = (V_{in} - V_c)A. \tag{5.36}$$

Напряжение V_D представляет собой усиленное рассогласование между действительным значением входного сигнала и его цифровым представлением. При максимальном уровне входного сигнала получается наибольшее значение ошибки $(V_{in} - V_c)$, равное разрешающей способности АЦП. При 8-ми разрядном преобразовании величина V_D равна $19.6A$ мВ. После этого мультиплексор подает напряжение V_D на АЦП, преобразующий его в цифровое значение C:

$$C = \frac{V_D}{R_0} = (V_{in} - V_c)\frac{A}{R_0}. \tag{5.37}$$

В результате микропроцессор получает два цифровых кода, соответствующих значения M и C, где C соответствует дополнительным разрядам, обеспечивающим более высокое разрешение. При $A = 255$, $E = 5$В, МЗР будет приблизительно равен 77 мкВ, разрешению 16-ти разрядного АЦП. На практике получить такое высокое разрешение, как правило, не удается, что связано с внутренними погрешностями ЦАП, дрейфом усилителя, шумами и т.д. Однако этот метод дает возможность реально повысить разрешение до 10 или 12 разрядов.

5.5. Прямая дискретизация и обработка сигналов

Выходные сигналы датчиков, как правило, очень малы. Для приведения таких сигналов до уровня, совместимого с устройствами сбора данных, обычно применяются усилители. К сожалению, усилители и подводящие кабели, часто приводят к появлению дополнительных погрешностей, увеличению стоимости и сложности всей системы. Поэтому в настоящее время использование усилителей считается устаревшим способом согласования уровней сигналов (по крайней мере, для некоторых типов датчиков) [5]. Во многих современных промышленных интерфейсных системах применяются цифровые устройства передачи и преобразования данных, реализованных на основе методов прямой дискретизации выходных сигналов датчиков, особенно эффективных в случаях интеграции датчика и всей системы на одном кристалле.

Традиционные методы АЦ преобразований основаны на работе с достаточно высокими входными сигналами, что позволяет делать большую величину МЗР и минимизировать погрешности, вызванные шумами и сигналами смещения. По этой причине минимальный уровень МЗР обычно выбирается равным не менее 100-200 мкВ, что делает невозможным прямое подключение многих датчиков (например, термопарных и пьезорезистивных струнных датчиков). Выходные сигналы таких датчиков часто не превышают нескольких милливольт, что означает, что МЗР 10-ти разрядного АЦП при этом должен быть порядка 1 мкВ.

При прямой дискретизации выходных сигналов датчиков нет необходимости использовать усилители в интерфейсной схеме, что может привести к улучшению рабочих параметров систем без ухудшения точностных характеристик. Основная идея прямой дискретизации заключается во встраивании датчика в схему преобразователя сигнала (например, АЦП или преобразователя импеданса в частоту). Такие преобразователи по своей природе являются модуляторами и, следовательно, нелинейными устройствами. Как правило, в их состав входит нелинейное устрой-

ство, часто пороговый компаратор. Смещение порогового уровня компаратора приводит к модуляции выходного сигнала, что и используется для преобразования сигнала датчика в дискретный вид.

На рис. 5.31А показана схема простого модуляционного генератора, который состоит из интегратора, реализованного на основе ОУ, и порогового устройства. Напряжение на конденсаторе C равно интегралу тока, пропорционального напряжению на неинвертирующем входе ОУ. Когда это напряжение сравнивается с пороговым уровнем, ключ S_W закрывается, конденсатор полностью разряжается. После чего конденсатор снова начинает интегрировать ток до следующего замыкания ключа и т.д. Рабочая точка ОУ задается резистором R_2, фототранзистором S и опорным напряжением V_{ref}. Изменение потока света, падающего на базу транзистора, приводит к изменению его тока коллектора, что смещает рабочую точку. Подобную схему можно использовать для прямой дискретизации выходного сигнала резистивного датчика (например, термистора). Если в схему ввести цепи, компенсирующие напряжение и ток смещения ОУ, а также дрейф температуры и т.д., ее точность преобразований будет значительно улучшена.

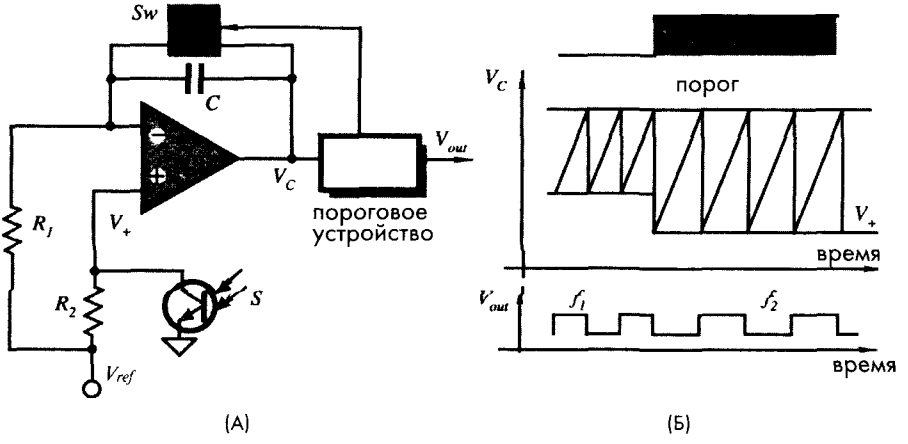


Рис. 5.31. А – схема генератора, модулируемого светом, Б – напряжение на выходе генератора

Емкостные датчики являются очень популярными измерительными устройствами. В настоящее время много типов емкостных датчиков изготавливают в интегральном исполнении методами микротехнологий. В состав емкостных датчиков давления входит тонкая кремниевая диафрагма, выполняющая роль подвижной пластины конденсатора с переменным зазором. На обратную сторону этой диафрагмы нанесен металлический электрод. Основной проблемой конденсаторов такого типа является относительно низкое значение емкости на единицу площади (пФ/мм^2), что приводит к увеличению размеров датчика. Обычно емкость таких датчиков при нулевом давлении составляет величину порядка нескольких пикофарад, поэтому при 8-ми разрядном разрешении датчик должен детектировать изменения емкости порядка 50 фФ и даже меньше (1 фФ = 10^{-15}Ф). Очевидно, что любые внешние измерительные

схемы работать с такими датчиками не могут, поскольку паразитная емкость соединительных проводов, как правило, составляет не менее 1 пФ, что сравнимо с емкостью самого датчика. Единственным выходом из данной ситуации является разработка интегрированного устройства на одном кристалле, составляющими частями которого являются сам датчик и интерфейсная схема. Для построения такого устройства можно применить метод с переключением конденсаторов, основанный на передаче заряда с одного конденсатора на другой при помощи твердотельных аналоговых переключателей.

На рис. 5.32 показана упрощенная схема преобразователя с переключением конденсаторов [6], в которой переменный конденсатор C_x и эталонный конденсатор C_r являются составными частями симметричного кремниевого датчика давления. Встроенные МОП-ключи (1-4) работают парами в противофазе и управляются тактовыми импульсами ϕ_1 и ϕ_2. При замыкании соответствующей пары ключей происходит заряд того или иного конденсатора сигналом от источника постоянного напряжения V_{PM}. Суммарный заряд в общей точке конденсаторов пропорционален разности $C_x - C_r$, и, следовательно, давлению, приложенному к датчику. Этот заряд поступает на вход преобразователя заряда в напряжение, состоящего из ОУ, интегрирующего конденсатора C_f и МОП ключа 5, используемого для разряда C_f. Выходной сигнал такого преобразователя представляет собой импульсный сигнал с переменной амплитудой (рис. 5.32Б), который может быть передан по линии передач и либо демодулирован для получения линейного сигнала, либо преобразован в цифровой код. Поскольку для построения интегратора используется ОУ с высоким коэффициентом усиления, величина его выходного напряжения не зависит ни от паразитной входной емкости C, ни от напряжения смещения, ни от температурного дрейфа. Минимальный детектируемый сигнал (уровень шума) определяется амплитудой шума и температурным дрейфом компонентов. Анализ схемы показал, что минимальная мощность шума соответствует в случаю, когда интегрирующий конденсатор C_f равен конденсатору частотной компенсации ОУ.

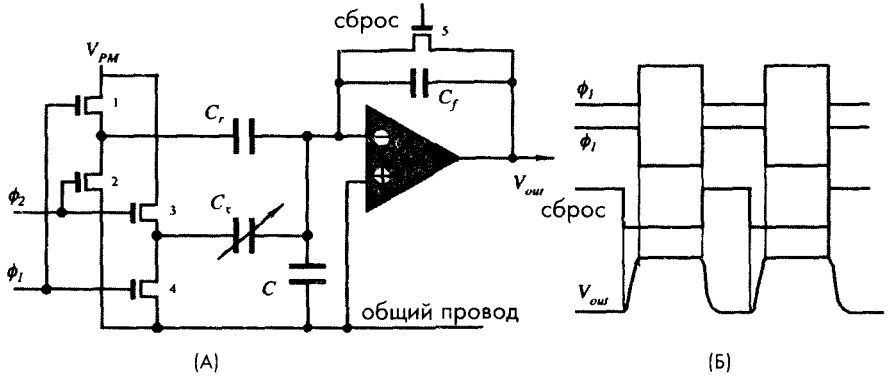


Рис. 5.32. Упрощенная схема дифференциального преобразователя емкости в напряжение (А) и его временные диаграммы (Б)

Во время переключения МОП ключа 5 происходит перенос некоторой части заряда через затвор транзистора сброса на инвертирующий вход ОУ [6]. Этот заряд распространяется через емкость между затвором и каналом МОП ключа 5. Утечка этого заряда приводит к появлению напряжения смещения на выходе ОУ, которое может быть скомпенсировано при помощи устройства гашения заряда [7], способного улучшить отношение сигнал/шум на два порядка от величины нескомпенсированого заряда. Температурный дрейф такой схемы может быть выражен как:

$$\frac{dV_{out}}{dT} = V_{PM}\frac{C_x - C_r}{C_f}(T_{Cr} - T_{Cf}), \qquad (5.38)$$

где T_{Cr} – номинальный температурный коэффициент C_x и C_r, а T_{Cf} – температурный коэффициент интегрирующего конденсатора C_f. В этом уравнении предполагается, что температурный дрейф в основном зависит от рассогласования емкостей в датчике. На рис. 5.33 показана типовая передаточная функция схемы для двух разных значений интегрирующего конденсатора C_f. Подобная схема была реализована по КМОП технологии на кремниевом кристалле размером 0.68×0.9 мм [8]. Она может работать с тактовой частотой в интервале 10...100 кГц.

Современная тенденция построения интерфейсных схем заключается в объединении на одном кремниевом кристалле усилителя, мультиплексора, АЦП, и других схем. Примером такого интегрированного устройства является ИС MAX 1463 (Maxim Integrated Products), в состав которой входит двухканальный 16-ти разрядный программируемый интерфейс, выполняющий функции усиления, калибровки, линеаризации сигнала и температурной компенсации. Эта ИС обеспечивает воспроизводимость рабочих характеристик датчика без применения внешних регулировочных компонентов. MAX 1463 может работать с разнообразными датчиками, включая датчики давления, терморезистивные и термопарные чувствительные элементы, тензодатчики, динамометры и резистивные элементы, применяемые в магнитных датчиках направления. У нее есть несколько выходных портов: аналоговых и цифровых. Выходными сигналами могут быть: напряжение, ток (4...20 мА), отношение сигналов и сигналы с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). В состав MAX 1463 также входят незадействованные ОУ, предназначенные для выполнения пользовательских функций, например, буферизации выходных сигналов ЦАП,

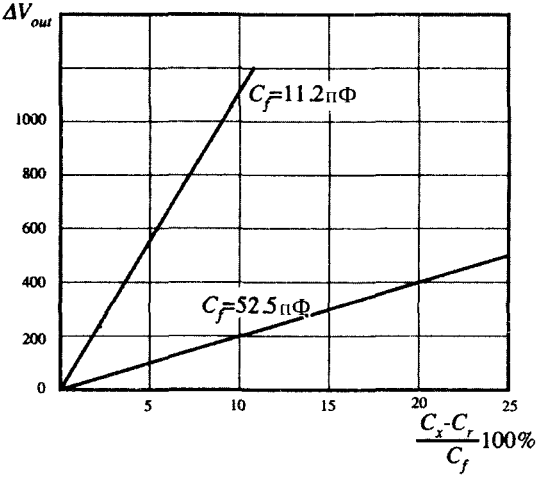


Рис. 5.33. Передаточная функция преобразователя емкости в напряжение при двух значенях интегрирующего конденсатора [6].

управления большими внешними нагрузками, дополнительного усиления и фильтрации сигналов. ИС MAX 1463 имеет внутренний 16-ти разрядный процессор с программируемой FLASH-памятью на 4 кбайта, 128 байт оперативной FLASH памяти, 16-ти разрядный АЦП и два 16-ти разрядных ЦАП. В дополнение к этому в нее входят два 12-ти разрядных цифровых порта для ШИМ сигналов, четыре ОУ и один встроенный датчик температуры. Микросхема смонтирована в стандартном SSOP корпусе с 28 выводами, что позволяет ее располагать в непосредственной близости от датчиков без каких-либо промежуточных кабелей и проводов.

5.6. Измерители отношений сигналов

Измерение отношений является хорошим способом улучшения точности датчика, поэтому он широко применяется при построении интерфейсных схем. Однако следует отметить, что этот метод работает, только когда источники погрешностей имеют *мультипликативную,* а не аддитивную природу. Это означает, что этот способ, например, не может помочь снизить тепловой шум, но он очень полезен для уменьшения влияния на чувствительность датчиков таких факторов, как нестабильность источников питания, окружающая температура, влажность, давление, старение и т.д. Метод измерения отношений требует использования в системе двух датчиков, один из которых является активным, т.е. измеряющим внешнее воздействие, другой – компенсационным, который либо экранируется от измеряемых сигналов, либо не реагирует на них. Остальные внешние факторы воздействуют на оба датчика одинаково, поэтому их рабочие характеристики также меняются одинаково. На вход второго датчика, часто называемого *эталонным*, подается известный сигнал, обладающий долговременной стабильностью и постоянством. Эталонный и активный датчики не обязательно должны иметь одинаковую природу, но требуется, чтобы они одинаково реагировали на дестабилизирующие факторы. На рис. 5.34А показан простой температурный детектор, в котором роль активного датчика выполняет термистор R_T с отрицательным температурным коэффициентом. Значение эталонного резистора R_0 равно сопротивлению термистора при некоторой заданной температуре (например, 25°С). Оба резистора подключаются к ОУ через аналоговый мультиплексор. Глубина ОС ОУ определяется резистором R. Сигналы на выходе ОУ при подсоединении термистора и эталонного резистора определяются следующими соотношениями:

$$V_N = -\frac{ER}{R_T},$$
$$V_D = -\frac{ER}{R_0}. \qquad (5.39)$$

Из выражений видно, что оба напряжения зависят от напряжения питания E и коэффициента усиления схемы. Источниками погрешностей здесь могут быть как резистор R, так и напряжение питания E. Если оба напряжения подать на схему делителя, его выходной сигнал можно представить в виде: $V_0 = kV_N / V_D = kR_0 / R_T$, где

κ – коэффициент усиления делителя. Отсюда видно, что на выходной сигнал делителя не оказывает влияния ни напряжение источника питания, ни коэффициент усиления ОУ. Он только зависит от отношения сопротивлений датчика и эталонного резистора. Правда, это утверждение справедливо только тогда, когда напряжение питания и коэффициент усиления ОУ остаются практически неизменными в период мультиплексирования. Отсюда и определяется предельное значение частоты мультиплексирования.

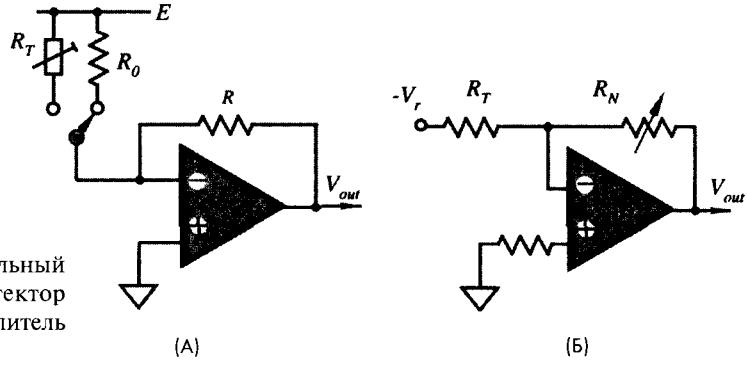


Рис. 5.34. Относительный температурный детектор (А) и аналоговый делитель сопротивлений (Б)

В состав измерителя отношений всегда входит делитель, который может быть цифровым, и аналоговым. В случае цифрового делителя выходные сигналы обоих датчиков мультиплексируются и конвертируются в двоичные коды при помощи АЦП, после чего передаются в компьютер или микропроцессор, где и выполняется сама операция деления. Аналоговый делитель часто является составной частью интерфейсной схемы. Выходной сигнал аналогового делителя (напряжение или ток), показанного на рис. 5.35А, пропорционален отношению двух входных напряжений (V_D и V_N) или токов:

$$V_0 = k\frac{V_N}{V_D}. \qquad (5.40)$$

При равенстве входных напряжений, коэффициент κ равен выходному напряжению. Рабочие диапазоны переменных (рабочие квадранты) определяются полярностью и пределами изменений входных напряжений. Например, когда V_D и V_N оба являются либо положительными, либо отрицательными, рабочим квадрантом является первый. А в случае, когда V_N является биполярным, делитель относится двухквадрантному типу. На напряжение V_D обычно наложено ограничение: оно должно быть униполярным. Поскольку при переходе от одной полярности к другой происходит пересечение нулевой точки, в которой выходной сигнал становится бесконечным (если только числитель в этот момент также не равен нулю). На практике V_D является сигналом эталонного датчика, обычно имеющего постоянное значение.

Деление всегда была самой сложной операцией для реализации в аналоговых схемах. Эта сложность исходит из самой природы деления: при приближении

знаменателя к нулю, числитель резко возрастает. Поэтому идеальный делитель должен иметь фактически бесконечный коэффициент усиления и бесконечный динамический диапазон. На практике оба эти фактора ограничены величиной дрейфа и шума при низких значениях V_D; это значит, что коэффициент усиления делителя для числителя связан со значением знаменателя обратной зависимостью (рис. 5.35Б). Таким образом, на величину суммарной погрешности оказывают влияние несколько факторов, такие как зависимость коэффициента усиления от величины знаменателя, входные погрешности (смещение, дрейф и шумы, которые должны быть намного меньше минимальных значений входных сигналов) и т.д. В дополнение к этому, выходной сигнал усилителя должен оставаться постоянным при постоянном соотношении входных сигналов, вне зависимости от их значений; например, 10/10=0.01/0.01=1 и 1/10=0.001/0.01=0.1

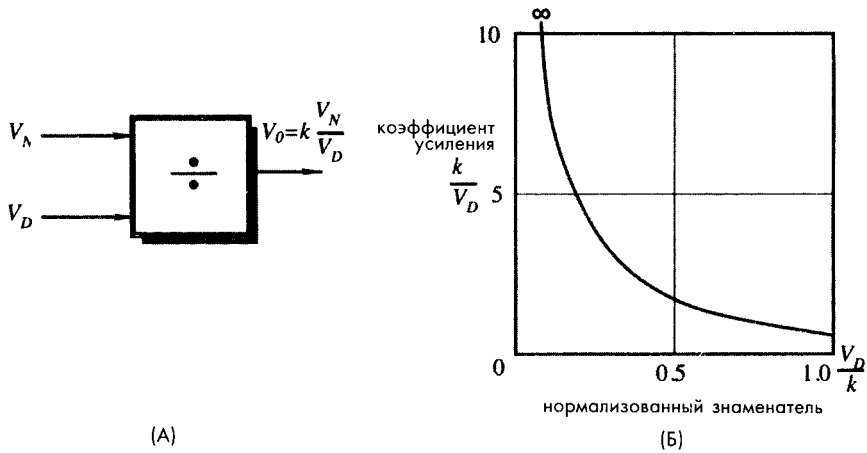


Рис. 5.35. Схематичное обозначение делителя (А) и зависимость коэффициента усиления делителя от величины знаменателя (Б)

5.7. Мостовые схемы

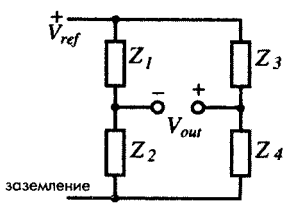


Рис. 5.36. Принципиальная схема моста Уитстона

Мостовая схема Уитстона является самой популярной схемой, используемой для измерения отношений. На рис. 5.36 показана принципиальная схема измерительного моста. Импедансы Z могут быть как активными, так и реактивными, т.е. они могут быть и обычными сопротивлениями, как в случае пьезорезистивных датчиков, и конденсаторами, и индукторами. Для резисторов импеданс всегда равен R, для идеального конденсатора $Z = 1/2\pi fC$, а для индуктора $Z = 2\pi fL$, где f – частота тока, протекающего через элемент. Выходное напряжение моста определяется следующим соотношением:

$$V_{out} = \left(\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \right) V_{ref}, \tag{5 41}$$

где V_{ref} – опорное напряжение

При выполнении следующего условия мост считается сбалансированным

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \tag{5 42}$$

Выходное напряжение сбалансированного моста равно нулю При изменении импеданса в любом плече моста, он выходит из состояния равновесия, и в зависимости от того увеличился или уменьшился этот импеданс, на выходе моста появляется либо положительное, либо отрицательное напряжение Для определения чувствительности выходного напряжения к изменению импеданса каждого плеча моста (калибровочные коэффициенты) надо найти соответствующие частные производные выражения (5 41)

$$\begin{aligned}
\frac{\partial V_{out}}{\partial Z_1} &= \frac{Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} V_{ref}, \\
\frac{\partial V_{out}}{\partial Z_2} &= -\frac{Z_1}{(Z_1 + Z_2)^2} V_{ref}, \\
\frac{\partial V_{out}}{\partial Z_3} &= -\frac{Z_4}{(Z_3 + Z_4)^2} V_{ref}, \\
\frac{\partial V_{out}}{\partial Z_4} &= \frac{Z_3}{(Z_3 + Z_4)^2} V_{ref}.
\end{aligned} \tag{5 43}$$

Суммируя эти уравнения, получим выражение для чувствительности моста

$$\frac{\delta V_{out}}{V_{ref}} = \frac{Z_2 \delta Z_1 - Z_1 \delta Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} - \frac{Z_4 \delta Z_3 - Z_3 \delta Z_4}{(Z_3 + Z_4)^2} \tag{5 44}$$

Внимательный анализ уравнения (5 44) показывает, что для компенсации, таких явлений, как температурная нестабильность, дрейф и т д , идентичными должны быть только импедансы соседних пар (т е Z_1 и Z_2, Z_3 и Z_4) Следует также отметить, что для уравновешивания моста необходимо только выполнение условия (5 42), импедансы при этом не обязаны быть равными На практике, как правило, перемен ным делается только один импеданс моста Этим импедансом часто является

датчик. Пусть Z_1 – импеданс датчика, тогда чувствительность моста определяется выражением:

$$\frac{\delta V_{out}}{V_{ref}} = \frac{\delta Z_1}{4Z_1}. \qquad (5.45)$$

Резистивные мостовые схемы часто используются при работе со струнными датчиками, пьезорезистивными преобразователями давления, термисторными термометрами и другими датчиками, где необходимо компенсировать влияние факторов окружающей среды. Подобные устройства также нашли свое применение при работе с емкостными и магнитными датчиками, измеряющими давление, перемещение, влажность и т.д.

5.7.1 Неуравновешенный мост

Схема Уитстона (рис. 5.37А) часто работает в режиме несбалансированного моста. При включении в одно из плечей такого моста датчика получим измерительную систему, основанную на принципе *рассогласования*. Этот принцип заключается в определении напряжения в диагонали моста. Выходное напряжение моста является нелинейной функцией разбаланса моста Δ. Для малых значений разбаланса (Δ<0.05), довольно часто встречающихся на практике, эту функцию можно считать квазилинейной. Максимальная чувствительность моста достигается, когда $R_1=R_2$, а $R_3=R$. Когда $R_1>>R_2$ или $R_1<<R_2$, выходное напряжение моста значительно уменьшается. Считая, что $\kappa = R_1/R_2$, можно записать следующее уравнение чувствительности моста:

$$\alpha = \frac{V}{R}\frac{k}{(k+1)^2}. \qquad (5.46)$$

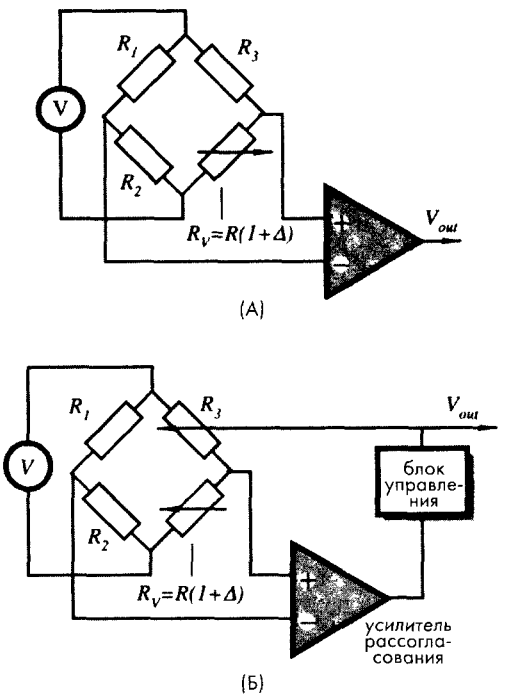


Рис. 5.37. Два способа использования мостовой схемы: А – неуравновешанный мост, Б – уравновешенный мост с управляемой ОС

На рис. 5.38 показана нормированная зависимость чувствительности моста от отношения импедансов, рассчитанная по этой формуле. Из графика видно, что максимальная чувствительность достигается при $\kappa = 1$, а в диапазоне $0.5<\kappa<2$ чувствительность падает относительно медленно. Если мост питается от источника тока, а не от источника напряжения, его выходное напряжение при малых значениях Δ в мосте с одним переменным импедансом определяется выражением:

$$V_{out} \approx I \frac{k\Delta}{2(k+1)}, \qquad (5.47)$$

где I – ток возбуждения.

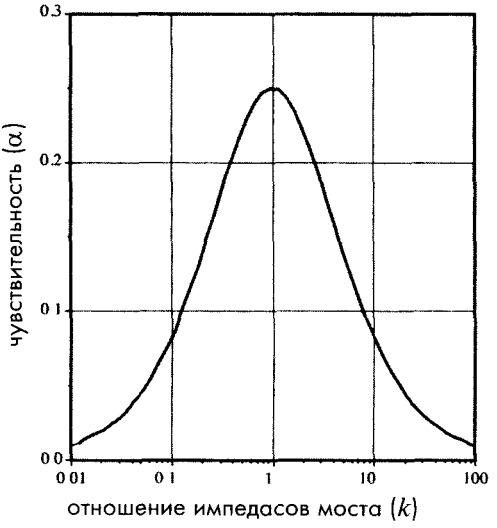


Рис. 5.38. Зависимость чувствительности разбалансированного моста от отношения импедансов

5.7.2. Уравновешенный мост

Другой метод использования мостовых схем называется *нуль-балансировкой*. В этом методе решается проблема, связанная с ограничениями, накладываемыми на величину рассогласования моста для достижения хорошей линейности. Для корректной работы в этом режиме мостовая схема в любой момент времени должна находится в уравновешенном состоянии. Для выполнения условия баланса моста (5.42) импеданс плеча моста, соседнего с плечом, в котором расположен датчик, должен меняться так же как и импеданс датчика. На рис. 5.37Б проиллюстрирован принцип построения такой схемы. Изменение величины сопротивления R_3 определяется сигналом усилителя рассогласования. Величина внешнего воздействия в данной системе пропорциональна выходному напряжению, задаваемому управляющим устройством. Пусть в схеме на рис. 5.37Б в обоих плечах стоят фоторезисторы R_v и R_3. Величина сопротивления фоторезистора R_3 может задаваться потоком излучений от СИД, управляемого усилителем рассогласования. При этом ток, протекающий через СИД, будет мерой сопротивления R_v, а, следовательно, и мерой интенсивности света, детектируемого датчиком.

5.7.3. Температурная компенсация резистивного моста

Резистивный мост Уитстона широко применяется при измерении температуры, силы, давления, магнитных полей и т.д. В большинстве случаев используемые резисторы обладают температурной чувствительностью. Это приводит к появлению температурной чувствительности передаточной функции, которая может быть аппроксимирована линейной зависимостью (см. уравнение (2.1) во второй главе). Для большинства датчиков, за исключением детекторов температуры, температурная зависимость является очень нежелательным эффектом, который необходимо компенсировать. Одним из способов компенсации является подключение к датчику устройства, выходной сигнал которого зависит от изменения температуры. Этот сигнал в дальнейшем используется для проведения либо аппаратной, либо программной корректировки показаний датчика. Другой способ – встраивание такого устройства в саму мостовую схему. Проанализируем связь между выходным напряжением моста Уитстона и сигналом возбуждения V_e. Будем считать,

что импедансы всех четырех плечеи моста обладают одинаковой чувствительностью α к внешнему воздействию Если сопротивление каждого резистора выразить в виде

$$R_i = R(1 \pm \alpha s), \tag{5 48}$$

где R – номинальное значение сопротивления и s – внешнее воздействие (т е давление, сила и т д), чувствительность можно определить как

$$\alpha = \frac{1}{R}\frac{dR}{ds} \tag{5 49}$$

Выходное напряжение моста соответствует выражению

$$V_{out} = V_e \alpha s + V_0, \tag{5 50}$$

где V_0 – напряжение смещения, соответствующее начальному разбалансу моста Если мост плохо сбалансирован, это напряжение может стать причиной возникновения значительных погрешностей Чтобы этого не происходило, датчик необходимо тщательно настраивать как при изготовлении, так и при эксплуатации В дальнейших рассуждениях будем считать, что значение V_0 не зависит от температуры, т е $dV_0/dT=0$ Однако в широких температурных диапазонах (больших ± 15°С) изменение величины V_0 необходимо учитывать

Для большинства датчиков величина чувствительности α в выражении (5 48) зависит от температуры, что также является источником погрешностей Из выражения (5 49) следует, что α может меняться при изменении от температуры либо величины R, либо производной dR/ds Если мост обладает положительным температурным коэффициентом сопротивления, его коэффициент α уменьшается с ростом температуры В этом случае также говорят, что он имеет отрицательную температурную чувствительность Взяв частную производную выходного напряжения по температуре в уравнении (5 50), получим следующее выражение

$$\frac{\partial V_{out}}{\partial T} = s\left(\alpha \frac{\partial V_e}{\partial T} + \frac{\partial \alpha}{\partial T} V_e\right) \tag{5 51}$$

Решение этого уравнения для случая, когда выходнои сигнал не зависит от температуры (т е $\partial V_{out}/\partial T=0$), имеет вид

$$\alpha \frac{\partial V_e}{\partial T} = -\frac{\partial \alpha}{\partial T} V_e \tag{5 52}$$

Откуда получается выражение

$$\frac{1}{V_e}\frac{\partial V_e}{\partial T} = -\frac{1}{\alpha}\frac{\partial \alpha}{\partial T} = -\beta, \tag{5 53}$$

где β – температурный коэффициент чувствительности (ТКЧ) плеча моста

Уравнение (5.53) является условием *идеальной* температурной компенсации симметричного моста Уитстона. Из этого выражения следует, что для компенсации температурных изменений α, напряжение возбуждения V_e должно меняться с такой же скоростью, но с противоположным знаком. Существует несколько схем, используемых для регулирования V_e [9]. Одна из них показана на рис. 5.39. В этой схеме используется блок компенсации температуры, управляющий напряжением V_e, питающим мост, по заранее определенной температурной зависимости. Блок температурной компенсации может быть реализован несколькими способами:

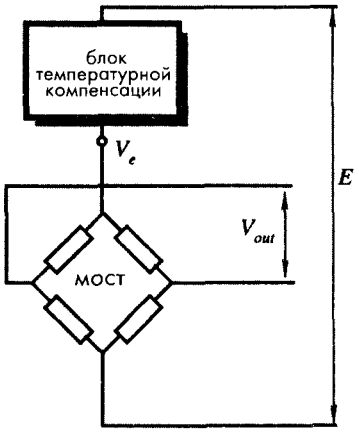


Рис. 5.39. Схема моста с цепью температурной компенсации

Способ 1. В состав блока входит датчик температуры. Такой блок может быть представлен через эквивалентный импеданс R_t, а мостовая схема – через эквивалентное сопротивление R_B. Тогда напряжение, поданное на мост, определяется выражением:

$$V_e = E\frac{R_B}{R_B + R_t}. \tag{5.54}$$

Взяв от этого выражения частную производную по температуре, получим:

$$\frac{\partial V_e}{\partial T} = E\left[\frac{1}{R_B + R_t}\frac{\partial R_B}{\partial T} - \frac{R_B}{(R_B + R_t)^2}\left(\frac{\partial R_B}{\partial T} + \frac{\partial R_t}{\partial T}\right)\right], \tag{5.55}$$

Подставив (5.54) в (5.55), выведем условие компенсации:

$$\frac{1}{V_e}\frac{\partial V_e}{\partial T} = \frac{1}{R_B}\frac{\partial R_B}{\partial T} - \frac{1}{R_B + R_t}\left(\frac{\partial R_B}{\partial T} + \frac{\partial R_t}{\partial T}\right). \tag{5.56}$$

Для моста с четырьмя температурно зависимыми импедансами плечей $R_B = R$, а $(1/R)(\partial R/\partial T) = \gamma$. Коэффициент γ называется температурным коэффициентом сопротивлений в плечах моста (ТКС). В соответствии с уравнением (5.53) выражение (5.56) должно быть равным отрицательному ТКЧ:

$$-\beta = \gamma - \frac{1}{R + R_t}\left(\frac{\partial R}{\partial T} + \frac{\partial R_t}{\partial T}\right). \tag{5.57}$$

Поскольку E не входит в это выражение, можно утверждать, что такой способ температурной компенсации работает в широком диапазоне напряжений возбуждения (при использовании этой схемы необходимо помнить, что в ней не должно быть активных компонентов (диодов, транзисторов и т.д)). Для обеспечения

компенсации температуры R_t должен входить температурно чувствительный резистор (например, термистор), сопротивление которого определяется из уравнения (5.57). В этом методе необходимо так настраивать блок компенсации температуры, чтобы он обеспечивал компенсацию не только ТКЧ и ТКС, но и V_e. Несмотря на некоторую сложность, этот метод обеспечивает температурную компенсацию в широком диапазоне температур: −20...+70°С, а при некотором снижении рабочих характеристик или усложнении компенсационного блока, этот диапазон расширяется до −40...100°С. На рис. 5.40А показан вариант блока компенсации температуры, реализованного на основе термистора R° с отрицательным температурным коэффициентом и нескольких регулировочных сопротивлений. Такой блок реализован в датчиках давления PMX2010 фирмы Motorola, в которых в кремниевую подложку встраиваются резисторы температурной компенсации. Настройка этих резисторов осуществляется при помощи лазера при проведении процедуры калибровки, что обеспечивает высокую температурную стабильность датчиков в широком диапазоне температур.

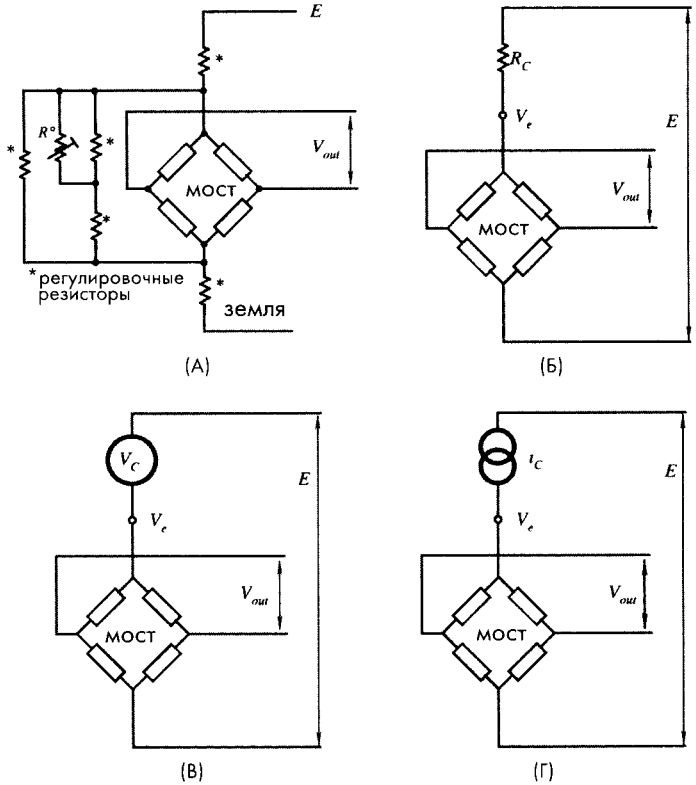


Рис. 5.40. Температурная компенсация мостовых схем: А – при помощи термистора с отрицательным температурным коэффициентом, Б – при помощи постоянного резистора, В – при помощи источника напряжения, управляемого температурой, Г – при помощи источника тока

Способ 2. Компенсационный блок состоит из постоянного сопротивления. Этот способ является самым распространенным методом температурной компенсации резистивного моста Уитстона. Постоянный резистор $R_t = R_c$ (рис. 5.40Б) должен обладать низкой температурной чувствительностью (менее 50×10^{-6}), тогда для него справедливо следующее утверждение:

$$\frac{1}{R_c}\frac{\partial R_c}{\partial T} = 0 \quad . \tag{5.58}$$

Тогда выражение (5.57) упрощается до вида:

$$-\beta = \frac{\partial R}{\partial T}\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R+R_c}\right). \tag{5.59}$$

Из уравнения (5.57) можно получить выражение для компенсационного резистора R_c:

$$R_c = -\frac{\beta R}{\partial R/\partial T + \beta R}. \tag{5.60}$$

или

$$R_c = -R\frac{\beta}{\gamma+\beta}. \tag{5.61}$$

Знак минус означает, что уравнение справедливо только для отрицательного ТКЧ β. Таким образом, когда известны ТКЧ, ТКС и номинальные сопротивления в плечах моста, можно найти такое значение резистора R_c, установленного последовательно с источником напряжения E, при котором получается удовлетворительная температурная компенсация схемы. Однако следует отметить, что в соответствии с уравнением 5.59, ТКЧ моста должна быть меньше его ТКС ($|\beta|< \gamma$). Поскольку E не входит в выражение (5.61) (также как и в первом методе), компенсация таким способом возможна в широком диапазоне напряжений питания. При использовании выражения (5.61) при выборе R_c может получиться очень большое значение компенсирующего резистора, что не подходит для многих применений. Для снижения ТКС датчика иногда используют дополнительный резистор, включенный параллельно мосту. При большом значении резистора R_c этот способ компенсации становится подобным четвертому методу, поскольку большой резистор ведет себя как квази-источник тока.

На первый взгляд такой способ температурной компенсации кажется очень привлекательным – только один резистор позволяет компенсировать температурный дрейф. Однако этот метод не подходит для прецизионных датчиков и при работе в широком температурном диапазоне. Для точного выбора R_c необходимо знать конкретные значения γ и β конкретных мостов. Определение этих параметров значительно повышает стоимость схемы, что также неприемлемо в ряде случаев. Поэтому R_c выбирают исходя из типовых, а не реальных значений, что может значительно увеличить погрешность

(до 10^{-4}/°C) В дополнение к этому большие резисторы R_c снижают выходное напряжение и уменьшают отношение сигнал/шум На практике такие компенсирующие схемы используются только в диапазоне температур 25±15°C

Способ 3 Здесь блок температурной компенсации состоит из температурно-чувствительного источника напряжения, (например, это может быть диод или транзистор) (Рис 5 40В) В этой схеме для получения наилучшей компенсации ТКЧ β, температурная чувствительность β_c источника напряжения V_c должна определяться следующим выражением

$$\beta_c = \beta\left(\frac{E}{V_c} - 1\right) \tag{5 62}$$

Поскольку β является параметром моста, подбирая E и V_c, можно добиться оптимальной температурной компенсации Но так как в состав компенсационного устройства входит источник напряжения, для выполнения условий компенсации здесь, в отличие от первых двух методов, необходимо учитывать и значение E Очевидным достоинством этой схемы является простота, т к здесь используются диоды и транзисторы с хорошо изученными температурными характеристиками, которые можно найти в соответствующих справочниках Недостаток метода – необходимость работы при заданном напряжении Такая температурная компенсация используется в диапазоне 25±25°C

Способ 4 (рис 5 40Г) В этой схеме в качестве схемы возбуждения используется источник тока Для возможности применения данной схемы мост должен обладать следующих свойством его ТКС (β) должен быть равен ТКЧ (α), но с противоположным знаком

$$\alpha = -\beta \tag{5 63}$$

Напряжение, приложенное к мосту, определяется выражением

$$V_e = I_c R_B \tag{5 64}$$

Если источник тока является температурно зависимым, а для моста с четырьмя идентичными плечами справедливо, что R_B=R, тогда

$$\frac{\partial V_e}{\partial T} = I_c \frac{\partial R}{\partial T} \tag{5 65}$$

Разделив (5 65) на (5 64) получим

$$\frac{1}{V_c}\frac{\partial V_e}{\partial T} = \frac{1}{R}\frac{\partial R}{\partial T} \tag{5 66}$$

При условии выполнения условия (5 63) осуществляется идеальная температурная компенсация, определяемая выражением (5 52) К сожалению, этот метод компенсации имеет такие же недостатки как и второй способ – снижение выходного напряжения и необходимость использования индивидуальных характеристик конкретных

датчиков в широком температурном диапазоне. Тем не менее этот способ хорошо работает в случаях, когда приемлема точность порядка 1-2% от полной шкалы измерений в температурном диапазоне более 50°С.

Из всего вышесказанного видно, что каждый метод температурной компенсации имеет свои границы применения, и в каждом конкретном случае необходимо учитывать ряд факторов: температурный диапазон, допустимую температурную погрешность, окружающие условия, размеры, стоимость и т.д. К сожалению, универсального решения этой проблемы не существует, выбор способа температурной компенсации – это всегда компромисс между различными техническими ограничениями.

5.7.4 Мостовые усилители

Мостовые усилители резистивных датчиков являются одной из самых распространенных интерфейсных схем. Они могут быть нескольких конфигураций. Выбор конфигурации зависит от требуемого способа заземления и от типа используемого источника эталонного напряжения (заземленного или плавающего). На рис. 5.41А показан так называемый активный мост, в котором переменный резистор (датчик), включенный в цепь ОС ОУ, является плавающим (т.е. изолированным от земли). Если резистивный датчик описать функцией первого порядка:

$$R_x \approx R_0(1+\alpha), \tag{5.67}$$

выражение для передаточной функции всей цепи будет иметь вид:

$$V_{out} = -\frac{1}{2}\alpha V. \tag{5.68}$$

На рис. 5.41Б показана схема с плавающим мостом и плавающим источником эталонного напряжения V. В этой схеме коэффициент усиления определяется резистором в цепи ОС, равным nR_0:

$$V_{out} = (1+n)\alpha\frac{V}{4}\frac{1}{1+\alpha/2} \approx (1+n)\alpha\frac{V}{4}. \tag{5.69}$$

На рис. 5.41В показана схема с несимметричными резисторами ($R \neq R_0$). В этой схеме используется плавающий источник эталонного напряжения V. Передаточная функция здесь определяется выражением:

$$V_{out} = n\alpha\frac{V}{4}\frac{1}{1+\alpha/2} \approx n\alpha\frac{V}{4}. \tag{5.70}$$

При использовании заземленного резистивного датчика часто применяется схема, показанная на рис. 5.41Г. Выражение для передаточной функции имеет вид:

$$V_{out} = -\frac{n}{2}\frac{V}{1+1/2n}\frac{\alpha}{1+\alpha} \approx -\frac{n}{2}\frac{V}{1+1/2n}\alpha. \tag{5.71}$$

При точной балансировке моста выходное напряжение V_{out} равно половине напряжения возбуждения моста $+V$. Для более эффективной работы ОУ значение n не должно превышать 50.

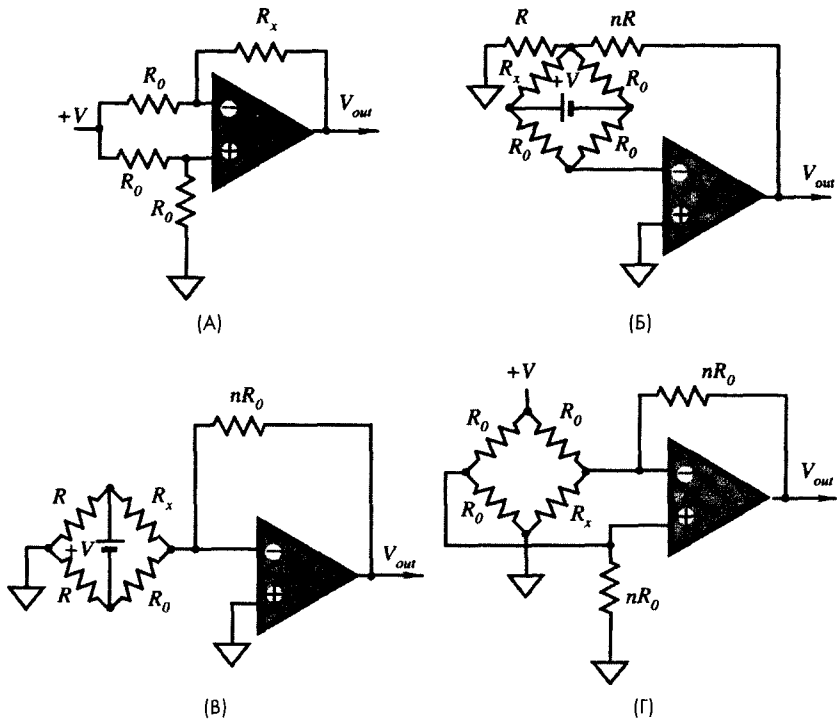


Рис. 5.41. Подключение ОУ к резистивному мосту.

5.8. Передача данных

Сигнал от датчика может передаваться в устройство обработки данных либо в цифровом, либо в аналоговом виде. На практике чаще используется цифровая передача данных. Для выполнения этого желательно датчик совмещать с АЦП. Передача данных в цифровом коде имеет ряд достоинств, самым главным из них является высокая помехозащищенность. Однако в этой книге методы передачи цифровой информации рассматриваться не будут. Здесь будут описаны способы передачи аналоговых сигналов, используемые тогда, когда цифровые методы применяться не могут. В зависимости от типа соединений они могут быть разделены на двух-, четырех- и шестипроводные способы передачи.

5.8.1. Двухпроводная передача

Двухпроводные аналоговые передатчики используются для сопряжения датчиков с управляющими и регистрирующими устройствами в промышленных системах уп-

равления технологическими процессами [10]. Например, при измерении температуры в какой-либо точке системы двухпроводной передатчик доставляет полученные данные либо на управляющий контроллер, либо в пультовую комнату, где происходит наблюдение за. процессом. По двухпроводной линии можно передавать как напряжение, так и ток. Однако в качестве промышленного стандарта выбран ток, изменяющийся в пределах 4...20 мА, который позволяет отображать весь диапазон внешних сигналов: 4 мА соответствует нулевому внешнему сигналу, 20 мА – максимальному Рис. 5.42 иллюстрирует преимущества использования тока, а не напряжения. В схеме связь между датчиком и контроллером осуществляется при помощи двух проводов. Для этого на выход датчика подключается так называемый *двухпроводной передатчик*, в роли которого может выступать преобразователь напряжения в ток, конвертирующий сигнал датчика в ток. А со стороны контроллера подсоединяется источник напряжения, обеспечивающий передачу тока до 20 мА. Таким образом формируется токовая петля, состоящая из датчика, передатчика, источника питания и сопротивления нагрузки, включенного последовательно с ним. При изменении сигнала датчика меняется и выходное сопротивление передатчика, что приводит к модуляции тока в диапазоне 4...20 мА. Тот же самый ток, несущий информацию, используется для питания передатчика и датчика. Поскольку минимальный ток в цепи равен 4 мА, его хватает для поддержания работы этих устройств. Ток, текущий в контуре, приводит к падению напряжения на сопротивлении нагрузки, расположенном со стороны контроллера Это падение напряжения и является информационным сигналом, используемым для дальнейшей обработки. Достоинство двухпроводной передачи – независимость величины тока от сопротивления соединительных проводов, а, следовательно, и от длины линии передач (очевидно, что это утверждение справедливо только в определенных пределах)

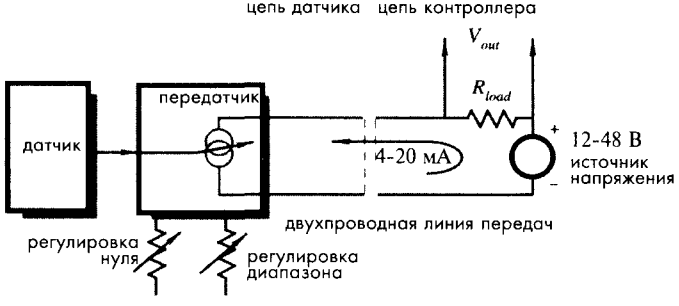


Рис. 5.42 Двухпроводной способ передачи аналоговых данных

5.8.2. Четырехпроводной способ подключения датчика

На практике часто бывают ситуации, когда резистивный датчик необходимо подключать к удаленной интерфейсной схеме. Если при этом датчик обладает относительно низким сопротивлением (например, сопротивление пьезорезисторов и резистивных датчиков температуры обычно составляет порядка 100 Ом), сопротивление соединительных проводов может привести к серьезным проблемам,

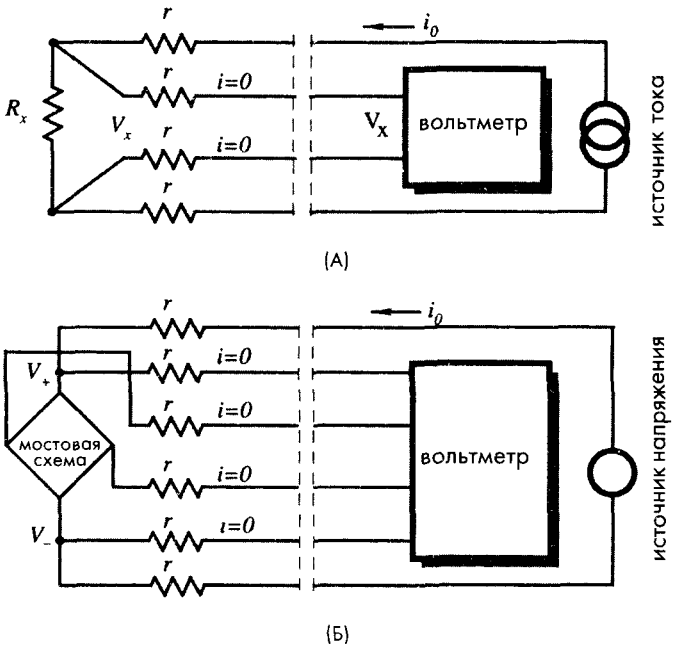


Рис. 5.43. Дистанционное измерение сопротивлений: А-четырехпроводной метод, Б – шестипроводный метод, применяемый с мостовыми схемами

поскольку оно влияет на напряжение возбуждения, поданное на мостовую схему. Эту проблему можно решить, применяя так называемый *четырехпроводный метод подключения* (рис. 5.43А), который позволяет измерять сопротивление удаленного резистора без учета сопротивления соединительных проводов. Как видно из рисунка, измеряемое сопротивление подключается к интерфейсной схеме при помощи четырех проводов (а не двух, как в предыдущей схеме). Два провода подсоединяются к источнику тока, а два оставшихся провода – к вольтметру. Источник постоянного тока имеет очень высокое выходное сопротивление, поэтому ток в цепи практически не зависит от сопротивлений r в контуре. Вольтметр имеет очень высокий входной импеданс, поэтому ток из токового контура к нему не течет. Падение напряжения на резисторе R_x равно:

$$V_x = R_x i_0 . \qquad (5.72)$$

Как видно из выражения, оно не зависит от сопротивления r соединительных проводов. Четырехпроводный метод передачи данных является удобным средством измерения сопротивления удаленных датчиков, часто используемым в промышленных АСУТП и научных исследованиях

5.8.3. Шестипроводный способ подключения мостовой схемы

При удаленном подключении моста Уитстона для поддержания температурной стабильности необходимо следить за напряжением возбуждения, питающего его (см. раздел 5.7). Длинные соединительные провода могут внести слишком большое последовательное сопротивление в цепь возбуждения, что скажется на работе

компенсационных схем Эту проблему можно решить при помощи двух дополнительных проводов, питающих мостовую схему напряжением, и двух выделенных проводов для измерения напряжения в диагонали моста (рис 5 43Б) Вольтметр, имеющий высокий входной импеданс и незначительный входной ток, служит для измерения действующего напряжения возбуждения, поданного на мост, и дифференциального выходного напряжения моста При таком способе подключения исключается влияние сопротивления соединительных проводов

5.9. Шумы в датчиках и интерфейсных схемах

Шумы в датчиках и интерфейсных схемах могут быть источниками серьезных погрешностей, что необходимо учитывать при разработке схем «Шумы подобны болезням их можно только предотвратить, подавить или смириться с ними, в зависимости от их природы, серьезности, сложности и стоимости лечения, но от них никогда не удается полностью избавиться» [11] По отношению к каждой конкретной схеме можно выделить две основные группы шумов *собственные шумы* (к ним относятся все шумы, возникающие внутри схемы) и *интерференционные помехи* (вносимые шумы), источники которых находятся за пределами схемы

Ни один датчик, независимо от того, насколько хорошо он был спроектирован, не вырабатывает на выходе сигнал, точно соответствующий внешнему воздействию Для того чтобы определить, насколько хорошо выходной сигнал датчика воспроизводит входной сигнал, пользуются критерием, основанным на требованиях по точности и надежности Отклонения сигнала датчика от истинного значения могут быть либо систематическими, либо стохастическими (случайными) Первый тип погрешностей зависит от вида передаточной функции датчика, его линейности, динамических характеристик и т д Общим для всех типов систематических отклонении является то, что все они определяются конструкциями датчиков, производственными допусками, качеством материалов и калибровкой Все перечисленные характеристики в течение заданного интервала времени должны оставаться постоянными или меняться очень медленно Все они поддаются математическому описанию и могут быть определены экспериментально (см главу 2) В ряде случаев полученное значение систематической погрешности может приводиться в справочных данных и учитываться в дальнейших расчетах Стохастические погрешности наоборот носят случайный характер, являются в достаточной степени непредсказуемыми и могут меняться очень быстро Часто именно они называются *шумами*, что связано с их природой и статистическими свойствами Следует отметить, что понятие *шум* иногда ассоциируют только со звуковыми сигналами и аудио аппаратурой В данной книге это слово трактуется намного шире под шумом понимаются все помехи, привносимые либо внешними воздействиями и окружающими факторами, либо возникающие в компонентах датчика и схемы в диапазоне от нуля до максимальных рабочих частот

5.9.1 Собственные шумы

Сигнал датчика, преобразуемый в интерфейсной схеме, состоящей из усилителя и АЦП, в цифровой код, нельзя характеризовать только его амплитудой и спектральными параметрами, всегда необходимо оценивать его разрешающую способность

При увеличении числа разрядов, величина МЗР уменьшается. Например, МЗР 10-ти разрядной системы с 5-ти вольтовой шкалой измерения равен 5 мВ, а 16-ти разрядной системы – уже 77 мкВ. Отсюда видно, что если суммарные помехи превышают уровень, скажем 300 мкВ, нет никакого смысла использовать 16-ти разрядное АЦП. На самом деле, на практике, ситуация еще хуже. Поскольку большинство датчиков не могут вырабатывать сигналы, соответствующие 5-ти вольтовой шкале, на их выходах необходимо устанавливать усилители. Например, если максимальный выходной сигнал датчика равен 5 мВ, МЗР 16-ти разрядного преобразователя составляет 77 нВ. Такой маленький сигнал усиливать очень трудно. В случаях, когда требуется высокая разрешающая способность преобразований, необходимо учитывать все источники шума. В таких системах помехи могут вырабатываться ОУ и другими компонентами, используемыми в цепях ОС, смещения и т.д.

Входные токи и напряжения смещения могут дрейфовать. В цепях постоянного тока этот дрейф трудно отличить от низкоуровневых сигналов датчика. Сигналы смещения обычно меняются очень медленно (в пределах частотной полосы десятков и сотен герц), поэтому их дрейф часто называется сверхнизкочастотным шумом. Этот шум эквивалентен случайным (или прогнозируемым, связанным, например, с температурой) изменениям напряжения и тока смещения. Для того чтобы отделить низкочастотный шум от высокочастотного, в эквивалентную схему на рис. 5.3 включены два дополнительных генератора. Один из них является генератором *напряжения смещения* e_0, а другой – генератором *тока смещения* i_0. Причины возникновения этих помех объясняются физической природой резисторов и полупроводниковых элементов, используемых для построения схем. Существует несколько источников низкочастотных шумов, их суммарное влияние отображено через генераторы шума напряжения и тока.

Одна из причин возникновения шума лежит в дискретной природе электрического тока, поскольку ток – это движение заряженных частиц, каждая из которых переносит определенное количество заряда (например, заряд электрона равен 1.6×10^{-19} Кл). На атомном уровне поток заряженных частиц выглядит очень хаотичным, а движения носителей зарядов напоминают лопающиеся зерна кукурузы при приготовлении попкорна. Ассоциация с попкорном действительно очень хороша, поэтому этот шум иногда называют «попкорновым». Движение электронов может быть описано только при помощи статистических терминов. Оно зависит от температуры, и мощность шума, в свою очередь, также определяется температурой. В резисторах это тепловое движение электронов приводит к появлению теплового шума или шума Джонсона [12]. Среднеквадратичное значение напряжения шума, пропорционального мощности шума, можно определить из выражения:

$$\overline{e}_n^{\,2} = 4\,kTR\,\Delta f, \quad B^2, \tag{5.73}$$

где $\kappa = 1.38\times10^{-23}$Дж/К – постоянная Больцмана, T – температура в Кельвинах, R – сопротивление в Омах, а Δf – ширина полосы, в пределах которой проводились измерения, в Гц. В некоторых случаях плотность шума в резисторе при комнатной температуре оценивается по следующей упрощенной формуле:

$$\overline{e}_n \approx 1\,3\cdot 10^{-10}\sqrt{R}\,\sqrt{\Delta f},\ \text{В}$$

Например, если частотная полоса шума составляет 100 Гц, а сопротивление – 10 МОм, среднее напряжение шума приблизительно равно

$$\overline{e}_n \approx 1\,3\cdot 10^{-10}\sqrt{10^7}\,\sqrt{100} = 4.111\ 10^{-6}\text{В} \approx 4\text{мкВ}$$

Даже самый обыкновенный резистор является источником шума и ведет себя как постоянно работающий генератор электрических сигналов Чем меньше величина сопротивления резисторов, тем больший тепловой шум они производят И если при маленьких номиналах этим шумом можно и пренебречь, то при больших – его всегда необходимо учитывать Например, в пироэлектрическом детекторе используется резистор смещения с номиналом порядка 50 ГОм Если датчик работает при комнатной температуре в полосе частот шириной 100 Гц, можно ожидать, что среднее напряжение шума на этом резисторе будет очень большим – порядка 0 3 мВ Для того чтобы шум не превышал допустимых пределов, полоса частот интерфейсной схемы должна быть, как можно, более узкой Следует отметить, что напряжение шума пропорционально квадратному корню от ширины полосы частот Это означает, что при уменьшении полосы частот в 100 раз, напряжение шума снизится только в десять раз Величина шума Джонсона является практически постоянной в широкой полосе частот, поэтому его часто называют *белым шумом*, поскольку он напоминает белый свет, состоящий из всех частот видимого спектра

Возникновение другого типа шумов объясняется протеканием постоянного тока в полупроводниках Этот шум получил название *дробового шума*, поскольку его звук напоминает «удары потока пуль о мишень» Это название предложил Шотки, поэтому существует и другое название – шум Шотки Дробовой шум также является белым шумом Чем выше ток смещения, тем больше величина этого шума По этой причине полевые и КМОП полупроводниковые устройства обладают низким уровнем такого шума Для тока смещения 50 пА, он равен около 4 фА/$\sqrt{\text{Гц}}$, что является очень маленькой величиной, эквивалентной движению порядка 6000 электронов в секунду Дробовой шум можно оценить при помощи выражения

$$i_{ш} = 5\ 7\times 10^{-4}\sqrt{I\Delta f}\ , \qquad (5\ 74)$$

где I – ток через полупроводниковый переход в пА, а Δf – полоса частот в Гц

На низких частотах к этим шумам добавляются шумы, связанные с протеканием переменного тока (Рис 5 44) В обоих источниках шума и тока, и напряжения, спектральная плотность шума обратно пропорциональна частоте Поскольку наибольший шум соответствует самой низкой частоте, а самые низкие частоты видимого диапазона излучений находятся в красной области спектра, такой шум часто называют *розовым шумом* Этот вид шума характерен для всех проводящих материалов, и, следовательно, он также возникает и в резисторах На самых низких частотах практически невозможно отделить розовый шум от белого шума Этот шум также называют фликер-шумом или шумом мерцаний Розовый шум особенно ощутим на частотах ниже 100 Гц, где работает большинство датчиков, поэтому в этом частотном диапазоне он может стать основным источником

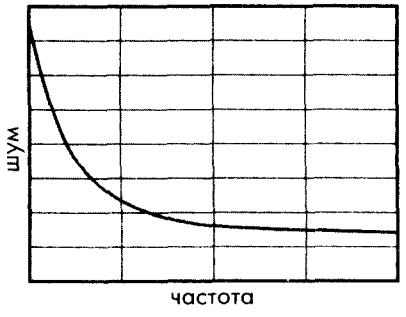


Рис. 5.44. Спектральное распределение розового шума

погрешностей, преобладая над шумами Джонсона и Шотки. Величина розового шума зависит от тока, протекающего через резистивный или полупроводниковый материал. В настоящее время прогресс в технологии производства полупроводниковых материалов позволил значительно снизить уровень фликер-шума, однако в случаях, когда требуется получить на низких частотах низкий уровень шума, в датчиках или входных цепях интерфейсных схем рекомендуется использовать пленочные или проволочные резисторы, особенно при протекании через них больших токов.

При наблюдении на экране осциллографа за выходным сигналом ОУ, являющимся основным устройством при построении интерфейсных схем, можно увидеть специфический шум, похожий на цифровой сигнал, переданный из космоса. Этот шум имеет форму прямоугольных импульсов переменной длительности порядка нескольких миллисекунд. Из-за характерного звука в громкоговорителе этот шум также получил название *попкорнового шума*. Этот шум объясняется дефектами, допущенными при производстве ИС. Но благодаря усовершенствованию технологий в современных полупроводниковых устройствах величина попкорнового шума значительно снижена.

Результирующий шум от всех источников тока и напряжений в схеме определяется суммой квадратов индивидуальный значений напряжений шума, т.е.

$$e = \sqrt{e^2_{n1} + e^2_{n2} + ... + (R_1 i_{n1})^2 + (R_1 i_{n2})^2 + ...} \qquad (5.75)$$

Величина случайной погрешности равна среднеквадратичному значению шума:

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T e^2 dt}, \qquad (5.76)$$

где T – время наблюдения, e – напряжение шума, а t – текущее время.

Шум также может быть описан в терминах пиковых значений, наблюдаемых в течение произвольного интервала времени. Положительные пиковые значения могут отличаться от отрицательных. В некоторых датчиках (например, пороговых детекторах) величина полного размаха шума влияет на рабочие характеристики самих устройств, поэтому в таких случаях определение этого значения бывает необходимым. Но на практике из-за распределения шума по закону Гаусса измерить размах шума бывает очень сложно. Поскольку среднеквадратичные значения шума получить гораздо проще, это представление получило большее распространение. В таблице 5.3 приведены полезные соотношения между двумя формами описания сигнала шума. Как правило, величина размаха шума превышает его среднеквадратичное значение от 2 до 8 раз, часто это определяется терпением наблюдателя и, соответственно, количеством имеющихся данных.

Таблица 5.3. Соотношение между полным размахом шума и его среднеквадратичным значением (с к з) (при распределении шума по закону Гаусса)

Номинальный размах напряжения шума	% времени, при котором шум превышает номинальный размах
2×с к з	32
3×с к з	13
4×с к з	4 6
5×с к з	1 2
6×с к з	0 27
7×с к з	0 046
8×с к з	0 006

5.9.2. Вносимый шум

Стабильность работы датчика и интерфейсной схемы зависит от их защищенности от шумов внешних источников. На рис. 5.45 показана схема распространения вносимых шумов Источники вносимых шумов часто поддаются идентификации. Примерами таких шумов являются всплески напряжения на линиях питания, молнии, изменения окружающей температуры, солнечная активность и т.д Такие помехи при попадании в датчики и интерфейсные схемы сказываются на их выходных сигналах. При этом они влияют либо на чувствительные элементы датчиков, либо на их выводы, либо на электронные компоненты в схеме. Очевидно, что для интерференционных сигналов датчик и интерфейсная схема играют роль принимающих устройств

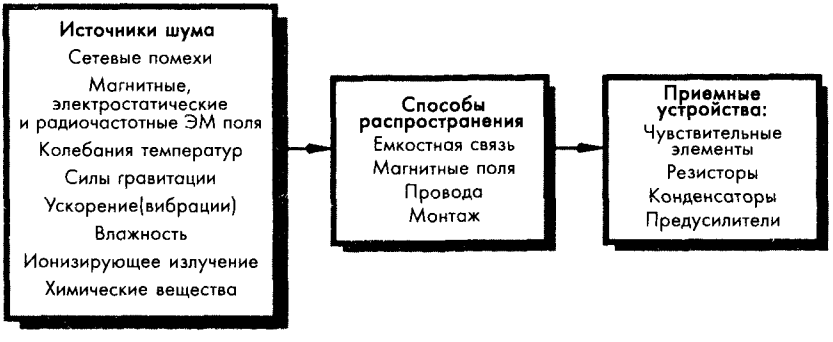


Рис. 5.45. Источники вносимых шумов и способы их распространения

Вносимые шумы можно классифицировать по нескольким критериям: по способу попадания в датчик или интерфейс, по типу влияния на выходной сигнал и т.д. По тому как вносимые шумы влияют на выходные сигналы, их можно разделить на *аддитивные* и *мультипликативные*.

Аддитивный шум e_n складывается с полезным сигналом V_s, формируя выходной сигнал V_{out}:

$$V_{out} = V_s + e_n. \tag{5.77}$$

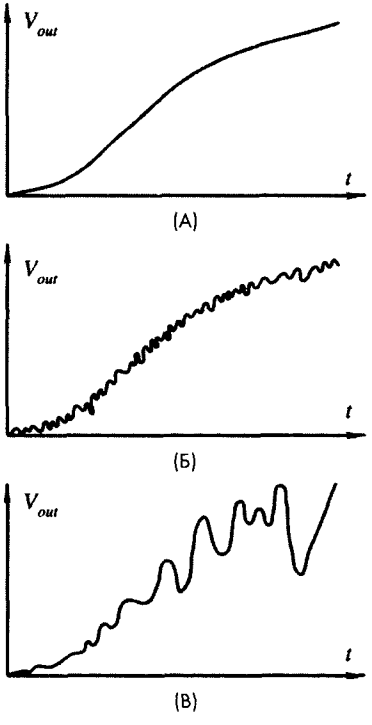


Рис. 5.46. Разновидности помех: А – полезный сигнал, Б – аддитивный шум, В – мультипликативный шум

На рис. 5.46Б показано влияние аддитивного шума на выходной сигнал. Из рисунка видно, что величина шума не меняется при изменении полезного сигнала. В линейных датчиках и интерфейсных схемах величина аддитивного шума абсолютно не зависит от величины сигнала, и если сигнал равен нулю, на выходе будет только шум.

Мультипликативный шум меняет передаточную функцию датчика или нелинейных компонентов таким образом, что полезный сигнал становится *модулированным* этим шумом:

$$V_{out} = [1 + N(t)]V_s, \tag{5.78}$$

где $N(t)$ является функцией шума. Пример влияния такого шума на полезный сигнал показан на рис. 5.46В. Когда полезный сигнал равен нулю, мультипликативная помеха на выходе устройства становится равной нулю. Мультипликативный шум растет одновременно с увеличением сигнала V_s. Как видно из названия, этот вид шума появляется в результате нелинейной операции умножения двух сигналов, одним из которых является полезный сигнал, а другим сигнал, определяемый шумом.

Для повышения помехозащищенности от вносимых аддитивных шумов датчики часто объединяются парами таким образом, что их выходные сигналы вычитаются один из другого (рис. 5.47). Такой способ называется *дифференциальным методом* построения датчиков. Один из датчиков, называемый *основным*, подвергается воздействию измеряемого сигнала, в то время как другой, эталонный датчик, защищается от его влияния.

Поскольку аддитивный шум характерен для линейных и квазилинейных датчиков и интерфейсных схем, на эталонный датчик не надо подавать никаких внешних сигналов, его входной сигнал чаще всего равен нулю. Предполагается, что на оба датчика действуют одинаковые вносимые помехи (собственные шумы датчика не могут быть устранены дифференциальным методом), называемые синфазными помехами. Это значит, что шумы, действующие на датчики, имеют одинаковую фазу и амплитуду, поэтому при вычитании сигналов они будут взаимно уничтоже-

ны. Такая комбинация датчиков называется *двойным* или *дифференциальным* датчиком. Насколько хорошо подавляются аддитивные шумы можно судить по величине *коэффициента ослабления синфазного сигнала* (КОСС):

$$KOCC = 0.5\,\frac{S_1 + S_0}{S_1 - S_0}, \tag{5.79}$$

где S_1 и S_0 – выходные сигналы основного и эталонного датчиков. КОСС зависит от величины внешних воздействий, и обычно чем выше входные сигналы, тем меньше его значение. Этот коэффициент показывает во сколько раз уменьшается синфазный шум по отношению к полезному сигналу на выходе датчика. Величина КОСС является мерой симметричности датчика. Для эффективного подавления шума оба датчика следует располагать, как можно, ближе друг к другу, они должны быть абсолютно идентичными и работать в одинаковых условиях. Также очень важно обеспечить надежное экранирование эталонных датчиков от внешних воздействий, в противном случае эффективность дифференциального метода будет значительно снижена.

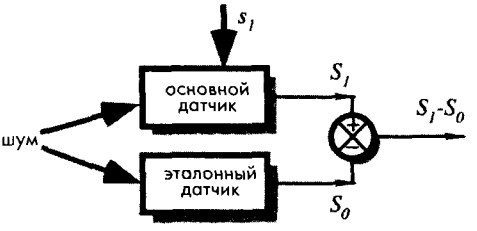


Рис. 5.47. Дифференциальный метод снижения аддитивных помех

Для уменьшения вносимого мультипликативного шума применяется метод измерения отношений (см. раздел 5.6, где дано описание таких схем). Его принцип достаточно прост. Используется дифференциальный датчик, обе части которого работают в одинаковых условиях окружающей среды и подвергаются воздействию идентичных мультипликативных шумов. При этом на одну половину датчика действует исследуемый внешний сигнал s_1, а на вторую половину – эталонную – постоянный стабилизированный сигнал s_0. Считаем, что окружающая температура является мультипликативной помехой, одинаково влияющей на оба датчика. Аппроксимируем выходное напряжение первого датчика в узком температурном диапазоне следующим выражением:

$$V_1 \approx \left[1+\alpha(T-T_0)\right] f(s_1), \tag{5.80}$$

где α – температурная чувствительность передаточной функции датчика, T – текущая температура, T_0 – температура при калибровке. Тогда напряжение на выходе эталонного датчика будет равно:

$$V_0 \approx \left[1+\alpha(T-T_0)\right] f(s_0). \tag{5.81}$$

Найдем отношение двух напряжений:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{f(s_1)}{f(s_0)}. \tag{5.82}$$

Поскольку $f(s_0)$ является постоянной, из последнего выражения видно, что это отношение от температуры (т.е. от мультипликативной помехи) не зависит. Однако следует уточнить, что способ измерения отношений работает только в случае мультипликативных помех, в то время как дифференциальный метод применим исключительно для подавления аддитивных шумов. Но оба метода абсолютно бесполезны для борьбы с собственными шумами, генерируемыми внутри датчиков и интерфейсных схем.

Собственные шумы, как правило, подчиняются закону Гаусса, чего нельзя сказать о вносимых помехах, которые часто трудно описать статистическими методами. Вносимые шумы могут быть периодическими, нерегулярно повторяющимися и просто случайными. Обычно их удается существенно снизить, применяя меры борьбы с электростатическими и электромагнитными наводками от источников питания, радиостанций, механических ключей, а также с всплесками напряжения и тока, возникающими из-за процессов переключений в реактивных цепях. К таким мерам относятся: фильтрация, развязка электрических цепей, экранирование проводников и компонентов, применение ограждающих потенциалов, исключение паразитных контуров заземления, физическая переориентация проводников и компонентов, установка гасящих диодов параллельно катушкам реле и моторов, выбор, как можно, более низких импедансов и использование малошумящих источников питания и опорного напряжения. В таблице 5.4 приведены некоторые источники вносимых помех, их типичные значения и способы борьбы с ними.

Таблица 5.4. Некоторые источники вносимого шума

Внешние источники	Типичные значения	Способы борьбы
Источники питания с частотой 60/50 Гц	100 пА	Экранирование, исключение паразитных контуров заземления, изолирование источников питания
Импульсные источники питания с частотой 120/100 Гц	3 мкВ	Фильтрация
Всплески напряжения на частоте 180/150 Гц от трансформаторов, работающих на частоте 60/50 Гц	0 5 мкВ	Переориентация компонентов
Радиостанции	1 мВ	Экранирование
Искрение при переключении	1 мВ	Фильтрация частоты 5-100 МГц, исключение паразитных контуров заземления и экранирование
Вибрации	10 пА (10-100 Гц)	Внимание к механическим соединениям, удаление проводов с большим напряжением от входных портов и датчиков
Вибрации кабеля	100 пА	Использование малошумящих кабелей
Платы (токи утечки)	0 01–10 пА ниже 10 Гц	Тщательная очистка платы, использование тефлоновых изоляторов

Источник [13]

Чаще всего электрические помехи попадают в схему через паразитные емкости, существующие практически везде. Например, человек, стоящий на диэлектрическом покрытии, и земля формируют емкость, равную около 700 пФ, а емкости между выводами разъема и между эмиттером и детектором оптрона составляют приблизительно 2 пФ. На рис. 5.48А показана емкостная связь между источником электрического шума и внутренним импедансом Z датчика через переходной конденсатор C_S. Импеданс датчика может быть чисто резистивным или комбинированным, состоящим из резисторов, конденсаторов, катушек и нелинейных элементов, например, диодов. Напряжение на импедансе Z зависит от частоты шума, величины паразитной емкости C_S и импеданса Z. Например, внутренний импеданс пироэлектрического детектора можно представить в виде параллельного соединения конденсатора 30 пФ и резистора 50 ГОм. Если такой датчик через конденсатор 1 пФ присоединить к двигающемуся человеку, тело которого обладает поверхностным электростатическим зарядом, может возникнуть статическое напряжение величиной до 1000 В. Если предположить, что частота движений человека составляет 1 Гц, наводка на датчике при этом будет равна 30 В, что в 3...5 раз выше величины полезного сигнала датчика, вырабатываемого в ответ на тепловое излучение от тела человека. Поскольку некоторые датчики и почти все электронные схемы имеют в своем составе нелинейные компоненты, высокочастотные наведенные сигналы, часто называемые электромагнитной интерференцией (ЭМИ), могут оказаться выпрямленными и появиться на выходе в виде постоянного или медленно меняющегося напряжения.

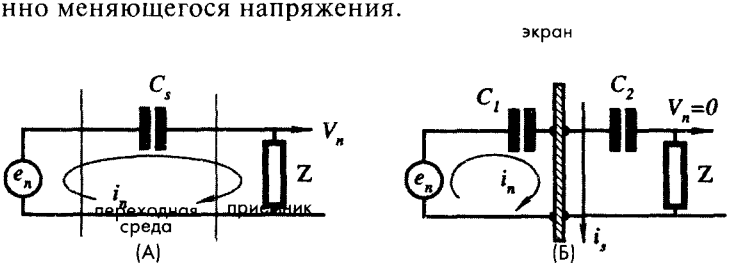


Рис. 5.48 Емкостная связь (А) и электрическое экранирование (Б)

5.9.3. *Электрическое экранирование*

Помехи, вызванные электрическими полями, могут быть значительно уменьшены при помощи соответствующего экранирования датчика и интерфейсных схем, особенно их высокоимпедансных и нелинейных компонентов. Каждый конкретный случай экранирования должен тщательно разрабатываться. При этом очень важно правильно идентифицировать источник помех и способ его связи со схемой. Некорректное экранирование может только ухудшить положение дел и создать новые проблемы.

Экранирование служит для решения двух задач [14]:

- Экранирование ограничивает распространение шума в соседние схемы. Здесь возникает проблема, связанная с тем, что отраженные от экранов паразитные

сигналы возвращаются назад, и необходимо тщательно продумывать маршрут их «отступления» с учетом контуров заземления и разводки проводов.

- Если источники помех находятся внутри самого устройства, экраны размещаются только над критичными участками с целью предотвращения попадания шума на чувствительные элементы детекторов и интерфейсных схем. Для этого экраны выполняются в виде металлических коробов вокруг определенных участков схемы или кабелей с экранировкой вокруг центральных проводников.

Как было показано в разделе 3.1 главы 3, шумы, связанные с электрическими полями, хорошо гасятся металлическими корпусами, поскольку заряд q не может существовать на внутренней поверхности замкнутой проводящей поверхности. На рис. 5.48 показана схема, поясняющая принцип возникновения паразитных емкостных связей. Здесь e_n – источник шума, в реальной жизни это может быть компонент схемы с переменным электрическим потенциалом; C_s – паразитная емкость (ее импеданс на определенной частоте равен Z_s) между источником шума и импедансом Z, который является приемным устройством по отношению к шуму. В результате возникшей емкостной связи появляется напряжение V_n. Величину тока шума можно определить как:

$$i_n = \frac{V_n}{Z + Z_s}, \tag{5.83}$$

а напряжения шума как:

$$V_n = \frac{e_n}{1 + Z_c / Z}. \tag{5.84}$$

Например, если $C_s = 2.5$ пФ, $Z = 10$ кОм (резистор), а $e_n = 100$ мВ, на частоте 1.3 МГц выходной шум составит 20 мВ.

Некоторые читатели могут подумать, что несложно отфильтровать шум с частотой 1.3 МГц от низкочастотного сигнала датчика. Но в реальной жизни это не так, поскольку многие датчики и первые каскады усилителей содержат нелинейные компоненты (например полупроводниковые p-n переходы), работающие как выпрямители. В результате этого спектр высокочастотного шума смещается в низкочастотную область, делая помеху сравнимой с полезным сигналом датчика.

На рис. 5.48Б показана схема, поясняющая работу электрического экрана. Предположим, что экран обладает нулевым потенциалом. Ток шума в левой части схемы равен $i_{n1}=e_n/Z_{c1}$. С другой стороны экрана ток шума будет практически равен нулю, поскольку в этой части схемы нет никаких источников сигналов. Следовательно, напряжение шума на импедансе Z будет также равно нулю, поэтому чувствительная часть схемы становится эффективно защищенной от источника шума. Однако при этом надо быть уверенными в том, что через экран не течет никакой ток i, который может вызвать появление разности потенциалов на сопротивлении экрана, и, соответственно, привести к возникновению дополнительных помех. Существует несколько практических правил, которые надо соблюдать при экранировании схем:

- Для эффективной работы электростатический экран должен быть подсоединен к внутренней точке защищаемой схемы, имеющей определенный опорный по-

тенциал. Если один из сигнальных выводов датчика подсоединен к земле, экран также должен быть соединен с землей. Если ни один из выводов датчика не подключен к точке заземления, заземлять экран *бесполезно*.

- При использовании экранированных проводов их экранировка должна быть подсоединена к точке с опорным потенциалом только со стороны источника сигнала (рис. 5.49А).
- Если экран разбит на секции, что может случиться, когда кабель собран из нескольких кусков, экранировка всех сегментов должна быть последовательно соединена, но к линии с опорным потенциалом собранный таким образом экран подсоединяется только в одной точке – со стороны датчика (рис. 5.49Б)

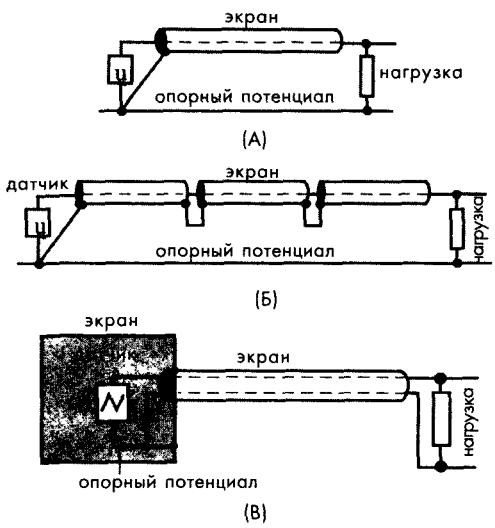


Рис. 5.49. Подсоединение сигнального кабеля к линии с опорным потенциалом

- Количество независимых экранов, используемых в системе сбора данных, должно быть равно числу измеряемых сигналов. Каждая сигнальная линия должна иметь свой собственный экран. Экраны разных линий не должны контактировать друг с другом, если только они не используют общий опорный потенциал (сигнальную «землю»). В этом случае все соединения следует выполнять отдельными проводами, подсоединенными к каждому экрану только в одной точке.
- Экран следует заземлять только в одной точке, желательно рядом с датчиком. Экранированный кабель никогда нельзя заземлять с двух сторон (рис. 5.50), поскольку разность потенциалов между двумя точками заземления (V_n) может привести к возникновению тока в экране i_s, который, используя магнитную связь, может индуцировать паразитное напряжение на центральный проводник.
- Если датчик размещен в экранированном корпусе, а данные передаются через экранированные кабели (рис. 5.49В), их экранировка должна быть подсоединена к корпусу. Полезный практический прием: использование внутри экрана отдельного проводника с опорным потенциалом («землей»). Экран нельзя использовать больше ни с какой другой целью, кроме как для защиты схем от электрических помех. Не допускайте появления токов в экране.
- Нельзя подавать на экран потенциал, отличный от опорного (за исключением случаев использования активных экранов, показанных на рис. 5.4Б). Напряжение с экрана передается на центральный проводник через емкость кабеля.

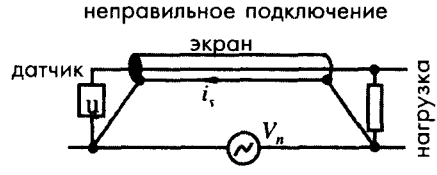


Рис. 5.50. Экранировка кабеля ошибочно подсоединена с двух концов

- Для уменьшения индуктивности подсоединение экрана к земле надо вести короткими проводами. Это особенно важно при одновременной передаче аналоговых и цифровых сигналов.

5.9.4. Блокировочные конденсаторы

Блокировочные конденсаторы используются для обеспечения низкого импеданса источника питания в точке подсоединения нагрузки. В случае высокого импеданса источника питания в подводящих линиях возникают паразитные сопротивления и индуктивности. При увеличении частоты паразитные индуктивности начинают создавать серьезные проблемы и могут привести к возникновению в схеме колебательных процессов. Даже на низких частотах блокировочные конденсаторы играют очень важную роль, поскольку они не пропускают высокочастотные помехи, проникающие в схему от внешних источников, например, радиостанций. На высоких частотах ни источник питания, ни регулятор не обладают нулевым выходным импедансом. Выбор типа конденсатора определяется областью применения устройства, частотным диапазоном схемы, стоимостью, размерами платы и т.д. При выборе конденсатора всегда необходимо помнить, что реальный конденсатор на высоких частотах не ведет себя как идеальный конденсатор, описанный в учебниках.

На рис. 5.51 показана эквивалентная схема конденсатора. Она состоит из номинальной емкости C, сопротивления утечки r_l, индуктивностей выводов L и их сопротивлений R. В схему также включены сопротивления r, отображающие поглощение энергии в диэлектрике, и емкости c_a, являющиеся «запоминающим устройством» конденсатора. Во многих интерфейсных схемах, особенно в усилителях, аналоговых интеграторах, преобразователях тока(заряда) в напряжение, потери в диэлектриках являются основными источниками погрешностей. В таких схемах предпочтительнее использовать пленочные конденсаторы.

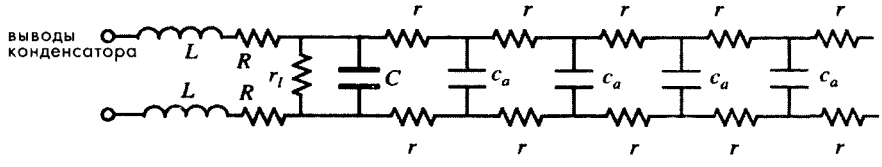


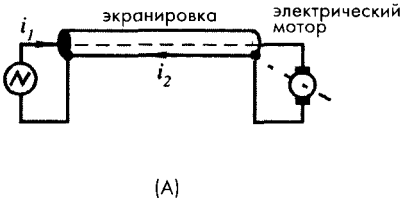
Рис. 5.51. Эквивалентная схема конденсатора

При использовании конденсатора в качестве блокировочного устройства r_l и r играют второстепенную роль, тогда как R и L становятся очень значимыми. Они ограничивают способность конденсатора гасить паразитные сигналы и обеспечивать низкий выходной импеданс источника питания. Часто блокировочные конденсаторы должны иметь очень большую величину (более 10 мкФ), рекомендуется для этих целей применять электролитические конденсаторы. К сожалению, такие конденсаторы обладают большими значениями R и L. Танталовые конденсаторы имеют более хорошие характеристики. Использование несоответствующих типов блокировочных конденсаторов может привести к возникновению ко-

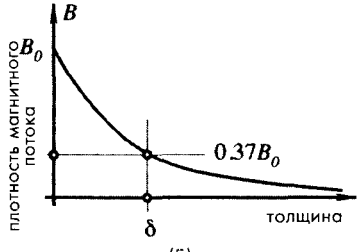
лебаний и перекрестных помех между линиями передач. Лучший способ подбора блокировочных конденсаторов – их тестирование на специализированных стендах.

5.9.5. Экранирование от магнитных полей

Помехи от электростатических и электрических полей могут быть значительно снижены при применении соответствующих экранов. Гораздо сложнее защищаться от магнитных полей, поскольку они проникают внутрь проводящих материалов. Обычный экран, размещенный вокруг проводника и заземленный на одном конце, очень слабо защищает проводник от наведенных магнитными полями напряжений. Когда магнитное поле B_0 проникает внутрь экрана, его амплитуда падает экспоненциально (рис. 5.52Б). Глубина проникновения поля δ внутрь экрана (скин-слой) соответствует толщине слоя, в котором происходит ослабление магнитного поля на 37% по сравнению с его величиной в воздухе. В таблице 5.5 приведены типовые значения δ для нескоторых типов материалов, определенные на разных частотах. Из таблицы видно, что на высоких частотах для построения эффективных экранов можно использовать практически любой материал, тогда как в нижнем диапазоне – предпочтительнее применять сталь.



(А)



(Б)

Рис. 5.52. А – Применение коаксиальных кабелей для подвода напряжения питания к нагрузке для снижения магнитных помех, Б – Защитные свойства магнитного экрана улучшаются при увеличении его толщины

Таблица 5.5. Зависимость толщины скин-слоя (в мм) от частоты

Частота	Медь	Алюминий	Сталь
60 Гц	8,5	10,9	0,86
100 Гц	6,6	8,5	0,66
1 кГц	2,1	2,7	0,20
10 кГц	0,66	0,84	0,08
100 кГц	0,2	0,3	0,02
1 МГц	0,08	0,08	0,008

Источник: [15]

Для построения эффективных магнитных экранов для работы на низких частотах рекомендуется использовать материалы, обладающие высоким коэффициентом магнитной проницаемости, например, мю-металлы. Однако защитные свой-

ства таких экранов значительно снижаются с ростом частоты и величины магнитного поля. Поэтому для работы на высоких частотах лучше применять магнитные экраны из толстой стали. Поскольку экранирование от магнитных полей всегда очень сложная задача, при работе на низких частотах всегда надо стремиться снижать магнитные поля; минимизировать площадь магнитного контура, особенно со стороны принимающих устройств; выбирать оптимальную геометрию проводников. Приведем несколько полезных практических рекомендаций:

- Приемные устройства надо располагать, как можно, дальше от источников магнитных полей.
- Нельзя размещать провода параллельно силовым линиям магнитного поля, их следует располагать перпендикулярно.
- Необходимо использовать экран из материала, соответствующего рабочей частоте и величине магнитного поля.
- Поскольку большой ток является источником магнитных полей, для его передачи следует применять скрученные пары проводов. Если в двух проводах токи равны, но противоположно направлены, общее магнитное поле будет нулевым. Для того чтобы этот способ был эффективен, ток должен протекать только по этим проводникам и ни в коем случае не попадать на линии заземления (в противном случае, могут образоваться паразитные контуры заземления).
- Если использовать для подключения источника тока к нагрузке экранированные провода, по их экранировке будет протекать обратный ток i_2 (рис. 5.52А). Если ток i_2 равен току i_1, протекающему в центральном проводнике, но имеет противоположное направление, созданные ими магнитные поля будут взаимно уничтожаться, и суммарное поле будет равно нулю. В этом случае происходит нарушение правила, гласящего, что по экрану не должен течь никакой ток. Однако это правило важно для борьбы с электростатическими помехами, здесь же кабель применяется для борьбы с магнитными наводками. Такой способ экранирования подходит при подключении устройств, для работы которых требуется большой ток, например, электрических моторов.
- Поскольку величина магнитных помех зависит от площади принимающего контура, для уменьшения паразитных наводок из-за напряжений, возникающих за счет магнитной связи, эту площадь надо делать, как можно, более меньшей.

Разберемся, что такое принимающий контур. На рис. 5.53 показан датчик, подсоединенный к цепи нагрузки при помощи двух проводников длиной L, расположенных на расстоянии D друг от друга. Получившаяся прямоугольная область с площадью, равной $a = LD$, и есть принимающий контур. Напряжение, индуцируемое в этом контуре, пропорционально его площади и косинусу угла между проводниками и вектором магнитной индукции. Поэтому для снижения уровня помех провода следует ориентировать перпендикулярно магнитному полю, а площадь a между ними делать минимально возможной.

Площадь a уменьшается при снижении длины проводников и/или расстояния между ними. Выполнение этих условий осуществляется при использовании скрученных пар проводов или проводников, близко прилегающих друг к другу. Применение скрученных пар предпочтительнее, поскольку их трудно разъединить, и они всегда располагаются вместе. На первый взгляд – это несущественное

требование. Однако на практике может возникнуть следующая ситуация: разработчик грамотно развел провода внутри устройства, а специалист сервис-центра при ремонте нарушил их расположение, что привело к значительному повышению уровня шума. Поэтому одно из основных правил: корректная разводка проводов должна быть защищена от несанкционированного вмешательства посторонних лиц.

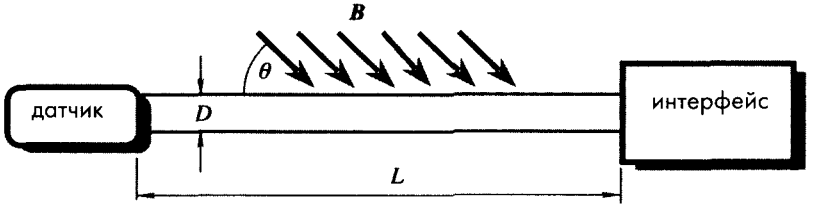


Рис. 5.53. Принимающий контур, сформированный длинными проводниками

Из всего вышесказанного видно, что бороться с магнитными наводками гораздо сложнее, чем с помехами от электрических полей.

5.9.6 Механический шум

Вибрации, вызванные ускорениями, также являются источниками внешних помех в датчиках, поэтому желательно их защищать от этих явлений. Помехи этого типа могут менять передаточные характеристики системы (мультипликативный шум) или приводить к появлению паразитных наводок в цепях датчика (аддитивный шум). Если в состав датчика входят механические компоненты, вибрации, совершаемые вдоль определенных осей с заданной частотой, могут привести к возникновению резонансных явлений. Поэтому для некоторых датчиков ускорение является источником помех. Например, большинство пироэлектрических детекторов также обладают некоторыми пьезоэлектрическими свойствами. Хотя основным назначением таких датчиков является измерение перепадов температур, они реагируют и на резкое изменение некоторых свойств окружающей среды, таких как сильные колебания атмосферного давления, ветер или механические вибрации. Иногда реакция на эти посторонние воздействия настолько сильная, что ее трудно различить от полезного сигнала.

5.9.7 Слои заземления

В течение многих лет слои заземления использовались инженерами–электронщиками и разработчиками печатных плат для борьбы с паразитными наводками [16]. Основное назначение слоев заземления – снижение индуктивности схемы. Согласно основным законам физики магнетизма (раздел 3.3 главы 3) ток i, протекающий в проводнике, приводит к появлению магнитного поля, сила которого пропорциональна величине этого тока и обратно пропорциональна расстоянию r до проводника:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}. \qquad (5.85)$$

Поэтому любой проводник с током всегда окружен магнитным полем. Индуктивность проводника – это мера энергии, накопленной им в индуцированном магнитном поле. Для определения индуктивности необходимо проинтегрировать поле вдоль всей длины проводника, от его поверхности до бесконечности. Однако если в двух близко расположенных проводниках протекают токи, равные по величине, но противоположно направленные, их магнитные поля взаимно уничтожаются. В этом случае мнимая индуктивность проводника становится гораздо ниже. Ток противоположного направления называется *обратным током*. В этом и заключается основополагающая идея использования слоев заземления, которые создают путь для обратного тока непосредственно под сигнальными проводниками. Обратный ток уходит напрямую в землю, вне зависимости от количества ответвлений от проводника. Ток по обратному пути всегда течет в сторону наименьшего импеданса. В корректно спроектированном слое заземления этот путь расположен прямо под сигнальными проводниками. Часто на практике применяются двухслойные монтажные платы, один слой которых является слоем заземления, а другой отдан под сигнальные линии. В многослойных платах слой заземления, как правило, располагается между двумя или более сигнальными слоями. Кроме снижения индуктивности схемы слои заземления используются для уменьшения резистивных потерь за счет скин-эффекта, возникающего при протекании переменного тока по ровной поверхности проводящего слоя. В дополнение к этому они повышают устойчивость схем при работе на высоких частотах, направляя паразитные сигналы через емкостную связь на землю. Приведем практические рекомендации по использованию слоев заземления:

- Площадь слоев заземления должна быть, как можно, большей. Особенно это важно для частей схемы, работающих с высокими частотами или цифровыми сигналами
- Такие компоненты схем, как выходные резисторы, ИС, транзисторы, развязывающие конденсаторы, имеющие дело с быстро меняющимися токами, необходимо монтировать, как можно, ближе к плате.
- Для подсоединения к общей линии заземления разных компонентов схемы надо использовать отдельные провода для опорных потенциалов и подсоединять их все в одной точке на слое заземления. Это необходимо для предотвращения падения напряжения через токи заземления.
- Длину проводников надо делать, по возможности, очень короткой для максимального снижения индуктивности схемы.

5.9.8. Развязка по цепи заземления и паразитные контуры заземления

Внутри любой схемы существуют источники помех, которые создают серьезные проблемы при работе с малыми сигналами. Иногда схема, очень тщательно рассчитанная на бумаге, при тестировании на стенде показывает достаточно хорошие рабочие характеристики, но при изготовлении на печатной плате эта же схема не удовлетворяет предъявленным требованиям по точности. Эта разница в поведении одной и той же схемы, но в разном исполнении (в виде макета и печатной платы) объясняется физическим расположением проводников. Обычно здесь играют роль

не проводники, соединяющие отдельные элементы схемы (конденсаторы, резисторы, транзисторы, ОУ и т д), а шины питания и заземления Эти две шины присутствуют практически во всех электронных схемах По обоим из них могут передаваться паразитные сигналы от одной части схемы в другую, по ним может осуществиться связь между выходными и входными каскадами измерительных систем

Шина питания подает ток ко всем элементам схемы Шина заземления также участвует в передаче напряжений и токов питания, к тому же она часто используется в качестве источника опорного потенциала для электрических сигналов Пересечения этих двух функций могут привести к возникновению паразитных контуров заземления На рис 5 54А показано, какие проблемы появляются при этом В схеме на этом рисунке сигнал датчика V_s поступает на положительный вход ОУ, который как правило, имеет высокий коэффициент усиления ОУ подключен к источнику питания и получает от него ток i, который возвращается на землю в виде обратного тока i' Провод заземления соединен со схемой в точке a, расположеннои рядом с датчиком Хотя в схеме нет ви димых источников помех, выходной сигнал состоит не только из полезного сигнала V_{out}, но и из некоторой ошибки Основная причина возникновения этой ошибки заключается в неправильном подсоединении проводов заземления На рис 5 54Б показано, что провод заземления является далеко неидеальным, поскольку он обладает конечными сопротивлением R_g и индуктивностью L_g В рассматриваемом примере обратный ток, возвращаясь к источнику питания после усилителя, проходит по шине заземления на участке ab, на котором происходит падение напряжения V_g Это напряжение хотя и небольшое, но может быть сравнимо с сигналом датчика Следует отметить, что L_g и R_g включены последовательно с датчиком, и, следовательно, напряжение V_g почти напрямую поступает на вход усилителя Токи, текущие по шине заземления, могут содержать высокочастотные (ВЧ) компоненты, в дополнение к этому индуктивность шины также вызывает появление довольно сильных ВЧ наводок, которые не только добавляют помехи, но и могут привести к нестабильности схемы Для примера, рассмотрим датчик температуры, который вырабатывает

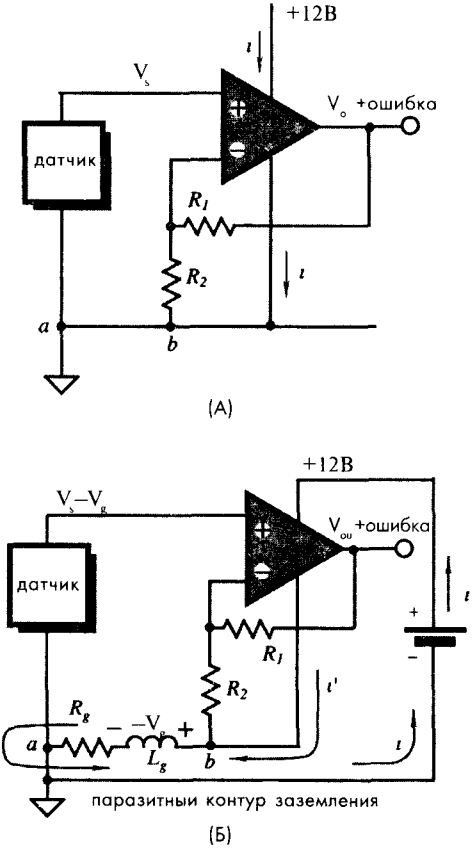


Рис. 5.54. А – неправильное заземление датчика и интерфейса, Б – путь тока от источника питания через провод заземления

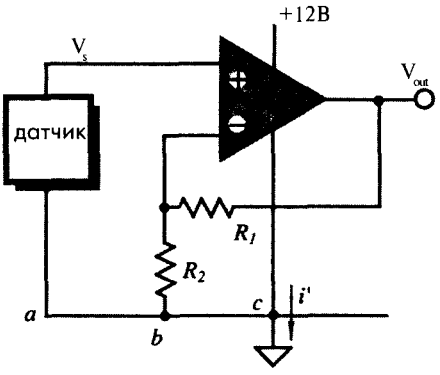


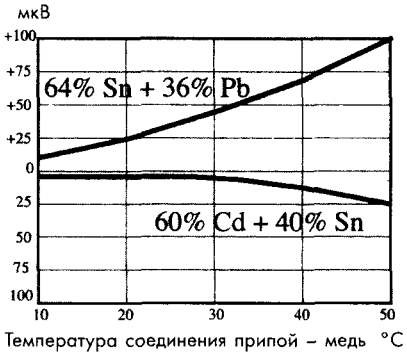
Рис. 5.55. Правильное заземление датчика и интерфейсной схемы

напряжение, соответствующее произведению его чувствительности (100 мкВ/°С) на температуру объекта. Ток на выходе малошумящего ОУ i в статическом режиме составляет 5 мА. Этот ток протекает через паразитный контур заземления, обладающий сопротивлением R_g=0.2 Ом. Падение напряжения на этом сопротивлении равно: $V_g=iR_g$=1 мВ, что соответствует ошибке – 10°С! Выход из этой ситуации довольно прост: надо разорвать петлю заземления. При разработке схем шину опорного заземления всегда необходимо отделять от контуров заземления, по которым течет ток. Это особенно важно при проектировании цифровых схем. На рис. 5.55 показано, что перемещение точки присоединения к земле из точки *a* в точку *c* предотвращает формирование паразитного напряжения на проводе заземления, соединяющем датчик с резистором ОС R_2. Всегда необходимо помнить, что подсоединение шины заземления к плате следует осуществлять только в одной точке. Нарушение этого правила может привести к возникновению паразитных контуров заземления, которые бывает очень сложно обнаружить.

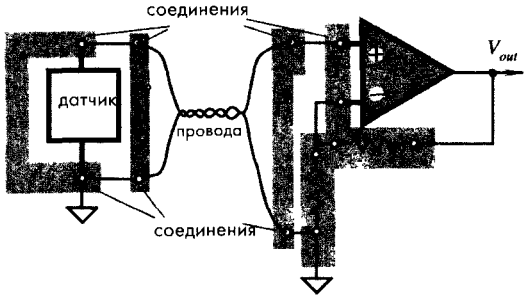
5.9.9. Шум Зеебека

Этот вид помех возникает в результате эффекта Зеебека (раздел 3.9 главы 3), который заключается в том, что при соединении двух разных металлов появляется термо э.д.с.. Величина этой э.д.с. обычно очень мала и для многих типов датчиков может просто игнорироваться. Но когда требуется получить абсолютную точность порядка 10...100 мкВ, эти паразитные сигналы приходится учитывать. На эффекте Зеебека построены некоторые датчики температуры. Однако во всех остальных применениях термически индуцированная э.д.с. является паразитным сигналом. В электронных схемах соединения разнородных металлов можно обнаружить во многих местах: в разъемах, переключателях, контактах реле и т.д. Например, при соединении контактов некоторых микросхем с медными платами персональных компьютеров иногда возникает напряжение смещения порядка 40 мкВ×ΔT, где ΔT – перепад температур (в °С) между двумя контактирующими металлами. Другим примером является использование припоя из свинца и олова для пайки медных выводов. Между припоем и медными элементами возникает термоэлектрическое напряжение 1...3 мкВ/°С. Для уменьшения этих паразитных сигналов до значений порядка 0.3 мкВ/°С применяются специальные припои из кадмия и олова. На рис. 5.56А показана зависимость э.д.с. Зеебека от температуры для двух типов припоев. Даже соединение двух идентичных проводов, изготовленных разными производителями, может привести к появлению температурной зависимости напряжения с наклоном порядка 200 нВ/°С.

Во многих случаях э д с Зеебека может быть значительно снижена при соответствующем монтаже схемы и выравнивании температур соединений Практические советы – делать минимальное количество соединений между датчиком и входными цепями интерфейсной схемы, где только возможно избегать включения в схему разъемов, механических ключей и других потенциальных источников термо э д с Но в некоторых случаях следовать этим советам не удается В таких случаях пытаются компенсировать термо э д с , возникающие в схеме, другими термо э д с , получаемыми на специально введенных соединениях Для получения эффекта взаимного уничтожения термо э д с все соединения в схеме должны поддерживаться при одинаковой температуре На рис 5 56Б показано соединение удаленного датчика к усилителю, где все места соединений поддерживаются хотя и при разных, но тщательно подобранных температурах Такие термически сбалансированные соединения должны быть близки по физическим свойствам и по возможности располагаться на общих теплоотводах Необходимо также избегать воздействий воздушных потоков и перепадов температур на платы интерфейсных схем и корпусов датчиков



(А)



(Б)

Рис. 5.56. А – э д с Зеебека, генерируемая на соединениях припой – медь [17], Б – поддержание одинаковой температуры соединений снижает термо э д с

5.10. Гальванические источники питания для маломощных датчиков

Для работы интегрированных датчиков в современных системах сбора данных и удаленного мониторинга необходимы надежные высокоэнергетичные источники питания История гальванических источников питания началась во времена Вольта, и за последние десятилетия здесь достигнут значительный прогресс В настоящее время электрохимические источники питания мало напоминают старые, всем хорошо известные Примерами таких источников являются алкалиновые, C-Zn, Zn-воздушные, Ni-Cd и свинцово-кислотные батареи Современные элементы питания Zn—воздушные, Ni-металлгидридные и особенно литиевые, получили широкое распространение благодаря своим достаточно высоким напряжениям и длительному сроку службы Лидером на рынке являются Li-MnO_2 батареи, выпускаемые разных габаритов от плоских миниатюрных элементов до устройств размера класса «D»

Все гальванические источники питания можно разделить на две группы: *первичные* элементы (устройства одноразового использования) и *вторичные* элементы (перезаряжаемые устройства многоразового использования).

Важной характеристикой батарей является такой параметр, как энергия на единицу веса, однако для миниатюрных устройств часто используется другой параметр: энергия на единицу объема.

Как правило, количество энергии, выделяемое батареей, зависит от скорости потребления мощности. Обычно с ростом тока количество вырабатываемой энергии уменьшается. Энергия и мощность гальванических источников питания зависит от конструкции батареи, ее размеров и рабочих циклов потребления тока. Производители обычно указывают емкость элемента питания в ампер-часах или ватт-часах, показывающих за какое время при определенной нагрузке батарея разрядится до заданного уровня напряжения полного разряда. Например, если C – это емкость батареи (в мА×–час), I-средний потребляемый ток (в мА), а n – рабочий цикл, время разряда батареи (срок службы первичного элемента) определяется выражением:

$$t = \frac{C}{In}. \tag{5.86}$$

Тогда если $C = 50$ мА ч, $I \approx 5$ мА, а схема в каждом часу работает только 5 мин (т.е. рабочий цикл составляет 5/60), батарея будет работать:

$$t = \frac{C}{In} = \frac{50 \times 60}{5 \times 5} = 120 \text{ часов}.$$

Но следует помнить, что указанные производителем цифры являются весьма приблизительными и не годятся для точных расчетов. Поэтому на практике при разработке схем необходимо определять срок службы конкретных батарей экспериментально. При расчете электронных схем всегда требуется проводить оценку потребления мощности во всех рабочих режимах при работе в разных температурных диапазонах. После этого по полученным значениям потребляемой мощности рассчитывают соответствующую им нагрузку и определяют время разряда батареи до заданного уровня напряжения. Бывают ситуации, когда схеме для работы требуются короткие импульсы тока большой амплитуды. Если окажется, что данная батарея не способна работать в таком импульсном режиме, иногда может помочь параллельный электролитический конденсатор, служащий для накопления энергии.

Следует отметить, что для определения срока службы батарей не рекомендуется проводить ускоренные испытания, поскольку, как это было указано ранее, их полезная емкость сильно зависит от нагрузки, рабочего профиля тока и рабочего цикла.

5.10.1. Первичные элементы

От конструкции гальванических источников питания зависят их рабочие характеристики и стоимость. Большинство первичных элементов состоят из толстых электродов прямой или концентрической формы, расположенных параллельно друг

другу, залитых водным раствором электролита. Большая часть маленьких вторичных элементов устроена по другому: в них длинные тонкие электроды наматываются в форме цилиндра и помещаются в металлический контейнер. Такой способ позволяет повысить плотность мощности, но при этом плотность энергии падает, а стоимость батареи возрастает. Благодаря низкой проводимости электролитов, некоторые литиевые первичные элементы также используют «свернутую» конструкцию [18].

C-Zn батареи. В таких элементах анод изготавливается из цинка. C-Zn батареи бывают двух типов. У одного типа в качестве катода используется натуральный диоксид марганца, а в качестве электролита – хлорид аммония. В другом типе C-Zn батарей катодом является электролитический диоксид марганца, а электролитом – хлорид цинка. Батареи этого вида до сих пор очень популярны, особенно на Востоке, где число их производителей составляет более 200. Их объем производства равен половине объема производства алкалиновых батарей в Европе, но только 25% от объема производства алколиновых элементов в США. C-Zn батареи предпочтительнее использовать в случаях, где требуется высокая плотность мощности, срок службы не является критичным параметром, а доминирующим фактором является низкая стоимость.

Алкалиновые марганцевые батареи. Спрос на эти батареи в последние годы резко возрос, особенно после того, как из цинкового анода исключили ртуть. Алкалиновые батареи способны вырабатывать высокий ток и имеют улучшенное соотношение мощности к плотности, но самым главным их достоинством является длительный срок службы – не менее 5 лет.

Первичные литиевые батареи. Большинство таких батарей производятся в Японии. Популярность элементов из лития и диоксида марганца объясняется их высокими рабочими напряжениями, широким диапазоном размеров и емкостей, а также продолжительным сроком службы. Литиево-йодные элементы обладают очень высокой плотностью энергии и способны работать до 10 лет в составе кардиостимуляторов. Однако в таких элементах применяется твердый электролит с низкой проводимостью, что не дает возможности выдавать большие токи. Рабочие токи литиевых батарей составляют несколько мкА, что часто бывает достаточным при работе с пассивными датчиками.

Количество лития в таких батареях очень мало, поскольку 1 г Li обеспечивает элементу емкость 3.86 А×час. Литиевые батареи не вредят окружающей среде, но считаются огнеопасными.

5.10.2. Вторичные элементы (аккумуляторы)

Вторичные элементы являются перезаряжаемыми батареями. *Герметичные свинцово-кислотные батареи* имеют малые размеры и большую емкость. Они выдерживают до 200 циклов перезарядки при временах разряда не менее 1 часа. Главными достоинствами таких элементов являются их низкая стоимость, малый саморазряд, высокая продолжительность жизни, а также способность работать с большими нагрузками и в суровых условиях окружающей среды. К их недостаткам можно отнести сравнительно большие размеры, вес и потенциальную опасность для окружающей среды, поскольку в их состав входят свинец и серная кислота.

Герметичные Ni-Cd и Ni-MH (никель – металлгидридные) батареи являются самыми распространенными вторичными элементами. Их объем производства превышает 1 млрд элементов в год. Типичная емкость элемента «АА» составляет более 800 мА×час. Это стало возможным благодаря применению высокопористого никелевого материала. Ni-Cd элементы достаточно терпимы к перезаряду и переразряду. NiCd батареи обладают интересным свойством: процесс их заряда является эндотермическим (т.е. протекает с поглощением тепла), тогда как другие батареи нагреваются при зарядке. Кадмий, однако, представляет потенциальную опасность для окружающей среды. Bi-MH и современные NiCd батареи не обладают эффектом «памяти», т.е. неполный разряд батареи не влияет на ее способность к полной перезарядке. Ni-MH батареи пришли на смену NiCd элементам, они не только обладают большей емкостью, но и более низким саморазрядом.

Литиевые полимерные батареи используют твердый электролит, что позволяет изготавливать их любой формы и размеров Однако эти батареи являются самыми дорогими. Перезаряжаемые алкалиновые батареи имеют низкую стоимость и хорошую плотность мощности. Однако у них довольно маленький срок службы.

Литература

1 Begunov, B N , Zakaznov, N P, Kiryushin, S I ,and Kuzichev, V I Optical Instrumentation Theory and Design *Mir Publishers, Moscow, 1988*

2 *Applications of Phototransistors in Electro-optic Systems* Motorola, 1988

3 *Giuliani, J F Optical waveguide chemical sensors In* Chemical Sensors andMi-croinstrumentation *Murray, R W et al (eds) American Chemical Society, Washington, DC, 1989, Chap 24*

4 *Mitchell G L Intensity-based and Fabry-Perot interferometer sensors In* Fiber Optic Sensors An Introduction for Engineers and Scientists *E Udd, ed , John Wiley & Sons, New York, 1991, Chap 6*

5 Welford, W T, and Winston, R *High Collection Nonimaging Optics* Academic Press, San Diego, CA, 1989

6 Winston, *R , and Enoch, J M Retinal cone receptor as an ideal light collector* J Opt Soc Am *61, 1120-1121, 1971*

7 *von Hevisy, G and Somiya, T Uberplatinschwarz* Zeitschr Phys ChemieA *171, 41, 1934*

8 *Harris, L , McGinnes, R , and Siegel, B* J Opt Soc Am *38, 7, 1948*

9 *Persky, M J Review of black surfaces for space-borne infrared systems* Rev Sci Instrum *70(5) 2193-2217, 1999*

10 *Lang, W , Kuhl, K , and Sandmaier, H Absorption layers for thermal infrared detectors In* Transducers'91 International Conference on Solid-state Sensors and Actuators Digest of Technical Papers *IEEE, New York, 1991, pp 635-638*

11 *Yariv, A Optical electronics, 3rd ed Holt, Reinhart and Winston, New York, 1985*

12 *Johnson, L M Optical modulators for fiber-optic sensors In* Fiber Optic Sensors Introduction for Engineers and Scientists *E Udd, ed John Wiley & Sons, New York 1991*

13 *Haus, H A* Waves and Fields in Optoelectronics *Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984*

ГЛАВА 6

ДЕТЕКТОРЫ ПРИСУТСТВИЯ И ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

11 сентября 2001 года перевернуло мышление людей: они стали больше задумываться о защите аэропортов, полетов и о безопасности в целом. Угроза подобных акций заставила разрабатывать более совершенные охранные системы для надежной защиты заданных периметров, для чего необходимы соответствующие сенсорные устройства. Датчики *присутствия* детектируют нахождение людей (а иногда и животных) в контролируемой зоне, тогда как *детекторы движения* реагируют только на перемещение объектов. Основным их отличием является то, что датчики присутствия вырабатывают выходной сигнал независимо от того движется объект или замер, в то время как сигнал на выходе детектора движения появляется только в случае перемещения объекта. Такие датчики применяются в системах наблюдения и охраны, в устройствах управления энергией (например, для управления включением/выключением электрического света), в интерактивных игрушках и т.д. В зависимости от конкретной ситуации присутствие человека может определяться по некоторым параметрам его тела или характеристикам поведения [1]. Например, датчик может реагировать на вес человека, тепло от его тела, звуки, на изменение диэлектрической проницаемости и т.д. Для определения присутствия людей и их передвижений в настоящее время применяются следующие типы датчиков:

- *Датчики давления воздуха*: детекторы перепадов давления воздуха, возникающих при открывании дверей и окон.
- *Емкостные датчики*: детекторы изменения емкости человеческого тела
- *Акустические датчики*: детекторы звуков, производимых людьми
- *Фотоэлектрические датчики*: детекторы пересечения луча света движущимися объектами
- *Оптоэлектронные датчики*: детекторы уровня освещенности или оптической контрастности в охраняемой зоне
- *Сенсоры предохранительных ковриков*: длинные полоски, располагающиеся на полу под ковриком у входной двери, реагирующие на давление, создаваемое весом непрошеного гостя.
- *Детекторы напряжений*: датчики деформации, встроенные в пол, ступени и другие конструктивные элементы.
- *Детекторы открывания*: электрические контакты, встроенные в двери и окна
- *Магнитные детекторы открывания*: бесконтактная версия детекторов открывания

- *Детекторы вибраций*: устройства, реагирующие на вибрации стен или других конструкций зданий; такие элементы могут также крепиться к дверям и окнам для обнаружения передвижений объектов.
- *Детекторы разбитых стекол*: датчики, реагирующие на специфические вибрации, характерные для бьющегося стекла
- *ИК детекторы движения*: устройства, реагирующие на тепловые волны, испускаемые теплыми или холодными движущимися объектами
- *СВЧ детекторы(микроволновые датчики)*: активные устройства, реагирующие на СВЧ электромагнитные волны, отраженные от объектов
- *Ультразвуковые датчики*: устройства аналогичные СВЧ датчикам, только в них вместо электромагнитных волн используются ультразвуковые колебания.
- *Видеодетекторы появления новых объектов*: видео устройства, сравнивающие текущее изображение охраняемой зоны с записанным в памяти эталонным изображением.
- *Системы видеораспознавания*: анализаторы изображений, сравнивающие характерные особенности лиц людей с портретами, хранящимися в базе данных
- *Лазерные детекторы*: устройства, подобные фотоэлектрическим детекторам. Их отличие в том, что они используют узкие лучи света и комбинацию отражателей
- *Электростатические детекторы*: датчики, способные детектировать статические электрические заряды, переносимые движущимися объектами

Одним из недостатков детекторов обнаружения присутствия людей или их вторжения в охраняемое пространство является ложное срабатывание. Под ложным срабатыванием понимается ситуация, когда система указывает на присутствие объектов, которых на самом деле там нет. В некоторых случаях, например, в игрушках или устройствах управления освещением, ложное срабатывание не причиняет особых проблем. Однако в охранных и военных системах одинаково опасными являются ситуации как ложного срабатывания, так и пропускания вторжения посторонних в контролируемую зону. Поэтому при выборе датчиков для таких применений необходимо обращать внимание на их надежность, избирательность и помехозащищенность. Для повышения надежности охранных систем часто используют несколько датчиков со своими интерфейсными схемами, работающими независимо друг от друга. Такой прием особенно эффективен в случае воздействия внешних помех. Другим способом снижения ошибок при обнаружении вторжения людей является применение нескольких датчиков, основанных на разных физических принципах [2] (например, очень эффективна комбинация емкостных и ИК детекторов, поскольку для них критичными являются разные виды вносимых помех)

6.1. Ультразвуковые датчики присутствия

Такие детекторы посылают акустические волны на объект и принимают отраженные от него волны. Более подробное описание ультразвуковых детекторов будет дано в разделе 7.6 главы 7. Для использования таких детекторов в качестве датчиков движения желательно увеличить их рабочий диапазон и угол охвата территории.

6.2. Микроволновые детекторы движения

СВЧ детекторы являются прекрасной альтернативой другим датчикам, когда требуется контролировать большие площади и работать в широком температурном диапазоне в сильно зашумленных условиях: при ветре, акустических помехах, в тумане, пыли, влажности и т.д. Принцип действия СВЧ детекторов основан на излучении электромагнитных радиочастотных волн в сторону охраняемой зоны. Самыми распространенными частотами являются 10.525 ГГц (X-диапазон) и 24.125 (K-диапазон). Мощность излучения должна быть довольно низкой, чтобы не причинять вред здоровью людей, длина излучаемых волн достаточно большая ($\lambda = 3$ см для X-диапазона), чтобы свободно проходить сквозь большинство частиц, загрязняющих воздух, и достаточно короткой, чтобы отражаться от больших объектов.

Микроволновая часть детекторов состоит из генератора Ганна, антенны и смесительного диода. Генератор Ганна представляет собой диод, смонтированный в маленькой прецизионной полости, который при подаче напряжения питания начинает вырабатывать СВЧ колебания. Часть этих электромагнитных волн, имеющих частоту f_0, проходит через диафрагму в волновод и попадает в антенну, которая направляет их в сторону объекта. В зависимости от применения выбираются разные фокусирующие характеристики антенны. Основное правило такое: чем уже диаграмма направленности антенны, тем большей чувствительностью она обладает (т.е. тем выше ее коэффициент усиления). Другое важное свойство следующее: антенны с узкой (игольчатой) диаграммой направленности имеют большие размеры по сравнению с широкоугольными антеннами, которые могут быть довольно миниатюрными. Типовая мощность излучения передатчика составляет 10...20 мВт. Стабильность генераторов Ганна зависит от приложенного напряжения, поэтому очень важно для питания генераторов использовать высококачественные регуляторы напряжения. Генератор может работать либо непрерывно, либо периодически. При работе в импульсном режиме резко снижается потребляемая от источника питания мощность.

Меньшая часть излучаемых волн попадает на смесительный диод Шотки и используется в качестве эталонного сигнала (рис. 6.1А). Часто приемник и передатчик сигналов расположены в одном модуле, называемом приемопередатчиком или трансивером. Часть отраженных от объекта волн возвращается назад на антенну, которая перенаправляет их на смесительный диод Ток на диоде представляет собой гармонический сигнал, частота которого определяется разностью фаз излучаемой и отраженной волн, которая прямо пропорциональна расстоянию до объекта. При помощи такого *фазочувствительного* детектора можно найти расстояние до объекта, однако, как правило, требуется определять не расстояние, а факт передвижения объекта в охраняемой зоне. Детекторы присутствия и движения часто реализуются на основе эффекта Доплера. На этом принципе работают практически все СВЧ и ультразвуковые детекторы. Следует отметить, что Доплеровские датчики являются детекторами движения, а не присутствия, поскольку реагируют только на движущиеся объекты. Далее поясним, как они работают.

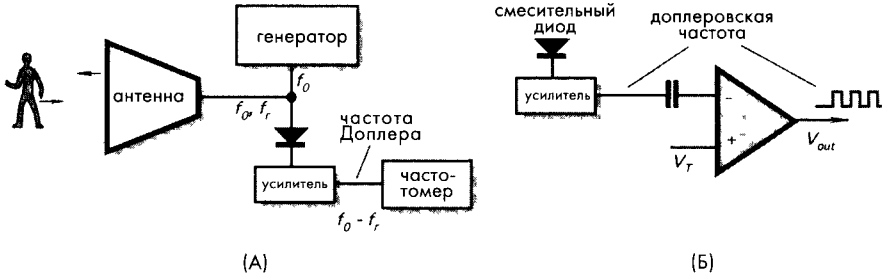


Рис. 6.1. СВЧ детектор присутствия: А – схема для измерения доплеровской частоты, Б – схема с пороговым детектором

Антенна излучает на частоте f_0, которая определяется длиной волны λ_0:

$$f_0 = \frac{c_0}{\lambda_0}, \tag{6.1}$$

где c_0 –скорость света. Когда объект движется по направлению к антенне или от нее, частота отраженного излучения меняется. При движении объекта от антенны со скоростью v, частота отраженного сигнала уменьшается, а при приближении объекта – возрастает. Это явление и называется *эффектом Доплера*, названным в честь австрийского ученного Кристиана Доплера (1803-1853) (150 лет назад не существовало акустических приборов для проведения прецизионных измерений. Для доказательства своей теории Доплер посадил трубачей на железнодорожную платформу, а рядом с путями разместил музыкантов с абсолютным слухом. Локомотив таскал эту платформу мимо музыкантов с разной скоростью два дня. Музыканты фиксировали ноты, играемые трубачами, при приближении и удалении платформы. После анализа полученных данных, оказалось, что уравнения Доплера верны.) Несмотря на то, что эффект Доплера был первоначально открыт для звука, он справедлив и для электромагнитных волн. Однако в отличие от звуковых волн, скорость которых зависит от движения источника звука, электромагнитные волны распространяются со скоростью света, являющейся абсолютной константой. Согласно теории относительности частота отраженных электромагнитных волн определяется следующим выражением:

$$f_r = f_0 \frac{\sqrt{1-(v/c_0)^2}}{1+v/c_0}. \tag{6.2}$$

На практике величиной $(v/c_0)^2$ можно пренебречь, поскольку она очень мала по сравнению с единицей. Тогда выражение для частоты отраженных волн становится аналогичным уравнению для акустических волн:

$$f_r = f_0 \frac{1}{1+v/c_0}. \tag{6.3}$$

Из-за эффекта Доплера отраженные и падающие волны имеют разную частоту. Смесительный диод складывает излучаемые (эталонные) и отраженные волны. Поскольку он является нелинейным устройством, его выходной сигнал состоит из множества гармоник частот обоих входных сигналов. Электрический ток, протекающий через диод, может быть представлен в виде полинома:

$$i = i_0 + \sum_{K=1}^{n} a_k (U_1 \cos 2\pi f_0 t + U_2 \cos 2\pi f_r t)^k , \qquad (6.4)$$

где i_0 – постоянная составляющая, a_k – коэффициенты гармоник, определяемые рабочей точкой диода, U_1 и U_2 – амплитуды излучаемого и отраженного сигналов, а t – время. Этот ток содержит бесконечное число гармоник, среди которых есть гармоника с частотой, равной разности частот Δf, называемой частотой Доплера:

$$\Delta f = a_2 U_1 U_2 \cos 2\pi (f_0 - f_r) t .$$

Частоту Доплера на смесительном диоде можно найти из уравнения (6.3):

$$\Delta f = f_0 - f_r = f_0 \frac{1}{c_0 / v + 1} , \qquad (6.5)$$

Поскольку $c_0/v >> 1$, после подстановки выражения (6.1) получим следующее уравнение:

$$\Delta f \approx \frac{v}{\lambda_0} . \qquad (6.6)$$

Следовательно, частота сигнала на выходе смесительного диода линейно пропорциональна скорости движения объекта. Например, человек приближается к детектору со скоростью 0.6 м/с, частота Доплера при работе датчика в X-диапазоне составит $\Delta f = 0.6/\ 0.03 = 20$ Гц.

Уравнение (6.6) справедливо только для случаев движения объекта прямо навстречу излучению детектора. Когда объект приближается к детектору под некоторым углом θ, частоту Доплера можно найти из следующего выражения:

$$\Delta f \approx \frac{v}{\lambda_0} \cos\theta . \qquad (6.7)$$

Из этого уравнения видно, что доплеровские детекторы становятся неэффективными при приближении объектов под углами θ, близкими к 90°. В датчиках скорости для определения скорости движения объекта требуется измерять частоту Доплера и фазу для нахождения направления перемещения (рис. 6.1А). Этот метод применяется в радарах автоинспекторов. В охранных системах и в устройствах открывания дверей в супермаркетах также используются доплеровские детекторы, но в них вместо измерения частоты при обнаружении движущихся объектов срабатывает пороговый компаратор (рис. 6.1Б). Отметим, что хотя из выражения (6.7) и следует равенство нулю частоты Доплера для объектов, движущихся под углом $\theta = 90°$,

на практике попадание объектов в охраняемую зону под любыми углами приводит к резким скачкам амплитуды принимаемого сигнала и, соответственно, к изменению выходного напряжения смесительного диода. Обычно этих перепадов сигналов достаточно для запуска порогового детектора.

Напряжение на смесительном диоде обычно находится в диапазоне от микровольт до милливольт, поэтому, как правило, следом за ним ставят усилитель. Поскольку частота Доплера лежит в звуковом диапазоне, используемый усилитель может быть достаточно простым; однако при этом необходимо применять узкополосный режекторный фильтр для подавления сетевых наводок и основных гармоник двухполупериодных выпрямителей, а также ламп дневного освещения: 60 и 120 Гц (или 50 и 100 Гц). Для обеспечения нормальной работы необходимо, чтобы мощность принимаемого сигнала была достаточно высокой. Выполнение этого условия зависит от нескольких факторов – от площади апертуры антенны A, площади объекта a, а также от расстояния до объекта r:

$$P_r = \rho \frac{P_0 A^2 a}{4\pi\lambda^2 r^4}, \tag{6.8}$$

где P_0 – мощность исходного излучения. Для эффективной работы площадь поперечного сечения объекта a должна быть достаточно большой, поскольку при $\lambda^2 \le a$, амплитуда принимаемого сигнала резко снижается. Отражающая способность объекта ρ при воздействии на него излучений определенной длины волны также сильно влияет на величину принимаемого сигнала. Обычно токопроводящие материалы и объекты с высокой диэлектрической проницаемостью хорошо отражают электромагнитные волны, тогда как многие диэлектрики поглощают энергию, и вследствие этого обладают плохой отражающей способностью. Пластмассы и керамические материалы имеют хорошую пропускающую способность и поэтому могут использоваться в качестве окон в СВЧ детекторах. Самыми хорошими объектами для микроволновых датчиков являются проводящие пластины с ровной, гладкой поверхностью, перпендикулярно расположенные к направлению излучения детектора. Ровная проводящая поверхность обладает очень высокой отражающей способностью, но при этом отклонение пластины даже на небольшой угол θ, сильно сказывается на работе датчика. Так при угле $\theta = 45°$, отраженный сигнал может и вовсе не дойти до приемной антенны. Такой способ отклонения электромагнитных волн применен в бомбардировщике Стелс, невидимом на экранах наземных радаров.

Для определения направления движения объекта (навстречу детектору или от него) датчик должен быть оснащен еще одним смесительным диодом. Второй диод располагается в волноводе таким образом, что доплеровские сигналы от двух диодов отличаются по фазе на 1/4 длины волны или на 90° (рис. 6.2А). Выходные сигналы обоих диодов усиливаются отдельно друг от друга и преобразуются в прямоугольные импульсы, которые далее анализируются в логическом устройстве, представляющем собой цифровой дискриминатор фаз, определяющий направление движения объекта (рис. 6.2Б). Такие детекторы в основном применяются в устройствах автоматического открывания дверей и управления транспортными потоками. В обоих случаях для выработки управляющего сигнала необходимо предварительно собрать определенную информацию об объекте. В устройствах открывания

дверей ограничение области наблюдения и мощности излучения может привести к существенному снижению ложных срабатываний Если в этих устройствах функция определения направления движения объектов является необязательной, то в системах управления транспортными потоками она необходима для исключения сигналов от удаляющихся автомашин Если такой доплеровский детектор используется в устройствах охранной сигнализации, вибрации строительных конструкций могут вызвать большое количество ложных срабатываний Логическое устройство должно исключать переменные сигналы, соответствующие вибрациям, и реагировать только на сигналы от движущихся объектов, таким образом, повышая надежность работы охранной системы

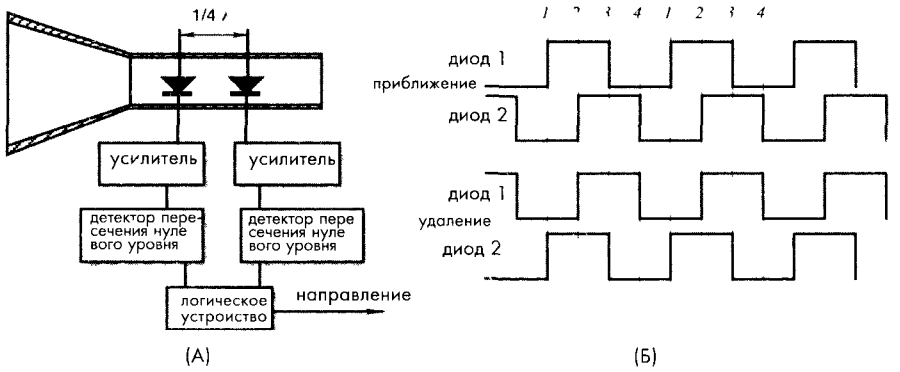


Рис. 6.2. Блок-схема (А) и временные диаграммы (Б) микроволнового доплеровского датчика движения с функцией определения направления перемещения

Если микроволновый детектор используется в США, он должен отвечать всем строгим требованиям (например, MSM20100), предъявляемым Федеральным Комитетом Информации Подобные требования существуют во многих странах Например, согласно OSHA 1910 97, в частотном диапазоне 100 МГц 100 ГГц излучение датчика не должно превышать 10 мВт/см^2 при работе со средним периодом опроса 0 1 1 час

На основе микромощного импульсного радара (см раздел 7 7 1 главы 7) можно реализовать достаточно эффективный детектор движения Достоинствами таких детекторов являются низкое потребление мощности и почти полная незаметность для злоумышленников Такой радар может быть спрятан внутри строительных конструкций и, благодаря своей низкой излучающей мощности, не превышающей мощность естественного теплового шума, его трудно обнаружить при помощи электронных устройств

6.3. Емкостные датчики присутствия

Поскольку человеческое тело представляет собой среду с высокой диэлектрической проницаемостью (на частоте 40 МГц диэлектрическая константа мышц, кожи и крови приблизительно равна 97, а жира и костей – 15), между ним и окружающими

предметами возникают различные емкостные связи. Величины появляющихся переходных емкостей определяются такими факторами, как размер тела, материал одежды , тип окружающих объектов, погода и т.д. Обычно он лежит в диапазоне от нескольких пикофарад до нескольких нанофарад. При движении человека величины этих емкостей меняются, что дает возможность отделить движущиеся объекты от статических. На самом деле все объекты связаны друг с другом некоторыми емкостными связями. И если эти связи в какой-либо зоне зафиксировать, появление любого нового объекта в окрестности этой зоны приведет к нарушению установившихся связей. На рис. 6.3 показано, что первоначально емкость между тестовой пластиной и землей (здесь, под словом «земля» подразумевается любой большой объект, такой как земля, озеро, автомобиль, корабль, самолет и т.д.) равна C_1. При вторжении человека в окрестность этой пластины формируются два дополнительных конденсатора: C_a – между пластиной и телом и C_b – между телом и землей. Поэтому суммарная емкость между пластиной и землей увеличится на величину ΔC:

$$C = C_1 + \Delta C = C_1 + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b}. \qquad (6.9)$$

Это изменение емкости может быть зафиксировано при помощи соответствующей аппаратуры и использоваться для детектирования присутствия людей в охраняемой зоне.

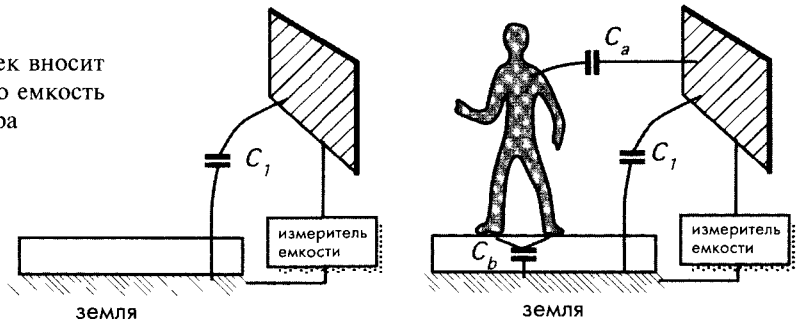


Рис. 6.3. Человек вносит дополнительную емкость в схему детектора

На рис. 6.4 показана емкостная охранная система для автомобиля [3]. Чувствительный элемент вмонтирован в сидение автомобиля. Он может быть изготовлен в виде металлической пластины или сетки, электропроводной ткани и т.д. Чувствительный элемент формирует одну из пластин конденсатора C_p. Второй пластиной этого конденсатора может быть либо корпус автомобиля, либо отдельная пластина, расположенная под ковриком на полу. В качестве эталонного конденсатора C_x используется либо постоянный, либо переменный конденсатор. Его необходимо размещать недалеко от сидения. Эталонный и чувствительный конденсаторы подключаются к соответствующим входам детектора зарядов (через резисторы R_1 и R_2). Для уменьшения паразитных наводок соединительные провода следует скручивать. Дифференциальный детектор зарядов управляется генератором прямоугольных импульсов (рис. 6.5). Когда на сидении никто не сидит,

эталонный конденсатор устанавливается приблизительно равным конденсатору C_p Резисторы и соответствующие конденсаторы определяют постоянные времени двух цепей В исходном состоянии обе *RC* цепи имеют одинаковые постоянные времени, равные τ_1 Напряжения с резисторов подаются на входы ОУ, выходной сигнал которого V_c практически равен нулю Небольшие пики на выходном сигнале свидетельствуют о некотором разбалансе схемы Когда человек садится на сидение, его тело формирует дополнительную емкость параллельно C_p, что приводит к увеличению постоянной времени цепи от τ_1 до τ_2 Это сказывается на увеличении амплитуды пиков на выходе ОУ Компаратор сравнивает V_c с эталонным уровнем напряжения V_{ref} Когда V_c становится больше V_{ref}, компаратор посылает сигнал на логическое устройство, вырабатывающее сигнал тревоги V, свидетельствующий о том, что в машине кто-то находится Следует отметить, что емкостной детектор является активным устройством, поскольку для его работы необходим сигнал генератора

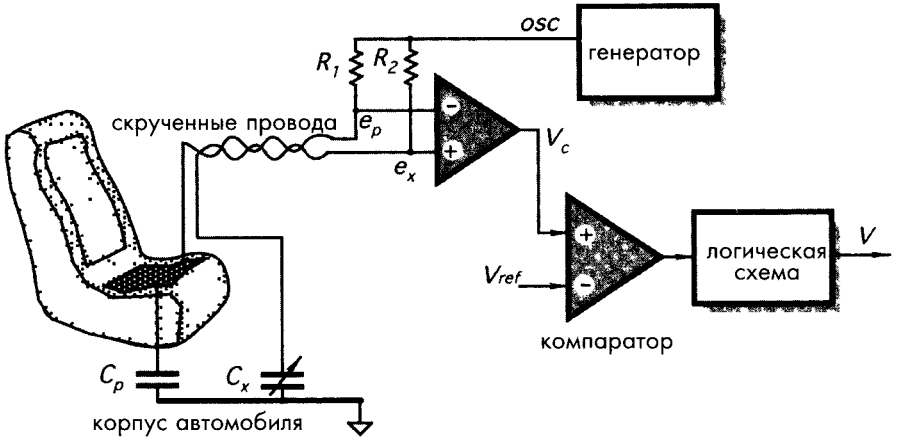


Рис. 6.4. Емкостной детектор для охраны автомобиля охранного детектора

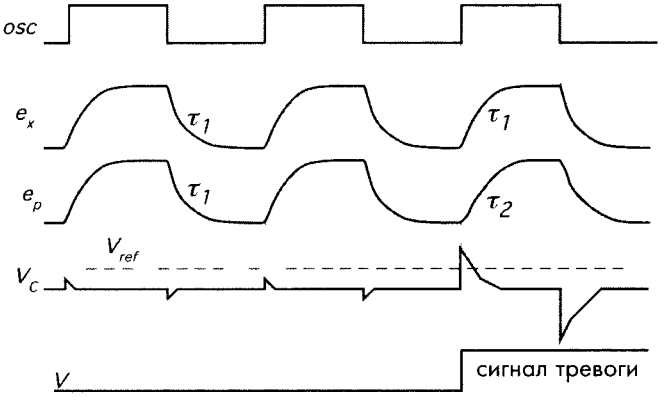


Рис. 6.5. Временные диаграммы работы емкостного датчика

Когда емкостной датчик присутствия используется рядом или на металлических устройствах, его чувствительность может быть несколько снижена из-за паразитных емкостных связей между электродом и металлическими частями. Эффективный способ борьбы с паразитными емкостями – применение экранов. На рис. 6.6А показан робот с металлической рукой. Рука движется рядом с людьми и другими потенциально проводящими объектами и может с ними столкнуться, если управляющий компьютер робота не получит информацию о близости руки с препятствием. При приближении любого объекта к руке робота формируется емкостная связь между ним и рукой, равная C_{s0}. Рука робота покрыта электрически изолированной проводящей оболочкой, называемой *электродом*. На рис. 6.3 показано, как можно при помощи детектирования емкостной связи определять присутствие людей в окрестности датчика. Однако массивная металлическая рука робота (рис. 6.6Б) имеет гораздо более сильную емкостную связь с электродом, чем образуемая связь между электродом и объектом. Элегантное решение этой проблемы – размещение между электродом и рукой робота промежуточного экрана (рис. 6.6В) (Этот принцип был предложен М.С. Катоу из Palnning Research Corp. при создании робота для NASA's Jet Propulsion Laboratory). Роль датчика приближения здесь выполняет многослойное покрытие руки робота, в котором нижний слой является диэлектриком, после него идет большой токопроводящий экран, а верхний слой представляет собой узкую пластину электрода. Для уменьшения емкостной связи между электродом и рукой робота, потенциал экрана должен быть равен потенциалу электрода, следовательно, на экран надо подавать напряжение, равное напряжению электрода (поэтому такой экран часто называется управляемым экраном). При выполнении этого условия между экраном и электродом не будет никакого электрического поля, а между экраном и рукой робота возникнет сильное электрическое поле. При этом между электродом и объектом также формируется достаточно сильное электрическое поле. На рис. 6.7 показана упрощенная схема генератора прямоугольных импульсов, частота которых зависит от значений входной емкости, состоящей из следующих емкостей: C_{sg} (между датчиком и землей), C_{s0}(между датчиком и объектом) и C_{0g} (между объектом и землей). Электрод соединен с экраном через повторитель напряжения. Частотно-модулированный сигнал поступает в компьютер робота, управляющий движением его руки. Такое устройство позволяет детектировать соседние проводящие объекты на расстоянии 30 см.

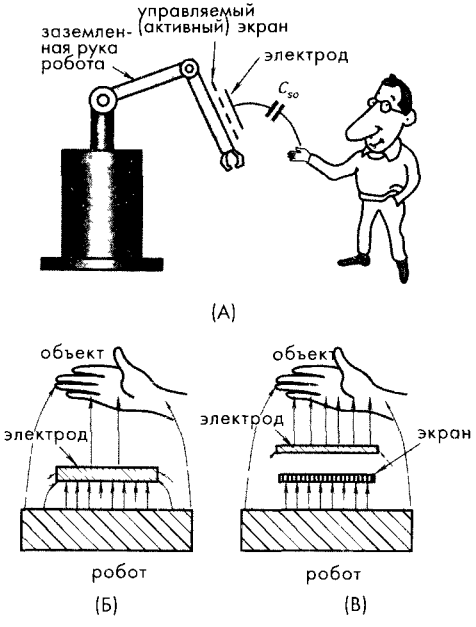


Рис. 6.6. Емкостной датчик приближения. Управляемыи экран располагается на металлическои руке заземленного робота (А). Без экрана электрическое поле в основном сосредоточено между электродом и роботом (Б), тогда как экран помогает перенаправить поле в область между электродом и объектом (В)

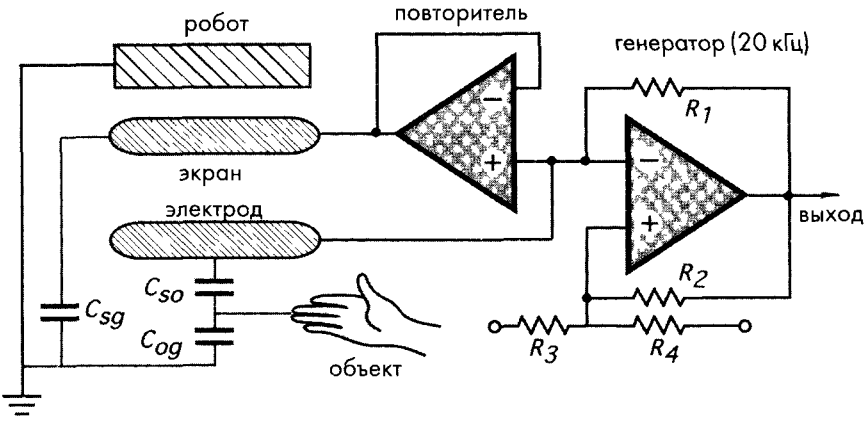


Рис. 6.7. Упрощенная схема частотного модулятора, управляемого входными емкостями

6.4. Электростатические датчики движения

Любой объект может накапливать на своей поверхности статическое электричество. Заряды на поверхности появляются вследствие электростатических явлений (т.е. процессов выделения зарядов при движении объектов, при трении тканей друг об друга, из-за турбулентности воздуха и атмосферного электричества и т.д) (см. раздел 3.1 главы 3). Обычно в воздухе находятся либо положительные, либо отрицательные ионы, которые при попадании на тело человека меняют его заряд. В идеальных статических условиях все объекты не заряжены, их объемные заряды равны нулю. Однако в реальных условиях в любом объекте, изолированном хотя бы временно от земли, может возникнуть разбаланс объемного заряда. Другими словами, он становится носителем электрических зарядов.

Любая электронная схема представляет собой набор проводников и диэлектриков. Если схема неэкранирована, все ее компоненты имеют емкостные связи с окружающими объектами. На практике переходные емкости могут быть очень малы – порядка 1 пФ и даже меньше. Для увеличения связи схемы с окружающими объектами на ее вход иногда ставят чувствительный электрод, напоминающий электрод, используемый в емкостных детекторах, рассмотренных в разделе 6.3. Электрод может быть выполнен в форме проводящей пластины, надежно изолированной от земли.

Между электродом и окружающими объектами всегда устанавливается электрическое поле, если хотя бы один из них является носителем зарядов. Другими словами, все распределенные конденсаторы, сформированные между электродом и соседними объектами, заряжаются статическими или слабо меняющимися электрическими полями. Когда вблизи электрода нет движущихся объектов электрическое поле там либо стационарно, либо меняется сравнительно медленно.

Если носитель заряда (человек или животное) меняет свое положение (удаляется или в окрестности электрода появляется новый объект – носитель заряда), статическое электрическое поле нарушается. Это приводит к перераспределению зарядов между переходными конденсаторами, включая те, которые сформированы между входным электродом и окружающими объектами. Величина зарядов на поверхности объектов зависит от их природы и атмосферных условий. Например, человек в сухой одежде, идущий по ковру, переносит в миллион раз больший заряд, чем человек в мокрой одежде, вошедший в помещение после дождя. Электронная схема должна быть адаптирована под конкретные условия, в которых ей предстоит работать. Другими словами, предназначение данной системы заключается в преобразовании переменных индуцированных зарядов на входах в электрические сигналы, которые далее усиливаются и поступают в устройства обработки данных. Таким образом, статическое электричество, являющееся обычным физическим явлением, можно использовать для формирования переменных электрических сигналов для детектирования движения объектов.

На рис. 6.8 показан однополярный электростатический детектор движения. Он состоит из проводящего электрода, подключенного на вход аналогового преобразователя импеданса, реализованного на основе МОП транзистора Q_1 резистора смещения R_1, входного конденсатора C_0, усилителя и оконного компаратора [4]. Вся схема кроме электрода, как правило, экранируется. Электрод же подвержен воздействию окружающей среды и образует с внешними объектами емкостные связи, которые можно выразить в виде конденсатора C_p. На рис. 6.8 источником статического электричества выступает человеческое тело, на поверхности которого распределены положительные заряды. Будучи носителем зарядов, тело формирует электрическое поле с напряженностью E. Это поле индуцирует на электроде отрицательные заряды. В стационарных условиях, когда человек находится без движения, напряженность поля остается постоянной, а входная емкость C_0 разряжается через резистор R_1. Для того чтобы схема обладала высокой чувствительностью, сопротивление резистора R_1 должно быть очень большим – порядка 10^{10} Ом и даже выше.

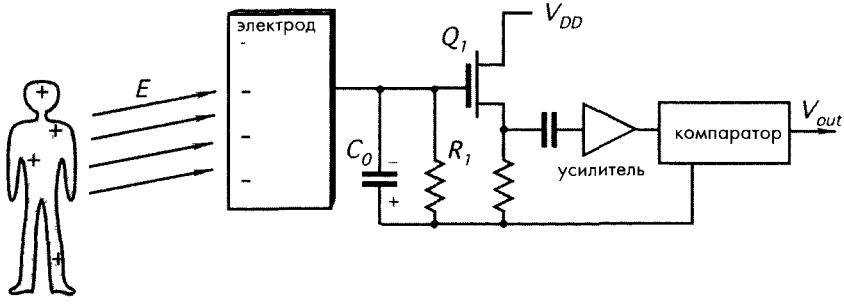


Рис. 6.8. Однополярный электростатический детектор движения

При движении человека напряженность электрического поля меняется. Это приводит к появлению на входном конденсаторе C_0 электрического заряда, что сказывается на величине напряжения на резисторе R_1, которое через разделительный конденсатор попадает на усилитель и далее на вход оконного компаратора. Компаратор сравнивает пришедший сигнал с двумя пороговыми уровнями, как это показано на временных диаграммах (рис. 6.9Б). Один пороговый уровень обычно выше базовой линии статического сигнала, а другой – ниже. При движении человека сигнал на входе компаратора отклоняется либо вверх, либо вниз, пересекая один из пороговых уровней. Выходной сигнал компаратора представляет собой серию прямоугольных импульсов, которая может быть подана в устройство обработки данных. Следует отметить, что в отличие от емкостных детекторов движения, являющихся активными устройствами, электростатические датчики относятся к пассивным схемам.

Существует несколько источников помех, которые могут привести к ложным срабатываниям электростатических детекторов: 60 или 50-ти герцовые сетевые наводки, электромагнитные поля от радиостанций, силовые электрические установки, молнии и т.д. Большинство перечисленных помех формирует вокруг детектора довольно равномерные электрические поля, которые могут быть скомпенсированы при использовании схемы с симметричными входами и высоким КОСС.

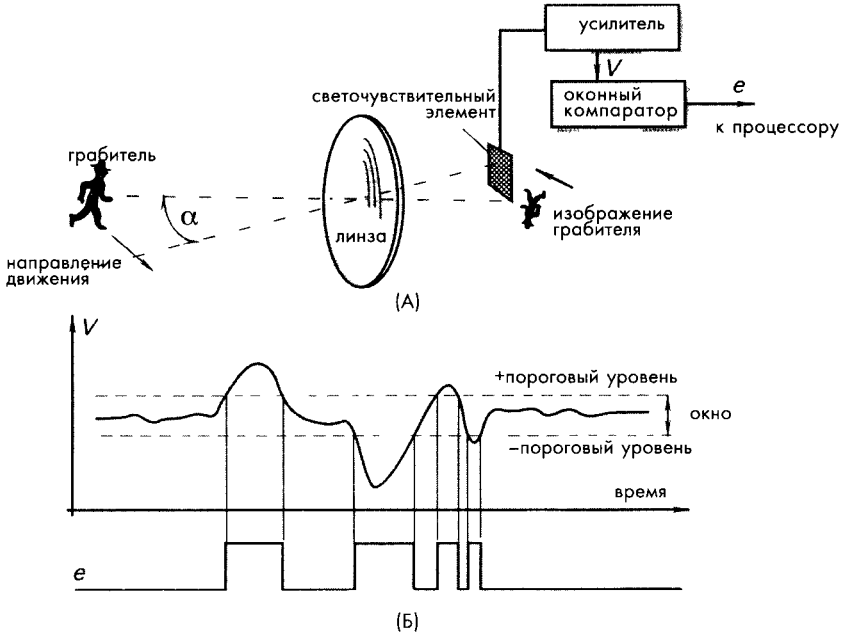


Рис. 6.9. Принципиальная схема оптоэлектронного датчика движения. Линза формирует изображение движущегося объекта (грабителя). Когда изображение пересекает оптическую ось датчика, оно попадает на чувствительный элемент (А). При этом на выходе светочувствительного элемента вырабатывается соответствующий сигнал, который усиливается и попадает на оконный компаратор (Б)

6.5. Оптоэлектронные детекторы движения

Оптоэлектронные детекторы движения являются самыми популярными датчиками, используемыми в охранных системах. Они используют электромагнитные излучения в оптическом диапазоне длин волн: 0.4...20 мкм. Этот диапазон включает в себя видимую, ближнюю ИК и часть дальней ИК областей спектра. Основное назначение оптоэлектронных детекторов – обнаружение двигающихся людей и животных. Такие детекторы работают на расстоянии до нескольких сотен метров и в зависимости от конкретных условий применения могут иметь либо узкое, либо широкое поле наблюдения.

Принцип действия оптических датчиков движения основан на детектировании излучений (либо видимых, либо нет), исходящих от поверхности движущегося объекта в окружающую среду. Таким излучением может быть либо собственное излучение объекта, либо отраженный от него свет внешнего источника. В первом случае речь идет о пассивном детекторе, во втором – об активном. Очевидно, что активный датчик нуждается в дополнительном источнике излучений, который может быть дневным светом, электрической лампой, ИК светоизлучающим диодом (СИД) и т.д. Пассивные детекторы регистрируют излучение среднего и дальнего ИК диапазона спектра от объектов, имеющих более высокие температуры по сравнению с окружающей средой. Оба вида детекторов для обнаружения объектов используют оптическую контрастность.

Оптоэлектронные и ультразвуковые детекторы, а также микроволновые датчики имеют разные области применения. В настоящее время оптоэлектронные устройства применяются, в основном, для качественного, а не количественного обнаружения присутствия движущихся объектов. Другими словами, оптоэлектронные детекторы очень полезны для индикации состояния объекта: движется он или стоит, но они не могут отличить один движущийся объект от другого, поэтому они никогда не используются для точного определения расстояния до объекта и измерения его скорости. Основные области применения оптоэлектронных датчиков движения – охранные системы (для обнаружения грабителей), устройства управления подачей энергии (включение и выключение света), а также, так называемые, «умные дома», в которых они управляют различными бытовыми приборами: кондиционерами, фенами, проигрывателями и т.д. Также они могут быть использованы в роботах, игрушках и т.д. Основными достоинствами оптоэлектронных детекторов движения являются простота и низкая стоимость.

6.5.1. Структуры датчиков

Основная структура оптоэлектронного детектора движения показана на рис. 6.9А. Вне зависимости от типа применяемого чувствительного элемента обязательными компонентами детектора являются: устройство фокусировки (линза или фокусирующее зеркало), светочувствительный элемент и пороговый компаратор. Оптоэлектронный детектор движения похож на фотокамеру. Его система фокусировки также создает на фокальной плоскости изображение поля наблюдения. Хотя в нем нет механического затвора, роль пленки в нем играет светочувствительный элемент. Этот элемент преобразует сфокусированный свет в электрический сигнал.

Рассмотрим детектор движения, смонтированный в комнате. Фокусирующая линза создает на фокальной плоскости, где расположен светочувствительный элемент, изображение комнаты. Если комната пустая, изображение является статическим, и выходной сигнал этого элемента является постоянным. Когда злоумышленник проникает в комнату и перемещается в ней, его изображение на фокальной плоскости также движется. В определенный момент времени тело злоумышленника попадает в зону, расположенную под углом α к оси линзы, и его изображение перекрывает часть светочувствительного элемента. Здесь необходимо понять, что на выходе детектора сигнал появляется только тогда, когда изображение объекта попадает на чувствительную поверхность датчика: нет перекрытия – нет сигнала обнаружения. Считаем, что тело злоумышленника создает изображение, электромагнитный поток излучения от которого отличен от потока в стационарном режиме. Тогда выходной сигнал светочувствительного элемента изменится на величину V. Другими словами, для того чтобы обнаружить движущийся объект, его оптическая контрастность должна отличаться от контрастности окружающих предметов.

На рис. 6.9Б показан процесс сравнения выходного сигнала с двумя пороговыми напряжениями, выполняемый на оконном компараторе. Назначение компаратора – преобразование аналогового сигнала V в двухуровневый дискретный сигнал, в котором 0 соответствует отсутствию движения объекта, а 1 – обнаружению движущегося объекта. В большинстве случаев сигнал V, снимаемый с чувствительного элемента, перед подачей на компаратор необходимо предварительно усиливать. В момент, когда изображение движущегося объекта попадает на светочувствительный элемент, напряжение на его выходе V пересекает один из уровней компаратора. На выходе компаратора при этом вырабатывается положительное напряжение, соответствующее «1», что означает обнаружение движущегося объекта в зоне наблюдения. Принцип действия этой схемы такой же как у пороговых устройств, применяемых в других типах детекторов присутствия, описанных ранее.

Из рис. 6.9. видно, что оптоэлектронный детектор обладает довольно узкой зоной наблюдения. Если злоумышленник продолжит свое движение в одном направлении, его изображение никогда больше не попадет на чувствительный элемент, и хотя он будет еще находится в помещении, на выходе компаратора будет нулевой сигнал. Величина зоны наблюдения определяется площадью чувствительного элемента, а ее можно менять только в ограниченных пределах, поэтому для большинства случаев требуется применение датчиков, имеющих другие структуры, описанные далее.

6.5.1.1. Составные датчики

В фокальной плоскости фокусирующего зеркала или линзы располагается несколько детекторов. При этом каждый детектор отслеживает узкую зону наблюдения, а все вместе они охраняют довольно большую площадь. Все детекторы либо поочередно подключаются к логическому устройству, либо имеют внутренние соединения друг с другом, обеспечивающие их согласованную работу.

6.5.1.2. Датчики со сложной формой чувствительного элемента

Если площадь чувствительного элемента детектора недостаточно велика для наблюдения за всей требуемой территорией, он может быть оптически разбит на несколько меньших частей. При этом будет получен эквивалент схемы составного датчика. Например, светочувствительный элемент может иметь форму, показанную на рис. 6.10А. Каждая часть такой структуры ведет себя как отдельный детектор излучения. Все эти детекторы соединяются либо последовательно, либо параллельно для формирования единой серпантинной структуры, с выхода которой и снимается сигнал (например, напряжение *v*), подаваемый в последующие логические устройства. При движении объекта его изображение перемещается вдоль поверхности сложного светочувствительного элемента, попеременно пересекая его рабочие и нерабочие участки. В результате этого с выхода детектора снимается переменный сигнал *v*. Площадь каждого участка светочувствительного элемента должна быть сравнима с величиной изображения объекта.

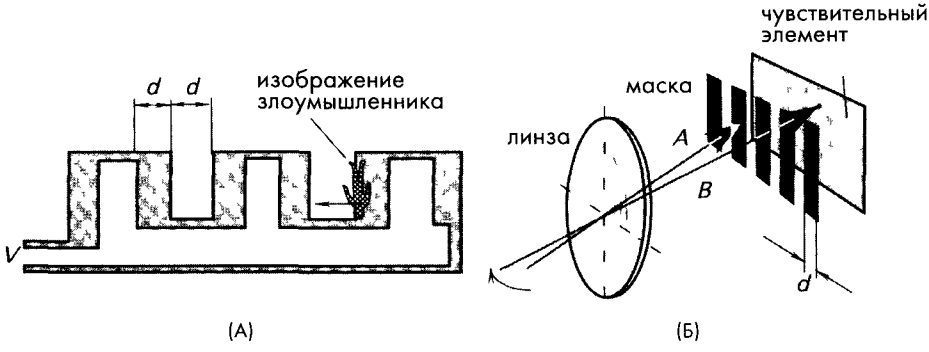


Рис. 6.10. А – светочувствительный элемент со сложной формой, Б – маска для деления изображения

6.5.1.3. Искажение изображения

Вместо того чтобы усложнять форму чувствительного элемента, можно разделить изображение всей наблюдаемой зоны на несколько частей. Для этого перед достаточно большим чувствительным элементом помещают специальную маску, имеющую форму, показанную на рис. 6.10Б. Маска является непрозрачной, поэтому изображение на поверхности детектора будет появляться только в местах, где ее нет. Принцип действия такого устройства такой же как у датчика со сложной формой чувствительного элемента, описанного в разделе 6.5.1.2.

6.5.1.4. Фасетный фокусирующий элемент

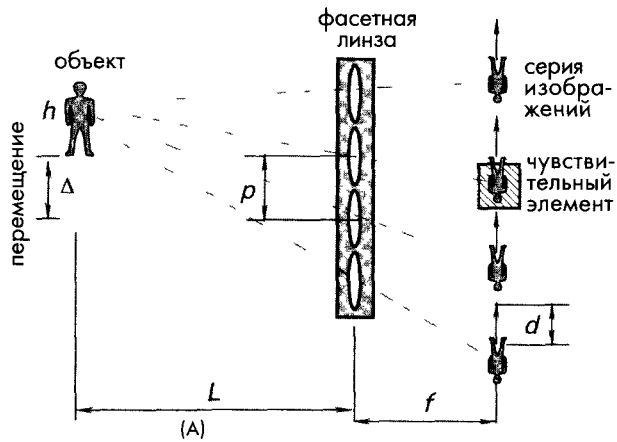
Другой способ расширения поля обзора при использовании детектора малой площади заключается в применении составных фокусирующих элементов. Для этого линза или фокусирующее зеркало делятся на несколько маленьких зеркал или линз со скошенными гранями, называемых фасетами. Каждый фасет создает свое собственное изображение, как показано на рис. 6.11А. При движении объекта его изоб-

ражение будет также перемещаться по чувствительному элементу, в результате чего на его выходе сформируется переменный сигнал. Комбинируя различные фасеты, можно получить любую желательную форму зоны наблюдения, как в вертикальной, так и в горизонтальных плоскостях. Применяя правила геометрической оптики, можно определить местоположение каждого фасета линзы или зеркала, их фокусные расстояния, количество фасетов и шаг между ними (расстояние между оптическими осями двух соседних фасетов). Для оценки фокусного расстояния f каждого фасета и шага между соседними элементами p можно применять следующие формулы:

$$f = \frac{Ld}{\Delta}, \tag{6 10}$$

$$p = 2nd, \tag{6.11}$$

где L – расстояние до объекта, d – ширина чувствительного элемента, n – количество чувствительных элементов (равномерно расположенных), а Δ – минимальное перемещение объекта, которое необходимо детектировать. Пусть в состав датчика входят два чувствительных элемента шириной $d = 1$ мм, расположенных на расстоянии 1 мм друг от друга. При этом необходимо с расстояния $L = 10$ м обнаруживать перемещение объекта, равное $\Delta = 25$ см. Тогда, применяя формулы (6.10) и (6.11), можно найти фокусное расстояние каждого фасета: f = (1000 см)×(0.1см)/ /25 см=4 см и расстояние между оптическими осями двух соседних фасетов: $p = 8$ мм.



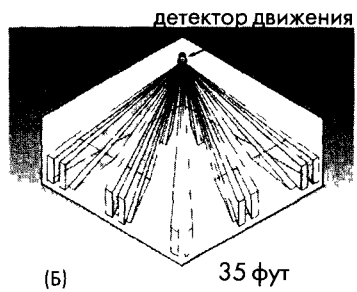


Рис. 6.11. А – фасетная линза создает вокруг чувствительного элемента серию изображений, Б – охраняемая зона сложной конфигурации, созданная составной фасетной линзой

Комбинируя фасеты, можно реализовать линзу, охватывающую большую площадь наблюдения (рис 6 11Б), в которой каждый фасет ответственен за сравнительно узкий участок охраняемой территории Все фасеты проектируют изображение объекта на один и тот же чувствительный элемент При движении объекта он пересекает границы разных зон, в результате чего происходит модуляция выходного сигнала датчика

6.5.2. Детекторы движения, работающие в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра

Большинство объектов (за исключением очень горячих) излучают электромагнитные волны только дальнего ИК спектрального диапазона Поэтому для работы рассматриваемой группы детекторов, как правило, необходим дополнительный источник света, освещающий объект Свет отражается от объекта в направлении фокусирующего устройства, входящего в состав детектора Источниками света могут быть солнечный свет или невидимый свет ближнего ИК диапазона от специальных излучателей Разработка детекторов, работающих в диапазоне видимого света, началось в 1932 году, когда радаров еще не было, а потребность обнаружения летающих объектов (аэропланов) уже появилась Один из первых детекторов аэропланов был реализован в виде фотокамеры, фокусирующая линза которой, выполненная из стекла, была направлена в небо Изображение летящего самолета фокусировалось на селеновый фотодетектор, реагирующий на изменение оптической контрастности образа неба Естественно, что такой детектор мог работать только в дневное время и при отсутствии облаков Такие ограничения явно не способствовали широкому распространению этих детекторов Другой тип детекторов движения, работающих в видимом спектральном диапазоне, был разработан для устройств контроля освещения в помещениях [5] и управления интерактивными игрушками [6]

Для отключения света в комнате при отсутствии в ней людеи можно использовать детектор движения видимого диапазона (например, Motion Switch, выпускаемый Intermatic, Inc, IL) в комбинации с таймером и мощным бесконтактным реле Детектор работает, когда комната освещена Видимый свет переносит достаточно большую энергию, и поэтому может быть обнаружен при помощи фотогальванических элементов или фоторезисторов, обладающих довольно хорошей чувствительностью Поэтому оптическая система таких детекторов, как правило, значительно проще, чем в других оптоэлектронных датчиках В детекторе Motion Switch фокусирующее устройство реализовано в виде точечной линзы (рис 6 12В) Такая линза представляет собой крошечное отверстие в непрозрачной фольге Для предотвращения дифракции световых волн диаметр этого отверстия должен быть значительно больше самой длиной детектируемой длины волны На самом деле детектор Motion Switch имеет линзу с тремя отверстиями, апертура каждого из которых равна 0 2 мм (рис 6 12В) Такая линза теоретически обладает бесконечно большим диапазоном глубины фокусировки, что позволяет располагать фотодетектор на любом расстоянии от нее Как правило, это расстояние определяется исходя из максимального перемещения объекта и размеров используемого фоторезистора Применяемый фоторезистор имеет серпантинную конфигурацию

чувствительного элемента (рис. 6.12А). Он подключается к схеме, реагирующей только на переменную составляющую выходного сигнала. Когда комната освещена, датчик работает как миниатюрная фотокамера: изображение зоны обзора формируется на поверхности фоторезистора. Перемещение людей в комнате меняет оптическую контрастность этого изображения, что приводит к изменению сопротивления фоторезистора, а, следовательно, и к модуляции электрического тока, проходящего через него. Этот модулированный сигнал усиливается и подается на компаратор, где сравнивается с заранее установленным пороговым уровнем. При превышении этого уровня компаратор вырабатывает электрические импульсы, сбрасывающие таймер, установленный на 15 мин. Если в течение 15 минут не было обнаружено никаких движений, таймер отключает свет в комнате. После этого свет может быть включен только ручным способом, поскольку данный детектор движения в темноте не работает

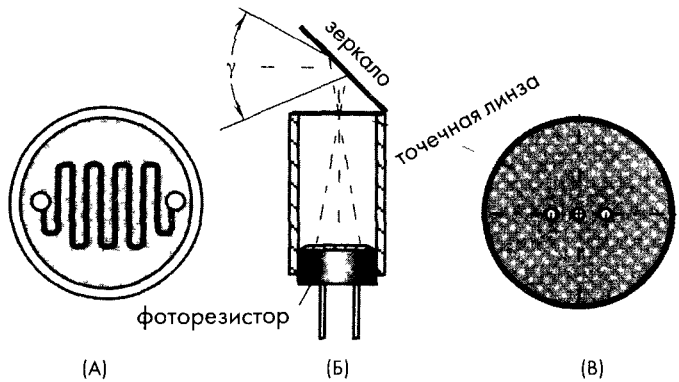


Рис. 6.12. Простой оптический детектор движения, используемый в системах отключения света и интерактивных игрушках А – чувствительная поверхность фоторезистора, Б – ровное зеркало и точечная линза формируют изображение на поверхности фоторезистора, В – точечная линза

6.5.3. Детекторы движения, работающие в дальнем ИК диапазоне

Другая разновидность детекторов движения работает в оптическом диапазоне тепловых излучений, который также называется дальним ИК диапазоном Такие детекторы реагируют на изменение теплового потока, поступающего на чувствительный элемент, возникающее при движении объекта [7-9]. В этом разделе будет обсуждаться метод обнаружения двигающихся людей, хотя при небольших доработках этот способ применим и для горячих, и для холодных объектов.

Принцип теплового метода детектирования движущихся объектов основан на физической теории излучения электромагнитных волн телами, температура которых превышает уровень абсолютного нуля. Фундаментальные положения этой теории описаны в разделе 3.12.3 главы 3. Желательно, чтобы читатели ознакомились с ними перед тем, как приступать к изучению данного раздела.

Для этого метода важно, чтобы температура поверхности объекта отличалась от температуры окружающей среды, т.е. необходимо, чтобы существовал температурный контраст. Интенсивность теплового излучения, выделяемого с поверхности любых объектов, определяется законом Стефана-Больцмана (уравнение (3.133)). Если температура объекта выше температуры окружающей среды, его тепловое

излучение смещается в сторону коротких длин волн и интенсивность его усиливается. Многие из объектов, движения которых необходимо обнаруживать, являются неметаллами, поэтому излучаемая ими тепловая энергия распределяется достаточно равномерно в виде полусферы (рис. 3.45А главы 3). Более того, почти все диэлектрические объекты обладают высокой излучающей способностью. Кожа человека является одним из лучших излучателей, ее коэффициент излучения превышает 90% (см. Приложение). Большинство тканей также имеют высокую излучающую способность – 0.74...0.95. В следующих разделах будут описаны два типа детекторов движения дальнего ИК диапазона. Первый из них реализован на основе пассивного ИК датчика, а второй использует активные ИК элементы.

6.5.3.1. Детекторы движения на основе пассивных ИК элементов

Такие детекторы часто применяются в охранных системах и устройствах управления освещением. Пассивные ИК (ПИК) чувствительные элементы реагируют на излучения дальнего ИК спектрального диапазона с длинами волн в интервале 4...20 мкм. Этот интервал соответствует тепловому излучению человеческого тела. В таких детекторах могут принципиально использоваться три типа чувствительных элементов: терморезисторы, термоэлементы и пироэлектрики. Но благодаря своей простоте, низкой стоимости, высокой чувствительности и широкому динамическому диапазону, в детекторах движения чаще всего применяются пироэлектрические элементы. Пироэлектрический эффект описан в разделе 3.7 главы 3, а в разделе 14.6.3 главы 14 рассматриваются некоторые типы пироэлектрических датчиков. Здесь, в этом разделе, приведены примеры практического использования этого эффекта при разработке датчиков.

Пироэлектрические материалы вырабатывают электрические заряды в ответ ни тепловой поток, проходящий через них. В упрощенном виде можно считать, что пироэлектричество появляется вследствие теплового расширения материалов (рис. 6.13). Поглощенное тепло заставляет расширяться переднюю часть чувствительного элемента. Поскольку все пироэлектрики также обладают пьезоэлектрическими свойствами, возникшее в результате расширения напряжение приводит к появлению зарядов на электродах элемента. Это означает, что между электродами, расположенными с двух сторон элемента, возникает разность потенциалов. К сожалению, пьезоэлектрический эффект здесь играет отрицательную роль. Поскольку если на датчик действуют паразитные внешние механические силы, они также приводят к появлению зарядов на электродах, которые часто трудно отличить от полезного сигнала.

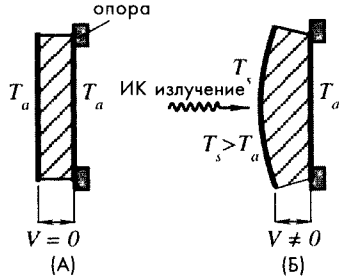


Рис. 6.13. Упрощенная модель пироэлектрического эффекта, как следствия пьезоэлектричества. Первоначально элемент имеет равномерную температуру (А); под действием теплового излучения передняя сторона элемента расширяется, что приводит к появлению на электроде зарядов (Б)

Для того чтобы разделить заряды, формируемые тепловым и пьезоэлектрическим способами, пироэлектрические датчики обычно изготавливают симметричными (рис. 6.14А), т.е. внутри корпуса размещают два абсолютно одинаковых элемента, выходы которых подключают к электронной схеме. При одновременной (синфазной) подаче на эти элементы одинаковых входных сигналов (помех) они будут взаимно уничтожаться, поэтому на выходе датчика сохранится нулевой (или постоянный) уровень сигнала. Основная идея датчика заключается в том, что тепловой поток, создаваемый при движении объекта, дойдет до чувствительных элементов в разные моменты времени, в результате чего на выходе детектора уровень сигнала изменится.

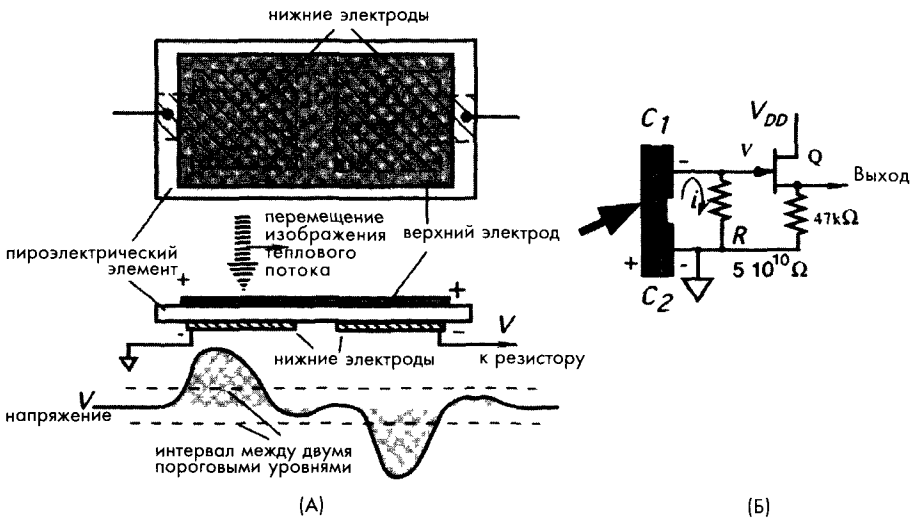


Рис. 6.14. Симметричный пироэлектрический датчик. А – чувствительный элемент, состоящий из переднего (верхнего) электрода и двух нижних электродов, нанесенных на общую подложку. Тепловой поток, от движущегося объекта, перемещается слева направо, формируя переменное напряжение на резисторе R (Б).

Один из способов изготовления симметричного датчика заключается в нанесении двух пар электродов с двух сторон пироэлектрического элемента. Каждая пара формирует конденсатор, заряжаемый либо от теплового потока, либо от механических напряжений. Электроды на верхней стороне датчика объединяются вместе, формируя один непрерывный электрод, в то время как нижние электроды остаются разделенными. Таким образом, получается последовательное соединение двух конденсаторов. В зависимости от стороны пироэлектрического элемента, на которой располагаются электроды, выходной сигнал, возникающий от воздействия теплового потока, будет иметь либо положительную, либо отрицательную полярность. В некоторых случаях для наблюдения за территорией сложной формы может потребоваться применение большего количества чувствительных электродов. Но, попрежнему, для лучшего подавления синфазных помех количество пар электродов

должно быть четным. При этом располагать электроды необходимо геометрически симметрично. Иногда такое соединение называется гребенчатым электродом.

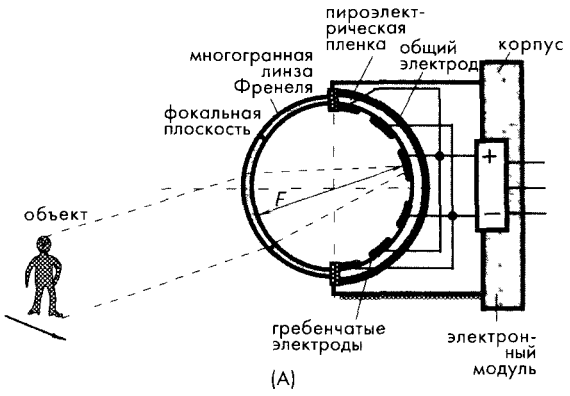
Симметричный чувствительный элемент следует так монтировать на подложке, чтобы обе части датчика при воздействии на них одинаковых внешних факторов вырабатывали идентичные выходные сигналы. В любой момент времени оптический элемент детектора фокусирует тепловое изображение объекта на поверхность только одной части датчика, на которой расположена единственная пара электродов. Очевидно, что при этом заряд возникает только на одной паре электродов, подверженных действию теплового потока. При перемещении теплового изображения объекта от одного электрода к другому ток i, текущий от чувствительного элемента через резистор R (рис. 6.14Б), меняется от нуля до положительного максимума, затем до нуля и до отрицательного максимума и опять до нуля (нижняя часть рис. 6.14А). Полевой транзистор Q с управляющим p-n-переходом используется в качестве преобразователя импеданса. Значение резистора R должно быть очень большим. Рассмотрим следующий пример. Типовой переменный ток, вырабатываемый детектором при обнаружении движущегося человека, составляет порядка 1 пА (10^{-12} А). Если требуется получить на выходе напряжение $v = 50$ мВ, в соответствии с законом Ома величина резистора должна быть: $R = v/i = 50$ ГОм (5×10^{10} Ом). Такой резистор не может быть напрямую включен в электронную схему, поэтому и необходим транзистор Q, выполняющий роль повторителя напряжения, коэффициент усиления которого близок к единице, а выходной импеданс составляет несколько кОм.

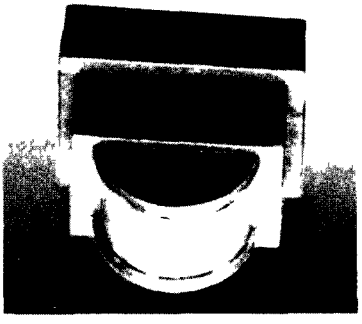
В Приложении перечислены некоторые материалы, обладающие пироэлектрическим эффектом, которые могут быть использованы для изготовления чувствительных элементов. На практике наибольшее распространение получили керамические элементы, что объясняется их низкой стоимостью и простотой изготовления. Пироэлектрический коэффициент керамики зависит от пористости материала, поэтому создавая полости в теле датчика, можно в некоторой степени регулировать его чувствительность. Перспективным материалом является поливинилиден фторид (PVDF), полимерные пленки из которого хотя и не обладают такой же чувствительностью, как твердотельные кристаллы, но имеют неоспоримые достоинства: пластичность и низкую стоимость. К тому же из PVDF можно изготавливать чувствительные элементы разных размеров практически любой формы.

Помимо чувствительных элементов в состав ИК детекторов движения входят фокусирующие устройства. Такими устройствами могут быть параболические зеркала и пластиковые линзы Френеля (раздел 4.6 главы 4). Популярность последних в настоящее время увеличивается, что связано с их низкой стоимостью, возможностью придания им заданной формы и тем, что помимо фокусировки они выполняют функции окон, защищающих внутренние части детектора от влаги и загрязнений.

На рис. 6.15А показан детектор движения, реализованный на основе полиэтиленовой многогранной выпуклой линзы Френеля и чувствительного элемента из PVDF пленки [7]. В этом датчике объединены два метода, описанные выше: использование фасетной линзы и составного электрода. Линза и чувствительный элемент имеют одинаковые радиусы кривизны, равные половине фокусного расстояния f. Это необходимо для того, чтобы активный участок сенсорной пленки всегда находился на фокальной плоскости соответствующей грани линзы.

В состав чувствительного элемента входит пара больших гребенчатых электродов, подсоединенных к положительному и отрицательному входам дифференциального усилителя, расположенного в электронном модуле. Усилитель подавляет синфазные помехи и усиливает напряжение, индуцированное тепловым потоком. На пленку чувствительного элемента со стороны линзы нанесено органическое покрытие, повышающее его поглощающую способность в дальнем ИК спектральном диапазоне. Описываемый детектор обладает хорошей разрешающей способностью (обнаруживает незначительные перемещения объекта на большом расстоянии до него) и очень маленькими размерами (рис. 6.15Б). Миниатюрные детекторы широко применяются в устройствах, где габариты играют решающее значение. Например, в выключателях освещения, где детектор должен монтироваться в стенку переключателя.





(Б)

Рис. 6.15. Детектор движения, работающий в дальнем ИК диапазоне спектра, состоящий из линзы Френеля и пироэлектрического сенсора из PVDF: А – внутренняя структура датчика, Б – внешний вид датчика

6.5.3.2. Анализ эффективности работы пассивного ИК детектора движущихся объектов (ПИК-детектора)

Несмотря на различия в типах применяемых оптических устройств, все ПИК-детекторы построены на одном физическом явлении – пироэлектричестве. Для оценки рабочих характеристик таких датчиков сначала необходимо определить мощность ИК излучений (тепловой поток), которую чувствительный элемент преобразует в электрические заряды. Оптическое устройство фокусирует излучение от объекта в миниатюрный тепловой образ на поверхности сенсора. Энергия от этого образа поглощается чувствительным элементом и конвертируется в тепло. Это тепло, в свою очередь, превращается в пироэлектрическом элементе в электрический ток.

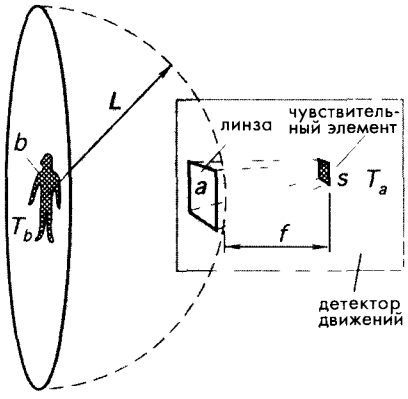


Рис. 6.16. Формирование теплового образа на поверхности чувствительного элемента ПИК-детектора движения

Для оценки уровня мощности излучения на поверхности датчика необходимо сделать несколько предположений:

- Двигающимся объектом является человек, эффективная площадь поверхности которого равна b (рис. 6.16). При этом температура в любой точке его поверхности, выраженная в Кельвинах, равна T_b.
- Объект является источником диффузионного (рассеянного) излучения, т.е. его излучение равномерно распределено внутри полусферы, площадь которой равна $A=2\pi L^2$.
- Фокусирующее устройство позволяет получить четкое изображение объекта, расположенного на любом расстоянии.
- В дальнейших расчетах считаем, что площадь поверхности линзы равна a, а температура сенсора (в Кельвинах) T_a совпадает с температурой окружающей среды.

Полная мощность ИК излучения (тепловой поток), испускаемая объектом, может быть найдена при помощи закона Стефана-Больцмана:

$$\Phi = b\,\varepsilon_a\,\varepsilon_b\,\sigma\left(T_b^{\,4} - T_a^{\,4}\right), \tag{6.12}$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, а ε_b и ε_a – коэффициенты излучения объекта и окружающей среды. Если температура объекта выше температуры окружающей среды, вся излучаемая ИК энергия направлена от него – в открытое пространство. Поскольку объект является источником рассеянного излучения, можно считать, что на равноудаленных от него расстояниях плотность потока одинакова. Другими словами, интенсивность ИК излучения распределена равномерно вдоль сферической поверхности радиуса L.

Считая, что поверхность объекта является идеальным излучателем, а окружающая среда – идеальным поглотителем (т.е. $\varepsilon_b = \varepsilon_a = 1$), можно найти плотность потока излучения на расстоянии L:

$$\phi = \frac{b}{2\pi L^2}\varepsilon_s\sigma\left(T_b^{\,4} - T_a^{\,4}\right), \tag{6.13}$$

где ε_s – коэффициент поглощения чувствительного элемента.

Эффективность линзы (ее коэффициент пропускания) γ теоретически меняется в диапазоне 0...0.92, в зависимости от свойств материала линзы и ее конструкции. Для полиэтиленовых линз Френеля γ лежит в пределах 0.4...0.7. Пренебрегая нелинейностью, вызванной четвертой степенью температур в уравнении (6.13), мощность теплового излучения, поглощенного элементом, можно выразить в виде:

$$\Phi_s = a\gamma\phi \approx \frac{2\sigma\varepsilon_s}{\pi L^2} a\gamma T_a^{\,3}\left(T_b - T_a\right) \tag{6.14}$$

Отсюда видно, что эта мощность обратно пропорциональна квадрату расстояния до объекта и прямо пропорциональна площадям линзы и объекта. Важно отметить, что в случае использования многогранной линзы, под параметром *a* понимается площадь отдельной грани. Если объект теплее сенсора, поток Φ_s является положительным. А если объект холоднее сенсора, поток становится отрицательным, что означает изменение его направления, т.е. тепло переходит от датчика к объекту. В реальной жизни это происходит тогда, когда человек входит в теплую комнату с мороза. В дальнейших рассуждениях будем считать, что поток всегда положительный.

Максимальное рабочее расстояние при заданных условиях определяется по уровню шума детектора. Для надежного обнаружения движений объекта максимальная мощность шума должна быть в 3...5 раз меньше уровня минимального сигнала.

Пироэлектрические датчики являются преобразователями потока тепловой энергии в электрический заряд. При передаче тепловой энергии всегда формируется градиент температур вдоль толщины чувствительного элемента. В рассматриваемом детекторе передняя сторона сенсора толщиной *h* обращена к линзе, а обратная сторона направлена на внутреннюю стенку корпуса датчика, температура которого обычно равна температуре окружающей среды, т.е T_a. На переднюю сторону сенсора нанесено специальное покрытие для увеличения его коэффициента поглощения (в идеале до 1). Когда передняя часть сенсора поглощает тепловой поток Φ_s, ее температура увеличивается, и тепло начинает распространяться к его задней части. Поскольку чувствительный элемент обладает пироэлектрическими свойствами, в ответ на проходящий через него тепловой поток на его поверхности начинают образовываться электрические заряды.

Температура чувствительного элемента при прохождении через него потока ИК излучения меняется со скоростью, определяемой выражением:

$$\frac{dT}{dt} \approx \frac{\Phi_s}{C}, \tag{6.15}$$

где Φ_s – мощность поглощенного излучения, *C* – теплоемкость элемента, *t* – время. Это уравнение справедливо только в течение очень короткого интервала времени (практически только в начальный момент, когда на сенсор начинает действовать тепловой поток), поэтому оно используется лишь для оценки величины сигнала. Электрический ток, вырабатываемый чувствительным элементом, может быть найден из фундаментальной формулы:

$$i = \frac{dQ}{dt}, \tag{6.16}$$

где *Q* – электрический заряд, образованный на электродах чувствительного элемента. Величина этого заряда определяется пироэлектрическим коэффициентом сенсора *P*, его площадью *s* и перепадом температуры *dT*:

$$dQ = PsdT. \tag{6.17}$$

Тепловая емкость элемента C может быть получена из выражения:

$$C = csh, \tag{6.18}$$

где c – удельная теплоемкость, s – площадь, а h – толщина чувствительного элемента. Подставляя уравнения (6.15), (6.17) и (6.18) в выражение (6.16), оценим пиковый ток, генерируемый сенсором в ответ на падающий тепловой поток:

$$i = \frac{PsdT}{dt} = \frac{Ps\Phi_s}{csh} = \frac{P}{hc}\Phi_s \tag{6.19}$$

Для вывода соотношения между током и движением объекта выражение (6.14) надо подставить в (6.19):

$$i = \frac{2Pa\sigma\gamma}{\pi hc} bT_a^{\,3}\frac{\Delta T}{L^2}, \quad \text{где } \Delta T = (T_b - T_a). \tag{6.20}$$

На основе анализа уравнения (6.20) можно сделать несколько выводов. Первое отношение этого выражения характеризует детектор, а оставшаяся часть – объект. Пироэлектрический ток прямо пропорционален разности температур (тепловой контрастности) между объектом и окружающей средой. Он также пропорционален площади поверхности объекта, направленной в сторону детектора. Несмотря на третью степень, влияние температуры T_a на величину тока невелико. Чем тоньше пироэлектрический элемент, тем выше чувствительность детектора. Площадь линзы напрямую связана с амплитудой сигнала. С другой стороны, если линза фокусирует на чувствительный элемент целое изображение объекта, площадь датчика не влияет на величину пироэлектрического тока.

Для дальнейшего анализа уравнения (6.20) найдем напряжение на резисторе R, которое можно использовать для детектирования движения объекта. Считаем, что чувствительный элемент изготовлен из PVDF пленки и обладает следующими свойствами: $P = 25$ мкКл/К·м^2, $c = 2.4 \cdot 10^6$ Дж/м^3 ·К, $h = 25$мкм. При этом площадь линзы равна $a = 1$ см^2, $\gamma = 0.6$, $R = 10^9$Ом (1 ГОм). Площадь поверхности объекта $b = 0.1$ м^2, его температура $T_b = 27$°С, а температура окружающей среды $T_a = 20$°С. Тогда при помощи уравнения (6.20) можно найти зависимость выходного напряжения от расстояния L от детектора до объекта. Полученная зависимость показана на рис. 6.17.

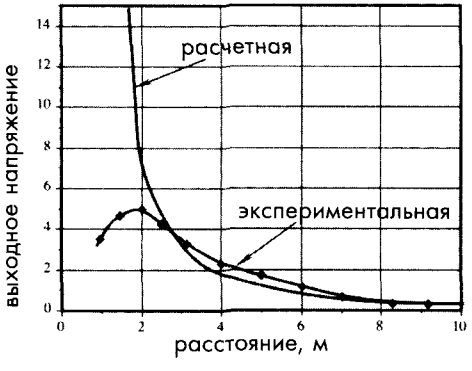


Рис. 6.17. Расчетная и экспериментальная зависимости амплитуды выходного сигнала ПИК детектора движения от расстояния до объекта

Графики на рис. 6.17 справедливы при условии, что изображение объекта не превышает площадь чувствительного элемента, и что оптическая система обеспечивает четкое изображение объекта, независимо от расстояния до него. На практике эти условия часто не выполняются, особенно при небольших расстояниях до объекта, где изображение объекта не только выходит за границы фокальной плоскости, но также может попасть на нерабочие участки симметричного чувствительного элемента. Способ снижения амплитуды сигнала при коротких расстояниях до объекта очевиден: нельзя допускать, чтобы напряжение превышало соответствующие расчетные значения.

Литература

1 Blumenkrantz, S Personal and Organisational Security Handbook *Government Data Publications, Washington, DC, 1989*

2 *Ryser, P and Pfister, G Optical fire and security technology Sensor principles and detection intelligence In* Transducers '91 International conference on Solid-State Sensors and Actuators Digest of Technical Papers *IEEE, New York, 1991, pp 579-583*

3 *Long, D J Occupancy detector apparatus for automotive safety system U S patent 3,898,472, 1975*

4 *Fraden, J Apparatus and method for detecting movement of an object, U S patent 5,019,804, 1991*

5 *Fraden, J Motion discontinuance detection system and method U S patent 4,450,351, 1984*

6 *Fraden, J Toy including motion-detecting means for activating same U S patent 4,479,329, 1984*

7 *Fraden, J Motion detector U S patent 4,769,545,1988*

8 *Fraden, J Active infrared motion detector and method for detecting movement U S patent 4,896,039, 1990*

9 *Fraden, J Active far infrared detectors In* Temperature Its Measurement and Control in Science and Industry *American Institute of Physics, New York, 1992, Vol 6, Part 2, pp 831-836*

ГЛАВА 7

ДЕТЕКТОРЫ ПОЛОЖЕНИЯ, ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И УРОВНЯ

«...Если Вы будете все время двигаться только в одном направлении, мы всегда сможем оттеснить Вас туда, где весь Ваш здравый смысл не будет иметь никакого значения».

из речи Юлия Цезаря к своим сенаторам

Определение положения физических объектов и их перемещений является важной функцией многих автоматизированных систем. Она необходима практически для всех АСУТП, систем управления транспортными потоками, охранных систем, без нее не может обойтись ни один робот. Под определением *положения* физического объекта понимается нахождение его координат (линейных или угловых) по отношению к заданной точке. Под *перемещением* объектов подразумевается их передвижение из одного положения в другое, находящееся от первого на определенном расстоянии или под определенным углом. Другими словами, перемещение всегда определяется по отношению к исходному положению объекта.

Для обнаружения опасных расстояний между двумя объектами обычно применяются детекторы *сближения*. Такие детекторы, по существу, являются пороговыми устройствами, реализованными на базе датчиков положения объекта. Датчики положения – это, как правило, линейные устройства, выходные сигналы которых соответствуют расстоянию между объектом и опорной точкой. Детекторы сближения являются более простыми устройствами, сигналы на выходе которых появляются только в случае обнаружения критического расстояния до объекта. Например, во многих роботах и движущихся механизмах автоматизированных систем применяется очень простой, но очень надежный датчик сближения – концевой выключатель, в состав которого входит пара либо нормально замкнутых, либо нормально разомкнутых контактов. Когда объект при своем движении механически размыкает или замыкает эти электрические контакты, концевой выключатель посылает сигнал в управляющее устройство. Этот сигнал указывает на то, что объект достиг своего конечного положения. Однако контактные переключатели имеют ряд недостатков: высокую механическую нагрузку на движущиеся объекты, гистерезис и т.д.

Детекторы перемещений часто являются составными частями более сложных датчиков, для которых обнаружение движущихся объектов – только одна из нескольких ступеней процесса преобразования сигнала (см. рис. 1.1. главы 1). Пример такого составного преобразователя – датчик давления, в котором давление приводит к перемещению диафрагмы, а перемещение диафрагмы, в свою очередь, вызывает изменение выходного электрического сигнала. Из приведенных примеров видно, что датчики перемещений, некоторые из которых описаны в данной главе, не только применяются самостоятельно, но и входят в состав многих других детекторов, рассматриваемых в других главах.

Большинство датчиков положения и перемещений являются статическими устройствами, быстродействие которых, как правило, не сказывается на рабочих характеристиках систем. Однако, производители таких датчиков обычно приводят в документации величину максимальной скорости реакции. Но в этой главе рассматриваются только статические датчики. Динамические датчики, чьи выходные сигналы, по определению, являются временными функциями, будут описаны в следующих главах.

Перед тем как приступить к разработке или выбору детектора положения и перемещения, необходимо ответить на следующие вопросы:

1. Какова величина и тип измеряемых перемещений? (существует два типа перемещений: угловой и линейный)
2. Какой должна быть разрешающая способность и точность?
3. Из чего изготовлен объект, перемещение которого необходимо измерить? (из металла, пластмассы, жидкости, ферромагнитных материалов и т.д)
4. Какой размер пространства отведен для монтажа датчика?
5. Каким должен быть диапазон измерений?
6. В каких условиях окружающей среды предстоит работать датчику? (влажность, температура, источники помех, вибрация и т.д.)
7. Какой должна быть потребляемая мощность датчика?
8. Каким может быть срок службы датчика? (этот параметр тесно связан с продолжительностью службы всей системы)
9. Какое количество датчиков необходимо изготовить? (ограниченное число, среднее количество, серийный выпуск)
10. Какой должна быть стоимость датчика?

Тщательный предварительный анализ помогает не допустить нежелательных промахов в дальнейшем.

7.1. Потенциометрические датчики

Датчики положения и перемещений часто реализуются на основе линейных или поворотных *потенциометров*. Принцип действия таких устройств основан на уравнении (3.54) главы 3. Из этого уравнения следует, что сопротивление проволочного резистора зависит от длины провода. Таким образом, если перемещение объекта будет связано с изменением положения ползунка потенциометра, получится устройство, контролирующее положение объекта, т.е. детектор перемещений. Потенциометрические преобразователи относятся к активным устройствам, поскольку для определения величины сопротивления через них должен протекать электри-

ческий ток, т.е. они нуждаются в дополнительном источнике возбуждения (например, в источнике постоянного тока). На рис. 7.1А показана принципиальная схема потенциометрического датчика перемещений. На практике процедуру измерения сопротивления заменяют процедурой определения падения напряжения на этом сопротивлении, которое для линейного потенциометра всегда пропорционально величине перемещения d:

$$V = E\frac{d}{D}, \tag{7.1}$$

где D – величина максимально возможного перемещения, а E – напряжение, приложенное к потенциометру (сигнал возбуждения). Здесь предполагается, что интерфейсная схема не создает никакой нагрузки. При невыполнении этого условия нарушается линейность зависимости между положением ползунка и выходным напряжением. В дополнение к этому, выходной сигнал пропорционален напряжению возбуждения, которое, если не является стабилизированным, может быть источником существенных погрешностей. Также следует отметить, что поскольку сопротивление потенциометра не входит в уравнение (7.1), датчики данного типа являются относительными устройствами (см. главу 4). Это означает, что их стабильность (например, в широком температурном диапазоне) практически не влияет на точность измерений. В маломощных датчиках желательно использовать высокоимпедансные потенциометры, однако при этом необходимо учитывать влияние подключаемой нагрузки. Поэтому часто на выходе таких схем приходится ставить повторители напряжений. Подвижный контакт потенциометра обычно электрически изолирован от чувствительной оси.

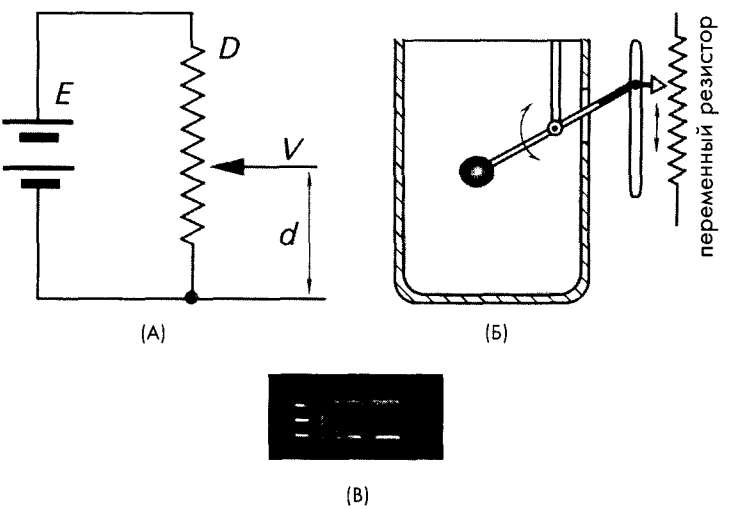


Рис. 7.1. А – потенциометрический датчик положения, Б – гравитационный датчик уровня жидкости с поплавком, В – линейный потенциометр *(напечатано с разрешения Piher Group, Tudela, Spain)*

Потенциометрический датчик, показанный на рис. 7.2А, имеет следующий недостаток. Подвижный контакт, двигаясь вдоль обмотки, может перемыкать то один, то два витка переменного резистора, что приводит к неравномерности шагов выходного напряжения или переменной разрешающей способности (рис. 7.2Б). Поэтому при использовании проволочного потенциометра из N витков можно говорить только о среднем разрешении n:

$$n = \frac{100}{N\%}. \tag{7.2}$$

Объект затрачивает усилия для перемещения ползунка потенциометра, затраченная энергия выделяется в форме тепла. Как правило, проволочные потенциометры изготавливаются из тонкого провода диаметром порядка 0.01 мм. Хороший потенциометр обеспечивает среднюю разрешающую способность около 0.1% от полной шкалы измерения, в то время как разрешение высококачественного пленочного потенциометра ограничивается только неоднородностью резистивного материала и шумовым порогом интерфейсной схемы. Потенциометры с непрерывным разрешением изготавливаются из проводящей пластмассы, углеродных пленок, металлических пленок или смеси металла и керамики, известной под названием *кермет*. Подвижные контакты прецизионных потенциометров изготавливаются из качественных сплавов металлов. Многооборотные угловые потенциометры измеряют перемещения в диапазоне 10°...3000°. Большинству потенциометров присущи следующие недостатки:

1. Значительная механическая нагрузка (трение).
2. Необходимость обеспечения механического контакта с объектом.
3. Низкое быстродействие.
4. Трение и напряжение возбуждения, приводящие к нагреву потенциометра.
5. Низкая устойчивость к факторам окружающей среды.

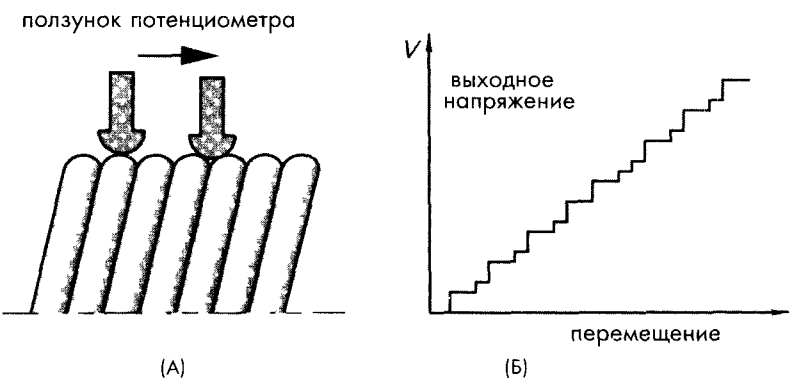


Рис. 7.2. Недостатки проволочных потенциометров: А – ползунок потенциометра может перемыкать одновременно два витка, Б – неравномерность шагов напряжения

7.2. Гравитационные датчики

К хорошо известным гравитационным детекторам уровня относятся датчики, используемые в туалетных бачках. Главным элементом таких преобразователей является поплавок – устройство, обладающее меньшей чем у воды плотностью. В большинстве бачков поплавок напрямую связан с водопроводным краном, и в зависимости от уровня воды открывает или перекрывает его. Поплавок, по своей сути, является детектором положения поверхности воды. Если уровень воды необходимо не только отслеживать, но и измерять, к поплавку можно подключить преобразователь положения: потенциометрический, магнитный, емкостной или какой-либо иной датчик прямого действия (рис. 7.1Б). Следует отметить, что гравитационные датчики восприимчивы к различным помехам, источниками которых являются трение и ускорение. Очевидно, что такие датчики не работают в условиях отсутствия гравитационных сил или в условиях переменной гравитации, например, на космических станциях или реактивных самолетах.

Уровнемеры, определяющие угол наклона объекта относительно направления к центру тяжести Земли, используются при строительстве дорог, в инерционных навигационных системах, в механических станках и других устройствах. Одним из самых старых, но до сих пор очень популярным детектором положения является ртутный переключатель (рис. 7.3А и 7.3Б), состоящий из непроводящей трубки (часто стеклянной), двух электрических контактов и капли ртути. Когда датчик наклонен относительно вектора гравитационной силы в одну сторону, капля ртути перемещается в противоположном от контактов направлении, переключатель размыкается. Изменение ориентации устройства приводит к тому, что ртуть скатывается в сторону контактов, закорачивая их, переключатель при этом замыкается. Ртутные переключатели применяются в бытовых термостатах, где они монтируются на биметаллической катушке, используемой в качестве чувствительного элемента, реагирующего на изменение окружающей температуры. При повышении или понижении комнатной температуры меняется изгиб катушки, который определяет ориентацию переключателя. Замыкание и размыкание контактов ртутного ключа управляет системами нагрева и охлаждения. Очевидный недостаток такой системы заключается в ее постоянном включении-выключении (на техническом языке – в двухпозиционном управлении). Ртутный переключатель является пороговым устройством, меняющим свое состояние в момент, когда угол его поворота превышает заданное значение.

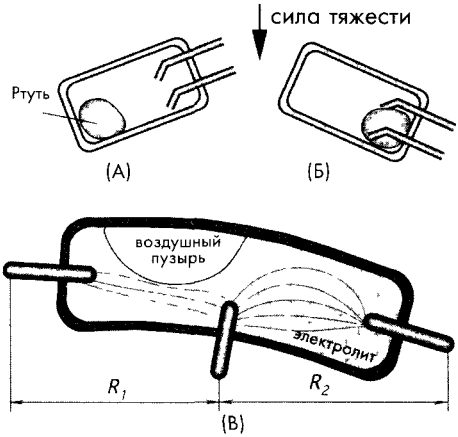


Рис. 7.3. Гравитационные датчики: А – ртутный переключатель в разомкнутом состоянии, Б – ртутный переключатель в замкнутом состоянии, В – электролитический детектор наклона

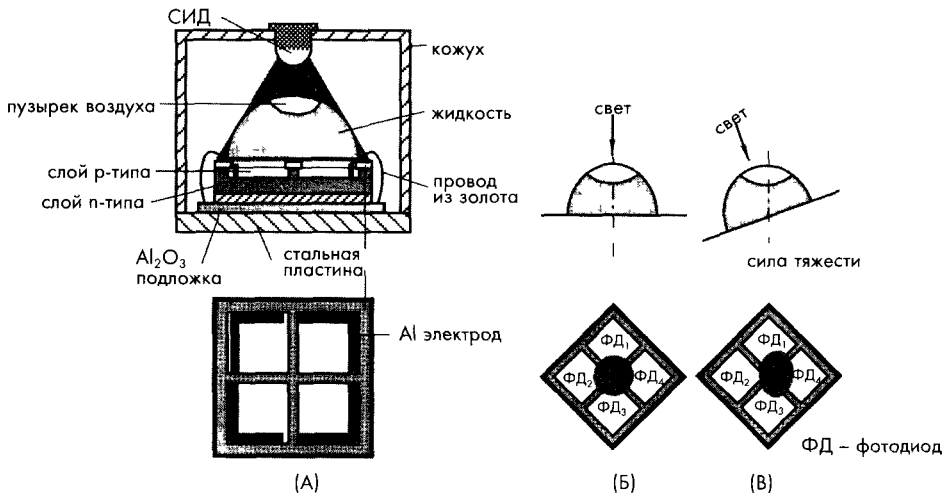


Рис. 7.4. Оптоэлектронные датчики наклона: А – конструкция, Б – тень от пузырька воздуха при горизонтальном положении датчика, В – тень от пузырька при его наклонном положении

Для более точного определения угловых перемещений применяются более сложные устройства. На рис. 7.3В показано одно из них, называемое *электролитическим датчиком наклона*. Этот датчик состоит из небольшой, слегка изогнутой стеклянной трубки, частично заполненной электролитом, в которой размещены три электрода: два – на концах, а один – по центру. Находящийся внутри трубки воздушный пузырь перемещается вдоль нее при ее наклоне в ту или другую сторону. В зависимости от расположения пузыря меняются электрические сопротивления между центральным и боковыми электродами. Как только положение трубки перестает быть горизонтальным, пропорционально ее углу наклона меняются и значения сопротивлений. Электроды включаются в мостовую схему, питаемую переменным током.

Электролитические датчики наклона выпускаются несколькими кампаниями (например, The Fredericks Company, Huntingdon Valley, PA) для измерения широкого диапазона углов: $\pm 1^{\circ}...\pm 80^{\circ}$. В зависимости от измеряемого диапазона меняется и степень изогнутости стеклянных трубок.

Еще более точными устройствами для измерения углов наклона являются датчики, реализованные на основе фотодиодной матрицы [1]. Устройства этого типа применяются в строительстве и на механических производствах для определения с высоким разрешением формы сложных объектов. Например, такие детекторы используются для оценки формы дорог и земельных участков, а также контроля равномерности листов стали, что нельзя выполнить традиционными методами. Оптоэлектронный датчик наклона (рис. 7.4А) состоит из светоизлучающего диода (СИД) и спиртового нивелира в форме полусферы, смонтированного на фотодиодной матрице p-n типа. Тень пузырька воздуха в жидкости нивелира проектируется на поверхность фотодиодной матрицы. Если датчик находится в строго горизонтальном положении, тень от пузырька является круглой (рис. 7.4Б), и площади участков тени,

попадающих на разные фотодиоды матрицы, будут равны. При наклоне датчика тень от пузырька принимает вид смещенного от центра эллипса (рис. 7.4В), очевидно, что при этом токи на выходах каждого фотодиода будут разными. Наиболее распространенные датчики имеют следующие технические параметры: диаметр СИД – 10 мм; расстояние между СИД и нивелиром – 50 мм, диаметры стеклянной полусферы и пузырька – 17 и 9 мм. Выходные сигналы диодов преобразуются в цифровой код и калибруются при разных углах наклона. Данные калибровки заносятся в специальные таблицы, используемые вычислительными устройствами при обработке полученных значений. Для определения формы объекта оптоэлектронный датчик поочередно помещается в узлы сетки, образованной равномерно нанесенными на поверхности объекта вертикальными и горизонтальными линиями. В результате этой процедуры находятся координаты x и y угла наклона в каждом узле сетки, по которым компьютер восстанавливает форму объекта.

7.3. Емкостные датчики

Емкостные датчики перемещений имеют широкую сферу применения. Они могут использоваться как самостоятельно для определения положения и перемещения объектов, так и входить в состав других датчиков, в которых перемещения отдельных элементов вызываются воздействием на них различных сил, давления, температуры и т.д. Поскольку емкостные датчики могут измерять перемещения объектов, изготовленных практически из любых материалов, они применяются повсеместно. Из уравнения (3.20), приведенного в главе 3, следует, что емкость плоского конденсатора обратно пропорциональна расстоянию между пластинами. Принцип действия емкостных датчиков основывается либо на изменении геометрии конденсатора (т.е. на изменении расстояния между пластинами), либо на изменении емкости за счет размещения между пластинами различных материалов: электропроводных или диэлектрических. Изменения емкости, как правило, преобразуются в переменный электрический сигнал. Емкостные датчики могут быть однополярными (в их состав входит только один конденсатор), дифференциальными (в их состав входят два конденсатора) или мостовыми (здесь уже используются четыре конденсатора). В случае дифференциальных или мостовых датчиков, один или два конденсатора являются либо постоянными, либо переменными, включенными навстречу друг другу.

В примере, показанном на рис. 7.5, рассматриваются три пластины одинаковой площади A. Эти пластины формируют два конденсатора C_1 и C_2. На две крайние пластины подаются синусоидальные сигналы одинаковой амплитуды, но с разностью фаз, равной 180°. Поскольку оба конденсатора являются одинаковыми, токи через них взаимно уничтожают друг друга, и потенциал центральной пластины практически равен нулю. Теперь рассмотрим ситуацию, когда центральная пластина сместилась вниз на расстояние x (рис. 7.5Б). Это приведет к изменению емкостей конденсаторов C_1 и C_2:

$$C_1 = \frac{\varepsilon A}{x_0 + x}, C_2 = \frac{\varepsilon A}{x_0 - x}. \qquad (7.3)$$

При этом амплитуда сигнала на центральной пластине будет пропорциональна величине перемещения x, а фаза – направлению движения. Амплитуду выходного сигнала можно найти из выражения:

$$V_{out} = V_0\left(-\frac{x}{x_0 + x} + \frac{\Delta C}{C}\right). \tag{7.4}$$

При выполнении условия $x<<x_0$, выходное напряжение практически линейно зависит от перемещения. Второй член суммы соответствует исходному рассогласованию двух конденсаторов и является основной причиной возникновения напряжения смещения выходного сигнала. Краевые эффекты на концах пластин и действие электростатических сил также относятся к причинам появления напряжения смещения. В результате действия силы притяжения или отталкивания между двумя заряженными пластинами, они ведут себя как пружины. Мгновенное значение этой силы определяется выражением:

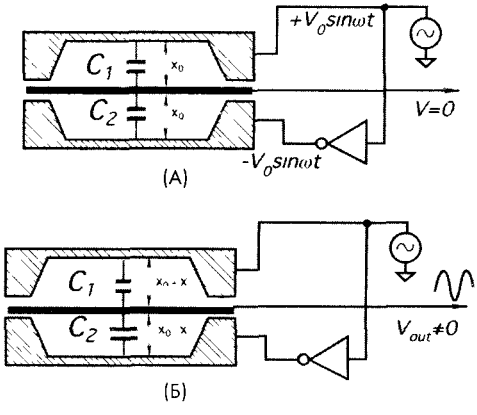


Рис. 7.5. Принцип действия емкостного датчика с плоскими пластинами: А – уравновешенное состояние, Б – неуравновешенное состояние

$$F = -\frac{1}{2}\frac{CV^2}{x_0 + x}. \tag{7.5}$$

На практике при измерении перемещения электропроводного объекта, его поверхность часто играет роль пластины конденсатора. На рис.7.6А показана принципиальная схема однополярного емкостного датчика, в котором одна из пластин конденсатора соединена с центральным проводником коаксиального кабеля, а другой пластиной является сам объект. Отметим, что собственная пластина датчика окружается заземленным экраном, что позволяет улучшать линейность и уменьшать краевые эффекты. Типовой емкостной датчик работает на частотах 3-МГц диапазона и может детектировать перемещения быстро двигающихся объектов. Частотные характеристики такого датчика со встроенным электронным интерфейсом лежат в диапазоне 40 кГц. Емкостные датчики приближения очень эффективны при работе с электропроводными объектами, при этом они измеряют емкость между электродом и самим объектом. Емкостные датчики также достаточно хорошо работают и с непроводящими объектами, но при этом их точность несколько ухудшается. Любой объект, попадающий в окрестность электрода, обладает своими собственными диэлектрическими свойствами, которые изменяют емкость между электродом и корпусом датчика, что, в свою очередь, приводит к появлению выходного сигнала, пропорционального расстоянию между объектом и детектором.

Для повышения чувствительности и снижения краевых эффектов в однополярном емкостном датчике применяют активное экранирование. При этом экран размещается вокруг нерабочих сторон электрода и на него подается напряжение, равное напряжению на электроде. Поскольку напряжения на экране и электроде имеют одинаковые амплитуды и фазы, между ними нет электрического поля, и все компоненты, расположенные за экраном не оказывают никакого влияния на работу датчика. Этод метод экранирования проиллюстрирован на рис. 7.7.

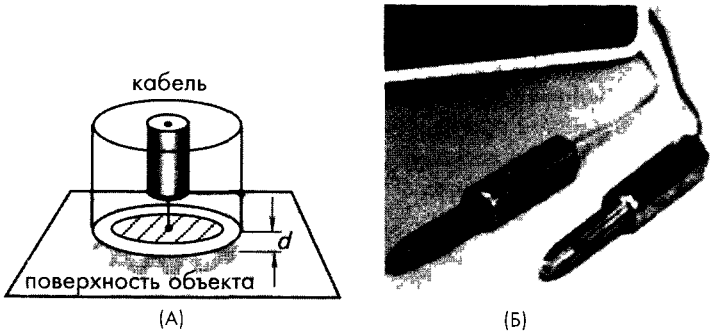


Рис.7.6. Емкостной датчик с экранирующим кольцом: А – поперечное сечение, Б – внешний вид.
(Напечатано с разрешения ADE Technologies, Inc., Newton, MA)

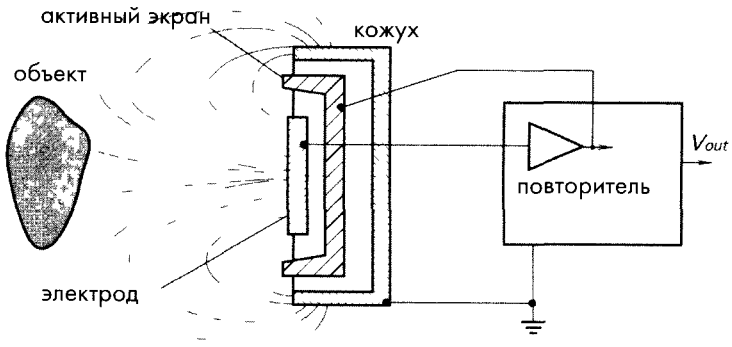


Рис. 7.7. Емкостной датчик, измеряющий расстояние до объекта, с активным экраном вокруг электрода

В последние годы очень популярными стали мостовые емкостные датчики перемещений [2]. На рис. 7.8А показан линейный мостовой емкостной датчик перемещений [3], состоящий из двух групп плоских электродов, расположенных параллельно на фиксированном расстоянии *d*. Для увеличения емкости расстояние между электродами делается достаточно маленьким. Стационарная группа электродов состоит из четырех прямоугольных элементов, а подвижная группа – из двух. Все шесть элементов имеют одинаковые размеры (размер боковой сторо-

ны равен b). Для увеличения диапазона линейности желательно делать размер каждого элемента, как можно, большим (здесь, как правило, начинают сказываться ограничения по механической прочности). Четыре электрода стационарной группы перекрестно соединены друг с другом электрическими проводами, что делается для формирования емкостной схемы мостового типа.

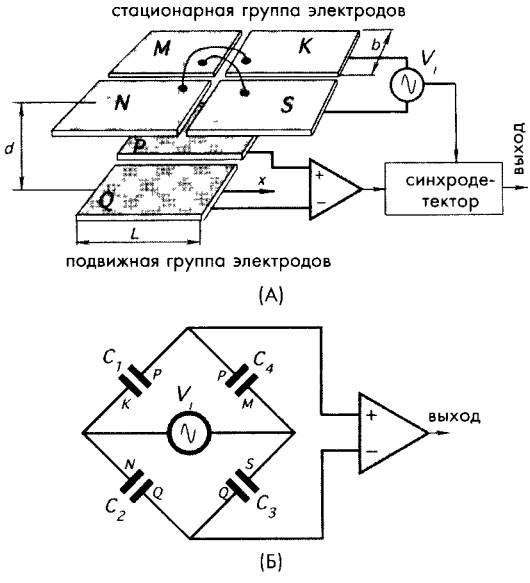


Рис. 7.8. Емкостной датчик мостового типа с параллельными пластинами: А – устройство групп электродов, Б – эквивалентная схема

На мостовую схему подается синусоидальное напряжение с частотой 5...50 кГц. Дифференциальный усилитель усиливает разность напряжений между парой электродов в подвижной группе. Выходной сигнал усилителя поступает на вход синхронного детектора. Емкость конденсатора, сформированного двумя параллельными пластинами, расположенными на фиксированном расстоянии друг от друга, пропорциональна площади части подвижной пластины, расположенной напротив соответствующей области стационарной пластины. На рис.7.8Б показана эквивалентная схема датчика перемещений с конфигурацией емкостного моста. Величина конденсатора C_1 определяется выражением:

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 b}{d}\left(\frac{L}{2} + x\right). \qquad (7.6)$$

Остальные значения емкостей вычисляются по аналогичным уравнениям. Отметим, что емкости конденсаторов, расположенных напротив друг друга, приблизительно равны между собой: $C_1 = C_3$, а $C_2 = C_4$. Нарушение симметричности расположения пластин приводит к разбалансу моста и появлению сигнала на выходе дифференциального усилителя. Емкостная мостовая схема обладает всеми достоинствами, присущими любой мостовой схеме: линейностью и высокой помехозащищенностью. Подобные датчики могут быть реализованы не только с плоскими электродами. Такой метод построения датчиков применим к любым симметричным конфигурациям (например, для построения детекторов вращательного движения).

7.4. Индуктивные и магнитные датчики

Одним из основных достоинств магнитных датчиков перемещений является то, что магнитное поле может проникать через все немагнитные материалы без потери

точности определения расстояния до объекта. Это означает, что какая не была преграда между датчиком и объектом: из нержавеющей стали, алюминия, латуни, меди, пластмассы, камня или дерева, расстояние между ними будет определено практически мгновенно. Другое достоинство магнитных датчиков заключается в том, что они могут работать в суровых условиях окружающей среды и им не страшна коррозия, поскольку и детекторы, и объекты при необходимости покрывают инертными материалами, не оказывающими никакого влияния на магнитные поля.

7.4.1. Линейно-регулируемые дифференциальные трансформаторы (ЛРДТ) и поворотно-регулируемые дифференциальные трансформаторы (ПРДТ)

Некоторые датчики положения и перемещений используют принцип электромагнитной индукции. При движении объекта между двумя катушками меняется магнитный поток. Это изменение потока может быть преобразовано в напряжение. Индуктивные датчики, в которых для изменения сопротивления магнитного контура используются различные ферромагнитные материалы, называются преобразователями магнитного сопротивления [4]. Индукционный преобразователь, как правило, состоит из двух катушек: первичной и вторичной. На первичную катушку подается переменное опорное напряжение V_{ref}, индуцирующее переменное напряжение V_{out} во вторичной катушке (рис. 7.9). Амплитуда V_{out} зависит от величины потокосцепления между двумя катушками. Существует два способа изменения потокосцепления. Один из них – перемещение объекта, изготовленного из ферромагнитного материала, внутри магнитного контура. Это приводит к изменению магнитного сопротивления между катушками, что, в свою очередь, вызывает изменение потокосцепления. На этом принципе реализуются ЛРДТ, ПРДТ и индуктивные датчики приближения. Другой метод заключается в физическом перемещении одной катушки относительно другой.

ЛРДТ – это трансформатор с механически управляемым сердечником. На его первичную обмотку подается синусоидальное напряжение постоянной амплитуды. Применение синусоидального сигнала позволяет избавиться от паразитных гармоник [5]. На вторичных обмотках индуцируется переменное напряжение. В цилиндрическое отверстие между катушками вставляется сердечник из ферромагнитного материала. При этом сердечник не касается обмоток. Две вторичные обмотки включены в противофазе. Когда сердечник расположен в центре трансформатора, выходные сигналы вторичных катушек взаимно уничтожают друг друга, поэтому на выходе трансформатора нет никакого напряжения. Перемещение сердечника в сторону от центрального положения приводит к изменению магнитных потоков во вторичных обмотках. В результате возникшего разбаланса появляется выходное напряжение. Изменение магнитных потоков происходит за счет изменения магнитных

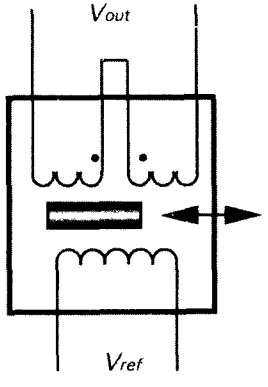


Рис. 7.9. Принципиальная схема ЛРДТ

сопротивлений пространства между катушками. Из всего вышесказанного следует, что величина потокосцепления определяется осевым положением сердечника. В линейной рабочей области в стационарном режиме амплитуда индуцированного сигнала пропорциональна смещению сердечника. Поэтому выходное напряжение может служить мерой перемещения. Выходной сигнал ЛРДТ не только показывает величину перемещения, но и его направление. Направление перемещения определяется фазовым углом между опорным и выходным напряжением. Опорное напряжение вырабатывается стабилизированным генератором. На рис. 7.10 показан ЛРДТ, соединенный с синхронным демодулятором, используемым для выпрямления синусоидального сигнала и представления его в виде выходного постоянного напряжения. Синхронный демодулятор состоит из аналогового мультиплексора и детектора пересечения нулевого уровня, преобразующего синусоидальный сигнал в прямоугольные импульсы, управляющие мультиплексором. Фаза сигнала детектора настраивается так, чтобы при нахождении сердечника в центральном положении выходное напряжение равнялось нулю. Выходной усилитель преобразует выходной сигнал к виду, совместимому с последующими схемами. Величина напряжения на выходе устройства соответствует расстоянию от сердечника до центральной точки, а его знак – направлению смещения.

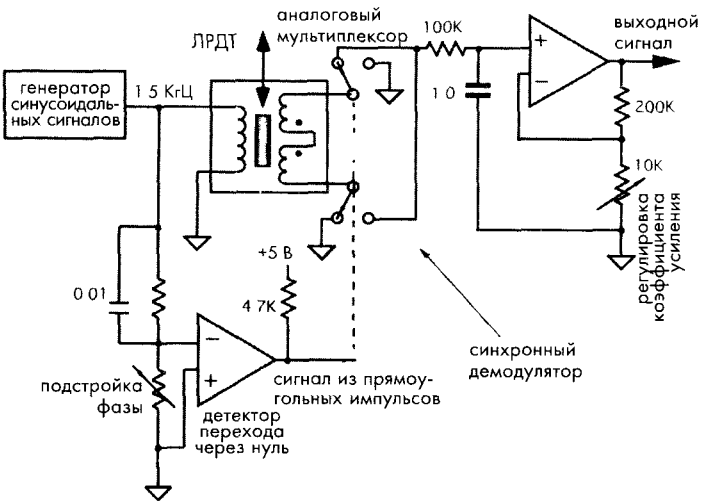


Рис. 7.10. Упрощенная схема датчика перемещений на основе ЛРДТ с интерфейсом

Для точного определения величины перемещений частота генератора должна быть, по крайней мере, на порядок выше максимальной частоты движения. При медленно меняющихся процессах стабилизированный генератор можно заменить подсоединением к сети, частота которой равна либо 60, либо 50 Гц.

ЛРДТ и ПРДТ обладают следующими достоинствами:

1. Датчики, реализованные на их основе, являются бесконтактными устройствами, с практически нулевыми потерями на трение.
2. Незначительным гистерезисом как магнитным, так и механическим.
3. Очень низким выходными импедансом.
4. Высокой помехоустойчивостью.

5. Прочной и надежной конструкцией.
6. Очень высокой разрешающей способностью.

Примером датчиков перемещений на основе ЛРДТ является так называемая *измерительная головка,* применяемая во многих видах тестового оборудования. В таких системах внутренний сердечник ЛРДТ подвешен на пружине, возвращающей измерительную головку в исходное положение.

ПРДТ работают на том же принципе, что и ЛРДТ, за исключением того, что в них используются вращающиеся сердечники. Основное применение ПРДТ – измерение угловых перемещений. Линейный диапазон измерений таких датчиков составляет порядка ±40° с погрешностью нелинейности около 1%.

7.4.2 Вихретоковые датчики

На рис. 7.11А показан датчик, состоящий из двух катушек, использующий *вихревые токи* для детектирования приближения объектов из немагнитных, но проводящих материалов. Одна из катушек является эталонной, а другая – чувствительной, реагирующей на вихревые токи, индуцируемые в проводящем объекте. Вихревые (круговые) токи формируют магнитное поле, направленное навстречу полю чувствительной катушки, приводящее к разбалансу между двумя катушками. Чем ближе объект придвигается к катушке, тем больше изменяется магнитное сопротивление. Толщина слоя, в котором циркулируют вихревые токи, определяется следующим выражением:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}, \qquad (7\ 7)$$

где f – частота, а σ – удельная проводимость объекта. Для эффективной работы датчика толщина объекта должна быть больше величины δ. Очевидно, что вихретоковые детекторы не следует применять для работы с металлизированными пленками и фольгой. Обычно зависимость между импедансом катушки и расстоянием до объекта x является нелинейной и температурочувствительной. Диапазон рабочих частот вихретоковых детекторов лежит в диапазоне 50 кГц...10 МГц.

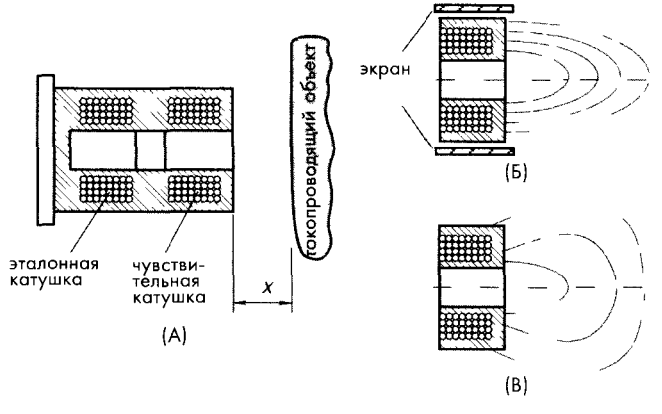


Рис.7.11. А– электромагнитный датчик приближения, Б – экранированный датчик, В – неэкранированный датчик

На рис. 7.11Б и 7.11В показаны две конфигурации вихретоковых датчиков: с экранированием и без. В состав экранированного датчика входит металлический кожух вокруг ферритового сердечника и катушек. Он фокусирует электромагнитное поле на переднюю часть датчика. Это позволяет встраивать датчики такого типа в металлические структуры без изменения диапазона измерений. Неэкранированный датчик обладает чувствительностью к перемещению не только с переднего конца, но и с боковых сторон. Поэтому диапазон измерения неэкранированного датчика несколько выше, чем у экранированного точно такого же диаметра. Для корректной работы в окружении неэкранированного датчика не должно быть металлических объектов.

Вихретоковые датчики могут не только определять положение объектов, но также измерять толщину материалов, толщину непроводящих покрытий, удельную проводимость и дефекты в изделиях. Дефектоскопия – это наиболее популярная область применения датчиков данного типа. В некоторых случаях используются не две, а большее число катушек: одна часть из них имеет очень маленький диаметр (2-3 мм), а другая – довольно большой (25 мм). Некоторые производители изготавливают вихретоковые детекторы с уникальными характеристиками под конкретные заказы (например, Staveley instruments, Inc.,Kennewick, WA). Главное достоинство таких электромагнитных детекторов заключается в том, что они не нуждаются в магнитных материалах, и за счет этого они могут работать достаточно эффективно при высоких температурах (значительно превышающих температуру Кюри для магнитных материалов), поэтому они часто применяются для измерения уровней расплавленных металлов и других проводящих жидкостей. Другое достоинство вихретоковых датчиков – отсутствие механической связи с объектом, поэтому нагрузка практически никак не влияет на их работу.

7.4.3 Поперечный индуктивный датчик

Другое устройство для определения положения объекта называется *поперечным индуктивным датчиком приближения*. Этот датчик применяется для измерения сравнительно небольших перемещений объектов из ферромагнитных материалов Как следует из названия, такой детектор определяет расстояние до объекта, оказывающего влияние на магнитное поле в катушке. Индуктивность катушки измеряется при помощи внешней электронной схемы (рис. 7.12). Принцип действия такого преобразователя основан на явлении самоиндукции. При попадании ферромагнитного объекта в окрестность датчика приближения, его магнитное поле изменяется, что приводит к изменению индуктивности катушки. Поскольку взаимодействие с объектом осуществляется только через магнитное поле, этот преобразователь является бесконтактным устройством, что является несомненным его достоинством. К недостаткам таких датчиков относится то, что они могут работать только с ферромагнитными объектами и измерять лишь небольшие расстояния.

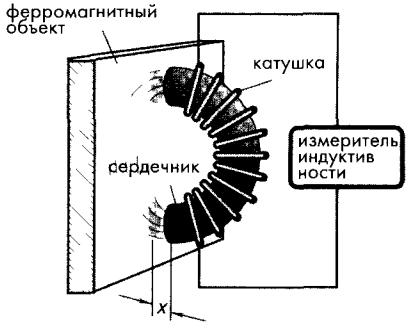


Рис. 7.12. Поперечный индуктивный датчик приближения

На рис. 7.13А показана модифицированная конструкция того же датчика. Для преодоления первого ограничения здесь на перемещающийся объект прикрепляется ферромагнитный диск, а катушка находится в стационарном положении. Существует и другая версия такого устройства: катушка прикрепляется к объекту, а сердечник фиксируется. Но такие устройства, по-прежнему, могут определять только небольшие перемещения, и к тому же они обладают довольно плохой линейностью по сравнению с ЛРДТ. Однако они с успехом могут применяться в качестве детекторов приближения, сигнализирующих о близком нахождении объектов, изготовленных из любых твердых материалов. На рис. 7.13Б показана зависимость выходного сигнала от расстояния до диска.

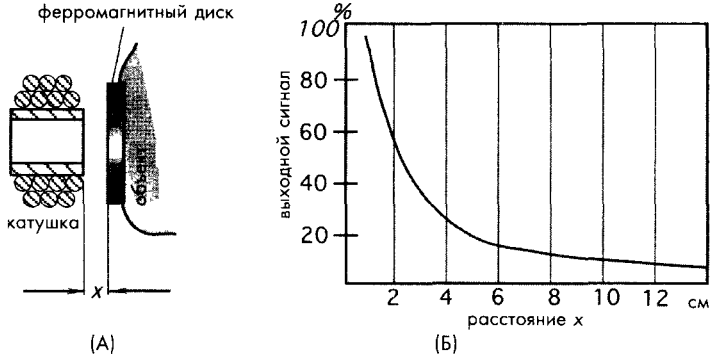


Рис. 7.13. Поперечный датчик приближения с дополнительным ферромагнитным диском (А) и зависимость выходного сигнала от расстояния (Б)

7.4.4. Датчики приближения, использующие эффект Холла

За последние годы популярность датчиков Холла значительно увеличилась (см. раздел 3.8 главы 3, где описан их принцип действия). Существуют два типа датчиков Холла: линейный и пороговый (рис. 7.14). Линейный датчик обычно интегрируется вместе с усилителем для упрощения согласования с последующими схемами. По сравнению с основным датчиком (рис. 3.30 главы 3) они работают в большем диапазоне напряжений и обладают более хорошей помехозащищенностью. Но эти датчики не отличаются хорошей линейностью зависимости выходного напряжения от плотности магнитного поля (рис. 7.15А), поэтому для получения точных результатов необходимо проводить их индивидуальную калибровку. В дополнение к усилителю в состав порогового датчика входит триггер Шмитта, обладающий гистерезисом. На рис. 7.15Б показана зависимость выходного сигнала порогового датчика от плотности магнитного поля. Как видно из рисунка, такой датчик обладает гистерезисом. Когда плотность приложенного магнитного поля превышает заданный пороговый уровень, триггер переключается из состояния ВЫКЛЮЧЕНО в положение ВКЛЮЧЕНО, что свидетельствует о критическом приближении объекта к детектору. Гистерезис за счет введения мертвой зоны, запрещающей работу датчика после прохождения порогового значения, устраняет паразитные колебания. Датчики Холла обычно изготавливаются в виде интегральных схем на кремниевых подложках в бескорпусном или корпусном исполнении.

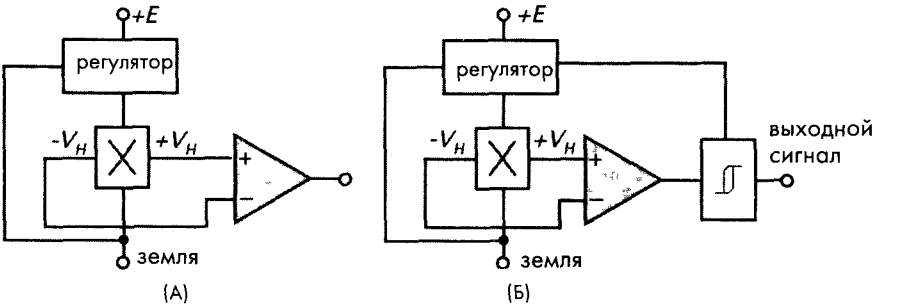


Рис. 7.14. Схемы линейного (А) и порогового (Б) датчика Холла

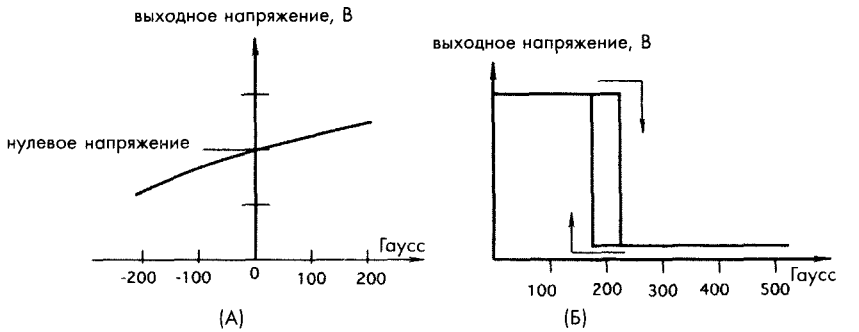


Рис. 7.15. Передаточные функции линейного (А) и порогового (Б) датчика Холла

Для возможности измерения положения и перемещения объектов датчику Холла необходим источник магнитного поля, а также интерфейсная схема. Магнитное поле характеризуется двумя основными параметрами: плотностью потока и полярностью (направленностью). Следует отметить, что для повышения чувствительности желательно, чтобы линии магнитного поля были перпендикулярны плоской поверхности датчика и имели заданную направленность. В пороговых датчиках фирмы Sprague® южный полюс магнита отвечает за переключение датчика, в то время как северный полюс не оказывает никакого влияния.

Перед разработкой датчика перемещений на основе детектора Холла необходимо провести полный предварительный анализ. Начинать необходимо с оценки силы магнитного поля. С увеличением расстояния от поверхности полюсов сила поля уменьшается. Силу поля можно определить либо при помощи измерителя магнитной индукции или калиброванного датчика Холла. Для датчика Холла порогового типа максимальное расстояние, при котором происходит переход выходного сигнала датчика из состояния ВКЛЮЧЕНО (ВЫСОКИЙ УРОВЕНЬ) в состояние ВЫКЛЮЧЕНО (НИЗКИЙ УРОВЕНЬ), называется *точкой отпускания*. Эта точка определяет критическое расстояние, на котором может работать датчик. Зависимость силы магнитного поля от расстояния не является линейной. Эта зависимость во многом определяется формой используемых магнитов, магнитным контуром и траекторией перемещения магнита.

Чувствительный элемент датчика Холла располагается внутри корпуса на некотором расстоянии от его стенок. Это расстояние и определяет минимальное рабочее расстояние. Магнит должен быть надежным и обеспечивать эффективный воздушный зазор в рабочей зоне. Его габариты должны соответствовать размерам установки, а цена сопоставима со стоимостью всей системы (Для получения большей информации по постоянным магнитам обратитесь к разделу 3.4 главы 3).

Датчики Холла могут использоваться в качестве прерывателей. В этом случае датчик Холла и магнит представляют собой единый блок с небольшим воздушным зазором между ними (рис. 7.16). Часто вся конструкция монтируется в одном корпусе, что помогает устранить процедуру выравнивания элементов друг относительно друга. При свободном воздушном зазоре датчик находится в положении ВКЛЮЧЕНО. Когда в пространство между магнитом и датчиком помещается ферромагнитная пластина, она формирует магнитный шунт, закорачивающий магнитный поток на себя, в результате чего детектор Холла переходит в состояние ВЫКЛЮЧЕНО. Ферромагнитная пластина, разрывающая магнитный поток, может совершать либо линейные, либо вращательные движения. Примером такого устройства является автомобильный прерыватель.

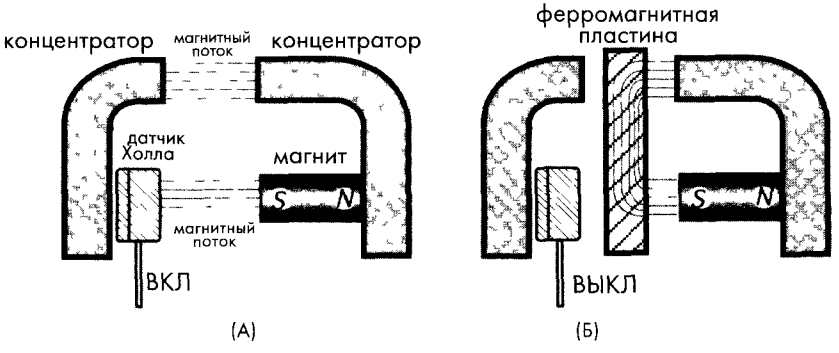
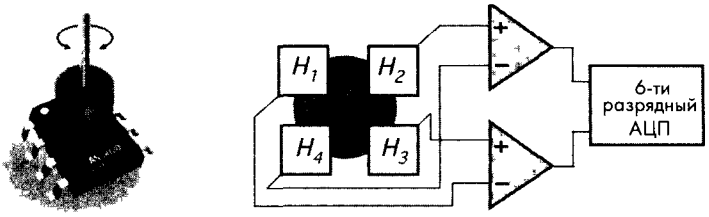


Рис. 7.16. Прерыватель, реализованный на основе датчика Холла: А – магнитный поток включает датчик, Б – магнитный поток шунтируется ферромагнитной пластиной [6]

Для детектирования линейных и круговых перемещений четыре датчика Холла включаются в мостовую схему. На рис. 7.17А и 7.17Б показаны внешний вид и принципиальная схема мостового датчика Холла для измерения угловых перемещений, изготовленного на одном кристалле по микросистемной технологии в пластмассовом корпусе SOIC-8. Схема детектирует угол и направление поворота кругового магнита, размещенного сверху кристалла, и преобразует полученные данные в цифровой код. Параметры АЦП определяют частотные характеристики системы. Рассматриваемый датчик может работать при скорости вращения магнита, равной 30 000 оборотов в минуту. Такое устройство позволяет точно определять линейное и угловое положение объекта, выполнять угловую кодировку и даже реализовать управляемый поворотный переключатель. Благодаря мостовой схеме включения датчиков, вся система устойчива к смещениям магнита и внешним помехам, включая посторонние магнитные поля.



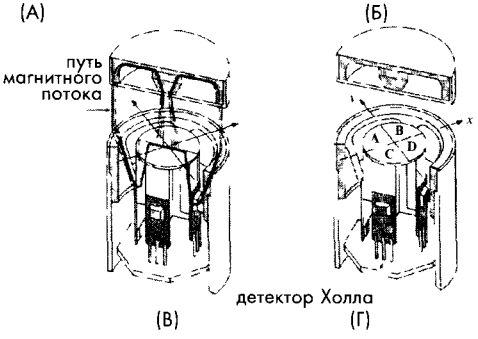


Рис. 7.17. Мостовой датчик Холла (А) и его внутренний интерфейс (Б) (напечатано с разрешения Austria Micro Systems). Вид датчика и перемещающегося объекта в разрезе: В – показаны пути магнитных потоков через датчик и объект, Г – показаны пути четырех потоков при достаточной удалении объекта

На рис. 7.17В и 7.17Г показан трехмерный (3D) датчик Холла, сравнивающий магнитные потоки от перемещающегося объекта, проходящие по четырем геометрически одинаковым магнитным траекториям, расположенным симметрично вокруг вертикальной оси системы. Эта схема является магнитным эквивалентом моста Уитстона. Когда объект находится вдали от датчика, симметричное поле постоянного магнита распространяется от центрального полюса через воздушный зазор к краям. При приближении объекта к датчику траектория магнитных потоков меняется, они теперь проходят через обе структуры. Поверхность центрального полюса датчика разделена на четыре равные части: A, B, C и D. Величины магнитных потоков в каждой из частей измеряются соответствующим детектором Холла. Существует два типа объектов: пассивный и активный. В состав активного устройства входит постоянный магнит, возбуждающий магнитное поле, детектируемое датчиком, когда они находятся друг от друга на рабочем расстоянии. Пассивные объекты не имеют собственного магнита. В этом случае магнитное поле генерируется

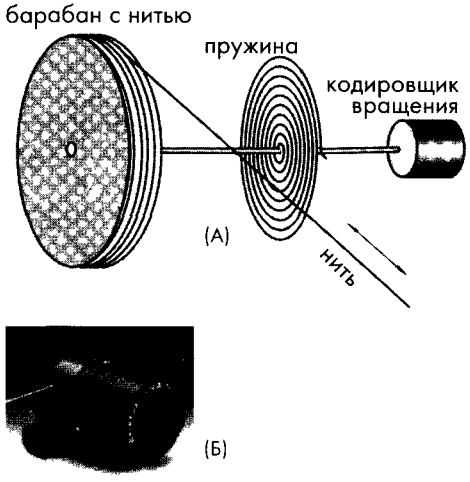


Рис. 7.18. Преобразование линейного перемещения (длины нити или кабеля) во вращательное движение (А) и внешний вид датчика длины кабеля (Б)
Напечатано с разрешения Space Age Control, Inc

датчиком, а объект лишь возвращает его обратно. Система управления беспилотным транспортным средством – яркий пример использования такой конструкции. В таких системах под поверхностью дороги расположены металлические полоски, играющие роль пассивных задающих устройств. При этом сам датчик располагается на транспортном средстве. При прохождении датчика над задающими полосками снимается информация о положении, скорости и направлении движения. Расстояние между датчиком и полосками не должно превышать нескольких дюймов.

Из рисунков 7.17А и 7.17Б видно, что мостовые схемы датчиков Холла позволяют с высокой степенью точности преобразовывать круговое движение в цифровой код. Используя это свойство, можно реализовать датчики перемещения на основе преобразователя линейного перемещения в круговое движение (рис. 7.18). Такие преобразователи выпускаются несколькими производителями, например, Space Age Control, Inc (www.spaceagecontrol.com).

7.4.5. Магниторезистивные датчики

Эти датчики применяются в тех же самых областях, что и датчики Холла. Магниторезистивные датчики могут использоваться как детекторы приближения, положения и поворота. Для функционирования им необходимы внешние источники магнитных полей, в качестве которых обычно применяются прикрепленные к ним постоянные магниты. На рис. 7.19 показана схема простого датчика линейных перемещений. Здесь для получения корректных результатов необходимо учи-

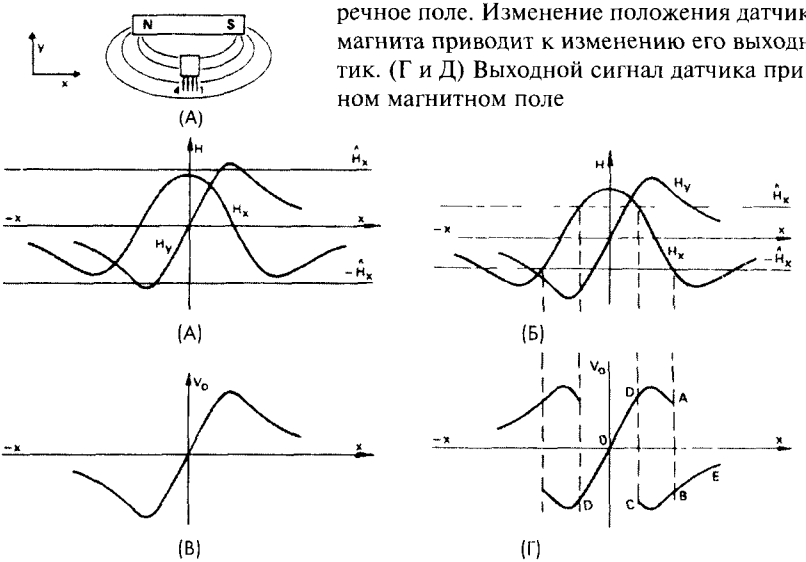


Рис. 7.19. Зависимость выходного сигнала магниторезистивного датчика, помещенного в поле постоянного магнита, от перемещения *x*, совершаемого параллельно оси магнита (А–В). Магнит создает как продольное, так и поперечное поле. Изменение положения датчика относительно магнита приводит к изменению его выходных характеристик. (Г и Д) Выходной сигнал датчика при слишком сильном магнитном поле

тывать ряд факторов, описанных далее. Датчик, размещенный рядом с постоянным магнитом, подвергается воздействию магнитного поля как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях. Если магнит ориентирован параллельно датчику (т.е. в направлении x), как показано на рис. 7.19А, $\mathbf{H}_x$ характеризует продольное поле, а изменение $\mathbf{H}_y$ является мерой перемещения x. На рис. 7.19Б показаны графики изменения $\mathbf{H}_x$ и $\mathbf{H}_y$ в зависимости от x, а на рис. 7.19В представлен соответствующий выходной сигнал. В этом примере напряженность поля вдоль оси x никогда не превышает $\pm \hat{\mathbf{H}}_x$ (значение напряженности, заставляющее датчик переключаться), при этом характеристики датчика остаются стабильными во всем диапазоне измерений. Однако, если магнит слишком мощный или расстояние между датчиком и магнитом очень маленькое, выходной сигнал будет значительно отличаться от показанного на рисунке.

Предположим, что первоначально датчик находится на поперечной оси магнита ($x = 0$). При этом $\mathbf{H}_y$=0, а $\mathbf{H}_x$ равна максимальному значению ($> \hat{\mathbf{H}}_x$). Теперь датчик перемещается в направлении $+x$, тогда его выходной сигнал изменяется, как показано на рис. 7.19Д. При смещении датчика в сторону увеличения координаты x, $\mathbf{H}_y$ и V_0 возрастут, а $\mathbf{H}_x$ сначала упадет до нуля, а потом начнет расти в отрицательную сторону до тех пор, пока $\mathbf{H}_x$ не превысит значение $-\hat{\mathbf{H}}_x$. В этой точке характеристики датчика резко меняются, и выходное напряжение изменяет свою полярность – участок АВ на рис. 7.19Д. При дальнейшем продвижении датчика вдоль оси x выходное напряжение датчика будет меняться в соответствии с участком ВЕ. Если теперь датчик начнет двигаться в противоположном направлении, $\mathbf{H}_x$ будет расти до тех пор, пока не превысит значение $+\hat{\mathbf{H}}_x$, напряжение V_0 будет меняться в соответствии с участком ВС. В этой точке характеристики датчика опять резко меняются, а выходной сигнал перескакивает из точки С в точку D. Очевидно, что у датчика существует гистерезисная петля ABCD. Аналогичная петля возникает при движении датчика в направлении $-x$. На рис. 7.19Д показан идеализированный случай, поскольку переключения никогда не происходят так резко.

На рис. 7.20А показано, как можно использовать магниторезистивные датчики KMZ10B и KM110B (информация по этим датчикам взята из

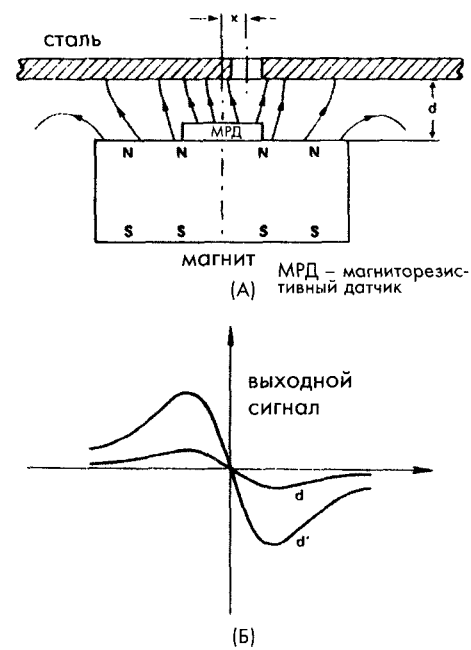


Рис. 7.20. Измерение линейных перемещений при помощи магниторезистивного датчика KMZ10: А – датчик расположен между постоянным магнитом и металлической пластиной, Б – выходной сигнал при разном расстоянии между магнитом и пластиной.

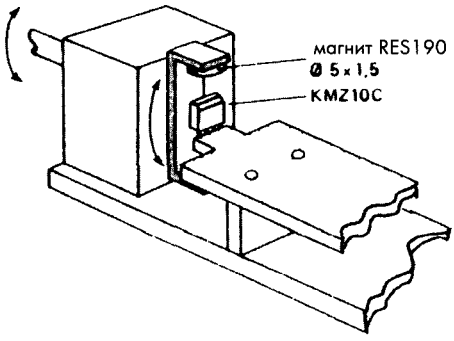


Рис. 7.21. Измерение угловых перемещений при помощи датчика KMZ10

документации Philips Semiconductors BV (Eindhoven, The Netherlands)) для определения линейных перемещений металлических объектов. Датчик размещается между пластиной и постоянным магнитом, ось которого ориентирована перпендикулярно оси металлической пластины. Неоднородности в пластине, например, отверстия и области немагнитного материала, нарушают магнитное поле и вызывают изменения выходного сигнала датчика. На рис. 7.20 показаны выходные сигналы при разном расстоянии d между пластиной и магнитом. При совмещении отверстия и датчика сигнал на его выходе становится равным нулю, независимо ни от расстояния d, ни от окружающей температуры.

На рис. 7.21 показан способ применения того же датчика для измерения угловых перемещений. В данном устройстве магнитное поле создается двумя постоянными магнитами RES190, закрепленными на вращающейся рамке, между которыми размещен датчик. Выходной сигнал датчика соответствует угловому перемещению рамки.

На рис. 7.22А показана схема определения угла и направления поворота зубчатого колеса при помощи датчика KM110. Метод определения направления вращения основывается на раздельной обработке выходных сигналов датчика, снимаемых с двух половин мостовой схемы.

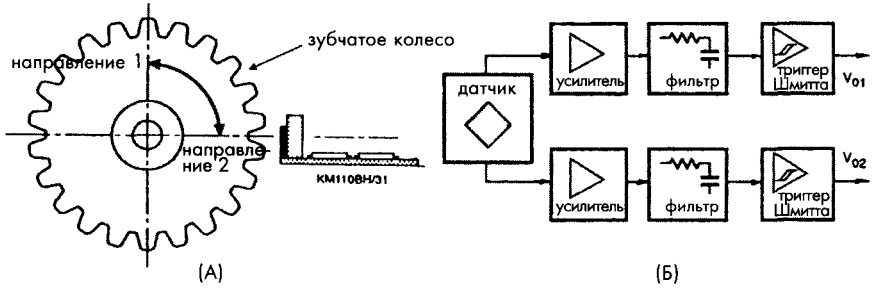


Рис. 7.22. А – оптимальное рабочее положение магниторезистивного модуля. Отметим, что магнит находится за датчиком, Б – принципиальная схема модуля

Модуль работает также как и магнитный мост Уитстона, измеряющий напряженность магнитного поля, изменяющуюся в зависимости от того, какая часть колеса находится напротив датчика: впадина или зубец. В этом модуле очень важно правильно расположить датчик и магнит: угол между осями

симметрии датчика и колеса должен быть близок к нулю. Более того, желательно, чтобы они совпадали. На рис. 7.22Б показана принципиальная схема такого модуля. Сигналы с мостовой схемы поступают сначала на соответствующие усилители, а потом через фильтры нижних частот на триггеры Шмитта, формирующие на своих выходах прямоугольные импульсы. Разность фаз на обоих выходах (рис. 7.23А и 7.23Б) показывает направление вращения.

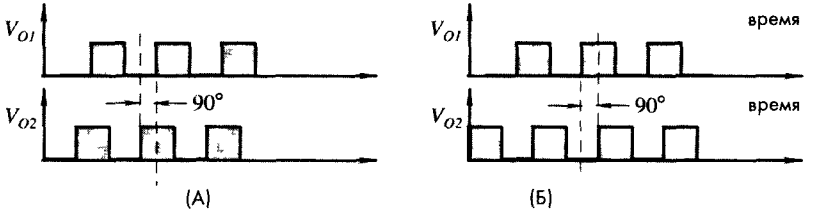


Рис. 7.23. Выходные сигналы магниторезистивного модуля: А – колесо вращается в направлении 1, Б – в направлении 2

7.4.6. Магнитострикционный детектор

Для измерения больших перемещений с высоким разрешением часто применяются магнитострикционные ультразвуковые датчики [8]. Магнитострикционный преобразователь состоит из двух основных частей: длинного волновода (до 7 м) и постоянного кольцевого магнита (рис. 7.24). Магнит может свободно перемещаться вдоль волновода, не касаясь его. Положение магнита над той или иной точкой волновода и является измеряемым сигналом, который датчик преобразует в электрический сигнал. Внутри волновода проходит проводник, который при подаче на него электрических импульсов создает магнитное поле вдоль всей его длины. Другое магнитное поле, образованное постоянным магнитом, существует только вблизи него. Поэтому два поля складываются только там, где находится постоянный магнит. Результирующее поле находится

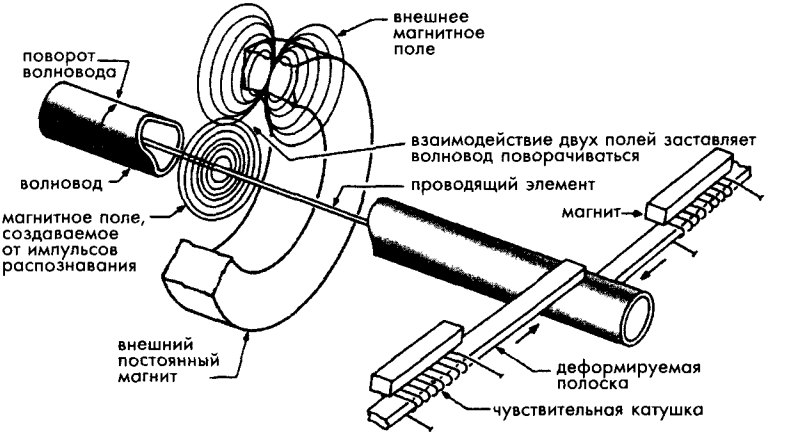


Рис. 7.24. Магнитострикционный датчик, использующий ультразвуковые волны для определения положения постоянного магнита

в виде векторной суммы напряженностей двух полей. Это поле создает крутящий момент, заставляющий волновод поворачиваться в месте расположения магнита. Это явление известно под названием эффекта Вайдемана.

Таким образом, электрические импульсы, подаваемые в коаксиальный проводник волновода, приводят к появлению механических импульсов кручения, распространяющихся вдоль волновода со скоростью звука, соответствующей его материалу. Момент прихода импульсов на головку датчика необходимо точно определять. Один из способов детектирования импульсов заключается в преобразовании ультразвуковых импульсов в выходные электрические сигналы. Это можно выполнить при помощи пьезоэлектрических датчиков или, как показано на рис. 7.24, при помощи датчика магнитного сопротивления, который состоит из двух катушек, расположенных рядом с небольшими постоянными магнитами. Катушки механически связаны с волноводом, поэтому и реагируют на импульсы, возникающие в нем, в такт с которыми они вырабатывают короткие электрические импульсы. Временная задержка между этими импульсами и соответствующими импульсами возбуждения, подаваемыми на проводник волновода, является точной мерой положения кольцевого магнита. Эта временная задержка при помощи соответствующей электронной схемы преобразуется в цифровой код. Достоинства такого датчика: линейность (порядка 0.05% от полной шкалы измерений), хорошая воспроизводимость (порядка 3 мкм) и долговременная стабильность. Этот датчик может работать в агрессивных средах, при высоких давлениях и температурах, а также при сильной радиации. У магнитострикционного датчика есть еще одно достоинство: низкая температурная чувствительность, которая может составлять порядка 20×10^{-6} на °C.

Такие датчики используются в гидравлических цилиндрах, в прессовальных машинах (для измерения линейных перемещений пресса), в горном деле (для обнаружения подвижки скал), вращающихся мельницах, кузницах, лифтах и в других устройствах, где требуется высокая разрешающая способность при измерении больших перемещений.

7.5. Оптические датчики

После механических контактных и потенциометрических датчиков оптические детекторы возможно являются наиболее популярными устройствами для определения положения и перемещений объектов. Среди их основных достоинств можно назвать простоту, отсутствие нагрузочного эффекта и относительно большие рабочие расстояния. Они нечувствительны к паразитным магнитным полям и электростатическим помехам, что делает их незаменимыми для некоторых приложений. В состав оптического датчика перемещений, как правило, входят три компонента: источник света, фотодетектор и устройства, управляющие светом (линзы, зеркала, оптические волокна и т.л.). На рис. 4.17 и 4.18 главы 4 приведены примеры двух оптоволоконных датчиков приближения. Подобные датчики можно реализовать и без применения оптоволокон. В этих случаях свет направляется на объект при помощи фокусирующих линз, а возвращается назад к детектору при помощи отражателей. В настоящее время этот метод претерпел существенные изменения: за счет более сложных компонентов удалось улучшить избирательность, повысить помехозащищенность и надежность оптических датчиков.

7.5.1. Оптические мостовые схемы

Классическая концепция мостовых схем применима и к оптическим датчикам. На рис. 7.25 приведен пример построения мостового оптического датчика. Четырехквадрантный фотодетектор состоит из четырех детекторов света, соединенных в мостовую схему. Объект должен отличаться по оптической контрастности от окружающей среды. Рассмотрим систему определения местонахождения космических объектов (рис. 7.25А). На фотодетектор при помощи оптической системы (например, телескопа) фокусируется изображение солнца или какого-то иного достаточно яркого объекта. Четыре выхода фотодетектора подсоединяются к соответствующим входам дифференциальных усилителей (рис. 7.25Б). Выходной сигнал каждого усилителя пропорционален перемещению изображения от оптического центра датчика вдоль соответствующей оси. Когда изображение находится точно в центре, выходные сигналы обоих усилителей равны нулю. Это происходит только тогда, когда оптическая ось телескопа пересекает объект.

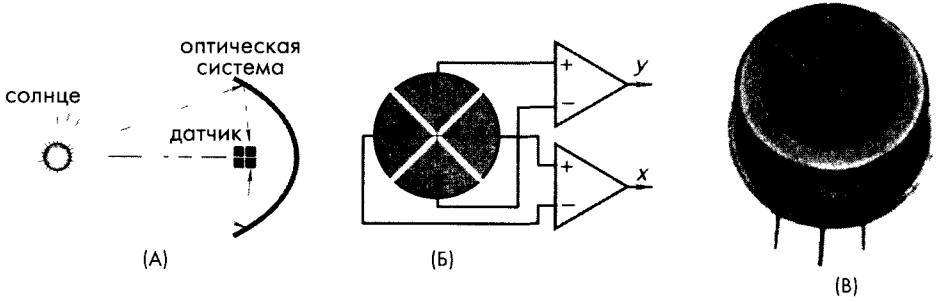


Рис. 7.25. Четырехквадрантный фотодетектор: А – фокусирование объекта на датчик, Б – подключение чувствительных элементов к дифференциальным усилителям, В – внешний вид датчика.
Перепечатано из Advanced Photonix, Inc. Camarillo, CA

7.5.2. Поляризационный детектор приближения

Использование поляризованного света позволяет улучшить характеристики оптоэлектронных датчиков. Каждый фотон света обладает индивидуальными направлениями магнитного и электрического полей, перпендикулярных друг другу и направлению распространения излучения (см. рис. 3.48 главы 3). Направление электрического поля совпадает с направлением *поляризации* света. Большинство источников света испускают фотоны, имеющие произвольную поляризацию. Для того чтобы свет стал поляризованным, его надо направить на поляризационный фильтр, изготовленный из специального материала, пропускающего фотоны только одного направления поляризации, остальные фотоны при этом либо поглощаются, либо отражаются. Однако любое направление поляризации можно представить в виде геометрической суммы двух ортогональных составляющих. Одна из этих составляющих совпадает с направлением поляризации фильтра. Тогда, поворачивая источник света, можно *постепенно* изменять интенсивность света на выходе фильтра (рис. 7.26).

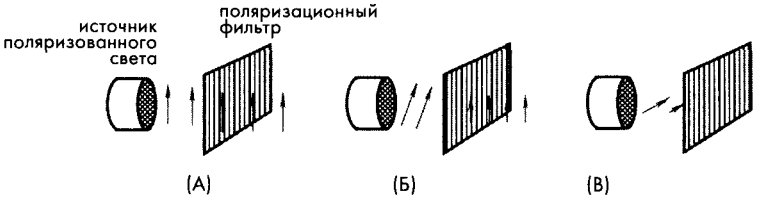


Рис. 7.26. Поляризованный свет, выходящий из поляризационного фильтра: А – направление поляризации света и фильтра совпадают, Б – поляризация света направлена под углом к вектору поляризации фильтра, В – направления поляризации фильтра и света перпендикулярны друг другу

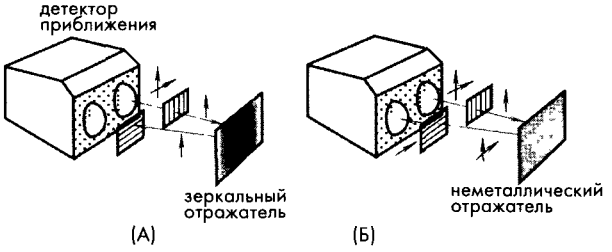


Рис. 7.27. Детектор приближения с двумя поляризационными фильтрами, расположенными под углом 90° друг к другу: А – поляризованный свет отражается от металлического объекта, не меняя направление поляризации, Б – неметаллический объект меняет направление поляризации отраженного света, что позволяет ему пройти через поляризационный фильтр

После встречи поляризованного света с объектом отраженные лучи могут либо сохранить то же самое направление поляризации (зеркальное отражение), либо изменить угол поляризации. Последний вариант характерен для многих неметаллических объектов. Таким образом, для того чтобы реализовать датчик, который бы не реагировал на отражающие объекты (например, металлические консервные банки, обертки из фольги и т.д.), в нем должно быть два перпендикулярно направленных поляризационных фильтра: один рядом с источником света, а другой рядом с детектором (рис. 7.27А и 7.27Б). Первый фильтр располагается рядом с излучающей линзой и служит для поляризации лучей от источника света, а второй – рядом с принимающей линзой детектора, его назначение – пропускать только компоненты излучений, направленные под углом 90° к испускаемому свету. Если свет отражается от зеркальных рефлекторов, направление его поляризации не меняется и, следовательно, принимающий фильтр ничего не пропустит на фотодетектор. Однако, если происходит незеркальное отражение от объекта, часть фотонов, имеющих соответствующее направление поляризации, достигнет фотодетектор. Следовательно, использование выходных поляризационных фильтров позволяет снизить а ложные срабатывания при детектировании неметаллических объектов.

7.5.3. Волоконооптические датчики

Волоконоптические датчики могут достаточно эффективно использоваться в качестве детекторов приближения и уровня. На рис. 4.18 главы 4 показан один из

вариантов датчиков перемещений, в котором интенсивность отраженного света модулируется в зависимости от расстояния d до отражающей поверхности.

На рис. 7.28 показан оптический детектор уровня жидкости (см. также раздел 7.8.3). Он состоит из двух оптоволоконных световодов и призмы. Принцип его действия основан на разности коэффициентов преломления воздуха (или газообразной фазы материала) и жидкости, уровень которой необходимо определить. Когда датчик находится выше уровня жидкости, большая часть света передающего световода (левого) попадает в принимающий световод (правый), что возможно благодаря полному внутреннему отражению призмы. Однако часть лучей достигают отражающую поверхность призмы под углами меньшими, чем угол полного внутреннего отражения, и теряются в окружающей среде. Когда призма достигает уровня жидкости, ее угол полного внутреннего отражения изменяется, поскольку коэффициент преломления жидкости превышает коэффициент преломления воздуха. Это приводит к большему падению интенсивности света, измеряемой на конце принимающего световода. Интенсивность света преобразуется в электрический сигнал при помощи соответствующего фотодетектора.

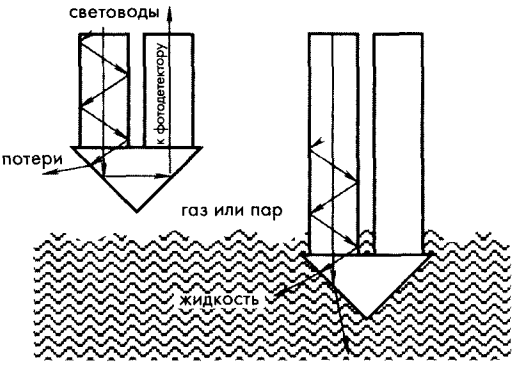


Рис. 7.28. Оптический детектор уровня жидкости, простроенный на принципе измения коэффициентов преломления в жидкой и воздушной среде

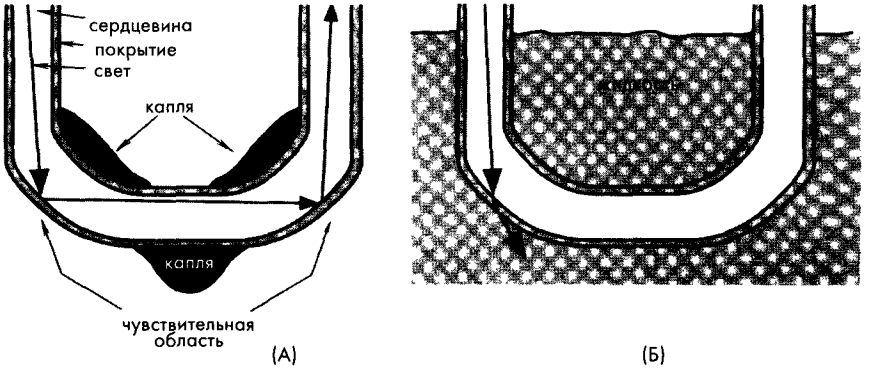


Рис. 7.29. Волоконнооптический датчик уровня жидкости: А – когда датчик находится выше уровня жидкости, интенсивность света на выходе световода максимальная, Б – когда чувствительная область погружается в воду, интенсивность света падает.

На рис. 7.29 показан еще один вариант волокнооптического датчика (данный датчик изготавливается кампанией Gems Sensors, Plainville,CT). Здесь световод имеет U-образную форму. В световоде при погружении в жидкость происходит модуляция интенсивности проходящего света. Рядом с местами изгибов, там где радиус кривизны наименьший, детектор имеет две чувствительные области. Все устройство монтируется в зонде, имеющем диаметр 5 мм, при этом погрешность воспроизводимости результатов такого датчика составляет около 0.5 мм. Отметим, что при вынимании зонда из жидкости в чувствительных областях на нем остаются капли .

7.5.4. Датчики Фабри-Перо

Для прецизионного измерения малых перемещений в неблагоприятных условиях окружающей среды применяются, так называемые, оптические резонаторы Фабри-Перо, состоящие из двух полуотражающих зеркал, расположенных напротив друг друга на расстоянии L (рис. 7.30А). Свет в резонатор поступает от источника с известными характеристиками, например, от лазера. Фотоны, попадая в резонатор, начинают отражаться то от одного, то от другого зеркала. В процессе этих отражений они интерферируют друг с другом. Фактически, резонатор играет роль светового накопителя. За пределы резонатора могут выйти фотоны только определенных частот. Таким образом, можно считать, что интерферометр Фабри-Перо является частотным фильтром, частота пропускания которого определяется длиной резонатора (рис. 7.30Б). При изменении длины резонатора соответственно меняются и частота выходящего света. Если сделать одно из зеркал подвижным, то, измеряя выходящую частоту импульсов света, можно определять очень маленькие изменения длины резонатора. Частота выходных импульсов кратна интервалу $\Delta\nu$, обратно пропорциональному длине резонатора:

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L}, \tag{7.8}$$

где c – скорость света. Для используемых на практике резонаторов расстояние между зеркалами составляет порядка 1 мкм, а типичные значения $\Delta\nu$ лежат в интервале 500 МГц...1 ГГц. Таким образом, по разнице частот выходного излучения и сигнала от эталонного источника света можно судить об изменении длины резонатора с точностью, сравнимой с длиной волны света. Объектом измерения может быть любая физическая величина, изменение которой приводит к изменению размеров резонатора (перемещению зеркал): например, механическое напряжение, сила, давление и температура.

Благодаря своей универсальности, детекторы Фабри-Перо получили широкое распространение. Например, они используются для измерения давления, и температуры [7-10]. Такие датчики детектируют изменения длины оптического пути, вызванные либо изменениями коэффициента преломления, либо изменением физической длины резонатора. Детекторы Фабри-Перо, изготовленные при помощи MEMS технологий, обладают миниатюрными размерами и низкой стоимостью. Другим достоинством микродатчиков Фабри-Перо является то, что для генерации интерференционного сигнала им подходят практически любые когерентные источники света, даже такие как СИД.

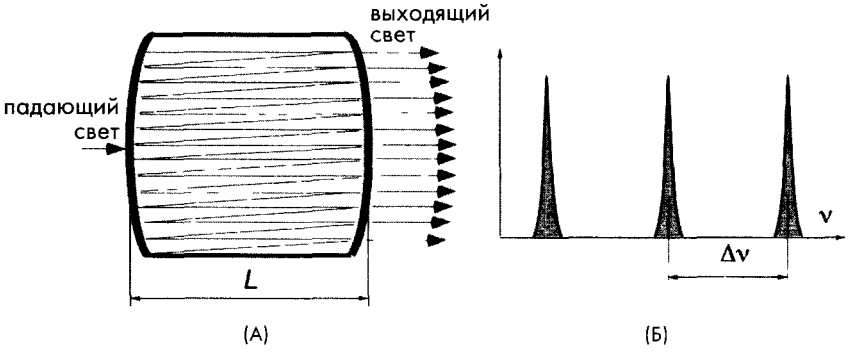


Рис. 7.30. А – многократная интерференция внутри резонатора Фабри-Перо, Б – импульсы света на выходе резонатора

На рис. 7.31 показан датчик давления, использующий резонатор Фабри-Перо. Давление, действующее на верхнюю мембрану, заставляет диафрагму прогибаться вниз, тем самым, уменьшая высоту резонатора L. Резонатор изготавливается в виде монолитного кристалла методами микротехнологий, поэтому зеркала представляют собой либо диэлектрические, либо металлические слои, нанесенные на соответствующую подложку. Для получения требуемых характеристик датчика, толщину каждого слоя необходимо строго контролировать. На рис. 7.31 показан микродатчик давления, выпускаемый FISO Technologies (www.fiso.com). Этот датчик обладает очень низким коэффициентом температурной чувствительности (менее 0.03%) и имеет внешний диаметр 0.55 мм, что делает его идеальным для применения в составе имплантируемых медицинских устройств и других миниатюрных инструментов.

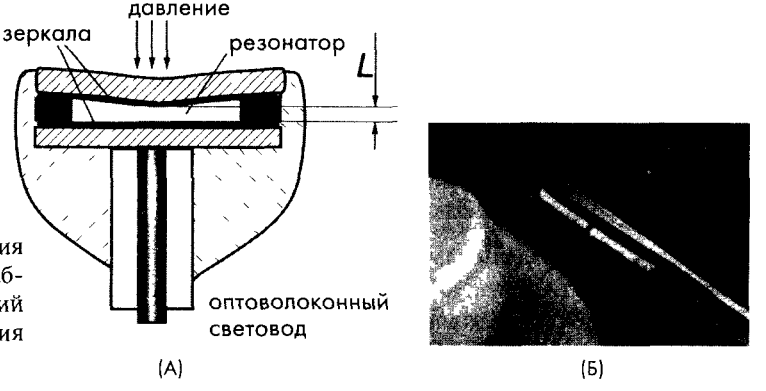


Рис. 7.31. Конструкция датчика давления Фабри-Перо (А) и внешний вид датчика давления FISO FOP-M (Б)

На рис. 7.32 показана измерительная система на основе датчика Фабри-Перо. Излучение от источника дневного света подается через светоделитель 2×2 на оптоволоконный волновод, соединенный с датчиком. В состав датчика входит интерферометр Фабри-Перо (ИФП), отражающий свет назад. При этом длина волны отраженного излучения зависит от размеров резонатора. Теперь остается только

измерить разницу длин волн. Это выполняется при помощи кросс-кореллятора, реализованного на базе клинообразного преобразователя Фабри-Перо, который, по существу, является резонатором с линейно изменяющейся геометрическими размерами. В зависимости от длины волны полученного излучения, оно пройдет через определенную зону резонатора. Место выхода света на клине преобразователя определяется при помощи детектора положения (ДП), детально описанного в разделе 7.5.6. Выходной сигнал детектора напрямую связан с внешним воздействием, приложенным к ИФП.

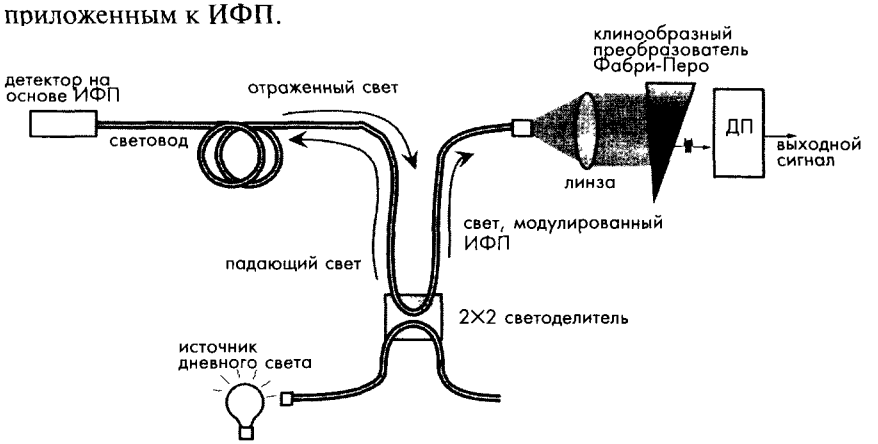


Рис. 7.32. Система измерения на основе датчика Фабри-Перо
(Приведено с разрешения Roctest, www.roctest.com)

Преимущества данного метода: линейность; нечувствительность к интенсивности излучения источника света и излучения, возникающего при передаче сигналов по световодам; универсальность, т.е. возможность измерения различных внешних воздействий одним и тем же инструментом; широкий динамический диапазон (1:15000) и высокая разрешающая способность. В дополнение к этому волоконооптические датчики устойчивы ко многим видам электромагнитных и радиочастотных помех и могут работать в суровых условиях окружающей среды, например, в СВЧ-печах.

7.5.5.Решетчатые датчики

Оптический датчик перемещения может быть изготовлен на основе двух перекрывающихся решеток, играющих роль модулятора интенсивности света (рис. 7.33А). Излучение от эталонной лампы сначала попадает на первую стационарную решетку, которая пропускает на вторую подвижную решетку только 50% света. Когда непрозрачные полоски подвижной решетки точно совмещаются с пропускающими зонами стационарной решетки, путь свету будет полностью перекрыт. Следовательно, такая комбинация решеток позволяет модулировать интенсивность выходящего пучка света от 0 до 50% интенсивности эталонной лампы (рис.7.33Б). Прошедший через решетки свет фокусируется на чувствительную поверхность фотодетектора, который преобразует его в электрический ток.

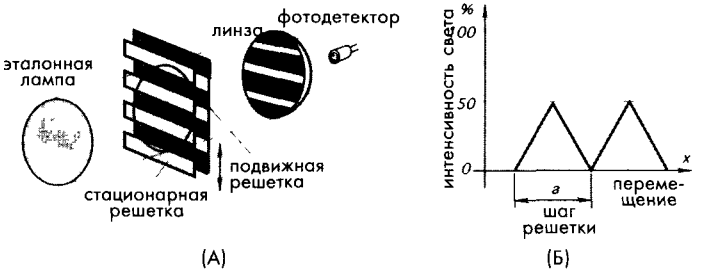


Рис. 7.33. Оптический датчик перемещений с решетчатым модулятором света: А – принципиальная схема, Б – передаточная функция

Максимальное измеряемое перемещение определяется размерами непрозрачного и пустого секторов решеток. Всегда необходимо выбирать компромисс между динамическим диапазоном модулятора и его чувствительностью, поскольку чем больше шаг решетки (больше размеры прозрачных и непрозрачных секторов), тем ниже чувствительность, но шире интервал измерений. Для повышения чувствительности желательно делать шаг решетки, как можно, меньше, чтобы самые незначительные перемещения решетки приводили к существенному изменению выходного сигнала. Этот тип модулятора используется в гидрофонах для определения перемещений диафрагмы [11]. При шаге решетки 10 мкм максимальное измеряемое перемещение составляет 5 мкм. В качестве источника света используется 2-х мВт He-Ne лазер, излучение которого через оптоволоконный световод подается на решетку. Тестирование показало, что чувствительность такого гидрофона составляет 1мкПа в динамическом диапазоне 125 дб, а рабочий интервал частот – порядка 1 кГц.

Принцип модуляции света при помощи решеток используется в очень популярных поворотных или линейных кодирующих устройствах, в которых в подвижной маске (обычно изготовленной в виде диска) формируются прозрачные и непрозрачные участки (рис. 7.34).

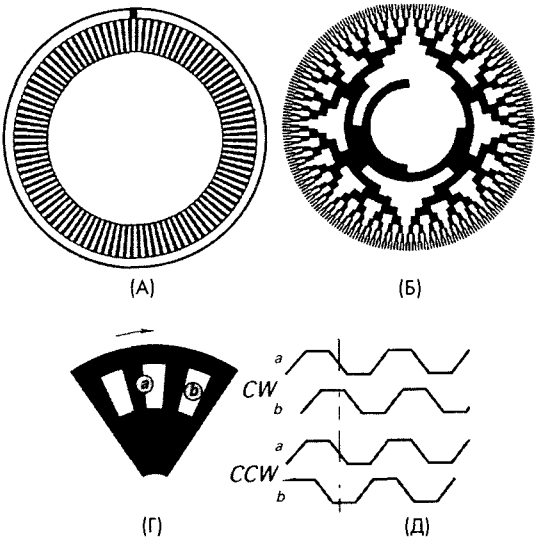


Рис. 7.34. Диски оптических шифраторов перемещений: А – дискретных, Б – абсолютных. При вращении диска по часовой стрелке (CW) сигнал *a* опережает сигнал *b* на 90° (В), а при вращении против часовой стрелки (CCW) – сигнал *a* отстает от *b* на 90° (Г).

Диск в данном случае выполняет роль прерывателя световых лучей оптопары. Когда непрозрачный участок диска перекрывает путь лучу, на выходе детектора устанавливается нулевой уровень сигнала. При прохождении луча через прозрачную зону выходной сигнал детектора равен единице. Оптические кодировщики часто используют ИК излучатели и детекторы, работающие в спектральном диапазоне 820...940 нм. Диски обычно изготавливаются из многослойной пластмассы, а непрозрачные участки на них формируются фотографическим методом. Такие диски имеют низкий вес, малую инерционность, небольшую стоимость, а также обладают устойчивостью к ударам и вибрациям. Для расширения температурного диапазона диски изготавливают из металла, тогда рисунок в них выполняется по технологии травления.

Существует два типа кодирующих дисков: дискретных и абсолютных перемещений. В первом случае импульсы вырабатываются при повороте диска на фиксированную величину угла (шаг), во втором случае угловое перемещение задается комбинацией прозрачных и непрозрачных секторов, расположенных по радиусу диска. Обычно рисунок диска абсолютных перемещений соответствует конкретному цифровому коду. Чаще других используется код Грея, двоичный и двоично-десятичный код.

Поскольку диски первого типа имеют более простую конструкцию, а, значит, и меньшую стоимость, они и получили более широкое распространение в кодирующих системах. В шифраторах дискретных перемещений достаточно использовать только один оптический канал (пару излучатель-детектор). Если необходимо определять и скорость угловых перемещений, и их направление, требуются два оптических канала. Для этого чаще других применяется квадратурный метод детектирования, когда определяется фазовый сдвиг между выходными сигналами двух оптических каналов, по знаку которого можно судить о направлении движения, а по величине – о скорости и перемещении (рис. 7.34В и 7.34Г).

7.5.6. Позиционно-чувствительные детекторы

Для точного измерения положений объектов и их перемещений на длинных и коротких расстояниях подходят оптические системы, работающие в ближнем ИК спектральном диапазоне. Примерами таких систем являются *позиционно-чувствительные детекторы (ПЧД)*, часто используемые в устройствах автофокусировки фото- и видео- камер. Модуль определения положения объекта является активным устройством: в его состав входит светоизлучающий диод (СИД) и ПЧД с фотодетектором. Принцип действия этого устройства основан на геометрических свойствах треугольников. На рис. 7.35 показано, как можно найти расстояние до объекта. Излучение от СИД, работающего в ближней ИК области спектра, проходя через линзу коллиматора, формирует луч с малым углом отклонения (менее 2 °). Луч представляет собой импульс длительностью 0.7 мс. Сталкиваясь с объектом, лучи отражаются назад на детектор. Полученное излучение (низкой интенсивности) фокусируется на чувствительной поверхности ПЧД. Выходные сигналы ПЧД (токи I_B и I_A) пропорциональны расстоянию x между центром детектора и световым пятном. Интенсивность дошедшего излучения сильно зависит от отражательных свойств объекта. Диффузионная отражающая способность в ближнем

$$I_A = I_0 \frac{D-x}{D}, I_B = I_0 \frac{x}{D}. \quad (7.10)$$

Для исключения зависимости выходных токов от фотоэлектрического тока (а, следовательно, и от интенсивности света) найдем отношение токов:

$$P = \frac{I_A}{I_B} = \frac{D}{x} - 1, \quad (7.11)$$

которое можно переписать в виде:

$$x = \frac{D}{P+1}. \quad (7.12)$$

На рис. 7.35 показана геометрическая модель описываемой измерительной системы. Решая задачу с двумя подобными треугольниками, получим выражение:

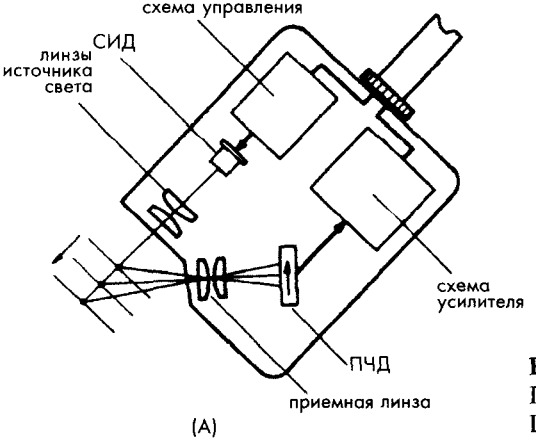
$$L_0 = f \frac{L_B}{x}, \quad (7.13)$$

где f – фокусное расстояние принимающей линзы. Подставляя сюда уравнение (7.12), найдем зависимость между искомым расстоянием и отношением выходных токов:

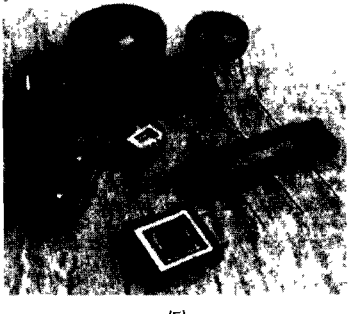
$$L_0 = f \frac{L_B}{D}(P+1) = k(P+1), \quad (7.14)$$

в котором k называется геометрической константой модуля. Очевидно, что эта зависимость является линейной.

На этом же принципе работы реализован промышленный оптический датчик перемещений (рис. 7.37), в котором ПЧД используется для измерения неболь-



(А)



(Б)

Рис. 7.37. Оптические датчики на основе ПЧД (фирмы Keyence Corp. Of America, Fair Lawn, NJ)

ших перемещений на расстоянии нескольких сантиметров. Эти датчики эффективно работают в реальном масштабе времени и применяются при измерениях:

- высоты в таких устройствах, как системы контроля: качества печатных плат, уровня жидких и твердых сред, и т.д.,
- эксцентриситета вращающегося объекта,
- толщины,
- перемещений,

а также для обнаружения присутствия в рабочей зоне определенных объектов. Основным достоинством датчиков на основе ПЧД является то, что их точность может превышать точность самого ПЧД [12].

ПЧД выпускаются двух типов: одно и двухмерные. Эквивалентные схемы ПЧД обоих типов показаны на рис. 7.38. Поскольку в состав эквивалентных схем входят распределенные емкости и сопротивления, постоянные времени ПЧД зависят от положения светового пятна. При подаче на выход ступенчатой функции постоянная времени ПЧД с небольшой чувствительной зоной меняется в диапозоне 1...2 мкс. Спектральный диапазон ПЧД составляет 320...1100 нм, следовательно, они работают в УФ, видимом и ближнем ИК областях спектра. Чувствительная поверхность небольших одномерных ПЧД лежит в пределах 1×2...1×12 мм, в то время как больших двухмерных ПЧД ее сторона равна 4...27 мм.

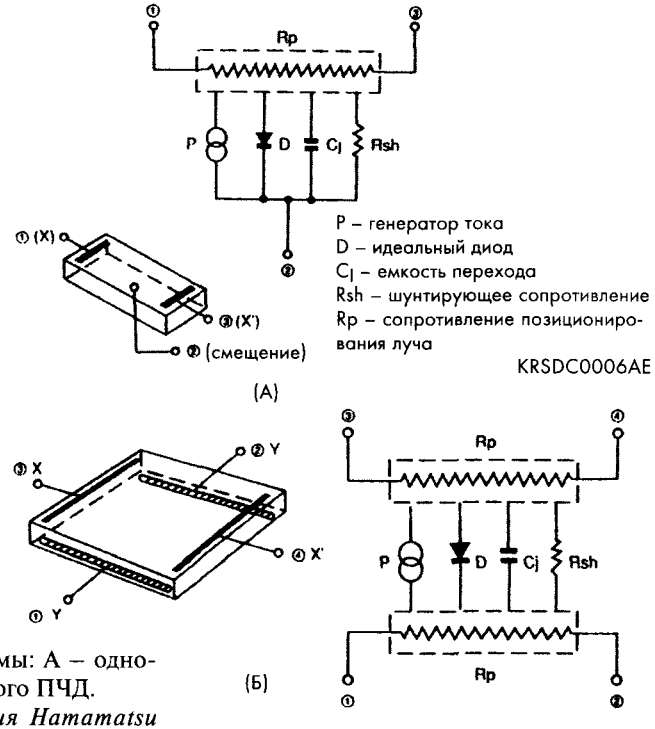


Рис.7.38. Эквивалентные схемы: А – одномерного ПЧД, Б – двухмерного ПЧД.
(Перепечатано с разрешения Hamamatsu Photonics K.K., Japan)

7.6. Ультразвуковые датчики

Для проведения бесконтактных измерений можно разработать активный датчик, который бы мог одновременно и передавать эталонный сигнал, и принимать отраженный от объекта сигнал. Передаваться энергия может в виде любого излучения – например, через электромагнитные волны оптического (как в ПЧД) или микроволнового диапазонов, через акустические волны и т.д. Принцип передачи и приема ультразвуковой энергии лежит в основе очень популярных ультразвуковых датчиков и детекторов скорости. Ультразвуковые волны являются механическими акустическими волнами, частота которых лежит за пределами слышимости человеческого уха – более 20 кГц. Однако сигналы этих частот воспринимаются некоторыми животными: собаками, кошками, грызунами и насекомыми. А некоторые виды млекопитающих, таких как летучие мыши и дельфины, общаются друг с другом ультразвуковыми сигналами.

При столкновении любых волн с объектом часть их энергии отражается. В случае ультразвуковых волн отраженная энергия рассеивается в пространстве. Это означает, что вне зависимости от направления падающего луча, все отраженные лучи почти равномерно распределяются внутри широкого пространственного угла, который может достигать значения 180°. При движении объекта частота отраженных волн не совпадает с частотой излучаемых волн. Это и есть так называемый эффект Доплера (см. раздел 6.2 главы 6 – там описан эффект Доплера для волн СВЧ диапазона. Этот эффект характерен для волн любой природы, в том числе и ультразвуковых).

Расстояние L_0 до объекта можно определить по скорости ультразвуковых волн v в данной среде и углу θ (рис. 7.39А):

$$L_0 = \frac{vt\cos\theta}{2}, \qquad (7.15)$$

где t – время, за которое ультразвуковая волна распространяется от излучателя до объекта и назад к приемнику. Если излучатель и приемник расположены недалеко друг от друга по сравнению с расстоянием до объекта, $\cos\theta \approx 1$. Очевидное преимущество ультразвуковых волн над волнами микроволнового диапазона заключается в том, что они распространяются со скоростями, которые намного меньше скорости света, характерной для СВЧ-волн. Поэтому интервал t для них гораздо длиннее, что упрощает его измерение, и, следовательно, снижает стоимость устройств.

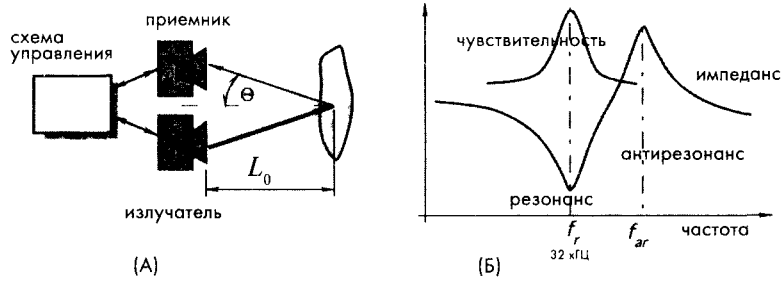


Рис. 7.39. Ультразвуковые датчики расстояний: А – принципиальная схема, Б – импедансная характеристика пьезоэлектрического преобразователя

Для генерации любых механических волн, включая ультразвуковые, требуется организовать обратно поступательное движение поверхности, при котором создаются зоны разряжения и сжатия рабочей среды: газовой (воздушной), жидкостной или твердой (см. раздел 3.10 главы 3, где рассматриваются звуковые волны). Для возбуждения ультразвуковых волн чаще всего применяются пьезоэлектрические преобразователи, работающие в так называемом *моторном* режиме. Это название указывает на то, что в данном режиме пьезоэлектрические устройства напрямую преобразуют электрическую энергию в механическую.

На рис. 7.40А показано, что входное напряжение, приложенное к пьезокерамическому элементу заставляет его изгибаться, возбуждая тем самым ультразвуковые волны. Поскольку пьезоэлектричество является обратимым эффектом, воздействие ультразвуковых волн на тот же керамический элемент приводит к появлению на его поверхности электрических зарядов. Другими словами, элемент может работать и как излучатель, и как приемник (микрофон). Типичная рабочая частота излучающего пьезоэлемента составляет около 32 кГц. Для повышения эффективности частота задающего генератора должна быть равна резонансной частоте f_r керамического элемента (рис. 7.39Б). При соблюдении этого условия удается реализовать лучшую чувствительность и эффективность элемента. При работе схемы в импульсном режиме для передачи и приема сигнала можно использовать один и тот же пьезопреобразователь. При непрерывном режиме работы необходимы два пьезоэлемента. На рис. 7.40Б показана типовая схема ультразвукового датчика перемещений, работающего в воздушной среде, а на рис. 7.41А – его внешний вид. Часто на практике важно знать диаграмму направленности датчика, которая имеет вид, изображенный на рис. 7.41Б. Чем уже диаграмма, тем выше чувствительность преобразователя.

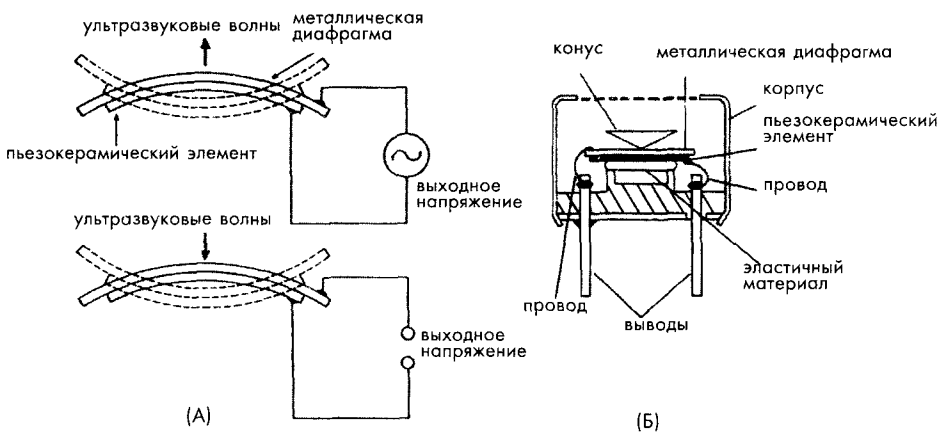


Рис. 7.40. Пьезоэлектрический ультразвуковой преобразователь: А – входное напряжение приводит к изгибу элемента, что вызывает генерацию ультразвуковых волн. И наоборот, в результате воздействия волн на выходе преобразователя появляется напряжение; Б – ультразвуковой преобразователь с открытой апертурой для работы в воздухе (*напечатано с разрешения Nippon Ceramic, Japan*)

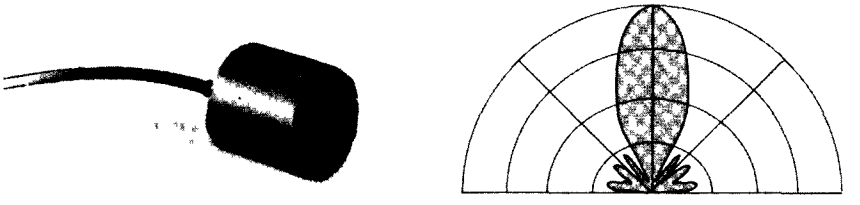


Рис. 7.41. А – ультразвуковой преобразователь, работающий в воздухе, Б – диаграмма направленности

7.7. Радары

7.7.1. Микромощные импульсные радары

В 1993 году в Lawrence Livermore National Laboratory был разработан *микромощный импульсный радар (МИР)*, который является недорогим бесконтактным детектором расстояния до объекта. Принцип действия МИР напоминает принцип действия обычных импульсных радарных систем, но между ними есть несколько существенных отличий. В состав МИР (рис. 7.42) входит генератор белого шума, выходной сигнал которого запускает импульсный генератор. Импульсный генератор вырабатывает очень короткие импульсы со средней частотой 2МГц±20%. Каждый импульс имеет фиксированную длительность τ, а появляются они в произвольные моменты времени. По отношению друг к другу эти импульсы расположены произвольным образом, но в соответствии с гауссовским распределением шума. Интервалы времени между двумя соседними импульсами лежат в пределах 200...625 нс. Можно сказать, что в МИРе происходит частотно-импульсная модуляция (ЧИМ) сигнала белым шумом с максимальной глубиной модуляции 20%. В свою очередь, прямоугольные импульсы генератора модулируют амплитуду сигнала радиопередатчика. Амплитудная модуляция (АМ) сигнала передатчика имеет 100% глубину. Это означает, что радиопередатчик от импульсов то включается, то выключается. Такая двухступенчатая модуляция называется модуляцией ЧИМ-АМ.

Радиопередатчик вырабатывает высокочастотный радиосигнал, состоящий из коротких пачек импульсов, которые через антенну передаются в окружающую среду. Электромагнитные волны отражаются от объекта и возвращаются обратно на радар. Тот же самый импульсный генератор, который модулирует сигнал передатчика, управляет и радиоприемником (с определенной задержкой по времени). Таким образом, приемник получает сигнал только в строго заданном интервале времени. Процесс импульсного управления приемником позволяет значительно снизить потребляемую мощность. Принятые отраженные импульсы демодулируются (восстанавливается прямоугольная форма сигнала). После чего определяется временная задержка между переданным и принятым сигналами. Эта временная задержка пропорциональна расстоянию D от антенны до объекта, от которого принятые волны отразились: $t_d=2D/c$, где c – скорость света.

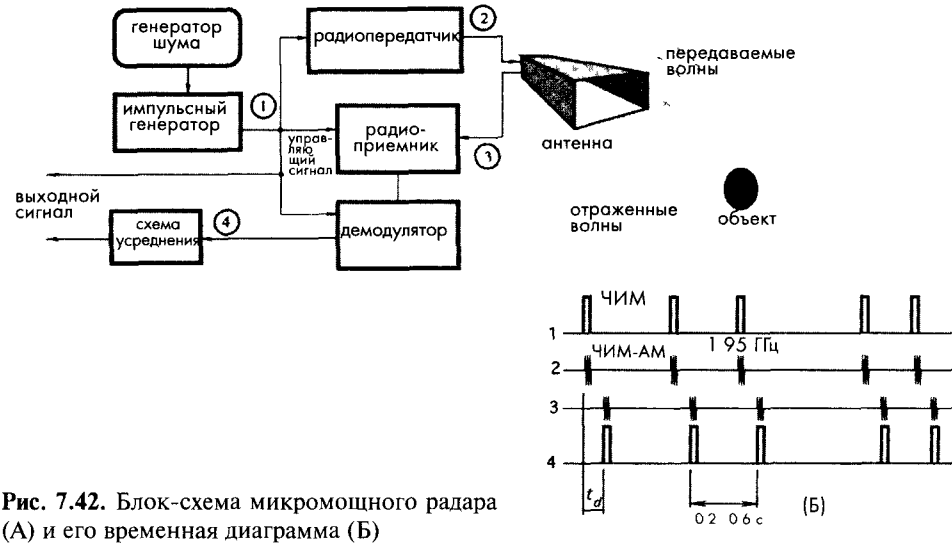


Рис. 7.42. Блок-схема микромощного радара (А) и его временная диаграмма (Б)

Несущая частота (центральная частота) радиопередатчика обычно равна либо 1.95, либо 6.5 ГГц. Из-за того, что модуляционные импульсы имеют очень короткую длительность, частотная полоса излучаемых сигналов очень широкая – порядка 500 МГц (для 1.95 ГГц несущей). Пространственное распределение переданной энергии определяется типом антенны. Для дипольной антенны зона перекрытия составляет почти 360°, но, используя различные типы рупоров, рефлекторов и линз, можно получить практически любую форму области распространения. Благодаря случайной модуляции генератора импульсов, широкой полосе пропускания и низкой спектральной плотности передаваемого сигнала, сигналы МИРа практически невозможно подавить радиоэлектронными методами, но при этом сам он остается незаметным для других, поскольку его излучение, принятое несинхронизированными приемниками воспринимается как белый тепловой шум.

Средний рабочий цикл передаваемых импульсов относительно мал (<1%). Поскольку импульсы распределены случайным образом, практически любое количество идентичных МИР могут работать в одной и той же зоне без разделения частот (т.е. они могут работать на той

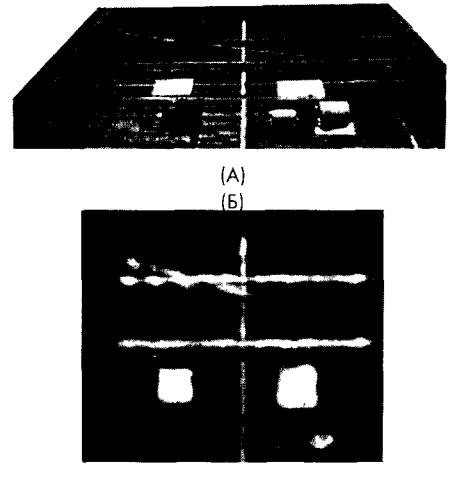


Рис. 7.43. Пример применения МИР: А – внутренняя арматура бетонной плиты (30 см) перед заливкой, Б – реконструированное 3D изображение той же плиты, полученное при помощи МИР

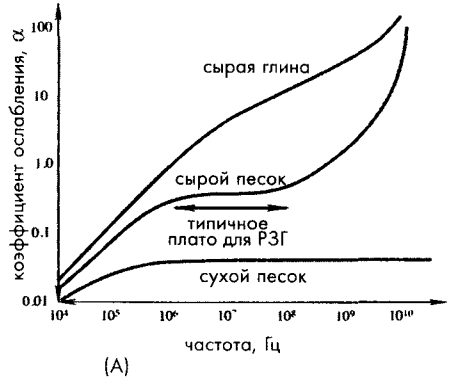
же самой несущей частоте внутри одной и той же частотной полосы). Шанс пересечения передаваемых сигналов от разных МИР очень мал. Даже если это произойдет, схема осреднения значительно снизит уровень помех. Для определения временной задержки, как правило, усредняется порядка 10 000 полученных импульсов.

Другим достоинством МИР является их низкая стоимость и очень низкая потребляемая мощность радиоприемника – около 12 мкВт. Потребляемая мощность всей системы обычно составляет 50 мкВт. Две алкалиновых батарейки АА могут питать такой радар в течение нескольких лет.

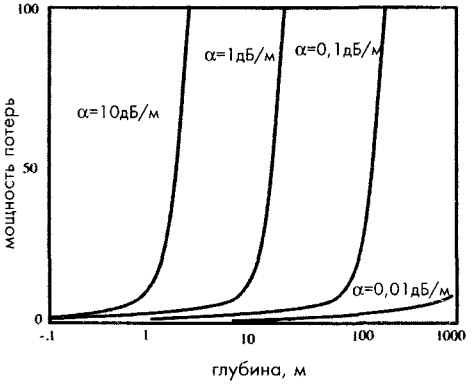
МИР применяются в измерителях расстояний (рис. 7.43), в детекторах обнаружения, в датчиках уровня, в автоматизированных системах, роботах, медицинских инструментах, системах вооружения и даже в игрушках.

7.7.2. Радар для зондирования грунта

Высокочастотные радары для зондирования грунта (РЗГ) применяются в гражданском строительстве, археологии, криминалистике и т.д. Принцип действия таких радаров довольно классический: они посылают радиоволны и принимают отраженные сигналы. Временная задержка между переданными и принятыми сигналами и есть величина, пропорциональная расстоянию до отражающей поверхности. Если радары, работающие в воздушной среде, измеряют расстояния до нескольких тысяч километров, рабочий диапазон РЗГ составляет, в лучшем случае, несколько сотен метров. Радары для зондирования грунта работают в интервале частот 500 МГц...1.5 ГГц (Noggin System, Sensors&Software, Inc, Canada, www.sensoft.ca). Радиоволны не могут проникать глубоко в почву, камни, а также в большинство материалов, сделанных людьми, например, бетон.



(А)



(Б)

Рис. 7.44. А – затухание радиоволн в разных материалах. Коэффициент ослабления зависит от типа материала и рабочей частоты сигнала. На низких частотах (< 1МГц) затухание сигнала, в основном, определяется электропроводностью среды, а на высоких частотах (>1000 МГц) – поглощением энергии молекулами воды. Б – затухание сигнала ограничивает глубину исследования грунта, по мере проникновения вглубь среды мощность потерь увеличивается экспоненциально.

Коэффициент экспоненциального ослабления сигнала α, как правило, определяется по электропроводности материала. В простых однородных материалах такое затухание сигнала является доминирующим фактором. В большинстве материалов энергия сигнала также теряется из-за наличия в них неоднородностей разного типа и воды. Влияние воды сказывается двумя путями: во-первых, в ней содержатся ионы, которые меняют объемную проводимость среды; во-вторых, молекулы воды на частотах выше 1000 МГц поглощают электромагнитную энергию. На рис. 7.44 показано изменение коэффициента ослабления от частоты возбуждающего сигнала и типа материала. В сухих материалах коэффициент ослабления наименьший и, следовательно, наибольшая глубина проникновения радиосигнала (рис. 7.45А). На рис. 7.45Б показан пример картинки на мониторе радара, полученной в процессе исследования грунта.

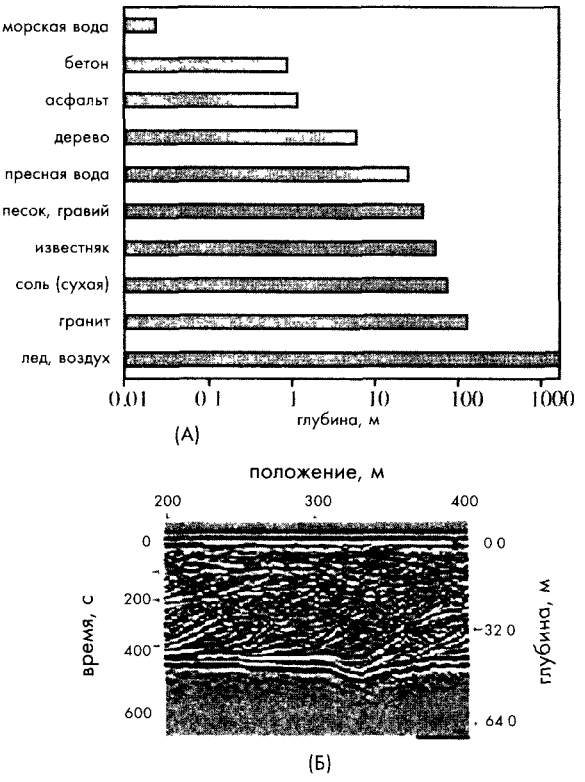


Рис. 7.45. А – максимальная глубина проникновения радиосигналов для разных материалов, Б – графическое представление исследуемого слоя, расположенного в мокром песке

Снижение частоты позволяет увеличить глубину проникновения в грунт, поскольку коэффициент ослабление сигнала сильно зависит от частоты. Но при уменьшении частоты всплывают две других особенности ЗГР. Во-первых, снижение частоты приводит к падению разрешающей способности. Во-вторых, при очень низкой частоте электромагнитные поля распространяются, в основном, диффузионным способом, и здесь уже больше подходят методы измерений электромагнитной индукции и вихревых токов.

7.8. Датчики толщины и уровня

Измерять толщину материала приходится практически везде: и при производстве любых изделий, и при контроле их качества, и при проведении разнообразных исследований и т.д. Существуют различные методы определения толщины: от оптических до ультразвуковых и рентгеновских. В этом разделе будут коротко рассмотрены менее известные из них.

7.8.1. Датчики абляции

Абляция – это рассеяние тепла при расплавлении или удалении защитного слоя происходящее под действием высоких температур. Системы тепловой защиты (СТЗ), построенные на этом принципе, используются для предохранения внутренних конструкции и оборудования космических кораблей от перегрева во время спуска при входе в атмосферу Земли. Такие СТЗ основаны на химическом разложении или фазовых переходах (или на том и другом вместе) определенных веществ, т.е. на реакциях, проходящих с поглощением тепла при температурах ниже критических для защищаемых объектов. В этом случае попадающая на объект тепловая энергия направляется на плавление, сублимацию или разложение абляционного материала. Скорость удаления абляционного материала прямо пропорциональна тепловому потоку на поверхности объекта. Оценить этот тепловой поток можно, измерив толщину защитного слоя. Следовательно, датчики абляции – это разновидность датчиков перемещений, которые определяют положение защитного слоя над внешней поверхностью объекта. По полученным данным оценивается толщина оставшегося абляционного слоя и тепловой поток, действующий на объект. Датчики абляции могут быть внутренними (встроенными в защитный слой) и наружными.

Встроенные датчики реализуются на основе либо детектора разрыва проволочек, либо преобразователя излучений, либо световодов [13]. Детектор разрыва проволочек состоит из нескольких тонких проводков, вмонтированных в абляционный слой на разных известных уровнях. Когда процесс разложения доходит до очередного проводка, он разрушается, тем самым разрывая электрическую цепь. На рис. 7.46А проиллюстрирована эта концепция. Иногда во все проволочки встраиваются термопары [14], которые располагаются строго друг под другом. Такая конструкция обеспечивает строгую очередность разрушения термопар и позволяет оценить температурный профиль защитного слоя и его изменение во времени.

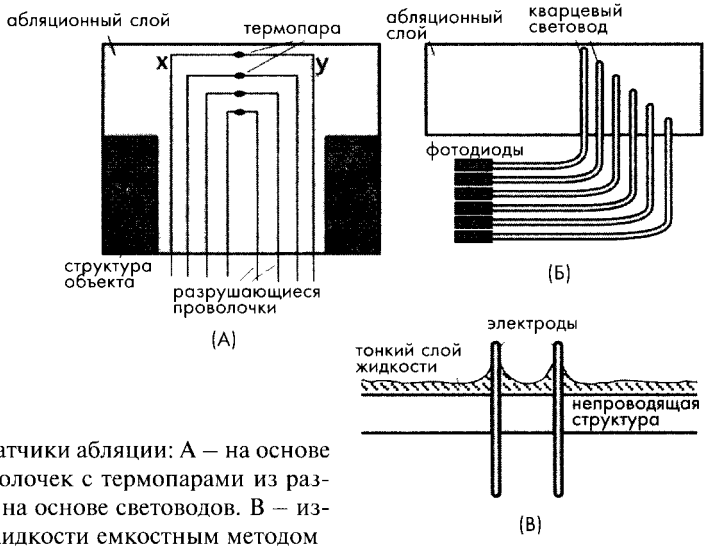


Рис. 7.46. Встроенные датчики абляции: А – на основе детектора разрыва проволочек с термопарами из разных металлов x и y, Б – на основе световодов. В – измерение тонкого слоя жидкости емкостным методом

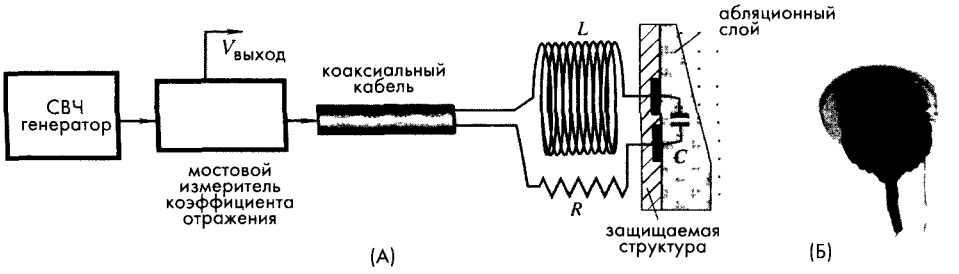


Рис. 7.47. Принципиальная схема наружного резонансного датчика абляции (А) и его внешний вид (Б)

Датчик абляции на основе световодов состоит из кварцевых оптоволоконных световодов, встроенных в защитный слой на известной глубине (рис. 7.46Б). Когда процесс разложения доходит до очередного световода, на выходе соответствующего фотодиода появляется электрический сигнал. Этот метод позволяет получить данные о прохождении фронта разложения через определенные точки слоя, но не дает возможности измерить температуру в этих точках, что обеспечивал предыдущий способ.

Наружный датчик абляции может быть реализован емкостным методом. В этом случае датчик представляет собой два электрода, которые могут иметь различную форму [13]. Этот датчик включается последовательно с катушкой индуктивности и резистором, подсоединенных к волноводу (например, коаксиальному кабелю). Устройство, показанное на рис. 7.47, очень напоминает структуру: передатчик – антенна. Резонансная частота полученного *RLC* контура приблизительно равна:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \qquad (7.16)$$

При выполнении условий резонанса вся электромагнитная энергия, поступившая в контур, рассеивается на резисторе. Однако, если вследствие изменения емкости меняется частота контура, часть энергии отражается назад к источнику. Если емкость продолжит изменяться, доля отраженной энергии возрастет. Когда речь идет об антенне, работающей подобным образом, говорят, что она расстроилась. Для определения доли отраженной энергии между источником радиочастотного сигнала и волноводом ставят мостовой измеритель коэффициента отражения (ИКО), часто называемый панорамным измерителем, постоянное напряжение которого пропорционально этой доле. После чего производят настройку антенны, для чего выходное напряжение мостовой схемы делается минимальным, при этом передаваемая энергия становится максимальной.

7.8.2. Детекторы толщины пленок

Датчики для измерения толщины пленок бывают механическими, оптическими, электромагнитными и емкостными. Оптические методы могут применяться только с прозрачными и полупрозрачными пленками. Плоские электроды, имитирующие конденсатор с параллельными пластинами, позволяют получать большие изменения

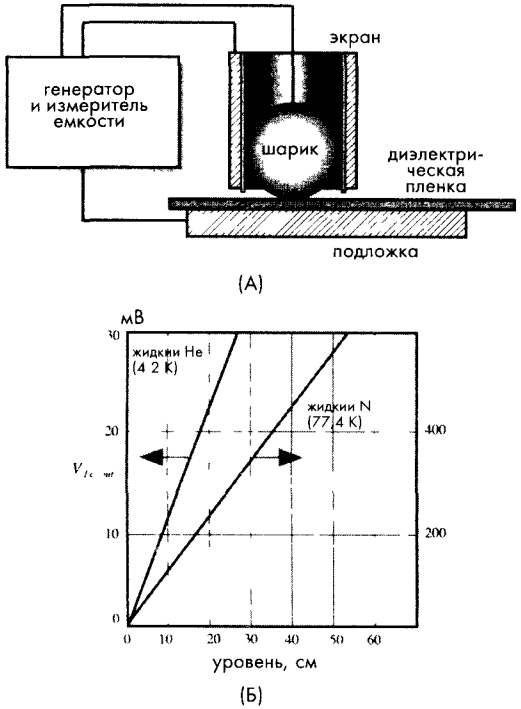


Рис. 7.48. Емкостной датчик для измерения толщины сухой диэлектрической пленки (А) и форма передаточной функции (Б) [16]

выходного сигнала. Для обеспечения точности измерений эти пластины должны быть строго параллельны исследуемой пленке. Поскольку пленка может быть нанесена на поверхность любой формы, под каждый конкретный случай разрабатываются электроды специальной формы.

В работе [15] описан простой емкостной датчик, измеряющий толщину жидких пленок. В нем определяется емкость между двумя небольшими электродами, выступающими над поверхностью жидкости (рис. 7.46В). Жидкость выполняет роль диэлектрика между пластинами конденсатора. Если диэлектрическая проницаемость жидкости отличается от проницаемости воздуха, изменение уровня жидкости приведет к изменению емкости датчика. Этот конденсатор входит в состав частотного модулятора, на вход которого подается фиксированная частота. Выходная частота модулятора определяется величиной емкости конденсатора датчика.

В работе [16] описан датчик со сферическим электродом, используемый для измерения толщины сухой диэлектрической пленки. Емкость измеряется между металлической сферой (шариком из нержавеющей стали диаметром 3...4 мм) и проводящей подложкой (рис. 7.48А). Для уменьшения краевых эффектов шарик помещается в активный экран, помогающий направлять электрическое поле через диэлектрическую пленку на подложку.

7.8.3. Датчики уровня жидкости

Известно много способов измерения уровня жидкости. Для этого подходят и резистивный (рис.7.1Б), и оптический (рис.7.28), и магнитный (рис. 7.24), и емкостной (рис.3.8 главы 3) датчики. Выбор датчика для каждого конкретного случая определяется многими факторами, но, пожалуй, основным из них является тип жидкости. Сложнее всего измерять уровень сжиженных газов, особенно жидкого гелия, обладающего низкой плотностью и низкой диэлектрической проницаемости, не считая того, что он должен храниться в закрытых сосудах Дюара при криогенных температурах. Для таких сложных случаев наиболее подходят датчики, реализованные на основе линии передач. Принцип действия этих датчиков подобен принципу датчиков абляции (см. рис. 7.47). На рис. 7.49 показана конструкция датчика для измерения уровня жидкостей на основе линии передач.

Чувствительный элемент напоминает емкостной датчик уровня, показанный на рис. 3.8 главы 3, однако, его принцип действия не заключается в изменении диэлектрической проницаемости жидкости. Сенсор представляет собой длинную трубку с внутренним электродом, окруженную внешним цилиндрическим электродом. Вся эта конструкция погружается жидкость, заполняющую пространство между электродами до уровня *x*. На электроды подается высокочастотный сигнал (порядка 10 МГц). Длина сенсора по отношению к длине волны может быть любой, но для обеспечения линейности рекомендуется. Чтобы она была меньше $(1/4)\lambda$ [17]. Высокочастотный сигнал проходит вдоль линии передач, сформированной двумя электродами. Поскольку диэлектрическая проницаемость жидкости отличается от проницаемости паров, свойства линии передач будут определяться положением границы между жидкостью и паром (другими словами, уровнем жидкости). Высокочастотный сигнал будет частично отражен от поверхности раздела жидкость-пар и вернется назад в верхнюю часть сенсора. В некоторой степени эта система напоминает радар, посылающий сигнал к объекту и принимающий отраженный сигнал. Измеряя сдвиг фаз между переданным и отраженным сигналами, определяется положение границы раздела. Сдвиг фаз измеряется при помощи фазового компаратора, на выходе которого вырабатывается постоянное напряжение. Более высокая диэлектрическая проницаемость обеспечивает более высокий коэффициент отражения и, соответственно, лучшую чувствительность датчика (рис. 7.49Б).

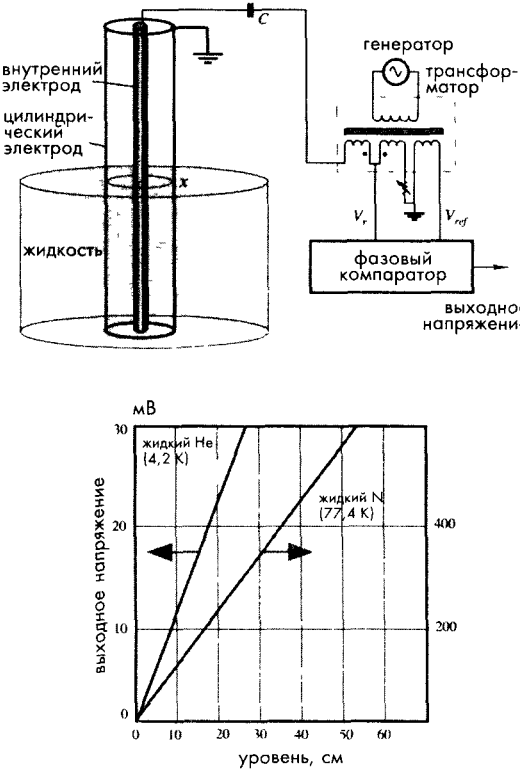


Рис. 7.49. Датчик на основе линии передач (А) и его передаточная функция (В) [17]

Литература

1. Kato, H., Kojima, M., Gattoh, M., Okumura, Y., and Morinaga, S. Photoelectric inclination sensor and its application to the measurement of the shapes of 3-D objects. *IEEE Trans. Iustrum. Meas.* 40(6), 1021-1026, 1991.
2. Barker, M. J. and Colclough, M. S. A two-dimensional capacitive position transducer with rotation output. *Rev. Sci. Instrum.*, 68(8), 3238-3240, 1997.
3. Peters, R.D. U.S. Patent 5, 461, 319, 1995.
4. De Silva, C. W. *Control Sensors and Actuators,* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ,1989.

5 *Linear Application Handbook,* Linear Technology, 1990
6 *Hall Effect IC Applications,* Sprague, 1986
7 B Halg, A silicon pressure sensor with a low-cost contactless interferometric optical readout *Sensors Actuators A* 30, 225-229, 1992
8 Dakin, J P, Wade, C A and Withers, P B An optical fiber pressure sensor, *SPIE Fiber Optics '87 Fifth International Conference on Fiber Optics and Optoelectronics,* Bellingham, 1987, pp 194-201
9 Lee, C E and Taylor, H F Fiber-optic Fabry-Perot temperature sensor using a low-coherence light source *J Lightwave Technol* 129-134, 1991
10 Wolthuis, R A , Mitchell, G L , Saaski, E , Haiti, J C and Afromowitz, M A Development of medical pressure and temperature sensors employing optical spectrum modulation *IEEE Trans Biomed Eng* 38, 974-980, 1991
11 Spillman, W B , Jr Multimode fiber-optic hydrophone based on a Schlieren technique A^/ *Opt* 20, 465, 1981
12 van Drecht, J and Meijer, G C M Concepts for the design of smart sensors and smart signal processors and their applications to PSD displacement transducers In *Transducers'91 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators Digest of Technical Papers* IEEE, New York, 1991, pp 475-478
13 Noffz, G K and Bowman, M P Design and laboratory validation of a capacitive sensor for measuring the recession of a thin-layered ablator NASA Technical Memorandum 4777, 1996
14 *In-Depth Ablative Plug Transducers,* Hycal Engineering, El Monte, CA, 1992
15 Brown, R C , Andreussi, P , and Zanelli, S The use of wire probes for the measurement of liquid film thickness in annular gas-liquid flows *Can J Chem Eng ,* 56, 754-757, 1978
16 Graham, J , Kryzeminski, M , and Popovic, Z Capacitance based scanner for thickness mapping of thin dielectric films *Rev Sci Intrum ,* 71(5), 2219-2223, 2000
17 Brusch, L , Delfitto, G, and Mistura, G Level meter for dielectric liquids *Rev Sci Instrum* 70(2), 1999

ГЛАВА 8

СКОРОСТЬ И УСКОРЕНИЕ

Ускорение – динамическая характеристика объекта. Согласно второму закону Ньютона оно возникает только после приложения к объекту какой-либо силы. Перемещение объекта, его скорость и ускорение являются взаимосвязанными физическими величинами: скорость – это первая производная от перемещения, ускорение – его вторая производная. Однако взять производную сильно зашумленного сигнала практически невозможно, поскольку это приводит к возникновению очень больших погрешностей даже при использовании очень сложных схем обработки. Поэтому скорость и ускорение объектов нельзя определять по данным, полученным при помощи детекторов перемещений, и для этого необходимо применять специальные схемы. Как правило, в низкочастотной области (в полосе частот порядка 1 Гц) довольно хорошую точность измерений обеспечивают датчики положения и перемещения объектов. В зоне средних частот (менее 1 кГц) уже предпочтительнее использовать датчики скорости. Тогда как на высоких частотах, когда перемещения соизмеримы с уровнем шума, применяются датчики ускорения.

Скорость движения может быть либо угловой, либо линейной. Она показывает насколько быстро объект движется по прямой линии или насколько быстро он вращается. Измерение скорости зависит от размеров объекта и может выражаться, например, в мм/с или миль/час. В настоящее время разработана глобальная система навигации (GPS), позволяющая определять скорость и положение крупных объектов, таких как наземные и морские транспортные средства, при помощи радиосигналов от большого количества спутников, вращающихся вокруг Земли. Определение скорости и положения таких объектов вычисляется по временным задержкам между сигналами, полученными от разных спутников. Для меньших объектов и меньших расстояний спутниковые системы не подходят. Здесь как правило, применяется метод сравнения с эталонными величинами. Принцип действия таких детекторов часто основан на измерении перемещений объекта относительно некоторого эталонного объекта, который часто входит в состав самого детектора. Поэтому чувствительный элемент, реагирующий на перемещение объекта, является одним из компонентов многих датчиков скорости и ускорения. Иногда таких элементов в составе датчиков скорости и акселерометров нет, поскольку они сами преобразуют свое движение в электрические сигналы. Например, в соответствии с законом Фарадея, магнит, двигающийся в катушке индуктивности, приводит к возникновению в ней напряжения. Это напряжение пропорционально скорости движения магнита и силе поля (см. уравнение (3.39) главы 3). Линейные датчики скорости построены на этом принципе

магнитной индукции. В их состав входит постоянный магнит и катушка индуктивности определенной формы. Выходное напряжение на катушке прямо пропорционально относительной скорости магнита в пределах рабочей зоны.

В датчиках скорости оба конца магнита находятся внутри катушки. При такой конструкции на выходе катушки будет всегда нулевое напряжение, поскольку напряжения, индуцируемые разными концами магнита будут взаимно уничтожать друг друга. Чтобы этого не происходило, катушка делится на две части. Северный полюс магнита индуцирует ток в одной половине катушки, а южный – в другой (рис. 8.1). Обе катушки подключены последовательно друг с другом, но в противоположных направлениях. Выходной сигнал такого устройства пропорционален скорости движения магнита. Максимальное значение измеряемой скорости определяется в основном входными цепями интерфейсной электронной схемы, а минимальное – уровнем шума, особенно от расположенных рядом мощных устройств переменного тока. В таблице 8.1 приведены типовые характеристики электромагнитного датчика скорости. Такие датчики очень похожи на детекторы положения на основе ЛРДТ, описанные в разделе 7.4 главы 7, за исключением того, что ЛРДТ с подвижным ферромагнитным сердечником относится к активным устройствами, в то время как сенсоры скорости являются пассивными, и в них движущимся элементом является сам постоянный магнит. Это означает, что они сами по себе являются генераторами тока и им для их работы не требуется сигнал возбуждения. Очевидно, что линейные датчики скорости детектируют скорость в пределах расстояния, ограниченного их размерами, поэтому они в основном используются для измерения скорости вибраций. Угловой датчик скорости, реализованный на этом же принципе, непрерывно меряет скорость вращения, и в них нет ограничений на количество оборотов.

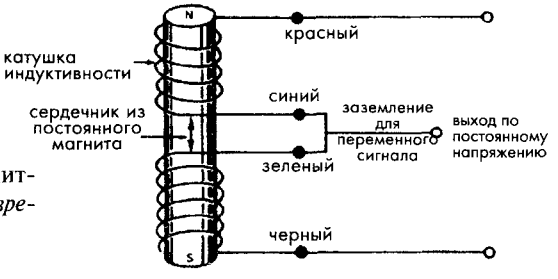


Рис. 8.1. Принцип действия электромагнитного датчика скорости (*Напечатано с разрешения Trans-Tek, Inc, Ellington, CT*)

Таблица 8.1. Характеристики электромагнитных датчиков скорости

Характеристика	Значение
Перемещение магнитного сердечника, дюйм	0 5 24
Чувствительность, мВ/дюйм/с	35 500
Сопротивление катушки, кОм	2 45
Индуктивность катушки, Гн	0 06 7 5
Частотная характеристика, Гц (при нагрузке, в 100 раз превышающей сопротивление катушки)	500 1500
Вес, г	20 1500

Источник Trans-Tek, Inc, Ellington, CT

8.1. Характеристики акселерометров

Вибрации – это динамическое механическое явление, заключающееся в периодических колебательных движениях вокруг заданного положения. В некоторых случаях, например, при проведении ударных испытаний, измерении линейных ускорений и т.д., вибрации могут отсутствовать, но это не меняет конструкции датчиков. Акселерометры считаются устройствами с одной степенью свободы, в состав которых входят: эталонная масса, упругая поддерживающая система (пружина) и рама, обладающая демпфирующими свойствами (см. рис. 3.48А главы 3).

Математическая модель акселерометра представлена в уравнении (3.156) главы 3. Для решения этого уравнения удобно воспользоваться преобразованиями Лапласа, применив которые, получим выражение:

$$Ms^2X(s)+bsX(s)+kX(s)=-MA(s), \tag{8.1}$$

где $X(s)$ и $A(s)$ – преобразования Лапласа для перемещения $x(t)$ и ускорения на входе акселерометра d^2y/dt^2. Решая его относительно $X(s)$, получим:

$$X(s)=-\frac{MA(s)}{Ms^2+bs+k}. \tag{8.2}$$

Введем удобную переменную $\omega_0=\sqrt{k/M}$, а также обозначим $2\xi\omega_0=b/M$. Тогда уравнение (8.2) примет вид:

$$X(s)=-\frac{A(s)}{s^2+2\xi\omega_0 s+\omega_0{}^2}. \tag{8.3}$$

Значение ω_0 – это собственная угловая частота акселерометра, а ξ – нормализованный коэффициент затухания. Считаем, что

$$G(s)=-\frac{1}{s^2+2\xi\omega_0 s+\omega_0{}^2}, \tag{8.4}$$

тогда уравнение (8.3) принимает вид:

$$X(s)=G(s)A(s).$$

Его решение может быть выражено при помощи операторов обратного преобразования Лапласа:

$$x(t)=L^{-1}\{G(s)A(s)\}. \tag{8.5}$$

Применяя к нему теорему о свертке преобразований Лапласа, получим:

$$x(t)=\int_0^t g(t-\tau)a(\tau)d\tau, \tag{8.6}$$

где a – зависимость амплитуды сигнала акселерометра от времени, а $g(t)$ – обратное преобразование Лапласа $L^{-1}\{G(s)\}$.

При $\omega = \omega_0\sqrt{1-\xi^2}$ уравнение (8.6) имеет два решения. Одно для затухания ниже критического (ξ<1):

$$x(t) = \int_0^t -\frac{1}{\omega} e^{-\xi\omega_0(t-\tau)} \sin\omega(t-\tau)a(t)d\tau , \qquad (8.7)$$

а другое – для затухания выше критического (ξ>1):

$$x(t) = \int_0^t -\frac{1}{\omega} e^{-\xi\omega_0(t-\tau)} \sinh\omega(t-\tau)a(t)d\tau . \qquad (8.8)$$

Во втором уравнении $\omega = \omega_0\sqrt{\xi^2-1}$. По этим выражениям можно определить выходной сигнал акселерометра при разных входных сигналах [1].

Правильно рассчитанный, изготовленный и откалиброванный акселерометр должен иметь одну резонансную (собственную) частоту и плоскую частотную характеристику, обеспечивающую получение точных измерений (рис. 8.2). В пределах плоской зоны датчик корректно реагирует на изменения входного сигнала. Для расширения динамического диапазона акселерометра, ограниченного резонансной частотой, применяют вязкое демпфирование. В качестве демпфирующей среды чаще всего используется силиконовая смазка.

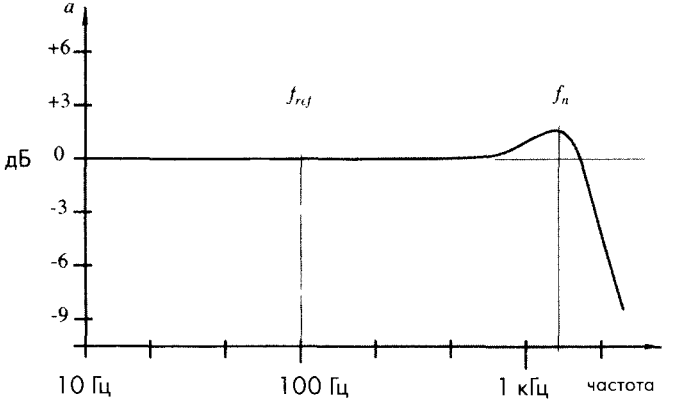


Рис. 8.2. Частотная характеристика акселерометра. f_n – собственная частота, f_{ref} – эталонная частота

При калибровке датчика определяются следующие характеристики:

1. Чувствительность – отношение электрического выходного сигнала к механическому входному. Она обычно выражается в вольтах на единицу измерения ускорения, соответствующую определенным условиям. Например, чувствительность может быть выражена как 1 В/g (единица ускорения g=9.80665 м/с^2 при проведении измерений на уровне моря на широте 45°). Чувствительность обычно определяется для синусоидального сигнала с эталонной частотой.

В США эта частота равна 100 Гц, а в Европе – 160 Гц (эти частоты выбраны такими потому, что они не совпадают ни с частотой сети, ни с ее гармониками)

2. Частотная характеристика – поведение выходного сигнала в рабочем частотном диапазоне акселерометра.
3. Резонансная частота недемпфированного датчика – четко детектируемый пик, который на 3-4 дБ выше выходного сигнала датчика на эталонной частоте. Для датчика с коэффициентом демпфирования близким к критическому этот пик может быть не очень отчетливым, в этом случае измеряется сдвиг фаз. На резонансной частоте он будет равен 180° относительно фазы сигнала на эталонный частоте.
4. Уровень выходного сигнала при нулевом внешнем воздействии (для емкостных и пьезорезистивных датчиков). Этот параметр определяется для положения датчика, в котором его чувствительная (активная) ось перпендикулярна направлению силы гравитации Земли. В датчиках, имеющих постоянную составляющую выходного сигнала, влияние гравитации необходимо устранять, иначе она может быть ошибочно воспринята как механическое воздействие.
5. Линейность акселерометра. Данный параметр определяется во всем динамическом диапазоне входных сигналов.

При выборе акселерометра для конкретного применения желательно ответить на следующие вопросы:

1. Что необходимо измерять: амплитуду вибраций или линейное ускорение?
2. При какой температуре окружающей среды должен работать датчик, и как быстро эта температура может меняться?
3. Каким должен быть частотный диапазон?
4. Какие требования предъявляются к линейности и точности?
5. Какие должны быть размеры датчика?
6. Каким должен быть источник питания?
7. Не придется ли датчику работать в агрессивной среде: в присутствии коррозионных реагентов и повышенной влажности?
8. Какой должна быть механическая прочность устройства?
9. Какая интенсивность существующих акустических, электромагнитных и электростатических полей?
10. Требуется ли заземление устройства?

8.2. Емкостные акселерометры

В состав всех акселерометров входит специальный элемент, называемый *инерционной массой*, движение которого отстает от движения корпуса. И независимо от конструкции датчика ускорений его основная цель заключается в детектировании перемещения этой массы относительно корпуса устройства и преобразовании его в пропорциональный электрический сигнал. Поэтому другой составной частью всех акселерометров является детектор перемещений, способный измерять микроскопические амплитуды вибрационных колебаний или линейных ускорений. Емкостной метод преобразования перемещений в электрический сигнал является самым проверенным и надежным. Емкостной датчик

ускорений состоит, по крайней мере, из двух пластин: стационарной, часто соединенной с корпусом, и свободно перемещающейся внутри корпуса, к которой подсоединена инерционная масса. Эти пластины формируют конденсатор, величина емкости которого зависит от расстояния d между ними (см. уравнение (3.23) главы 3), а значит и от ускорения движения, испытываемого датчиком. Максимальное перемещение, определяемое емкостным акселерометром, редко превышает 20 мкм. Следовательно, в таких датчиках всегда необходимо компенсировать дрейф различных параметров, а также подавлять всевозможные помехи. Поэтому обычно акселерометры имеют дифференциальную структуру, для чего в их состав вводится дополнительный конденсатор, емкость которого должна быть близка к емкости основного конденсатора. При этом напряжения на конденсаторы подаются со сдвигом фаз 180°. Тогда величина ускорения датчика будет пропорциональна разности значений емкостей конденсаторов.

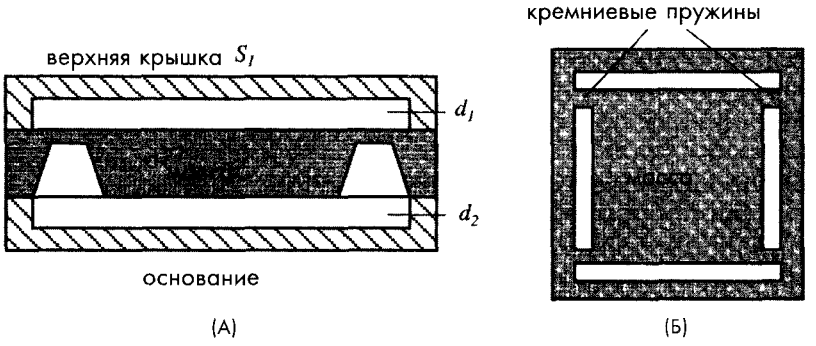


Рис. 8.3. Емкостной акселерометр с дифференциальным конденсатором: А – поперечное сечение акселерометра, Б – вид сверху на инерционную массу, поддерживаемую четырьмя кремниевыми пружинами

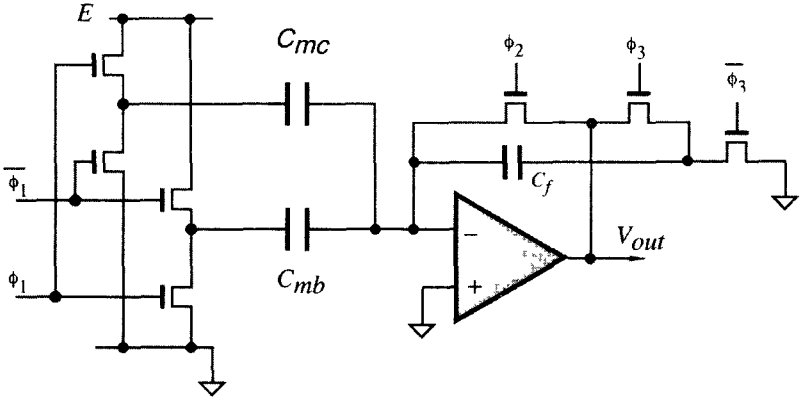


Рис. 8.4. Схема преобразователя емкость-напряжение, реализуемая на одной кремниевой подложке с датчиком

На рис. 8.3А показано поперечное сечение емкостного дифференциального акселерометра, в котором инерционная масса расположена между верхней крышкой и основанием [2]. Масса поддерживается четырьмя кремниевыми пружинами (рис. 8.3Б). Верхняя крышка и основание отделены от массы расстояниями d_1 и d_2. Все три элемента изготовлены методами микротехнологий на одной кремниевой подложке. На рис. 8.4 показана упрощенная схема преобразователя емкость-напряжение, аналогичная схеме на рис. 5.52 главы 5.

Площадь пластины конденсатора C_{mc}, образованного массой и верхним электродом, равна S_1, а площадь пластины второго конденсатора C_{mb}, образованного массой и основанием – S_2. При движении массы по направлению к верхнему электроду расстояние d_1 уменьшается на Δ, а расстояние d_2 увеличивается на ту же самую величину. Значение Δ равно механической силе F_m, действующей на массу, деленной на коэффициент упругости κ кремниевой пружины:

$$\Delta = \frac{F_m}{k}. \tag{8.9}$$

Строго говоря, эквивалентная схема акселерометра справедлива только тогда, когда на положение массы не влияют электростатические силы (т.е. когда емкость конденсаторов линейно зависит от F_m) [3]. Акселерометр стоит на входе управляемого суммирующего усилителя, выходное напряжение которого зависит от значений конденсаторов и, следовательно, от силы:

$$V_{out} = 2E\frac{C_{mc} - C_{mb}}{C_f}. \tag{8.10}$$

Уравнение (8.10) справедливо только при малых изменениях емкостей датчика. Выходной сигнал акселерометра также зависит от температуры и рассогласования значений конденсаторов. Рекомендуется проводить калибровку таких датчиков во всем температурном диапазоне и осуществлять соответствующую коррекцию выходного сигнала во время измерений. Другой эффективный способ повышения стабильности устройства – разработка системы самокалибровки, позволяющей компенсировать влияние электростатических сил, возникающих, когда либо на верхнюю крышку, либо на основание подается высокое напряжение.

8.3. Пьезорезистивные акселерометры

Чувствительным элементом таких акселерометров является тензодатчик, измеряющий деформацию пружин, поддерживающих инерционную массу. Эта деформация пропорциональна величине и скорости перемещения массы, а значит и ускорению. Такие устройства могут измерять ускорения в широком частотном диапазоне: 0...13 кГц. При разработке соответствующей конструкции пьезорезистивные акселерометры выдерживают перегрузку, равную 10 000g. Естественно, что интервал измерений таких датчиков гораздо уже: $\pm 1000g$ с погрешностью менее 1%. Параметр перегрузки является критическим для многих применений. Акселерометры, реализованные из дискретных компонентов, обладающих индивидуальными

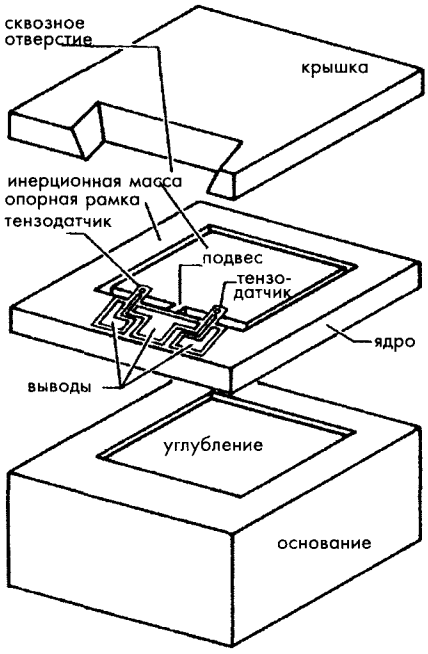


Рис. 8.5. Устройство пьезорезистивного акселерометра

температурными характеристиками, страдают от высокой температурной зависимости выходного напряжения, что требует тщательного подбора параметров составных элементов каждого датчика. Эта проблема решается при интегральном изготовлении таких датчиков методами микротехнологий.

На рис. 8.5 показан твердотельный акселерометр, обладающей широким динамическим диапазоном, разработанный Endevco/Allied Signal Aerospace Co (Sunnyvale, CA). Микродатчик состоит из трех слоев кремния. Внутренний слой (ядро)включает в себя инерционную массу и упругую подвесную конструкцию. Масса крепится внутри рамки, сформированной методом травления, на подвесе, с двух сторон которого расположены тензодатчики, детектирующие движение массы. Внешние два слоя: крышка и основание, защищают подвижные части от внешних загрязнений. В обоих внешних слоях сделаны углубления, позволяющие инерционной массе свободно перемещаться [4]. У этого датчика есть несколько важных особенностей. Одна из них заключается в том, что чувствительная ось датчика лежит в плоскости подложки, тогда как в большинстве конструкций аналогичных датчиков она перпендикулярна подложке. Изготовление всех компонентов датчика на одном кремниевом кристалле позволяет реализовать надежную и прочную механическую конструкцию.

Когда ускорение действует на чувствительную ось, инерционная масса поворачивается вокруг подвеса. При этом один из тензодатчиков испытывает сжатие, а второй – растяжение. Поскольку тензодатчики имеют небольшую длину, даже маленькие перемещения вызывают большие изменения сопротивления. Для балансировки мостовой схемы в том же кремниевом кристалле сформированы пять подстроечных резисторов (непоказанных на рисунке).

8.4. Пьезоэлектрические акселерометры

Пьезоэлектрический эффект (не путайте с пьезорезистивным) часто лежит в основе датчиков вибраций и ускорений. Этот эффект заключается в прямом преобразовании механической энергии в электрическую в материалах, имеющих кристаллическую структуру, включающую в себя электрические диполи (раздел 3.6 главы 3). Эти датчики работают в частотном диапазоне менее 2 Гц....5кГц. Они также обладают хорошим подавлением внеосевых шумов, высокой линейностью и широким температурным диапазоном (до 120°С). Хотя иногда в качестве чувствительных элементов применяются кварцевые кристаллы, все же большее рас-

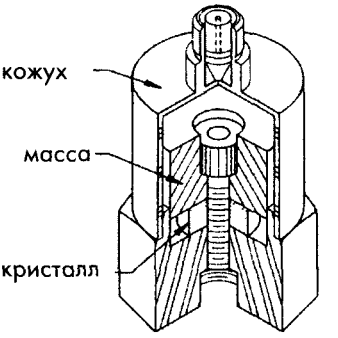


Рис. 8.6. Принципиальная схема пьезоэлектрического акселерометра. Ускорение, действующее на датчик, приводит к разности перемещений кожуха и инерционной массы, в результате чего появляется сила, действующая на кристалл. Выходной сигнал акселерометра прямо пропорционален ускорению или уровню вибраций

пространение для этих целей получили керамические пьезоэлектрические материалы, такие как титанат бария, титанат цирконат свинца (PZT) и метаниобат свинца. Кристалл располагается между кожухом и инерционной массой, на которую действует сила, пропорциональная ускорению (рис. 8.6). Микродатчики обычно реализуются из кремния. Поскольку кремний не обладает пьезоэлектрическими свойствами, при формировании интегрированного микродатчика на кремниевую консольную балку наносится тонкая пленка из титаната свинца. Для улучшения частотных характеристик пьезоэлектрический сигнал усиливается при помощи преобразователей заряд-напряжение или ток-напряжение, встроенных в один и тот же корпус с пьезоэлектрическим кристаллом.

8.5. Тепловые акселерометры

8.5.1. Акселерометры с нагреваемой пластиной

Поскольку принцип действия акселерометров заключается в определении перемещения инерционной массы, для проведения таких измерений можно воспользоваться основной формулой теплопередачи (см. уравнение (3.125) главы 3). Тепловой акселерометр, как и любой другой датчик ускорений, состоит из инерционной массы, подвешенной на тонкой консольной балке, расположенной рядом с теплоотводящей пластиной или между двух теплоотводящих пластин (рис. 8.7) [5]. Масса и балка изготовлены методами микротехнологий. Пространство между ними заполнено теплопроводящим газом. Масса нагревается при помощи встроенного нагревателя до заданной температуры T_1. Когда ускорения нет, между массой и теплоотводами устанавливается тепловое равновесие: количество тепла q_1 и q_2, переданное пластинам через газ пропорционально расстояниям M_1 и M_2.

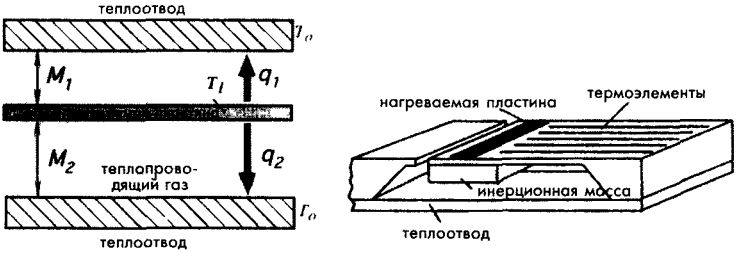


Рис. 8.7. Тепловой акселерометр: А – поперечное сечение нагреваемой части, Б – устройство датчика (показано без крышки) [5]

Температура в любой точке консольной балки, на которой закреплена инерционная масса, зависит от расстояния между ней и опорой x, а также от величины зазоров от нее до теплоотводов. Ее можно найти из дифференциального уравнения:

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \lambda^2 T = 0 \,, \tag{8.11}$$

где

$$\lambda = \sqrt{\frac{K_g(M_1 + M_2)}{L_{si} D M_1 M_2}} \,, \tag{8.12}$$

где K_g и K_{si} – коэффициенты теплопроводности газа и кремния, а D – толщина консольной балки. Для граничных условий, при которых температура теплоотводов равна нулю, решение уравнения (8.11) имеет вид:

$$T(x) = \frac{P \sinh(\lambda x)}{WDK_{si}\lambda \cosh(\lambda L)} \,, \tag{8.13}$$

где W и L – ширина и длина балки, а P – тепловая мощность. Для измерения температуры на балке формируется детектор температуры, в качестве которого могут выступать интегрированные в балку диоды (в главе 16 приведено описание применения кремниевых диодов в качестве температурных датчиков) или нанесенные на ее поверхность последовательно соединенные термопары. Эта температура, преобразованная в электрический сигнал, и является мерой величины ускорения. Чувствительность тепловых акселерометров (порядка 1% от изменения выходного сигнала, отнесенного к g) несколько ниже, чем у датчиков ускорений емкостного и пьезоэлектрического типов, однако они менее подвержены влиянию температурных изменений окружающей среды, а также электромагнитных и электростатических помех.

8.5.2. Акселерометры с нагреваемым газом

Другой интересный акселерометр использует в качестве инерционной массы – газ. Такой акселерометр разработан MEMSIC Corporation (www.memsic.com). Он изготовлен на КМОП кристалле и является двухосевым измерителем ускорений. Принцип действия такого устройства основан на передаче тепла методом принудительной конвекции. Как указывалось в главе 3, тепло может передаваться тремя способами: за счет теплопроводности, конвекцией и излучением. Конвекция может быть естественной (обусловленной силой гравитации) и принудительной (для которой требуется применение внешних устройств, например, вентилятора). В акселерометрах с нагреваемым газом (АНГ) источником такой внешней силы является ускорение. Такие датчики определяют внутренние изменения в процессах теплопередачи в замкнутом объеме газа. АНГ функционально эквивалентны традиционным акселерометрам с инерционной массой. В данном случае в роли инерционной массы

выступает неравномерно нагретый газ. Такая инерционная масса обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционной твердотельной массой. Главным достоинством является высокий уровень допустимых перегрузок (до 50 000g), что значительно повышает их надежность.

Датчик состоит из пластины, примыкающей к герметичной полости, заполненной газом. В пластине вытравлено углубление. В центре кремниевой пластины над углублением подвешен нагреватель (рис. 8.8). На пластине установлены четыре датчика температуры: термоэлементы из алюминия и поликремния (ТЭ). ТЭ расположены на одинаковом расстоянии с четырех сторон от нагревателя (две оси). Отметим, что ТЭ определяют только градиент температур, поэтому левый и правый ТЭ можно считать одним ТЭ, где левая часть соответствует холодному спаю, а правая – горячему (см. раздел 16.2 главы 16, где описан принцип действия термопар). В данном случае ТЭ используются вместо термопар с единственной целью: увеличить электрический выходной сигнал. Другая пара ТЭ применяется для определения градиента температур вдоль оси *y*.

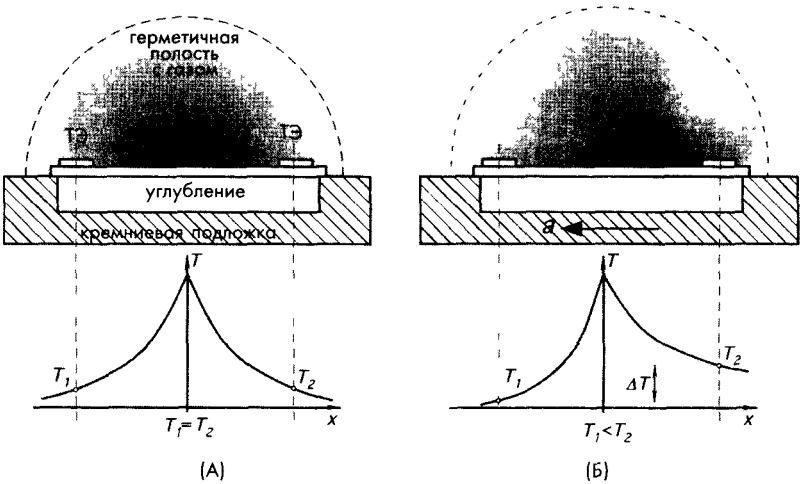


Рис. 8.8. А – поперечное сечение АНГ вдоль оси *x*. Нагретый газ располагается симметрично вокруг нагревателя, Б – ускорение заставляет нагретый газ смещаться вправо, что приводит к перепаду температур

При нулевом ускорении распределение температуры внутри полости с газом симметрично относительно источника тепла, поэтому все четыре ТЭ детектируют одинаковую температуру, что приводит к нулевому выходному напряжению в каждой паре чувствительных элементов. Нагреватель разогревается до температуры выше температуры окружающей среды (обычно около 200°С). На рис. 8.8А показаны два ТЭ, измеряющих градиент температуры вдоль оси *x*. Из рисунка видно, что наибольшая температура газа наблюдается рядом с нагревателем, и она довольно резко падает ближе к краям, где

расположены ТЭ. Когда на газ не действуют никакие силы, температура имеет конусообразное распределение вокруг нагревателя, при этом температура левого ТЭ T_1 равна температуре T_2 правого ТЭ. Ускорение акселерометра в любом из направлений из-за конвекционной теплопередачи изменит температурный профиль, который станет несимметричным. На рис. 8.8Б показано, как изменится температурный профиль при ускорении a, направление которого указано стрелкой. Под действием ускорения теплые молекулы газа смещаются к правому ТЭ, передавая ему часть своей энергии. В результате этого температуры, а, следовательно, и выходные напряжения правого и левого ТЭ перестанут быть равными ($T_1 < T_2$). Разница температур ΔT, а значит, и напряжение между выходами ТЭ прямо пропорциональна ускорению. В данной конструкции существует два идентичных измерительных канала, позволяющих определять ускорение вдоль оси x и оси y.

АНГ способны измерять ускорения в диапазоне $\pm 1 ... \pm 100g$. Такие акселерометры могут определять и динамическое ускорение (например, вибрации), и статическое ускорение (например, ускорение свободного падения). Аналоговые выходные напряжения снимаются с чипа как в абсолютном, так и в относительном виде. Абсолютное выходное напряжение не зависит от приложенного напряжения, а относительное – пропорционально ему. Типичный шумовой порог для АНГ ниже $10^{-3}g$/Гц, что позволяет на очень низких частотах измерять субмиллиметровые сигналы ускорения. Быстродействие датчика, т.е. его способность детектировать быстрые изменения ускорения, зависит от его конструкции. 3-дБ спад частотной характеристики для типового АНГ происходит на частоте около 30 Гц. Этот диапазон может быть расширен до 160 Гц с применением компенсационных схем.

Следует отметить, что чувствительность выходного сигнала АНГ меняется при изменении окружающей температуры (рис. 8.9). Для компенсации этого изменения в чип акселерометра встраивается температурный датчик (резистивный детектор температуры или кремниевый переход).

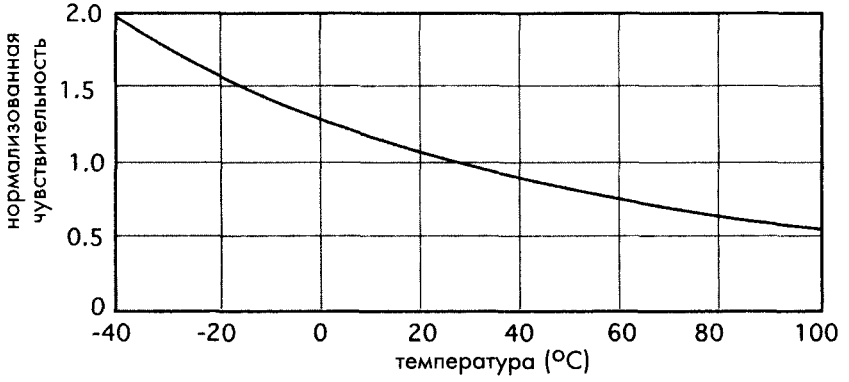


Рис. 8.9. Чувствительность теплового акселерометра к окружающей температуре

8.6. Гироскопы

Гироскоп является самым популярным навигационным датчиком (пожалуй, он уступает первенство только компасу). Во многих ситуациях, когда геомагнитное поле либо отсутствует (как в космосе), либо по каким-либо причинам сильно нарушено, гироскоп является необходимым устройством для определения положения транспортных средств. Гироскоп в переводе означает «хранитель направления», также как маятник в часах является «хранителем времени». Принцип действия гироскопов основан на фундаментальном законе сохранения угловых моментов: «*В произвольной замкнутой системе (в которой отсутствуют внешние силы) сумма угловых моментов всех ее частей относительно любой неподвижной точки пространства всегда остается постоянной*»

8.6.1. Роторный гироскоп

Механический гироскоп состоит из массивного диска, свободно поворачивающегося вокруг основной оси вращения (рис. 8.10), которая удерживается рамкой, способной вращаться относительно одной или двух осей. Таким образом, в зависимости от количества осей вращения гироскопы имеют одну или две степени свободы. Следует отметить, что:

1. Основная ось вращения свободного гироскопа не будет менять свое пространственное положение, при отсутствии внешних сил, действующих не нее
2. При соответствующем изготовлении крутящий момент гироскопа (его выходной сигнал) пропорционален его угловой скорости движения вокруг оси, перпендикулярной основной оси вращения.

При свободном вращении диска (ротора) он всегда стремится сохранить свое осевое положение. Если платформа гироскопа вращается вокруг входной оси, у гироскопа появляется крутящий момент относительно перпендикулярной (выходной) оси, заставляющий основную ось вращения поворачиваться вокруг выходной оси. Это явление называется *прецессией* гироскопа. Его можно объяснить при помощи закона Ньютона для вращательного движения: *Производная во времени от углового момента количества движения относительно любой заданной оси равна сумме моментов всех сил механической системы, приложенных к данной оси.* Это означает, что когда к входной оси приложен момент T и скорость ω диска поддерживается постоянной, угловой момент ротора может быть изменен только путем поворота проекции оси вращения относительно входной оси. В этом случае скорость движения оси вращения относительно выходной оси будет пропорциональна приложенному моменту:

$$T = I\omega\Omega, \tag{8.14}$$

где Ω – угловая скорость вращения вокруг выходной оси, а I – момент инерции ротора гироскопа относительно оси вращения. Для определения направления прецессии можно воспользоваться следующим правилом: Прецессия всегда имеет направление, при котором направления вращения ротора и приложенного механического момента совпадают.

Точность механических гироскопов сильно зависит от воздействия внешних нежелательных сил, вызывающих дополнительные моменты вращения, что приводит

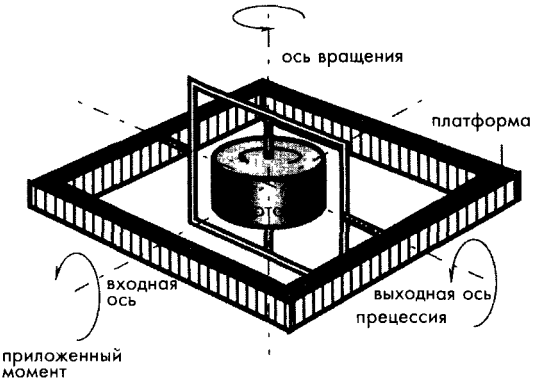


Рис. 8.10. Механический гироскоп с одной степенью свободы

к дрейфу характеристик. Источниками возникновения этих сил являются: трение, несбалансированность ротора, магнитные поля и т.д. Для уменьшения сил трения стремятся избавиться от подвесной системы крепления, для чего ротор и управляющий двигатель иногда помещают в вязкую жидкость, обладающую высокой плотностью, например, во фторуглеводород. В этом методе требуется строго контролировать температуру жидкости. К тому же такое устройство становится повышенно подверженным старению. Другой способ уменьшения трения – использование, так называемой, газовой опоры, это когда ось ротора удерживается газом под высоким давлением. В качестве газа может использоваться гелий, водород или просто воздух. Еще более интересным решением является поддержка ротора в вакууме при помощи электрического поля (речь идет об электростатических гироскопах). Существуют также магнитные гироскопы, в которых ротор удерживается магнитным полем. При изготовлении такие устройства охлаждаются криогенным способом до температур, при которых ротор становится сверхпроводящим. После чего при помощи внешнего магнитного поля внутри ротора формируется достаточно сильное противодействующее поле, позволяющее ротору свободно вращаться в вакууме. Такие магнитные гироскопы часто называются криогенными.

8.6.2. Монолитные кремниевые гироскопы

Хотя гироскопы с вращающимся ротором в течение многих лет были практически единственным устройствами применяемыми при построении навигационных устройств, их размеры в настоящее время являются сильно ограничивающим фактором. Однако принцип действия таких датчиков не позволяет реализовать их в виде миниатюрных монолитных устройств. К тому же все части традиционных механических гироскопов: рамки, подвесные конструкции, моторы и роторы, требуют высокой точности при изготовлении и сборке, что обуславливает их высокую стоимость. Наличие в датчиках таких элементов как моторы и подвесы, приводит к тому, что вследствие их повышенного износа, гироскопы удовлетворяют объявленным характеристикам в течение только ограниченного количества рабочих часов. Поэтому и возникла потребность в разработке альтернативных устройств для определения направления и скорости движения объектов. В ряде случаев глобальная система навигации (GPS) является идеальным выбором, но она не работает в космосе, под водой, и ее невозможно использовать там, где размеры и стоимость датчиков имеют решающее значение. Более перспективный метод построения гироскопов основан на применении микротехнологий, позволяющих реализовать миниатюрные устройства, в которых вращающийся диск заменяется на вибрирующий

элемент. Такой подход дает возможность использовать технологии, применяемые в электронной промышленности для налаживания серийного выпуска монолитных датчиков ускорений. В дополнение к этому гироскопы вибрационного типа имеют более прочную конструкцию и могут работать в довольно суровых окружающих условиях, поэтому они нашли широкое применение в военных и аэрокосмических приборах.

Все гироскопы вибрационного типа основаны на явлении ускорения Кориолиса. Эффект Кориолиса, объясняемый силой инерции, был описан французским инженером-математиком Густавом-Гаспаром Кориолисом в 1835 году. Кориолис показал, что при применении законов Ньютона к телам, перемещающимся внутри вращающейся рамки, в уравнениях движения необходимо учитывать силу инерции, направленную вправо от направления движения тела, при вращении рамки против часовой стрелки, и влево – при вращении по часовой стрелке

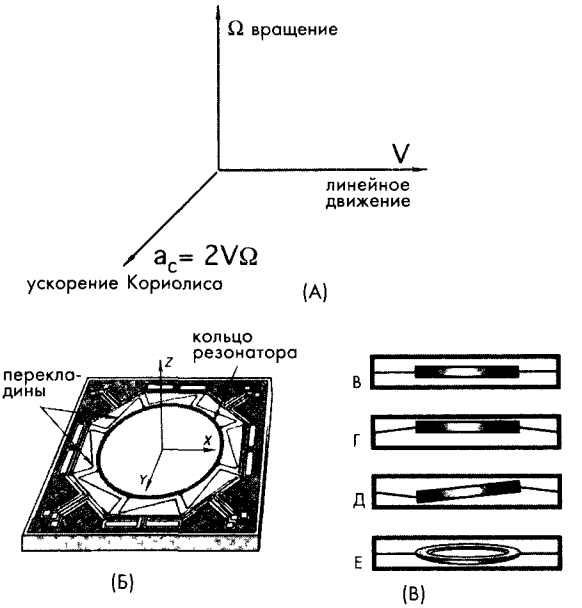


Рис. 8.11. А – ускорение Кориолиса, Б – микроструктура с вибрирующим кольцом, В – влияние ускорения на режимы вибрации кольца

Если тело движется линейно внутри опорной рамки, вращающейся вокруг оси, перпендикулярной направлению движения, в нем возникает ускорение Кориолиса. Это ускорение прямо пропорционально скорости вращения тела относительно третьей оси, перпендикулярной плоскости, образованной двумя другими осями (рис. 8.11А). В микрогироскопах вращение заменено на вибрацию, а по величине возникающего ускорения можно судить о скорости движения. В отличие от роторных гироскопов, в которых инерционная масса вращается по кругу, в вибрационных датчиках подвешенная масса двигается линейно, совершая гармонические колебания.

Существует несколько практических способов построения вибрационных гироскопов, но все их можно разделить на три основные группы [6]:

1. Простые вибраторы (масса на пружине, балки),
2. Уравновешенные вибраторы (камертон),
3. Тонкостенные резонаторы (фужеры, цилиндры, кольца)

На практике были реализованы гироскопы всех трех перечисленных типов.

Самый первый вибраторный гироскоп состоял из двухрамочной структуры, подвешенной на двух вращающихся изгибных элементах (рис. 8.12). Структура имеет внутренние прорези, обеспечивающие свободное движение подвижных частей в активной области. Во время работы на внешнюю рамку («мотор») действует крутящий момент, возникающий из-за электростатических сил, появляющихся при

подаче на электроды соответствующего управляющего напряжения, в результате чего она совершает колебательные движения с постоянной амплитудой. Эти вибрации передаются на внутреннюю рамку через внутренний изгибной элемент, вследствие чего инерционная масса также начинает колебаться. Если при этом гироскопический элемент будет совершать движение с угловой скоростью Ω вокруг оси, направленной перпендикулярно плоскости устройства, сила Кориолиса заставит внутреннюю рамку вибрировать относительно выходной оси с частотой, равной управляющей частоте, и амплитудой, пропорциональной входной скорости Ω. Максимальная разрешающая способность достигается тогда, когда управляющая частота, поданная на внешнюю рамку, совпадает с резонансной частотой внутренней рамки. О величине входной угловой скорости судят по изменению емкости между внутренней рамкой и парой электродов. При работе по схеме без ОС угловое перемещение внутренней рамки относительно выходной оси пропорционально входной угловой скорости. Это значит, что выходной угол θ прямо пропорционален отношению моментов инерции, механической добротности Q, управляющему углу ϕ_0 и входной скорости Ω, и обратно пропорционален управляющей скорости ω_n:

$$\theta = \left[\frac{\mathbf{I}_x + \mathbf{I}_y + \mathbf{I}_z}{\mathbf{I}_x}\right]\frac{\phi_0 \Omega Q}{\omega_n} \quad . \tag{8.15}$$

При работе по схеме с ОС внутренняя рамка балансируется так, чтобы достигался ноль по фазе и квадратуре. Более подробное описание данного гироскопа приведено в [7].

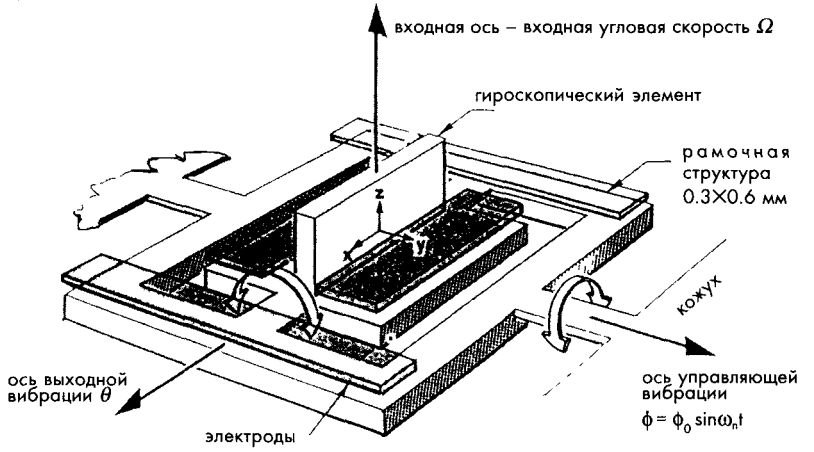


Рис. 8.12. Принципиальная схема вибрационного гироскопа

Одна из последних разработок – гироскоп, относящийся к третьей группе, разработанный British Aerospace Systems and Equipment и ее партнером Sumitomo Precision Products Company Ltd. [8]. Это монолитное кремниевое микроустройство реализовано на основе кольцевого резонатора. Кремний обладает отличными механическими свойствами (см. раздел 18.1.1 главы 18). Например, кремний в кристаллическом состоянии обладает пределом прочности 7 ГПа, что выше, чем для многих видов стали. Если принять во внимание низкую плотность кремния

(2330 кг/м^3), можно убедиться, что для своего веса кремниевые кристаллы являются очень прочным материалом. Чтобы гироскоп обладал стабильными характеристиками на протяжение всего срока службы вне зависимости от условий окружающей среды, его резонатор изготавливается из кристаллического кремния методом травления. Плоская форма вибрирующего кольца гарантирует концентрацию всей мощности колебаний внутри одной плоскости. Поэтому в данной конструкции не возникает паразитных связей между плоскостями, что гарантирует стабильность параметров колебаний в широком температурном диапазоне.

Для корректной работы резонатора подвесная конструкция должна обеспечивать ему, как можно, более свободное движение. На рис. 8.11Б показан чувствительный элемент такого гироскопа. Резонатор состоит из 6-мм кремниевого кольца, подвешенного на восьми радиальных гибких перекладинах, прикрепленных к опорной рамке 10×10 мм. Токопроводящие дорожки нанесены только на верхнюю поверхность устройства, а контактные площадки для подсоединения проводов расположены на внешней части опорной рамки. Кристалл методом анодного сплавления соединяется со стеклянной пластиной, при этом температурные коэффициенты пластины и кремния должны совпадать. В полученной конструкции существует восемь идентичных проводящих контуров, каждый из которых состоит: из контактной площадки, опорного ответвления, 1/8 части кольца, следующего опорного ответвления и следующей контактной площадки. Каждое опорное ответвление состоит из двух проводников, принадлежащих двум соседним контурам, и третьего вспомогательного проводника, расположенного между первыми двумя, используемого для снижения емкостной связи. Сюда же для формирования плоскости заземления подсоединена и кремниевая подложка. Резонатор возбуждается при помощи любого подходящего преобразователя, который может быть и оптическим, и электростатическим, и пьезоэлектрическим, и электромагнитным, и тепловым. Сигнал возбуждения подается либо на поддерживающую структуру, либо на сам резонатор. Основная частота колебаний составляет 14.5 кГц. На рис. 8.11 В-Е проиллюстрировано влияние линейного и углового ускорения на резонатор. На рис. 8.11В показан вид резонатора сбоку при отсутствии ускорений, на рис. 8.11Г – влияние линейного ускорения вдоль оси z, на рис. 8.11Д – влияние углового ускорения относительно оси x, а на рис. 8.11Е – влияние углового ускорения относительно оси y. Поскольку положение кольца меняется по отношению к рамке, в конструкцию устройства должен входить датчик перемещений, детектирующий движения резонатора: электромагнитный, емкостной, оптический, пьезоэлектрический или тензочувствительный. В рассматриваемом гироскопе используется магнитный принцип преобразований, для чего внутри устройства при помощи магнита из самариевого кобальта формируется магнитное поле, направленное перпендикулярно плоскости кольца. Вся конструкция размещается в стандартном герметичном металлическом корпусе для ИС.

8.6.3. Оптические гироскопы

Многие современные датчики, используемые в системах контроля и управления, реализуются на основе эффекта Саньяка, проиллюстрированного на рис. 8.13 [9]. Два лазерных луча света распространяются в противоположных направлениях

внутри оптического кольца радиуса R, обладающего коэффициентом преломления n. Соответственно один луч перемещается по часовой стрелке (CW), а второй – против часовой стрелки (CCW). Лучу света, чтобы сделать один оборот вокруг кольца, требуется время $\Delta t=2\pi R/nc$, где c – скорость света. Теперь предположим, что кольцо вращается с угловой скоростью Ω по часовой стрелке. В этом случае двум лучам, перемещающимся в противоположных направлениях, придется пройти разный путь. Для движущегося по часовой стрелке луча путь составит $l_{CW}=2\pi R+\Omega R\Delta t$, а для второго луча – $l_{CCW}=2\pi R-\Omega R\Delta t$. Следовательно, разница между путями составит:

$$\Delta l = \frac{4\pi\Omega R^2}{nc}, \tag{8.16}$$

Очевидно, что для точного измерения Ω, необходимо корректно определять Δl. Для этого разработаны три типа устройств: (1) оптические резонаторы, (2) интерферометры без ОС, (3) интерферометры с ОС.

В кольцевом лазерном гироскопе для определения Δl используются свойства когерентности лазерного излучения. Для возбуждения лазерного излучения в замкнутой оптической полости вдоль длины кольца должно укладываться целое количество длин волн. Световые лучи, не удовлетворяющие этому условию, последовательно проходя оптический путь, интерферируют сами с собой. Для компенсации изменения длины пути, вызванные вращением кольца, длина волны λ и частота излучения υ должны также меняться:

$$-\frac{dv}{v}=\frac{d\lambda}{\lambda}=\frac{dl}{l}. \tag{8.17}$$

Выражение (8.17) является фундаментальным уравнением, связывающим частоту, длину волны и путь излучения в кольцевом лазере. При вращении кольцевого лазера со скоростью Ω из уравнения (8.16) вытекает, что световые волны должны растягиваться в одном направлении и сжиматься в другом; это необходимо для получения целого числа длин волн вдоль длины кольца для выполнения критерия возбуждения коггерентных волн. Отсюда можно найти разность частот между световыми лучами. При смешивании двух лучей частота результирующего сигнала определяется выражением:

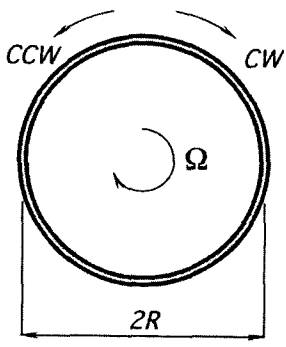


Рис. 8.13. Эффект Саньяка

$$F=\frac{4A\Omega}{\lambda nl}, \tag{8.18}$$

где A – площадь внутри кольца.

На практике оптические гироскопы стоятся либо на основе оптоволоконного кольцевого резонатора, либо на основе оптоволоконной катушки, состоящей из многих витков оптоволокна [10]. На рис. 8.14А показан оптический кольцевой резонатор. Он состоит из оптоволоконной петли, образованной на основе

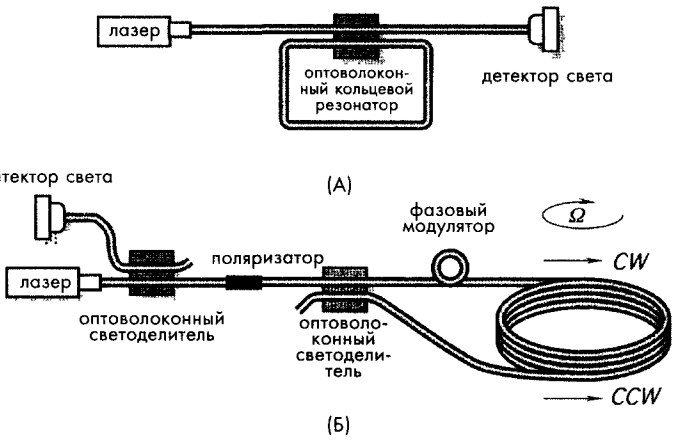


Рис. 8.14. А – оптоволоконный кольцевой резонатор, Б – аналоговый гироскоп на основе оптоволоконной катушки ([9])

оптоволоконного светоделителя, имеющего очень низкий коэффициент перекрестных связей. Когда частота входящего луча совпадает с резонансной частотой оптоволоконного кольца, большая часть света остается в нем, а интенсивность излучения, дошедшего до детектора, резко падает. Гироскоп, реализованный на основе оптоволоконной катушки (рис. 8.14Б), состоит из источника света и детектора, связанных оптоволоконными световодами. Между детектором и вторым разветвителем размещается поляризатор. Он служит для обеспечения того, чтобы оба встречно направленных луча проходили одинаковый маршрут вдоль катушки [11]. Оба луча смешиваются и направляются на детектор, который регистрирует косинусоидальные изменения интенсивности излучения, вызванные меняющимся сдвигом фаз между лучами, возникающим из-за вращения катушки. Такие оптические гироскопы сравнительно недороги, имеют небольшие размеры и позволяют реализовывать датчики вращения с динамическим диапазоном до 10000. Оптические гироскопы используются для измерения отклонений от заданного направления движения, угла наклона, в системах стабилизации углового положения и также в системах навигации. Основным достоинством таких датчиков является их способность работать в суровых условиях окружающей среды, где не могут работать механические гироскопы.

8.7. Пьезоэлектрические кабели

Вибрационные датчики, реализованные в виде кабелей, строятся на основе пьезоэлектрического эффекта: при сжатии внешней поверхности такого кабеля на его внутреннем проводнике появляется электрический сигнал. Пьезоэлектрические кабели Vibracoax™ (Philips Electronic Instruments, Norcross, GA) используются для мониторинга вибраций лопастей компрессора в самолетных двигателях турбинного типа. Такие кабели также применяются для обнаружения насекомых в хранилищах силоса и при анализе потока транспорта на автострадах. В последнем случае пьезоэлектрические кабели монтируются в дорожное покрытие перпендикулярно движению транспорта. При соответствующей установке и эксплуатации срок службы таких датчиков составляет, по крайней мере, пять лет [12]. Эти датчики реагируют преимущественно на силы,

направленные вдоль вертикальной оси. Пьезоэлектрический кабель состоит из твердого медного кожуха, покрытого слоем изоляции, внешний диаметр которого составляет 3 мм; плотно спрессованного пьезоэлектрического керамического порошка и внутреннего медного стержня (рис. 8.15А). Обычно кабель заварен с одной стороны, а с другой стороны подсоединен к 50-ти омному кабелю расширения.

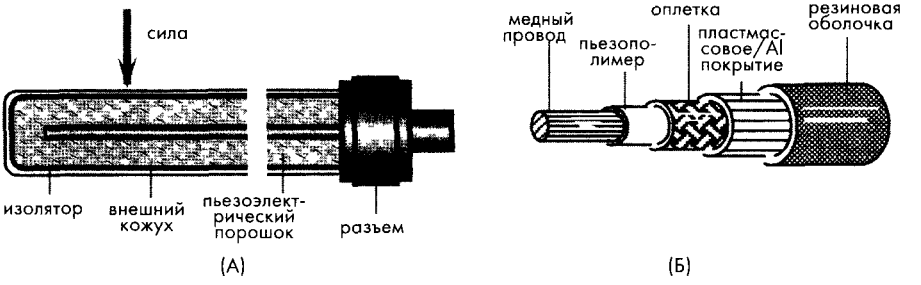


Рис. 8.15 .Датчики в виде пьезоэлектрических кабелей. А – устройство кабеля Vibracoax, Б – полимерная пленка, используемая как компонент, вырабатывающии напряжение [13]

Другой метод реализации пьезоэлектрических кабелей заключается в использовании полимерной пленки из поливинилиден фторида (PVDF) в качестве одного из компонентов изоляции медного кабеля (рис. 8.15Б). Пленка из PVDF при соответствующем изготовлении обладает пьезоэлектрическими свойствами, что делает возможным построение на ее основе чувствительных элементов. Когда к кабелю прикладывается механическая сила, пьезоэлектрическая пленка сжимается и на ее поверхностях образуются электрические заряды противоположных знаков. Внутренний медный провод и оплетка используются в качестве электродов, собирающих заряды.

Для придания кабелю пьезоэлектрических свойств его чувствительный компонент (керамический порошок или полимерная пленка) должны пройти процедуру поляризации. Для этого кабель нагревается до температуры, близкой к температуре Кюри, и для придания требуемой ориентации керамическим диполям в

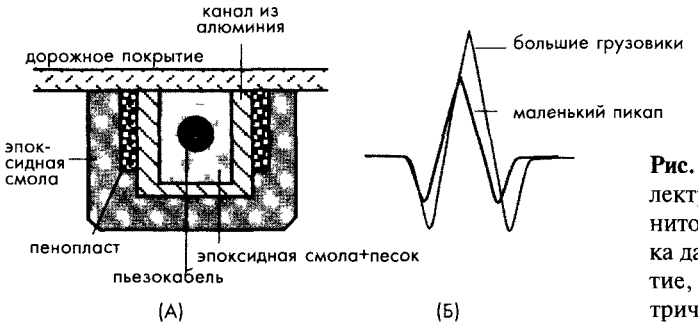


Рис. 8.16. Применение пьезоэлектрических кабелей при мониторинге дороги: А – установка датчика в дорожное покрытие, Б – форма выходных электрических сигналов

порошке или диполям полимера в пленке подвергается воздействию высокого напряжения, после чего охлаждается (высокое напряжение при этом не отключается). Когда такой кабель вмонтирован в дорожное покрытие (рис. 8.16), необходимо произвести его калибровку, поскольку форма выходного электрического сигнала и его амплитуда зависят не только от свойств кабеля, но и от типа покрытия и грунта. Выходной сигнал пропорционален механическому напряжению, приложенному к кабелю Длинный кабель с тонким пьезоэлектрическим изоляционным слоем обладает сравнительно низким выходным импедансом (600 пФ/м), что нехарактерно для пьезоэлектрических устройств. Такой пьезоэлектрический кабель имеет довольно широкий динамический диапазон (>200 дБ), способен почувствовать вибрации малой амплитуды от дождя и града, при этом его выходной сигнал сохранит свою линейность даже при движении по дороге тяжелых грузовиков. Кабели данного типа выдерживают давление до 100 МПа и работают в температурном диапазоне –40...+125°С. В таблице 8.2 приведены типовые параметры пьезокабелей

Таблица 8.2. Типовые параметры пьезоэлектрических кабелей

Параметр	Единица измерения	Значение
Емкость на частоте 1 кГц	пФ/м	600
Предел прочности на разрыв	МПа	60
Модуль Юнга	ГПа	2,3
Плотность	кг/м^3	1890
Акустический импеданс	Мрейл (10^6/см^2)	4
Относительная диэлектрическая проницаемость	1 кГц	9
tan δe	1 кГц	0,017
Гидростатический пьезокоэффициент	пКл/Н	15
Продольный пьезокоэффициент	В•м/Н	250×10^3
Поперечный пьезкоэффициент	В•м/Н	150×10^3
Электромеханический коэффициент связи	%	20
Выходная мощность	мДж/напряжение (%)	10
Выходное напряжение	кВ/напряжение (%)	5
Источник [140]		

Литература

1 *Articolo, G A Shock impulse response of a force balance servo-accelerometer In Sensors Expo West Proceedings* Helmers Publishing, 1989

2 Sensor signal conditioning an IC designer's perspective *Sensors Magazine,* 23-30,1991

3 Alien, H , Terry, S , and De Bruin, D Accelerometer system with self-testable features *Sensors Actuators* 20, 153-161, 1989

4 Suminto, J T A simple, high performance piezoresistive accelerometer In *Trans-ducers'91, 1991 International Conference on Solid-State Sensors and Actuator's Digest of Technical Papers* , IEEE, New York, 1991, pp

5 Harıtsuka, R , van Duyn, D S , Otaredıan, T , and de Vrıes, P A novel accelerom-eter based on a sılıcon thermopile In *Transducers '91 Internatıonal Conference on Solıd-State Sensors and Actuators Dıgest of Technıcal Papers* IEEE, New York, 1991, pp 420-423
6 Fox, C H J and Hardıe, D S W Vıbratory gyroscopıc sensors *Symposıum Gyro Technology* (DGON), 1984
7 Boxenhom, B B , Dew B , and Greıff, P The mıcromechanıcal ınertıal guıdance system and ıts applıcatıons In *14th Bıennıal Guıdance Test Symposıum,* 6588th Test Group, Holloman AFB, New Mexıco, Oct 3-5, 1989
8 Vamham, M P, Hodgıns, D , Norrıs, T S , and Thomas, H D Vıbratıng planar gyro U S patent 5,226,321, 1993
9 Udd, E Fıber optıc sensors based on the Sagnac ınterferometer and passıve rıng resonator In *Fıber Optıc Sensors* E Udd, ed John Wiley & Sons, New York, 1991,pp 233-269
10 Ezekıel, S and Ardıtty, H, J , eds *Fiber-Optic Rotatıon Sensors* Sprınger Serıes ın Optıcal Scıences Vol 32, Sprınger-Verlag, New York, 1982
11 Fredericks, R J , and Ulrıch, R Phase error bounds of fiber gyro wıth ımperfect polarızer/depolarızer *Electron Lett* 29, 330, 1984
12 Baılleul, G Vıbracoax pıezoelectrıc sensors for road traffic analysıs *Sensor Expo Proceedıngs,* Helmers Publıshıng, 1991
13 Radıce, P F Pıezoelectrıc sensors and smart highways In *Sensors Expo Proceedıngs* Helmers Publıshıng, 1991
14 *Pıezo Fılm Sensors Technıcal Manual* Measurement Specialtıes, Inc , Faıl-field, NJ , Aprıl 1999, avaılable at www msıusa com

ГЛАВА 9

ДАТЧИКИ СИЛЫ, МЕХАНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ПРИКОСНОВЕНИЯ

В то время как кинематика изучает статическое положение объектов и их движение, динамика отвечает на вопрос: «Что является причиной этого движения?». Классическая механика имеет дело с движущимися объектами, чья скорость значительно ниже скорости света. Движущиеся частицы: атомы и электроны – являются предметами изучения квантовой механики и теории относительности. Классическая механика исследует взаимодействия макрообъектов, обладающих определенной массой, зарядом, дипольным моментом и т.д. На многие вопросы классической механики в общем виде ответил Исаак Ньютон (1642-1727), который всегда заявлял, что родился в год смерти Галилея (хотя на самом деле он родился 4 января 1643 года). Ньютон развил идеи Галилея и других замечательных физиков. Его первый закон звучит следующим образом: «*Если на тело не действуют никакие внешние силы, оно будет либо находиться в состоянии покоя, либо двигаться с постоянной скоростью по прямой линии*». Часто этот закон называют законом инерции. Этот закон иногда трактуется по другому: «При отсутствии внешних сил, действующих на тело, его ускорение **a** равно нулю».

Если сила приложена к свободному телу (не связанному ни с каким другим телом), оно получает ускорение, направление которого совпадает с направлением силы, которая также является векторной величиной. Ньютон обнаружил, что ускорение, полученное телом, всегда прямо пропорционально приложенной силе **F** и обратно пропорционально массе тела m, которая является скалярной величиной и характеристикой тела:

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m}. \tag{9.1}$$

Выражение (9.1) известно под названием *второго закона Ньютона*. Это название было дано великим швейцарским математиком и физиком Леонардом Эйлером в 1752 году, спустя 65 лет после публикации закона Ньютона [1]. Первый закон является частным случаем второго закона: когда результирующая всех сил, действующих на тело, равна нулю, ускорение тела также равно нулю.

Второй закон Ньютона позволил ввести механические единицы. В системе СИ масса (кг), длина (м) и время (с) являются *основными* единицами (см. таблицу 1.7 главы 1), в то время как сила и ускорение – *производными* единицами. Единицу

измерения силы назвали *Ньютон*. Сила 1 Н, приложенная к телу массой 1 кг, приводит к появлению ускорения 1 м/с^2.

В Британской и американской системах единиц основными единицами считаются сила (фунт), длина (фут) и время (с). При этом единица массы определяется как масса, для ускорения которой на 1 фут/с^2 необходимо приложить силу 1 фунт. Британская единица массы называется *слаг*. В таблице 9.1 приведены механические единицы.

Таблица 9.1. Механические единицы

Система единиц	Сила	Масса	Ускорение
СИ	Ньютон (Н)	Килограмм (кг)	м/с^2
Британская	Фунт-сила	Слаг	Фут/с^2

Третий закон Ньютона устанавливает принцип взаимодействия между двумя телами: *Сила действия равна противодействию или взаимное влияние двух тел друг на друга всегда одинаково, но противоположно направлено.*

На практике часто необходимо знать плотность тела, которая определяется как количество вещества в единице объема. Ее можно выразить через массу m и объем V тела:

$$\rho = \frac{m}{V}. \tag{9.2}$$

Единицей измерения плотности в системе СИ является кг/м^3, а в Британской системе – фунт/фут^3. В Приложении приведены плотности некоторых материалов.

В системе СИ единица измерения силы является одной из фундаментальных физических величин. Измерение сил проводится и при проведении механических исследований, и в гражданском строительстве, и при взвешивании объектов, и при изготовлении протезов и т.д. При определении давления также требуется измерение силы. Считается, что при работе с твердыми объектами измеряется сила, а при работе с жидкостями и газами определяется давление. Это значит, что сила рассматривается тогда, когда действие приложено к конкретной точке, а давление определяется тогда, когда сила распределена по сравнительно большой площади.

Датчики силы можно разделить на два класса: количественные и качественные. Количественные датчики измеряют силу и представляют ее значение в электрических единицах. Примерами таких датчиков являются динамометрические элементы и тензодатчики. Качественные датчики – это *пороговые* устройства, чья функция заключается не в количественном определении значения силы, а в детектировании превышения заданного уровня приложенной силы. Примером таких устройств является клавиатура компьютера, каждая клавиша которой замыкает соответствующий контакт только при нажатии на нее с определенной силой. Качественные датчики часто используются для детектирования движения и положения объектов (см. главу 7). Коврик у двери, реагирующий на давление приложенное к нему, и пьезоэлектрический кабель также являются примерами качественных датчиков давления.

Методы измерения силы можно разделить на следующие группы:

1. Уравновешивание неизвестной силы силой тяжести тела известной массы
2. Измерение ускорения тела известной массы, к которому приложена неизвестная сила
3. Уравновешивание неизвестной силы электромагнитной силой
4. Преобразование силы в давление жидкости и измерение этого давления
5. Измерение деформации упругого элемента системы, вызванной неизвестной силой

В современных датчиках наиболее часто применяется 5 метод, а методы 3 и 4 используются сравнительно редко.

В большинстве датчиков не происходит прямого преобразования силы в электрический сигнал. Для этого обычно требуется несколько промежуточных этапов. Поэтому, как правило, датчики силы являются *составными* устройствами. Например, датчик силы часто представляет собой комбинацию преобразователя сила-перемещение и детектора положения (перемещения). Это может быть простая спиральная пружина, уменьшение длины которой x, вызванное приложенной силой сжатия F, будет пропорционально ее коэффициенту упругости:

$$x = kF \,. \tag{9.3}$$

На рис. 9.1А показан датчик, состоящий из пружины и детектора перемещений, реализованного на основе линейно регулируемого дифференциального трансформатора (ЛРДТ) (раздел 7.4 главы 7). В линейном диапазоне изменения длины пружины напряжение на выходе ЛРДТ пропорционально приложенной силе. На рис. 9.1Б представлен еще один вариант датчика силы, состоящий из гофрированной мембраны, заполненной жидкостью, непосредственно на которую и действует сила, и датчика давления. Гофрированная мембрана, распределяя силу на входе по поверхности чувствительного элемента датчика давления, играет роль преобразователя сила-давление.

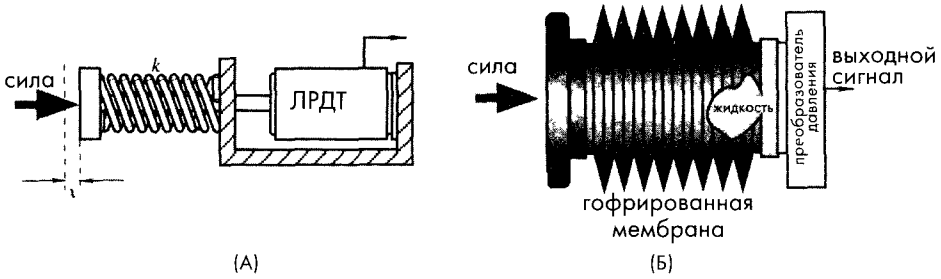


Рис. 9.1. А – датчик силы с нагружаемой пружиной и ЛРДТ, Б – датчик силы на основе преобразователя давления

9.1. Тензодатчики

Тензодатчик – это гибкий резистивный чувствительный элемент, сопротивление которого пропорционально приложенному механическому напряжению (величине деформации). Все тензодатчики построены на основе *пьезорезистивного*

эффекта, описанного в разделе 3.5.3 главы 3, и для них справедливо следующее соотношение (см. уравнение (3.63) в главе 3):

$$\frac{dR}{R} = S_e e \ , \tag{9 4}$$

где S_e – коэффициент тензочувствительности материала, а e – величина деформации. Для большинства материалов $S_e \approx 2$, за исключением платины, для которой $S_e \approx 6$ [3].

При небольших изменениях сопротивления металлического провода, не превышающих 2% (что справедливо для большинства случаев), справедливо следующее соотношение:

$$R = R_0(1 + x), \tag{9.5}$$

где R_0 – сопротивление тензодатчика в ненагруженном состоянии, а $x=S_e e$. Для полупроводниковых материалов величина тензочувствительности зависит от концентрации легирующих компонентов (рис. 18.2А главы 18). Величина сопротивления уменьшается при сжатии и увеличивается при растяжении. В таблице 9.2 приведены характеристики некоторых тензодатчиков.

Таблица 9.2.

Материал	Тензочувствительность (S_e)	Сопротивление, Ом	Температурный коэффициент сопротивления (°C⁻¹·10⁻⁶)	Примечание
57%Cu-43%Ni	2	100	10 8	Тензочувствительность постоянная в широком диапазоне механических напряжений, могут использоваться до 260°C
Сплавы платины	4 6	50	2,160	Применяются при высокотемпературных измерениях
Кремний	-100 +150	200	90,000	Высокая чувствительность, подходят для измерения больших механических напряжений

Источник [4]

Проволочный тензодатчик представляет собой резистор, наклеенный на гибкую подложку, которая в свою очередь прикрепляется на объект, где измеряется сила или напряжение. При этом должна обеспечиваться надежная механическая связь между объектом и тензочувствительным элементом, в то время как провод резистора должен быть электрически изолирован от объекта. Коэффициенты теплового расширения подложки и провода должны быть согласованы. Для изготовления тензодатчиков подходят многие материалы, но самыми распространенными из них являются сплавы: *константан, нихром, advance и karma*. Диапазон сопротивлении – 100 Ом...несколько тысяч Ом. Для получения хорошей чувствительности датчик должен иметь длинные продольные участки и короткие попе-

речные (рис. 9.2); это делается для того, чтобы чувствительность в поперечном направлении не превышала 2% от продольной чувствительности. Для измерения напряжений в разных направлениях меняется конфигурация датчиков. Обычно тензодатчики включаются в мостовые схемы Уитстона (раздел 5.7 главы 5). Следует отметить, что полупроводниковые тензочувствительные элементы обладают довольно сильной чувствительностью к изменениям температуры, поэтому в интерфейсных схемах или в самих датчиках необходимо предусматривать цепи температурной компенсации.

Рис. 9.2. Проволочный датчик напряжений на гибкой подложке

9.2. Тактильные чувствительные элементы

Тактильные датчики – это специальный класс преобразователей силы или давления, которые характеризуются небольшой толщиной. Эти датчики полезны в случаях, когда сила или давление измеряются между двумя поверхностями, расположенными близко друг к другу. Такие датчики часто используются в робототехнике, например, их устанавливают на «пальцы» механических приводов для обеспечения обратной связи при контакте с объектом – это напоминает то, как работают тактильные сенсоры кожи человека. Датчики касания используются в сенсорных дисплеях, клавиатурах и других устройствах, где необходимо реагировать на физическое прикосновение. Тактильные датчики широко применяются в биомедицине, для определения прикуса зубов и правильности установки коронок в стоматологической практике, а также при исследовании давления на ноги человека при ходьбе. Иногда при проведении операций протезирования их устанавливают в искусственные суставы для корректировки положения и т.д. В строительстве и на механических производствах тактильные датчики используются для определения сил, действующих на закрепленные устройства.

Для изготовления тактильных чувствительных элементов используются несколько методов. В некоторых из них на поверхности объекта формируется специальный тонкий слой из материала, чувствительного к механическим напряжениям. На рис. 9.3 показан простой тактильный датчик, обеспечивающий функции включения-выключения, состоящий из двух листов фольги и прокладки. Внутри прокладки сделаны круглые (или любой другой необходимой формы) отверстия. Один из листов фольги заземлен, а второй подсоединен к нагрузочному резистору. Если требуется контролировать несколько чувствительных зон, используется мультиплексор. Когда к верхнему проводнику прикладывается внешняя сила над отверстием в прокладке, он прогибается и соприкасается с нижним проводником, тем самым устанавливая с ним электрический контакт, заземляющий нагрузочный резистор. При этом выходной сигнал становится равным нулю, что свидетельствует о приложенной силе. Верхний и нижний проводники могут изготавливаться методом трафаретной печати проводящими чернилами на подложке из таких материалов, как Mylar® или полипропилен. Чувствительные зоны таких датчиков определяются рядами и колонками проводников, нанесенных чернилами. Прикосновение в определенному участку чувствительной поверхности приводит к замыканию соответствующих ряда и колонки, что показывает локализацию приложенной силы.

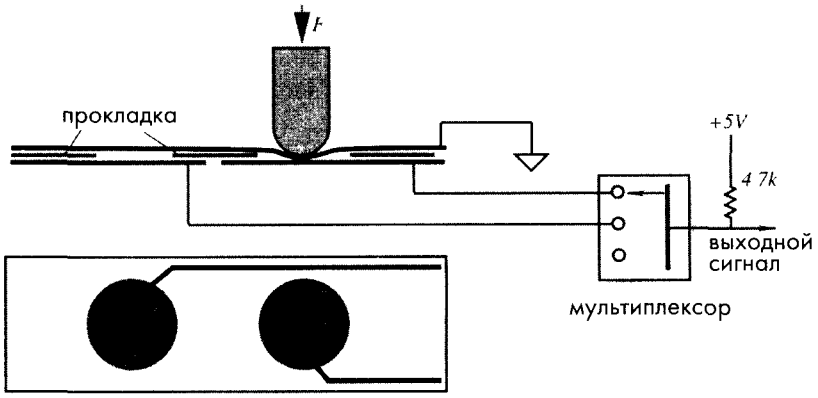


Рис. 9.3. Тактильный чувствительный элемент мембранного типа

Хорошие тактильные датчики получаются на основе пьезоэлектрических пленок, например, из поливинилиден фторида (PVDF), которые используются как в пассивном, так и в активном режимах. На рис. 9.4 показан активный ультразвуковой пьезоэлектрический тактильный датчик, состоящий из трех слоев пленок, соединенных вместе (в датчике существуют еще дополнительные защитные слои, не показанные на рисунке). Верхний и нижний слои изготовлены из PVDF пленок, а центральный слой обеспечивает акустическую связь между крайними слоями. Механические характеристики центральной пленки определяют чувствительность и рабочий диапазон датчика. На нижний пьезоэлектрический слой подается переменное напряжение от генератора. Эти колебания заставляют периодически сжиматься и пленку из PVDF, и промежуточный компрессионный слой, и верхнюю пленку из PVDF, играющую роль приемника. Поскольку пьезоэлектричество является обратимым явлением, с верхней пленки снимается переменное напряжение, которое усиливается и выпрямляется на синхронном демодуляторе, реагирующем как на амплитуду, так и на фазу поступающего сигнала. Когда к верхнему слою прикладывается внешняя сила **F**, механические характеристики трехслойной структуры изменяются, что отражается на фазе и амплитуде выходного сигнала.

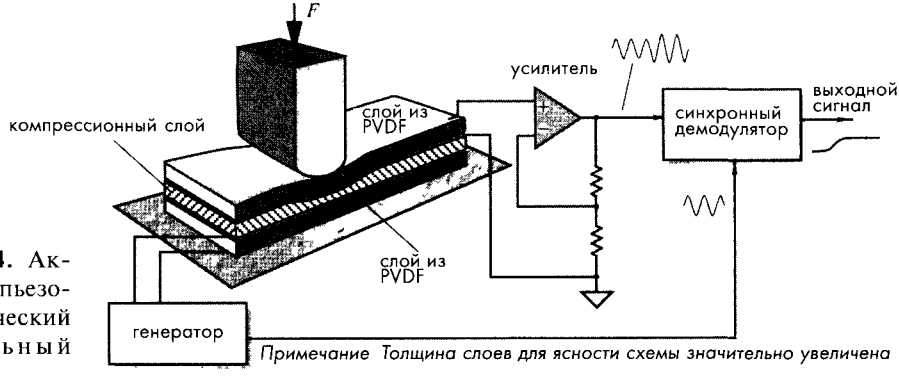


Рис. 9.4. Активный пьезоэлектрический тактильный датчик

В определенных пределах выходной сигнал тактильного датчика линейно зависит от приложенной силы. Если толщина пленок из PVDF составляет 25 мкм, а толщина компрессионной пленки из силиконовой резины – 40 мкм, толщина всего чувствительного элемента (включая защитные слои) не превышает 200 мкм. Электроды из PVDF пленки могут быть сформированы в виде ячеек либо на передающей, либо на приемной стороне. Применение мультиплексирования при подключении ячеек позволяет распознавать зоны приложения внешней силы. Такой датчик также может использоваться для измерения небольших перемещений. При определении перемещений в несколько миллиметров его точность составляет ±2 мкм. Достоинства данного датчика – простота и выходной сигнал в виде постоянного напряжения (т.е. способность детектировать статические силы)

На рис. 9.5А показан еще один вариант пьезоэлектрического тактильного датчика, в котором полоски из PVDF пленки встраиваются в слой резины на поверхности преобразователя. Такой датчик является пассивным устройством, поскольку для генерации выходного сигнала ему не требуется дополнительного возбуждения, поэтому он реагирует, в основном, на частоту механических воздействий, а не на их амплитуду. Конструкция данного датчика разработана для применения в робототехнике для отслеживания неровностей исследуемой поверхности. Поскольку здесь чувствительный элемент встроен в поверхностный слой, его выходной сигнал соответствует перемещениям этого слоя, возникающим из-за действия сил трения.

Датчик встраивается в жесткую конструкцию («палец» робота), имеющую пористый упругий внутренний слой (1 мм толщиной), на который наносится слой из силиконовой резины («кожа»). Иногда между этими слоями располагается вспомогательная жидкостная прослойка. Поскольку полоски из пьезоэлектрической пленки располагаются на некоторой глубине от поверхности «кожи», а их чувствительность зависит от их ориентации, величина сигнала определяется направлением перемещения «пальца». На рис. 9.5Б показан биполярный выходной сигнал такого датчика, способного отслеживать неоднородности поверхности высотой порядка 50 мкм.

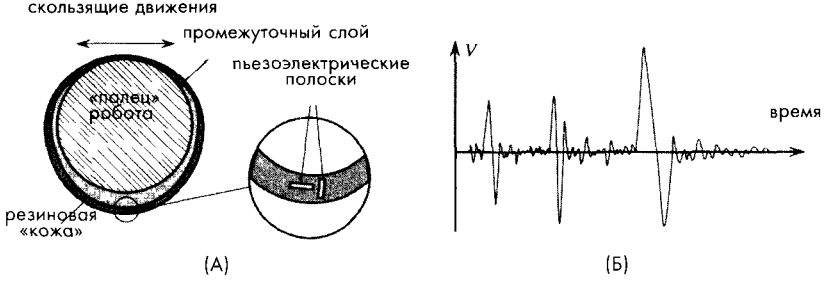


Рис. 9.5. Тактильный датчик на основе пьезоэлектрической пленки для детектирования сил скольжения А – поперечное сечение, Б – выходной сигнал [5]

Приведем еще несколько примеров датчиков на основе PVDF и других полимерных пленок [6]. Многие тактильные датчики выполняют функции сенсорных переключателей. В отличие от традиционных переключателей, надежность контактов которых сильно снижается при попадании на них влаги и пыли,

пьезоэлектрические ключи, благодаря своему монолитному исполнению, могут работать в неблагоприятных условиях окружающей среды. Один из вариантов таких переключателей состоит из стальной консольной балки, на которую нанесен слой пьезоэлектрической пленки. Балка одним концом прикреплена к плате схемы (рис. 9.6А), на входе которой стоит ключ на основе полевого МОП транзистора, не потребляющего энергию в нормально открытом состоянии. Как только к балке будет приложено механическое усилие, напряжение, возникшее на пленке, мгновенно переключит МОП ключ, и на его выходе появится ВЫСОКИЙ уровень сигнала. Такой сенсорный переключатель не подвержен ни коррозии, ни выгоранию, у него нет дребезга контактов, обычно присущих традиционным механическим переключателям. Он выдерживает до 10 миллионов циклов безаварийной работы. Простота конструкции делает такие переключатели привлекательными для использования в различных промышленных счетчиках, в системах автоматизации технологических процессов, в разливочных аппаратах и т.д., но самое широкое распространение они получили в игровых автоматах для игры в пинбол. На рис. 9.6Б показано устройство еще одного пьезоэлектрического выключателя консольного типа, в котором PVDF пленка размещается между двух подложек разной толщины. Такая конструкция обеспечивает очень сильное растяжение пьезопленки при отклонении балки от нейтральной оси вверх и сильное ее сжатие при отклонении балки в противоположном направлении. Рассматриваемые пьезоэлектрические выключатели нашли свое применение в счетчиках потребления газа и электроэнергии. Для таких переключателей не требуются внешние источники питания, поэтому газовым счетчикам на их основе не страшны проскоки искр. Пьезоэлектрические ключи балочного типа часто монтируются в обод баскетбольной корзины для определения попадания в нее мяча. Такие переключатели также встраиваются в мягкие куклы для детектирования поцелуя в щечку или щекотания каких-либо ее частей, в торговые

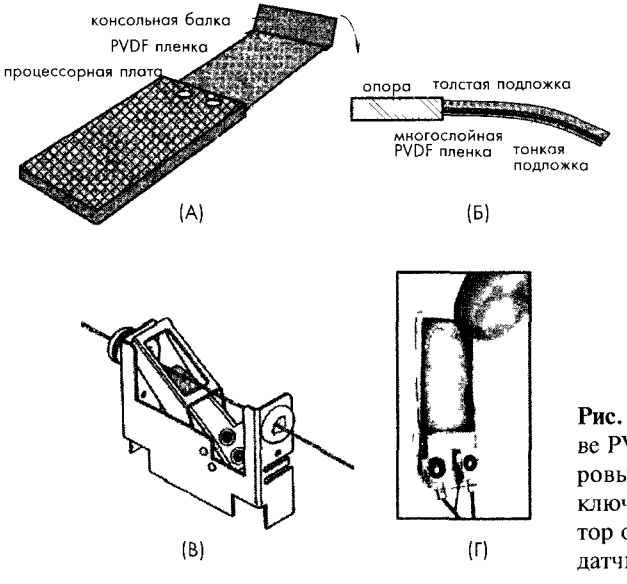


Рис. 9.6. А – переключатель на основе PVDF пленки, используемый в игровых пинбол-автоматах, Б – переключатель балочного типа, В – детектор обрыва нити [6], Г – тактильный датчик на основе PVDF пленки

или игровые автоматы для их запуска при обнаружении опущенной монеты, в цифровые потенциометры для повышения надежности.

Тактильные элементы на основе пьезоэлектрических пленок способны работать в широких частотных и динамических диапазонах и поэтому часто используются в электронных музыкальных инструментах. Например, они встраиваются в педальные переключатели больших и малых барабанов, в переключатели тамтамов, а также в клавиши электропианино. Пьезоэлектрические пленочные сенсоры реагируют на силу, с которой барабанщик давит на педаль или пианист нажимает на клавишу. В электропианино встроенные в клавиши пьезоэлементы обеспечивают динамический диапазон и длительность звучания нот в строгом соответствии с ходом клавиши.

На текстильных заводах требуется проводить непрерывный мониторинг нескольких тысяч нитей на обрыв. Необнаруженный вовремя обрыв может привести к порче большого куска ткани, поскольку стоимость работ по реставрации материала часто превышает стоимость ее производства. Традиционные сенсоры, определяющие обрыв нити по замыканию контактов, не очень надежны, поскольку пух загрязняет контактные площадки и не дает возможности обнаруживать разрыв нити. Вибрационный датчик на основе пьезоэлектрической пленки, встроенный в тонкую стальную балку, отслеживает акустический сигнал, возникающий от трения нити при ее прохождении над балкой (рис. 9.6В). Отсутствие характерных вибраций приводит к немедленной остановке ткацкого станка.

На рис. 9.7 показан датчик на основе PVDF пленки, используемый для контроля за частотой дыхания спящего ребенка. При этом детектируются малейшие движения тела, возникающие при вдохе и выдохе, что необходимо для обнаружения внезапной остановки дыхания [7]. Датчик размещается под матрасом кроватки. Тело нормально дышащего ребенка из-за подъема и опускания диафрагмы при дыхании совершает небольшие колебательные движения, что вызывает смещение его центра тяжести. Именно это смещение и контролируется датчиком. Датчик состоит из трех слоев: PVDF пленка расположена между подложкой из силиконовой резины и прижимного слоя из пластика, например, такого как Milar. Сторона прижимного слоя, направленная к PVDF пленке, имеет гофрированную поверхность. Под действием переменной силы тяжести в PVDF слое возникает электрический заряд, поступающий на вход преобразователя ток-напряжение, с выхода которого снимается переменный выходной сигнал с амплитудой, пропорциональной в определенном диапазоне приложенной силе.

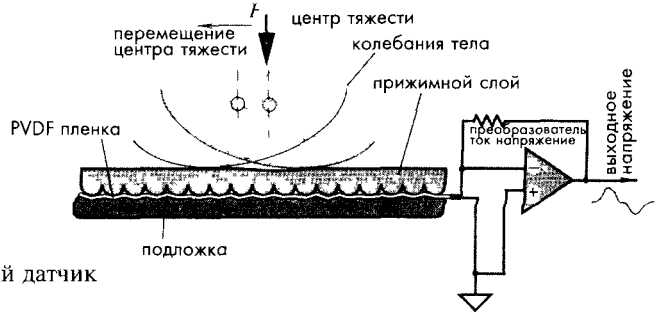


Рис. 9.7. Пьезоэлектрический датчик для контроля за дыханием

Другой разновидностью тактильных датчиков является пьезорезистивный чувствительный элемент. Он изготавливается из материалов, чье электрическое сопротивление зависит от приложенного механического напряжения или давления [8]. К таким материалам относятся проводящие эластомеры или пасты, чувствительные к изменению давления. Проводящие эластомеры изготавливаются из силиконовой резины, полиуретана и других материалов, в состав которых входят проводящие частицы или волокна. Например, проводящая резина получается при введении в обычную резину угольного порошка. Принцип действия эластомерных датчиков основан либо на изменении площади контактов при сдавливании эластомера между двумя проводящими пластинами (рис. 9.8А), либо на изменении толщины эластомерного слоя. В зависимости от величины внешней силы, действующей на датчик, меняется площадь контактной зоны между прижимным устройством и эластомером, в результате чего изменяется электрическое сопротивление. При определенном давлении эта площадь становится максимально возможной, и передаточная функция входит в режим насыщения (рис. 9.9Б). Для резистивного полимера Velosat™ толщиной 70 мкм и удельным сопротивлением пленки 11 кОм/см^2, сопротивление при давлении выше 16 кПа определяется следующим аппроксимационным соотношением:

$$R = \frac{51.93}{p^{1.47}} + 19. \qquad (9.6)$$

Однако следует отметить, что значения сопротивления может значительно дрейфовать, когда полимер подвергается действию давления длительное время. Поэтому такие пьезорезистивные датчики применяются, как правило, для качественных, а не количественных измерений.

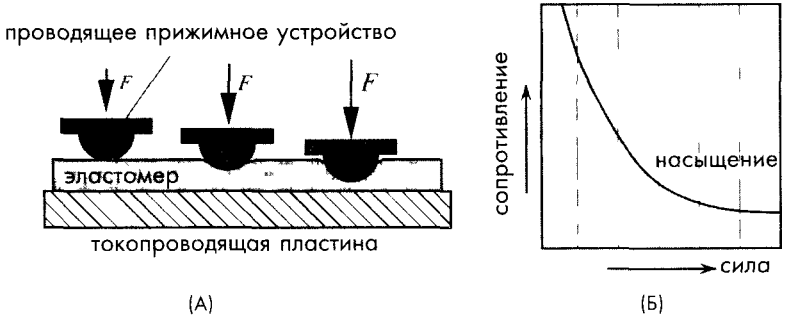


Рис. 9.8. Пьезорезистивный тактильный датчик А – с изменяемой площадью контактов, Б – его передаточная функция

Более тонкие пьезорезистивные тактильные датчики получаются из полупроводниковых полимеров, сопротивление которых также зависит от давления. Конструкция таких датчиков напоминает мембранный переключатель (рис. 9.9) [9]. По сравнению с тензодатчиками пьезорезистивные чувствительные элементы обладают более широким динамическим диапазоном: типовое изменение сопротивления составляет три порядка при изменении силы в интервале 0...3 кг, но более низкой точностью (обычно ±10%). Однако в тех случаях, когда не требуется точное измерение силы,

а решающим является стоимость датчика, применение таких детекторов является оправданным. Толщина типовых пьезорезистивных полимерных датчиков обычно составляет 0.25 мм, но возможно изготовление и более тонких структур.

В робототехнике требуются тактильные микросенсоры, обладающие хорошим пространственным разрешением, высокой чувствительностью и широким динамическим диапазоном. Принцип действия порогового тактильного детектора с механическим гистерезисом может быть основан на использовании пластической деформации кремниевой мембраны [10]. На рис. 9.10 показано интегральное исполнение кремниевого тактильного микропереключателя, состоящего из герметичной полости, сформированной внутри кремниевой подложки, плотно закрытой тонкой мембраной. При отсутствии внешних сил за счет расширения газа, находящегося внутри полости, мембрана образует выпуклый купол. При нормальной температуре и приложенной силе, превышающей критическое значение, верхний электрод прогибается вниз, контактируя с нижним электродом.

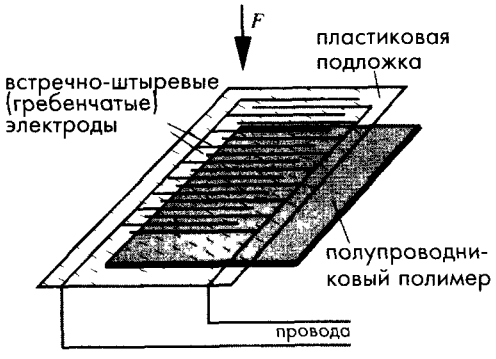


Рис. 9.9. Полимерный пьезорезистивный тактильный датчик

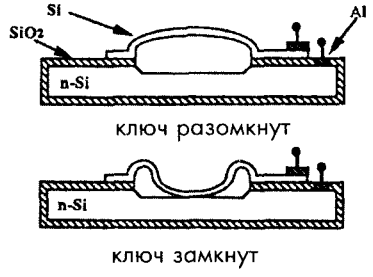


Рис. 9.10. Кремниевый микропереключатель [10]

Исследования показали, что такой ключ замыкается при давлении порядка 13 psi (фунт на квадратный дюйм), а его гистерезис равен 2 psi. Сопротивление ключа в разомкнутом состоянии составляет 10 кОм, что приемлемо для маломощных схем.

На рис. 9.11 показан еще один вариант тактильного микропереключателя [11], в котором вместо газа, находящегося под давлением, применяется вакуум. Здесь вакуумная микрокамера находится между холодным катодом и подвижным анодом в виде диафрагмы. Когда между анодом и кремниевым выступом на катоде появляются положительная разность потенциалов, формируется электрическое поле. Если напряженность поля превышает значение 5×10^7 В/см, электроны совершают туннельный переход с катода в вакуумную камеру. Сила поля, а, следовательно, количество испускаемых электронов (ток эмиссии) определяется величиной потенциала на аноде. Когда к аноду прикладывается внешняя сила, он опускается вниз, изменяя тем самым напряженность поля и ток эмиссии.

Ток эмиссии может быть выражен через напряжение на аноде V:

$$I = V^2 a \exp\left(-\frac{b}{\beta V}\right), \tag{9.7}$$

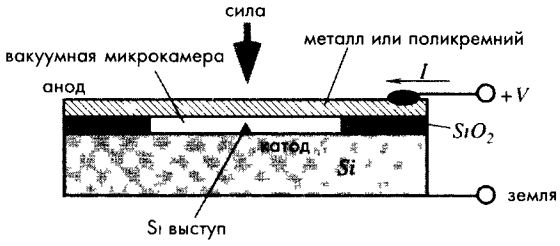


Рис. 9.11. Схема датчика силы, реализованного на основе вакуумного диода [11]

где a и b – константы, а β – геометрический коэффициент выступа на катоде, определяемый расстоянием между анодом и катодом. Для повышения чувствительности радиус кривизны выступа должен составлять порядка 0.02 мкм.

9.3. Пьезоэлектрические датчики силы

Рассмотренные в предыдущем разделе пьезоэлектрические тактильные датчики не предназначены для проведения точных измерений силы. Однако на основе того же пьезоэлектрического эффекта можно реализовать и прецизионные датчики силы, как активные, так и пассивные. При разработке таких датчиков всегда следует помнить, что пьезоэлектрические устройства не могут измерять стационарные процессы. Это означает, что пьезоэлектрические датчики силы преобразуют изменения силы в переменный электрический сигнал, но при этом они никак не реагируют на постоянное значение внешней силы. Поскольку приложенные силы могут изменять некоторые свойства материалов, при разработке активных датчиков необходимо учитывать всестороннее влияние сигналов возбуждения. На рис. 9.4 показан вариант активного датчика силы. При проведении количественных измерений при помощи такого датчика следует помнить, что его диапазон измерения зависит от частоты механического резонанса применяемого пьезоэлектрического кристалла. Принцип действия таких датчиков основан на том, что при механической нагрузке кварцевых кристаллов определенных срезов, используемых в качестве резонаторов в электронных генераторах, происходит сдвиг их резонансной частоты. Выражение для спектра собственных механических частот пьезоэлектрического генератора имеет вид [13]:

$$f_n = \frac{n}{2l}\sqrt{\frac{c}{\rho}}, \qquad (9\,8)$$

где n – номер гармоники, l – геометрический параметр, определяющий резонансную частоту (например, толщина относительно большой и тонкой пластины или длина тонкого длинного стержня), c – коэффициент упругой деформации (например, коэффициент жесткости при сдвиге вдоль толщины пластины или модуль Юнга в случае тонкого стержня), а ρ – плотность кристалла.

Частотный сдвиг возникает из-за нелинейности зависимостей некоторых параметров кристалла от величины внешних сил. Например, в уравнении (9.8) коэффициент жесткости c зависит от приложенной нагрузки, тогда как плотность и геометрический параметр меняются при этом незначительно. Для каждого среза кристалла существуют направления, при приложении сил сжатия

вдоль которых наблюдается минимальная чувствительность пьезорезонатора. При разработке генераторов выбираются именно эти направления, поскольку они позволяют реализовать наибольшую механическую стабильность. Тогда как при проектировании датчиков разработчики преследуют противоположную цель, поэтому избегают использования данных направлений. Так для построения высокоэффективного датчика давления применили дисковый резонатор с диаметральным приложением сил [14] (рис. 9.12).

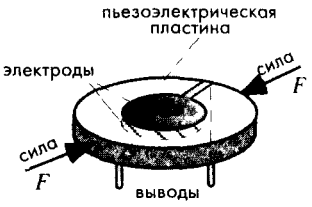


Рис. 9.12. Пьезоэлектрический дисковый резонатор, применяемый в диаметральном датчике силы

На рис. 9.13 показан еще один датчик, работающий в сравнительно узком диапазоне 0...1.5 кг, но обладающий хорошей линейностью и 11-ти разрядным разрешением. Для изготовления такого датчика из кристалла вырезали прямоугольную пластину, у которой один край параллелен оси x, а передняя грань образует с осью z угол θ, приблизительно равный 35°. Такой срез часто называют АТ-срезом.

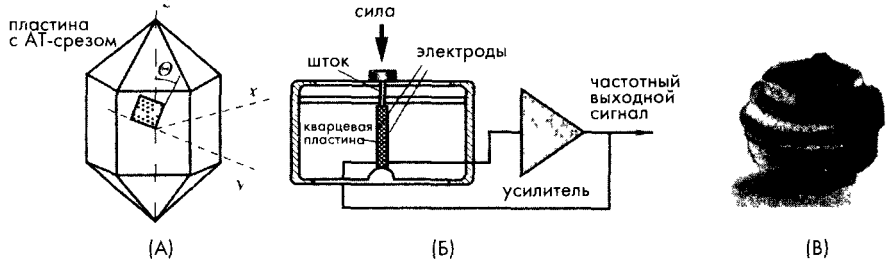


Рис. 9.13. Кварцевый датчик силы: А- АТ срез кварцевого кристалла, Б – структура датчика, В – внешний вид (напечатано с разрешения Quartzcell, Santa Barbara, CA)

На поверхностях пластины нанесены электроды, на которых в результате пьезоэлекрического эффекта (см. рис. 3.22 главы 3) возникают заряды противоположных знаков. Эти электроды включены в цепь положительной ОС генератора на основе ОУ (рис. 9.13Б). Кварцевый кристалл в ненагруженном состоянии вибрирует на основной частоте f_0. При воздействии на кристалл внешней силы его частота смещается на величину Δf [15]:

$$\Delta f = F\frac{Kf_0^{\,2}n}{l}, \qquad (9.9)$$

где F – приложенная сила, K – константа, n – номер гармоники, l – размер кристалла. Для компенсации ухода частоты вследствие изменения температуры, иногда применяют сдвоенный кристалл, одна половина которого используется для температурной корректировки. Каждый резонатор включается в свой собственный колебательный контур, и для исключения влияния температуры находится

разность частот сигналов двух контуров. На рис. 9.13В показан внешний вид серийно выпускаемого датчика силы.

При разработке любых датчиков силы на основе пьезорезонаторов приходится находить компромисс между двумя противоречивыми требованиями. С одной стороны резонатор должен обладать максимальной добротностью, для чего датчик желательно изолировать от окружающей среды и поместить в вакуум. С другой стороны, на датчик действуют давление и внешние силы, поэтому он должен иметь довольно жесткую конструкцию, что неминуемо ухудшает добротность всего устройства, в том числе и резонатора.

Эта проблема частично решается в датчиках с более сложной структурой. Например, в работах [13,16] описан фотолитографический способ изготовления двух- и трех- балочных структур. Цель их создания заключается в согласовании размеров вибрирующего элемента с четвертью длины акустической волны (1/4 λ). При выполнении этого условия полное отражение волны происходит в точках, куда прикладываются внешние силы, что позволяет значительно снизить влияние нагрузки на величину добротности резонатора.

Литература

1 *Raman, V V The second law of motion and Newton equations Physics Teacher,* 1972
2 Doebelin, E 0 *Measurement Systems Applications and Design McGraw-Hill,* New York, 1966
3 Pallás-Areny, R and Webster, J G *Sensors and Signal Conditioning,* 2nd ed John Wiley & Sons, New York, 2001
4 Holman J P *Experimental Methods for Engineers* McGraw-Hill, New York, 1978
5 Howe, R T Surface micromachining for microsensors and microactuators *J Vac Sci Technol B* 6(6), 1809-1813, 1988
6 *Piezo Film Sensors Technical Manual* Measurement Specialties, Inc , Norris-town, PA, 1999, available at www msiusa com
7 Fraden, J Cardio-Respiration Transducer, U S Patent 4509527, 1985
8 Del Prete, Z , Monteleone, L , and Steindler, R A novel pressure array sensor based on contact resistance variation metrological properties *Rev Sci Instrum* 72(3), 1548-1558, 2001
9 Yates, B A keyboard controlled joystick using force sensing resistor *Sensors Magazine,* 39-39, 1991
10 Huff, M A , Nikolich, A D , and Schmidt, M A A threshold pressure switch utilizing plastic deformation of silicon In *Transducers'91 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators Digest of Technical Papers,* IEEE, New York, 1991, pp 177-180
11 Jiang, J C , White, R C , andAllen, P K Microcavity vacuum tube pressure sensor for robotic tactile sensing In *Transducers* '97 *International Conference on Solid-State Sensors and Actuators Digest of Technical Papers* IEEE, New York, 1991, pp 239-240
12 Brodie, I Physical considerations in vacuum microelectronics devices *IEEE Trans Electron Dev ,* 36, 2641, 1989
13 Benes, E , Groschl M , Burger W , and Schmid M Sensors based on piezoelectric resonators *Sensors Actuators A* 48, 1-21, 1995
14 Karrer, E and Leach J A low range quartz pressure transducer *ISA Trans* 16, 90-98, 1977
15 Corbett, J P Quatz steady-state force and pressure sensor In *Sensors Expo West Proceedings* Helmers Publishing, Peterborough, NH, 1991
16 Kirman, R G and Langdon, R M Force sensors U S Patent 4,594,898 1986

ГЛАВА 10

ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ

Прежде чем открыть что-то новое,
необходимо изучить много старого»
-говорил мой учитель физики

10.1. Общие понятия о давлении

Понятие давления первоначально основывалось на работе Евангелиста Торричелли, который некоторое время был учеником Галилея [1]. Поставив в 1643 году эксперимент с блюдцами, заполненными ртутью, он сделал вывод, что атмосфера оказывает давление на Землю. Другой великий физик Блэйз Паскаль в 1647 году вместе со своим зятем Перье провели еще один опыт: они измеряли высоту ртутного столба у подножия и на вершине горы Puy de Dome. При этом они обнаружили, что давление действующее на столбик ртути зависит от высоты подъема. Свой прибор, который они использовали в этом эксперименте, Паскаль назвал *барометром*. В 1660 году Роберт Бойль сформулировал закон: «*Для заданной массы воздуха при известной температуре произведение давления на объем является постоянной величиной*». В 1738 году Даниэль Бернулли разработал теорию динамического давления газов, из которой аналитическим способом можно вывести закон Бойля. По сути Бернулли опередил закон Шарля-Гей-Люссака, сформулировав следующее утверждение: «При нагреве газа в постоянном объеме его давление увеличивается». Более подробное описание динамической теории жидкостей и газов можно найти в учебниках физики. В этом разделе будут приведены краткие основы этой теории, необходимые для разработки и использования датчиков давления.

В общем виде, все материалы можно разделить на твердые тела и жидкие среды. Под термином *жидкая среда* здесь понимается все, что способно течь. Это могут быть как жидкости, так и газы, поскольку между ними не существует серьезных различий. При изменении давления жидкости превращаются в газы и наоборот. К жидким средам невозможно приложить давление ни в каком другом направлении, кроме перпендикулярного к поверхности. При любом угле кроме 90° жидкость будет просто соскальзывать или стекать. Для жид-

кой среды в стационарных условиях давление можно выразить через отношение силы F, действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности A [2]:

$$p = \frac{dF}{dA}. \tag{10.1}$$

Давление имеет механическую природу, и поэтому для его описания можно использовать основные физические величины: массу, длину и время. Хорошо известен факт, что давление сильно меняется вдоль вертикальной оси, тогда как на одинаковой высоте оно постоянно во всех направлениях. При увеличении высоты давление падает, что можно выразить следующим соотношением:

$$dp = -wdh\ , \tag{10.2}$$

где w – удельный вес среды, dh – изменение высоты, а dp – соответствующее ему изменение давления.

Давление жидкой среды в замкнутом объеме не зависит от формы сосуда, поэтому при разработке датчиков давления такие параметры как форма и размеры часто бывают не очень существенными. Если на одну из сторон сосуда с жидкостью или газом действует внешнее давление, оно передается по всему объему без уменьшения его значения.

Кинетическая теория газов утверждает, что давление является мерой полной кинетической энергии молекул:

$$p = \frac{2}{3}\frac{KE}{V} = \frac{1}{3}\rho C^2 = NRT\ , \tag{10.3}$$

где KE – кинетическая энергия, V – объем, C^2 – среднее значение квадрата скоростей молекул, ρ – плотность, N – число молекул в единице объема, R – универсальная газовая постоянная, а T – абсолютная температура.

В уравнении (10.3) предполагается, что давление и плотность газов связаны линейной зависимостью, т.е. увеличение давления приводит к пропорциональному росту плотности. Например, при температуре 0°С и давлении 1 атм плотность воздуха составляет 1.3 кг/м^3, в то время как при той же температуре, но давлении 50 атм – его плотность уже будет 65 кг/м^3, т.е. в 50 раз больше. В отличие от газов плотность жидкостей мало меняется в широком диапазоне давлений и температур. Например, для воды при температуре 0°С и давлении 1 атм плотность составляет 1000 кг/м^3, в то время как при той же температуре и давлении 50 атм – плотность равна 1002 кг/м^3, а при температуре 100°С и давлении 1 атм – плотность равна 958 кг/м^3.

Избыточное давление – это давление газа, превышающее давление окружающей среды. В противоположном случае – речь идет о вакууме. Давление называется относительным, когда его измеряют относительно давления окружающей среды, и абсолютным – когда оно измеряется по отношению к нулевому давлению. Давление среды может быть стационарным, когда жидкая среда находится в покое, или динамическим, когда оно относится к жидкостям в движении.

10.2. Единицы измерения давления

В системе СИ единицей измерения давления является *паскаль*: 1 Па=1Н/м^2. Это значит, что давление 1 паскаль равно силе, равномерно распределенной по поверхности площадью 1 квадратный метр. Иногда в качестве технической единицы измерения давления применяется единица, называемая *атмосфера,* обозначаемая 1 атм. Одна атмосфера это давление, которое оказывает столб воды высотой 1 метр на площадку 1 квадратный сантиметр при температуре +4°С и нормальном гравитационном ускорении. Между единицами давления существует следующая взаимосвязь:

$$1Па = 1.45\times10^{-4}\,фунт-сила/дюйм^2 = 9.869\times10^{-6}\,атм = 7.5\times10^{-4}\,см\ ртутного\ столба$$

Для грубых оценок можно запомнить еще одно соотношение: 0.1 мм H_2O создает давление, приблизительно равное 1 Па. В промышленности применяется другая единица давления, называемая *торр* (это название дано в честь физика Торричелли), которая определяется как давление, создаваемое столбиком ртути высотой 1 мм при 0°С, нормальном атмосферном давлении и нормальной гравитации. Идеальное давление атмосферы Земли, равное 760 торр, называется *технической атмосферой*:

$$1атм = 760торр = 101.325Па\ .$$

В системе единиц США давление измеряется в фунтах-силы на квадратный дюйм. Эта единица там обозначается как psi. Для перевода psi в единицы системы СИ можно воспользоваться соотношением:

$$1psi = 6.89\times10^3\ Па = 0.0703\ атм.$$

Принцип действия любого датчика давления заключается в преобразовании давления, испытываемого чувствительным элементом, в электрический сигнал. В конструкцию практически всех преобразователей давления входят сенсоры, обладающие известной площадью поверхности, чья деформация или перемещение, возникающие вследствие действия давления, и определяются в процессе измерений. Таким образом, многие датчики давления реализуются на основе детекторов перемещения или силы, причиной возникновения которой является тоже перемещение. Поэтому перед прочтением следующих разделов рекомендуется изучить главы 7 и 9, где описаны датчики перемещений и силы.

10.3. Ртутные датчики давления

На рис. 10.1 показан простой датчик давления, использующий принцип сообщающихся сосудов. Чаще всего такие датчики применяются для измерения давления газов. U-образный провод с точкой заземления в центре помещается в U-образную трубку с ртутью. Часть этого провода оказывается закороченной ртутью, в результате чего сопротивление в обоих ветвях провода всегда будет пропорционально высоте столбиков ртути. Полученные резисторы включены в схему моста Уитстона, который находится в уравновешенном состоянии пока равно

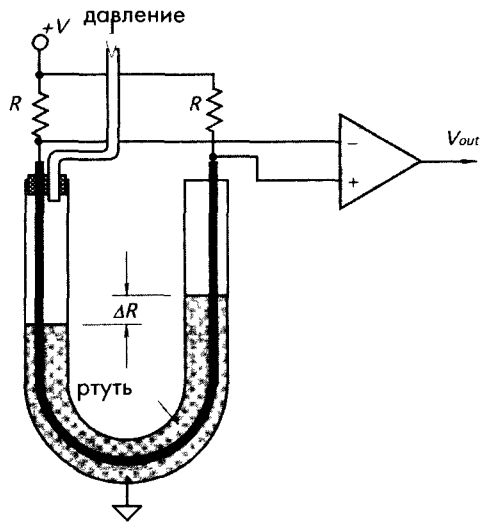


Рис. 10.1. U-образный датчик давления, заполненный ртутью, применяемый для измерения давления газов

нулю дифференциальное давление в трубке. Давление, приложенное к одному из концов трубки (например, левой), приводит к разбалансировке мостовой схемы и появлению на ее выходе ненулевого сигнала. Чем выше давление в левой части трубки, тем больше сопротивление соответствующего плеча и тем меньше сопротивление противоположного. Выходное напряжение пропорционально разности сопротивлений ΔR в двух плечах моста, незакороченных ртутью участков провода:

$$V_{out} = V\frac{\Delta R}{R} = V\beta\Delta p. \qquad (10.4)$$

Такой датчик обычно калибруется напрямую в торрах. К сожалению, простота является практически единственным его достоинством, потому что он обладает целым рядом существенных недостатков: необходимостью прецизионного выравнивания, плохой помехозащищенностью от ударов и вибраций, большими габаритами и загрязнением газа ртутными парами. Отметим, что такой датчик может использоваться и в качестве детектора наклона, поскольку нулевой сигнал на его выходе при отсутствии внешнего давления на одно из плечей трубки свидетельствует о строго горизонтальном его расположении.

10.4. Сильфоны, мембраны и тонкие пластины

Чувствительные элементы, входящие в состав датчиков давления, являются механическими устройствами, деформирующимися под действием внешнего напряжения. Такими устройствами могут быть трубки Бурдона (С-образные, спиральные и закрученные), гофрированные [3] и подвесные диафрагмы, мембраны, сильфоны и другие элементы, форма которых меняется под действием на них давления.

На рис. 10.2А показан сильфон, преобразующий давление в линейное перемещение, которое может быть измерено при помощи соответствующего датчика. Таким образом, сильфон выполняет первый этап преобразований давления в электрический сигнал. Он обладает относительно большой площадью поверхности, что дает возможность получать довольно существенные перемещения даже при небольших давлениях. Жесткость цельного металлического сильфона пропорциональна модулю Юнга материала и обратно пропорциональна внешнему диаметру и количеству изгибов на нем. Жесткость сильфона также связана кубической зависимостью с толщиной его стенок.

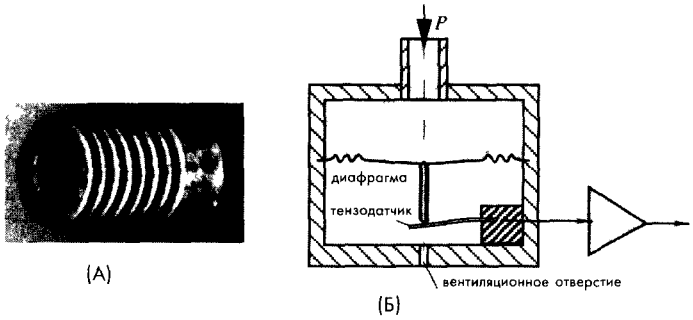


Рис. 10.2. А – стальной сильфон, используемый в датчиках давления (Servometer Corp., Cedar Grove, NJ), Б – металлическая гофрированная диафрагма, применяемая для преобразования давления в линейное перемещение

На рис. 10.2Б показана диафрагма, применяемая в анероидных барометрах для преобразования давления в линейное отклонение. Диафрагма, формирующая одну из стенок камеры давления, механически связана с тензодатчиком, который преобразует ее отклонения в электрический сигнал. В настоящее время большинство датчиков давления такого типа изготавливаются с кремниевыми мембранами, методами микротехнологий.

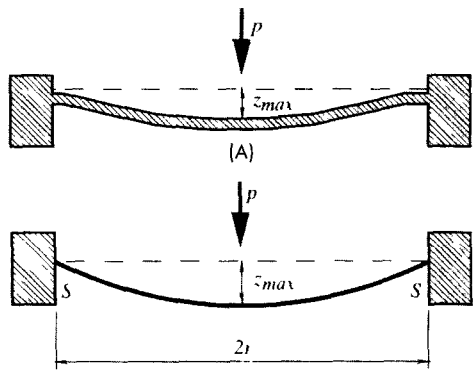


Рис. 10.3. Деформация тонкой пластины (А) и мембраны (Б) под действием давления p

Мембрана – это тонкая диафрагма, радиальное растяжение которой S измеряется в Ньютонах на метр (рис. 10.3Б). Коэффициентом жесткости при изгибе здесь можно пренебречь, поскольку толщина мембраны гораздо меньше ее радиуса (по крайней мере в 200 раз). Приложенное давление к одной из сторон мембраны сферически выгибает ее. При низких значениях давления p отклонение центра мембраны z_m и ее механическое напряжение σ_m являются квазилинейными функциями давления (напряжение измеряется в Н/м^2):

$$z_{\max} = \frac{r^2 p}{4S}, \tag{10.5}$$

$$\sigma_{\max} \approx \frac{S}{g}, \tag{10.6}$$

где r – радиус мембраны, а g – ее толщина. Механическое напряжение мембраны считается постоянным по всей ее поверхности.

Для нахождения наименьшей собственной частоты мембраны можно воспользоваться следующим соотношением [4]:

$$f_0 = \frac{1.2}{\pi r}\sqrt{\frac{S}{\rho g}}, \tag{10.7}$$

где ρ – плотность материала мембраны. При значительной толщине мембраны, когда ее отношение $r/g \leq 100$, речь уже идет о *тонкой пластине* (рис. 10.3А). Если такую пластину закрепить между двумя зажимными кольцами, в системе появится значительный гистерезис, вызванный силами трения между кольцами и пластиной. Поэтому пластину и поддерживающие компоненты лучше изготавливать в виде монолитной конструкции.

Для пластины, также как и для мембраны, максимальное отклонение линейно связано с давлением:

$$z_{\max} = \frac{3(1-\nu^2)r^4 p}{16Eg^3}, \tag{10.8}$$

где E – модуль Юнга (Н/м^2), а ν – коэффициент Пуассона. Максимальное механическое напряжение в пластине тоже является линейной функцией давления:

$$\sigma_{\max} \approx \frac{3r^2 p}{4g^2}. \tag{10.9}$$

В уравнениях (10.5)-(10.6) и (10.8)-(10.9) предполагается, что разрабатываемый датчик давления будет измерять отклонения мембраны или пластины. Поэтому далее необходимо выбрать метод преобразования полученного отклонения в электрический сигнал. Это можно выполнить несколькими способами, некоторые из которых будут рассмотрены в следующих разделах.

10.5. Пьезорезистивные датчики

В состав датчиков давления обязательно входят два компонента: пластина (мембрана) известной площади A и детектор, выходной сигнал которого пропорционален приложенной силе F (уравнение (10.1)). Оба эти элемента могут быть изготовлены из кремния. Датчик давления с кремниевой диафрагмой состоит из самой диафрагмы и встроенных в нее диффузионным методом пьезорезистивных преобразователей в виде резисторов [5]. Поскольку монокристаллический кремний обладает очень хорошими характеристиками упругости, в таком датчике отсутствует ползучесть и гистерезис даже при высоком давлении. Коэффициент тензочувствительности кремния во много раз превышает аналогичный коэффициент тонкого металлического проводника [6]. Обычно тензорезисторы включаются по схеме моста Уитстона. Максимальное выходное напряжение таких датчиков обычно составляет несколько сот милливольт, поэтому на их выходе, как правило, ставятся усилители сигналов. Кремниевые резисторы обладают довольно сильной температурной чувствительностью, поэтому всегда при разработке датчиков на их основе необходимо предусматривать цепи температурной компенсации.

Когда к полупроводниковому резистору номинала R прикладывается механическое напряжение, вследствие пьезорезистивного эффекта его сопротивление меняется на величину ΔR[7]:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t , \tag{10.10}$$

где π_l и π_t – пьзорезистивные коэффициенты в продольном и поперечном направлениях, а σ_l и σ_t – напряжения в продольном и поперечном направлениях. Пьезорезистивные коэффициенты определяются ориентацией кремниевого кристалла. Для дифузионного резистора *p*-типа, имеющего ориентацию <110>, а также для кремниевой квадратной диафрагмы *n*-типа с ориентацией поверхности <100>, показанных на рис. 10.4, эти коэффициенты можно найти из аппроксимационного соотношения [7]:

$$\pi_l = -\pi_t = \frac{1}{2}\pi_{44}. \tag{10.11}$$

Изменение сопротивления пропорционально приложенному механическому напряжению, и, следовательно, приложенному давлению. Резисторы располагаются на диафрагме так, чтобы их продольные и поперечные коэффициенты тензочувствительности имели противоположные знаки, тогда изменения значений резисторов также будут иметь разные знаки:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{1}{2}\pi_{44}(\sigma_{1y} - \sigma_{1x}) . \tag{10.12}$$

При включении резисторов в полумостовую схему и при подаче на нее напряжения возбуждения *E*, выходной сигнал будет равен выражению:

$$V_{out} = \frac{1}{4}E\pi_{44}(\sigma_{1y} - \sigma_{1x}). \tag{10.13}$$

Взяв частные производные от V_{out}, можно найти чувствительность датчика к давлению a_p и его температурный коэффициент b_T:

$$a_p = \frac{1}{E}\frac{\partial V_{out}}{\partial p} = \frac{\pi_{44}}{4}\frac{\partial(\sigma_{1y} - \sigma_{1x})}{\partial p}, \tag{10.14}$$

$$b_T = \frac{1}{a_p}\frac{\partial a_p}{\partial T} = \frac{1}{\pi_{44}}\frac{\partial \pi_{44}}{\partial T} . \tag{10.15}$$

Поскольку коэффициент $\partial\pi_{44}/\partial T$ имеет отрицательное значение, температурная чувствительность также будет отрицательной, что означает, что при увеличении температуры чувствительность падает.

Существует несколько методов изготовления кремниевых датчиков давления. В одном из способов [8] используется подложка из кремния *n*-типа с ориентацией поверхности <100>, на которой методом ионной имплантации бора формируются

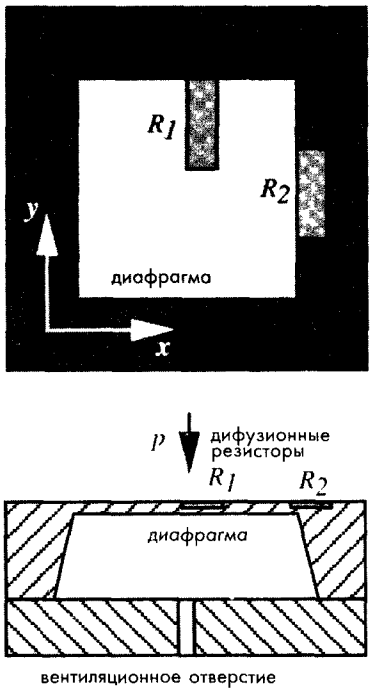


Рис. 10.4. Расположение пьезорезисторов на кремниевой диафрагме

пьезорезисторы с поверхностной концентрацией примесей, равной 3×10^{18} в одном кубическом сантиметре. Один из них (R_1) параллелен, а другой (R_2) перпендикулярен ориентации диафрагмы <110>. Одновременно с формированием пьезорезисторов изготавливаются и другие компоненты схемы датчика: резисторы и p-n переходы, используемые в цепях компенсации температуры, располагающиеся в сравнительно толстой зоне подложки вокруг диафрагмы. В связи с таким расположением они не реагируют на давление, действующее на диафрагму.

На рис. 10.5 показана схема еще одного монолитного микродатчика давления, выпускаемого фирмой Motorola. В этом датчике пьезорезистивный элемент, представляющий собой тензодатчик, формируется методом ионной имплантации на кремниевой диафрагме. К выводам резистора 1 и 3 подводится напряжение возбуждения. Под прямым углом к направлению тока возбуждения прикладывается давление, вызывающее механическое напряжение диафрагмы, которое, в свою очередь, формирует в резисторе поперечное электрическое поле, снимаемое в виде напряжения с выводов 2 и 4. Такой тензодатчик является механическим аналогом датчика Холла, рассмотренного в разделе 3.8 главы 3. Использование одного тензоэлемента устраняет необходимость точного согласования четырех тензо- и температурно- чувствительных резисторов, формирующих мост Уитстона, как это было в предыдущей конструкции. Одновременно с этим здесь существенно упрощены дополнительные цепи, необходимые для проведения калибровки и температурной компенсации. Тем не менее схема одноэлементного тензодатчика является электрическим аналогом мостовой структуры. Балансировка этой схемы определяется не точным подбором резисторов, как это было в обычной мостовой схеме, а тем, насколько хорошо отрегулировано расположение выходных выводов.

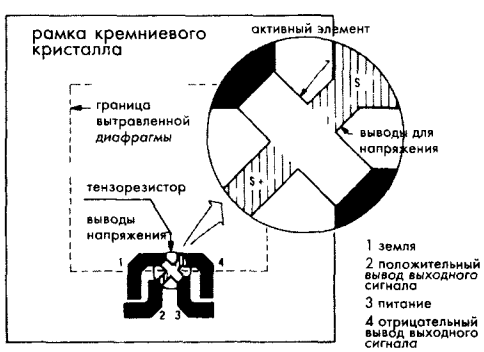


Рис. 10.5. Схема некомпенсированного пьезорезистивного элемента датчика давления Motorola MPX (напечатано с разрешения Motorola, Inc)

Для формирования тонкой диафрагмы площадью 1 мм^2 используются традиционные травильные реагенты (например, анизотропый раствор гидразина в воде: $N_2H_4 \cdot H_2O$). В качестве

маскирующих слоев применяется SiO_2, для формирования защитного слоя с нижней стороны подложки – Si_3N_4. Скорость травления при 90°С составляет 1.7 мкм/мин. Конечная толщина диафрагмы равняется приблизительно 30 мкм.

Другой способ изготовления диафрагм основан на методе сплавления кремния, который позволяет надежно соединять подложки из монокристаллического кремния без применения промежуточных слоев [9]. Этот способ дает возможность формирования микродатчиков (более чем в восемь раз меньших обычных кремниевых датчиков давления диафрагменного типа), которые могут использоваться в преобразователях катетерного типа для проведения медицинских исследований. Такой микродатчик состоит из двух частей: верхней и нижней подложек (рис. 10.6А). В нижней закрепленной подложке методом анизотропного травления формируется полость по размеру диафрагмы. Толщина нижней подложки составляет 0.5 мм, а требуемая длина диафрагмы – 250 мкм, поэтому в результате анизотропного травления формируется пирамидальная полость глубиной 175 мкм. Следующий шаг заключается в соединении методом сплавления нижней подложки с верхней, состоящей из кремния *p*-типа с нанесенным эпитаксиальным слоем *n*-типа. Толщина эпитаксиального слоя соответствует заданной конечной толщине диафрагмы. После этого методом контролируемого травления удаляется часть верхней подложки, в результате чего от нее остается только тонкий слой из монокристаллического кремния, который и образует диафрагму датчика. Далее методом ионной имплантации формируются резисторы, а методом травления проделываются контактные отверстия. На последнем этапе нижняя подложка заземляется и шлифуется до получения желаемой толщины устройства – порядка 140 мкм. Несмотря на то, что размеры такого датчика более чем в половину меньше традиционного кремниевого преобразователя давления, они обладают одинаковой тензочувствительностью. На рис. 10.6Б показано сравнение двух диафрагм, полученных по разным технологиям. При тех же самых размерах диафрагмы и толщины кристалла, устройство, полученное методом сплавления почти на 50% меньше.

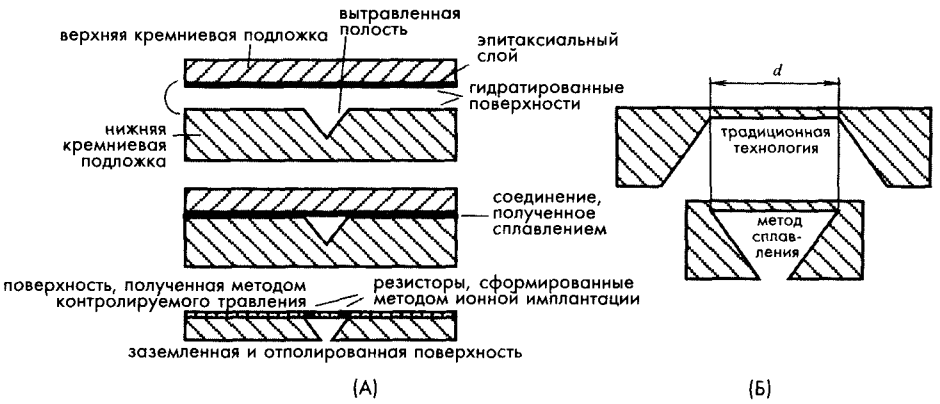


Рис. 10.6. Изготовление кремниевой мембраны методом сплавления кремния: А – технологические этапы изготовления, Б – сравнение двух диафрагм, полученных по разным технологиям

Датчики давления бывают трех типов, позволяющих измерять *абсолютное, дифференциальное и манометрическое* давление. Абсолютное давление, например, барометрическое, измеряется относительно давления в эталонной вакуумной камере, которая может быть как встроенной (рис. 10.7А), так и внешней. Дифференциальное давление, например, перепад давления в дифференциальных расходомерах, измеряется при одновременной подаче давления с двух сторон диафрагмы. Манометрическое давление измеряется относительно некоторого эталонного значения. Примером может служить, измерение кровяного давления, которое проводится относительно атмосферного давления. Манометрическое давление по своей сути является разновидностью дифференциального давления. Во всех трех типах датчиков используются одинаковые конструкции диафрагм и тензодатчиков, но все они имеют разные корпуса. Например, при изготовлении дифференциального или манометрического датчика, кремниевый кристалл располагается внутри камеры, в которой формируются два отверстия с двух сторон кристалла (рис. 10.7Б). Для защиты устройства от вредного влияния окружающей среды внутренняя часть корпуса заполняется силиконовым гелем, который изолирует поверхность кристалла и места соединений, но позволяет давлению воздействовать на диафрагму. Корпуса дифференциальных датчиков могут иметь разную форму (рис. 10.8). В некоторых случаях при работе с горячей водой, коррозионными жидкостями и т.д. необходимо обеспечивать физическую изоляцию устройства и гидравлическую связь с корпусом датчика. Это может быть реализовано при помощи дополнительных диафрагм и сильфонов. Для того чтобы не ухудшались частотные характеристики системы, воздушная полость датчика почти всегда заполняется силиконовой мазкой типа Dow Corning DS200.

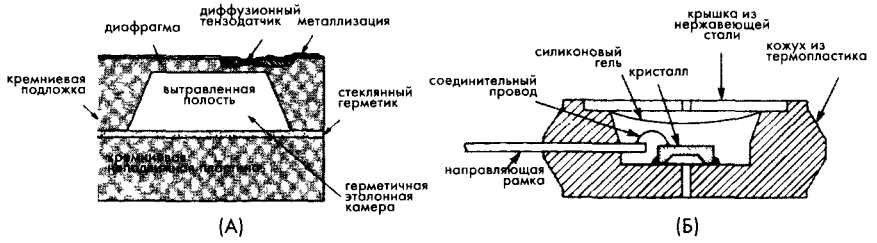


Рис. 10.7. Устройство корпусов датчиков: А – абсолютного, Б – дифференциального давлений (напечатано с разрешения Motorola Inc)

Рис. 10.8. Примеры корпусов дифференциальных датчиков давления. *(Напечатано с разрешения Motorola Inc)*

Для всех кремниевых датчиков характерна зависимость их характеристик от температуры. Коэффициент температурной чувствительности таких датчиков, определяемый выражением (10.15), обычно отрицательный, и для получения точных результатов его необходимо компенсировать. В разделе 5.7.3 главы 5 описаны основные методы температурной компенсации мостовых схем. Без осуществления температурной компенсации передаточная функция датчика будет выглядеть, как показано на рис. 10.9А.

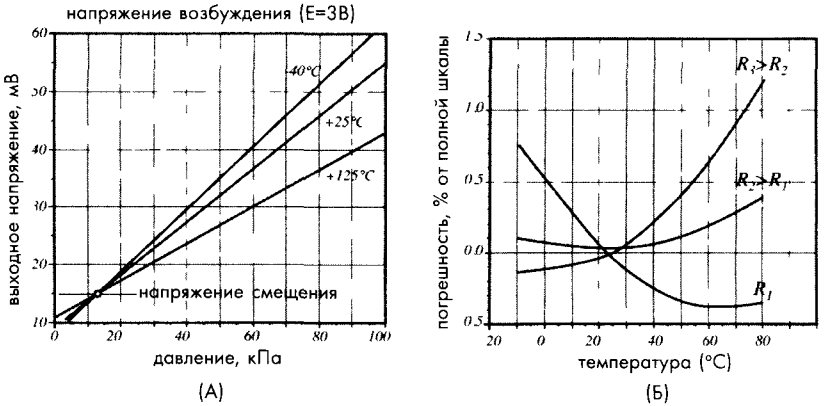


Рис. 10.9. Температурные характеристики пьезорезистивного датчика давления: А – передаточная функция при трех разных температурах, Б – приведенная погрешность для трех значений компенсационных резисторов

На практике часто достаточно бывает простой температурной компенсации, выполняемой при помощи подключения к датчику последовательного или параллельного резистора. Подбирая соответствующее значение резистора, настраивают рабочий диапазон выходного напряжения датчика (рис. 10.9Б). Однако для осуществления более надежной температурной коррекции в широком диапазоне температур необходимо применение более сложных компенсационных цепей, в которых часто используются детекторы температуры. Альтернативой аппаратной коррекции температуры выступает программная. Для этого используется встроенный детектор температуры, измеряющий температуру датчика давления. Данные обоих датчиков поступают в процессорную систему, где проводится их соответствующая цифровая корректировка.

10.6. Емкостные датчики

Емкостные датчики давления также реализуются на основе кремниевых диафрагм. В таких датчиках перемещение диафрагмы относительно опорной пластины меняет емкость между ними. Емкостные датчики работают наиболее эффективно при невысоких давлениях. Монолитные емкостные датчики давления, изготовленные из кремниевых кристаллов, обладают максимальной стабильностью рабочих характеристик. Перемещение диафрагмы может обеспечить 25% изменение емкости в широком диапазоне значений, что делает возможным проведение прямой оцифровки результатов измерений (см. раздел 5.5 главы 5). В то время как для диафрагм,

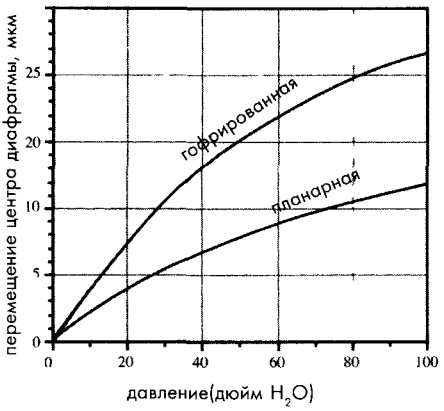


Рис. 10.10. Отклонение центральной части планарной и гофрированной диафрагм одинаковых размеров при наличии в системе плоскостных растягивающих напряжений

используемых в пьезорезитивных датчиках, необходимо обеспечивать максимальное механическое напряжение на краях, для диафрагм в емкостных датчиках существенным является перемещение их центральной части. Диафрагмы в емкостных датчиках могут быть защищены от избыточного давления при помощи механических ограничителей с каждой стороны диафрагмы (для дифференциальных датчиков давления). В пьзорезистивных датчиках из-за небольших перемещений такой способ защиты, к сожалению, работает недостаточно эффективно, поэтому для них определяется давление разрыва, которое, как правило, в 10 раз превышает максимальное измеряемое давление, в то время как для емкостных преобразователей с механическими ограничителями эта величина в 100 раз больше. Это особенно важно при работе в области низких давлений, где возможны всплески высокого давления.

Для обеспечения хорошей линейности емкостных датчиков необходимо, чтобы диафрагмы обладали ровной поверхностью центральной части. Традиционно считается, что емкостные датчики обладают линейностью только тогда, когда перемещения диафрагм значительно меньше их толщины. Одним из способов улучшения линейности является использование гофрированных диафрагм, изготовленных методами микротехнологий. Планарные диафрагмы обычно обладают лучшей тензочувствительностью по сравнению с гофрированными тех же размеров и толщины. Однако при наличии в системе плоскостных растягивающих напряжений изгибы гофрированной мембран их значительно ослабляют, что приводит к существенному улучшению линейности и чувствительности таких датчиков (рис. 10.10).

10.7. Датчики переменного магнитного сопротивления

При измерении низких давлений перемещение тонкой пластины или диафрагмы может быть небольшим. Фактически, оно может быть таким маленьким, что тензодатчик, прикрепленный к диафрагме или встроенный в нее, будет выдавать очень низкий выходной сигнал, недостаточный для последующей его обработки. Один из возможных способов решения этой проблемы – использование емкостного датчика, в котором отклонение диафрагмы измеряется по ее положению относительно опорной пластины, а не по напряжению внутри материала. Другим способом решения проблемы измерения очень низких давлений является применение магнитных датчиков. *Датчики переменного магнитного сопротивления* (ПМС) измеряют изменение магнитного сопротивления дифференциального трансформатора, вызванного перемещением магнитной диафрагмы, возникающего вследствие

воздействия на нее внешнего давления. Принцип действия таких датчиков очень напоминает принцип действия магнитных детекторов приближения, описанных в главе 5. На рис. 10.11А проиллюстрирована основная идея модуляции магнитного потока. Конструкция, состоящая из Е-образного сердечника и катушки формирует магнитный поток, силовые линии которого проходят через сердечник, воздушный зазор и диафрагму. Магнитная проницаемость материала сердечника по крайней мере в 1000 раз выше проницаемости воздушного зазора [10], поэтому его магнитное сопротивление всегда ниже сопротивления воздуха. В связи с этим величина индуктивности всей этой конструкции определяется шириной зазора. При отклонении диафрагмы величина воздушного зазора либо увеличивается, либо уменьшается в зависимости от направления перемещения, что вызывает модуляцию индуктивности.

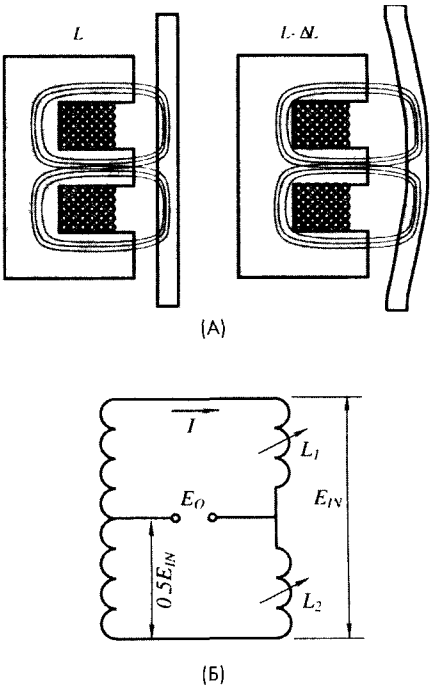


Рис. 10.11. Датчик измерения давления по переменному магнитному сопротивлению: А – основной принцип действия, Б – эквивалентная схема

На рис. 10.12 показана конструкция ПМС датчика давления, в котором между двумя половинами корпуса, состоящих из катушки и Е-образного сердечника, размещается магнитно проницаемая диафрагма. Катушки покрыты специальным составом, обеспечивающим прочность системы даже при воздействии очень высоких давлений. С двух сторон диафрагмы сформированы узкие рабочие камеры, соединенные с входными портами подачи давления. Рабочий диапазон датчика определяется толщиной диафрагмы, однако полное отклонение диафрагмы редко превышает 25...30 мкм, потому такие преобразователи, в основном, применяются для измерения низких давлений. Небольшие поперечные размеры рабочих камер физически защищают мембрану от чрезмерного отклонения в условиях избыточного давления, поэтому ПМС датчики являются достаточно надежными устройствами. При подаче переменного тока возбуждения возникает магнитный поток, захватывающий оба сердечника, воздушные зазоры и диафрагму. Таким образом, в состав датчика входят два индуктивных элемента, являющихся плечами мостовой схемы (рис. 10.11Б). Когда на диафрагму действует дифференциальное давление, она отклоняется в ту или другую сторону, что приводит к пропорциональному изменению магнитного сопротивления двух воздушных зазоров. Даже небольшое давление на диафрагму приводит к значительному изменению выходного сигнала, намного превышающему уровень шума.

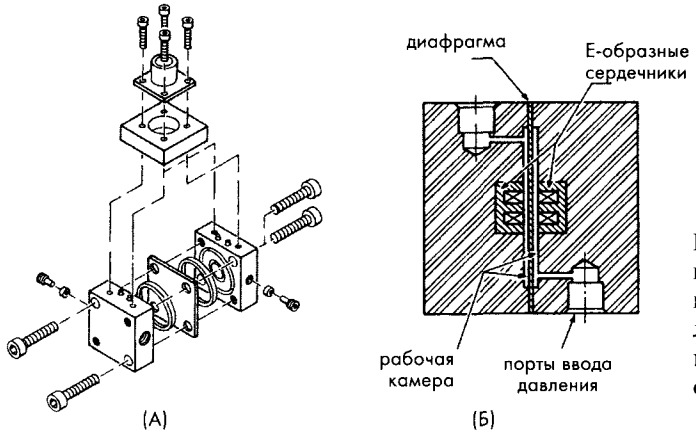


Рис. 10.12. Конструкция ПМС датчика для измерения низкого давления: А – схема сборки датчика, Б – устройство датчика

Выходной сигнал ПМС датчика пропорционален магнитному сопротивлению плечей индуктивного моста Уитстона, в котором активными элементами являются индуктивные сопротивления $x_{1,2}$. Индуктивность катушки определяется ее геометрией и количеством витков. Если в зону действия магнитного потока поместить материал, обладающий магнитной проницаемостью, то поскольку этот материал имеет низкое сопротивление, часть потока уйдет туда, что приведет к изменению собственной индуктивности катушки. Индуктивность цепи, а следовательно, и ее реактивное сопротивление, обратно пропорциональна магнитному сопротивлению, поэтому справедливо следующее выражение: $x_{1,2} = \kappa/d$, где κ – константа, а d – величина зазора. При возбуждении мостовой схемы высокочастотным сигналом ее выходной сигнал модулируется по амплитуде приложенным давлением. Амплитуда результирующего сигнала пропорциональна разбалансу моста, а его фаза соответствует направлению этого разбаланса. На выходе такого датчика иногда ставят демодулятор для получения не переменного, а постоянного выходного напряжения.

10.8. Оптоэлектронные датчики

При измерении низких давлений или когда для повышения динамического диапазона применяются толстые мембраны, для получения заданных значений разрешения и точности величина перемещения диафрагмы может оказаться недостаточной. В дополнение к этому рабочие характеристики большинства пьезорезистивных и некоторых емкостных датчиков довольно сильно зависят от температуры, что требует использования дополнительных цепей температурной компенсации. Оптические методы измерений обладают рядом преимуществ над остальными способами детектирования давления: простотой, низкой температурной чувствительностью, высокой разрешающей способностью и высокой точностью. Особенно перспективными являются оптоэлектронные датчики, реализованные на основе явления интерференции света [11]. Такие преобразователи используют принцип измерения малых перемещений Фабри-Перо, детально рассмотренный в разделе 7.5 главы 7. На рис. 10.13 показана упрощенная схема одного из таких датчиков.

В состав датчика входят следующие компоненты: пассивный кристалл оптического преобразователя давления с диафрагмой, вытравленной в кремниевой подложке; светоизлучающий диод (СИД) и кристалл детектора [12]. Детектор состоит из трех p-n фотодиодов, к двум из которых пристроены оптические фильтры Фабри-Перо, имеющие небольшую разницу по толщине. Эти фильтры представляют собой кремниевые зеркала с отражением от передней поверхности, покрытые слоем из SiO_2, на поверхность которых нанесен тонкий слой Al. Оптический преобразователь похож на емкостной датчик давления, описанный в разделе 10.2, за исключением того, что в нем конденсатор заменен на интерферометр Фабри-Перо[13], используемый для измерения отклонения диафрагмы. Диафрагма, сформированная методом травления в подложке из монокристаллического кремния, покрыта тонким слоем металла. На нижнюю сторону стеклянной пластины также нанесено металлическое покрытие. Между стеклянной пластиной и кремниевой подложкой существует зазор шириной w, получаемый при помощи двух прокладок. Два слоя металла формируют интерферометр Фабри-Перо с переменным воздушным зазором w, в состав которого входят: подвижное зеркало, расположенное на мембране, меняющее свое положение при изменении давления, и параллельное ему стационарное полупрозрачное зеркало на стеклянной пластине. Поскольку величина w связана с внешним давлением линейной зависимостью, длина волны отраженного излучения меняется при изменении давления. Принцип действия датчика основан на измерении модуляции длины волны, получаемой от сложения падающих и отраженных излучений. Частота периодического интерференционного сигнала определяется шириной рабочей полости интерферометра w, а его период равен $1/2w$.

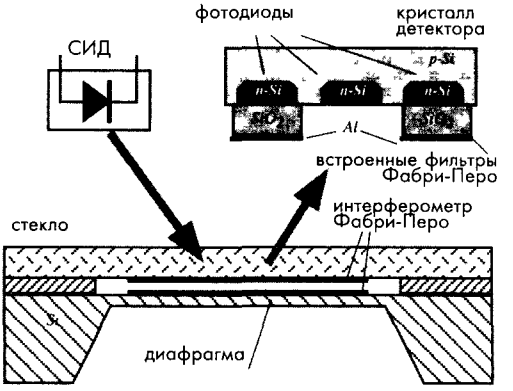


Рис. 10.13. Схема оптоэлектронного датчика давления, использующего принцип интерференции света [12]

Детектор работает как демодулятор, электрический выходной сигнал которого пропорционален приложенному давлению. Он является оптическим компаратором, сравнивающим высоту рабочей камеры датчика давления и толщину виртуальной камеры, сформированной за счет разности высот двух фильтров Фабри-Перо. Когда размеры этих камер равны, ток фотодетектора будет максимальным. При изменении давления происходит косинусная модуляция фототока с периодом, соответствующим половине средней длины волны источника излучения. Фотодиод без фильтра используется в качестве эталонного диода, отслеживающего полную интенсивность света, поступающего на детектор. Его выходное напряжение применяется при последующей обработке сигналов для получения нормированных результатов измерений. Поскольку рассматриваемый датчик давления является нелинейным, он обычно встраивается в микропроцессорную систему, на которую, в частности, возложены функции его линеаризации. Аналогичные оптические

датчики давления реализуются на основе оптоволоконных световодов. Такие датчики незаменимы при проведении измерений в труднодоступных зонах, где использование ВЧ интерферометров невозможно [14].

10.9. Вакуумные датчики

При производстве подложек для микроэлектронных устройств, оптических компонентов, а также в ходе проведения химических и других технологических процессов бывает необходимо измерять очень низкие давления. Без таких измерений не обходятся и при проведении некоторых научных экспериментов, например, в космических исследованиях. Термин *вакуум* означает давление ниже атмосферного, но, как правило, он употребляется в случаях практического полного отсутствия давления газов. Абсолютный вакуум получить невозможно, даже в космическом пространстве нет ни одной зоны, где бы полностью отсутствовала материя.

Вакуум можно измерять и традиционными датчиками, при этом будут регистрироваться отрицательные значения давления по отношению к атмосферному, но это очень неэффективный подход. Обычные датчики давления не могут определять очень низкие концентрации газов из-за низкого отношения сигнал/шум. В отличие от традиционных датчиков давления измерители вакуума работают на совершенно других принципах, которые основываются на некоторых физических свойствах молекул газов и заключаются в определении числа молекул в заданном объеме. К таким физическим свойствам относится теплопроводность, вязкость, ионизация и другие. В этом разделе будут даны краткие описания самых популярных датчиков давления, используемых для измерения вакуума.

10.9.1. Вакуумметры Пирани

Вакуумметры Пирани – это датчики, измеряющие давление по теплопроводности газа. Этот тип измерителей вакуума был разработан первым. В конструкцию самого простого датчика Пирани входит нагреваемая пластина. Измерение вакуума заключается в определении количества тепла, теряемого этой пластиной, которое зависит от давления газа. В основу принципа действия вакуумметра Пирани положено открытие Мариана Ван Смолючовски [15], который установил, что при нагревании объекта его тепловые потери формируются из следующих составляющих:

$$G = G_0 + G_g = G_s + G_r + ak\frac{PP_T}{P + P_T}, \qquad (10.16)$$

где G_s – теплоотдача в твердые окружающие предметы, G_r – радиационная теплопередача, a – площадь нагреваемой пластины, κ – коэффициент, характеризующий свойства газа, а P_T – максимальное давление, которое можно измерить данным датчиком. Первые два члена представляют собой паразитную теплопроводность G_0, а третий член соответствует передаче тепла газу G_g. На рис. 10.14А показано влияние различных факторов на тепловые потери нагреваемой пластины. При отсутствии паразитных теплопотерь теплопроводность газа линейно снижается вплоть до абсолютного вакуума. Поэтому при разработке таких устройств всегда стремятся минимизировать факторы, составляющие G_0. Для этого

либо используют конструкцию с подвешенной нагреваемой пластиной для уменьшения теплового контакта с корпусом датчика, либо применяют дифференциальный метод снижения влияния G_0.

Существует несколько конструкций датчиков Пирани, используемых в вакуумной технике. В состав некоторых из них входят две пластины, находящиеся при разных температурах. В таких датчиках давление газа определяется по количеству энергии, затраченной на нагрев пластин. Другие датчики используют только одну пластину, при этом теплопроводность газа измеряется по величине теплопотерь в окружающие стенки. Для измерения температуры в состав датчиков обычно входят либо термопары, либо платиновые терморезисторы. На рис. 10.15 показан дифференциальный вакуумметр Пирани. Камера датчика разделена на две идентичные секции. В одной из секций газ находится при эталонном давлении (например, при 1 атм =760 торр), а вторая расположена в вакуумной камере, давление в которой необходимо измерить. В каждой камере есть нагреваемая пластина, которая для уменьшения кондуктивной теплопередачи через окружающие твердые предметы подвешена на очень тонких соединительных элементах. Желательно, чтобы обе камеры имели одинаковые форму, конструкцию и размеры, для того чтобы кондуктивные и радиационные потери тепла в них были идентичными. Чем симметричнее конструкция камер, тем лучше компенсируются паразитные теплопотери G_0. Пластины нагреваются при помощи электрических нагревателей. В рассматриваемом датчике нагревательным элементом является термистор с отрицательным температурным коэффициентом (ОТК) (см. главу 16). Сопротивления термисторов равны и имеют сравнительно низкий номинал, поэтому в них возможно протекание процесса саморазогрева Джоуля (см. рис. 16.11 главы 16).

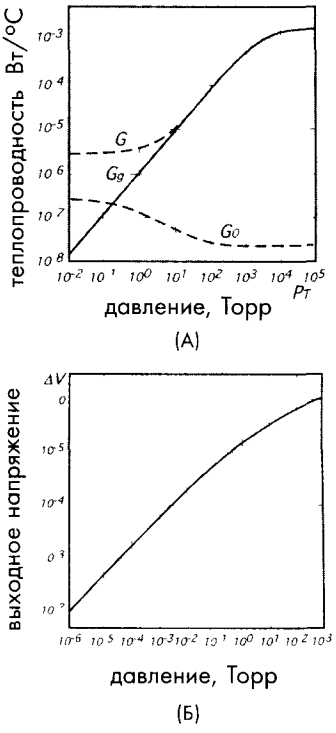


Рис. 10.14. А – тепловые потери нагреваемой пластины, Б – передаточная функция вакуумметра Пирани

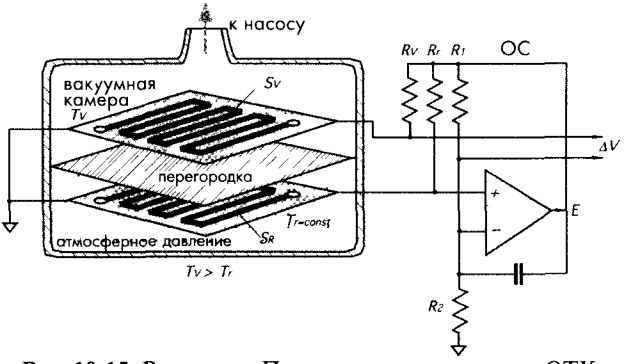


Рис. 10.15. Вакуумметр Пирани с термисторами с ОТК, работающими в режиме саморазогрева

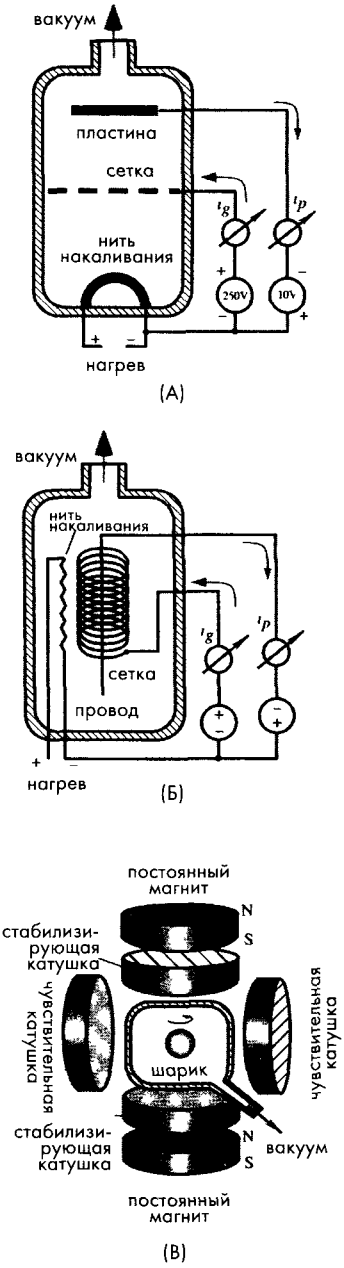


Рис. 10.16. Ионизационный вакуумный датчик (А), измеритель Баярда-Алперта (Б), датчик газового сопротивления (В)

Эталонный термистор S_r включен в схему самобалансирующегося моста, в состав которого входят также резисторы: R_r, R_1, R_2 и ОУ. Мостовая схема автоматически выводит температуру термистора S_r на постоянный уровень T_r, определяемый сопротивлениями резисторов моста, на который окружающая температура не оказывает никакого влияния. Отметим, что уравновешивание мостовой схемы осуществляется при помощи цепей как положительной, так и отрицательной ОС, включенных относительно ее плечей. Конденсатор C не допускает возникновения в схеме колебательных режимов. То же самое напряжение E, которое используется для нагрева эталонной пластины, подается на термистор S_v, расположенный на чувствительной пластине, через резистор R_v, равный резистору R_r. Выходное напряжение снимается относительно чувствительного термистора и моста. Передаточная функция такого датчика показана на рис. 10.14Б. Вакуумметрам иногда приходится работать с газами, которые могут загрязнить их чувствительную пластину, поэтому в их состав также должны входить соответствующие фильтры.

10.9.2. Ионизационные датчики

Такие датчики напоминают вакуумные лампы, используемые в качестве усилителей в старых радиоприемниках. Ток ионов между пластиной и нитью накаливания почти линейно зависит от плотности молекул (давления) [16,17]. Лампы вакуумных датчиков имеют обратное включение: на сетку подается высокое положительное напряжение, а пластина подсоединяется к низкому отрицательному напряжению. Выходным сигналом ионизационного датчика является ток ионов i_p, снимаемый с пластины, пропорциональный давлению и току электронов i_g на сетке. В настоящее время используется усовершенствованная модель этого датчика, называемая измерителем Баярда-Алперта [18]. Он обладает большей чувствительностью и стабильностью и может измерять более низкие давления. Его принцип действия аналогичен предыдущему датчику, но измеритель Баярда-Алперта имеет другую конструкцию, в нем пластина заменена на провод, окруженный сеткой, а нить накаливания катода вынесена наружу (рис. 10.16Б).

10.9.3. Датчик газового сопротивления

При столкновении молекул газа с подвижным объектом, они теряют свою энергию. В этом заключена основная идея датчика с вращающимся ротором [19]. В рассматриваемом датчике (рис. 10.16В) маленький стальной шарик диаметром 4.5 мм при помощи магнитов удерживается в подвешенном состоянии внутри вакуумной камеры и при этом вращается с частотой 400 Гц. Магнитный момент шарика индуцирует напряжение в расположенных по бокам чувствительных катушках. Молекулы газов, сталкиваясь с шариком, замедляют его скорость вращения. По величине изменения скорости вращения судят о давлении газа в камере:

$$P = \frac{\pi \rho a \bar{c}}{10\sigma_{eff}} \left(\frac{-\omega' - RD - 2\alpha T'}{\omega} \right), \qquad (10.17)$$

где ρ и a – плотность и радиус шарика, ω'/ω – относительное изменение скорости вращения, $\bar{c}$ – средняя скорость молекул газа, α – коэффициент теплового расширения шарика, а T' – температура шарика [20].

Литература

1 Benedict, R P *Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements,* 3rd ed John Wiley & Sons, New York, 1984
2 Plandts, L *Essentials ofFluid Dynamics* Hafner, New York, 1952
3 Di Giovanni, M *Flat and Corrugate Diaphragm Design Handbook Marcel* Dekker, New York, 1982
4 Neubert, H K P *Instrument Transducers An Introduction to Their Performance and Design,* 2nd ed Clarendon Press, Oxford, 1975
5 Clark, S K and Wise, K D Pressure sensitivity in anisotropically etched thin-diaphragm pressure sensor *IEEE Trans Electron Dev* , ED-26,1887-1896,1979
6 Tufte, O N , Chapman, PW and Long, D Silicon diffused-element piezoresistive diaphragm *J Appl Phys* 33, 3322-3327, 1962
7 Kurtz, A D and Gravel, C L Semiconductor transducers using transverse and shear piezoresistance Proc 22nd ISA Conference, 1967
8 Tanigawa, H , Ishihara, T , Hirata, M , and Suzuki K MOS integrated silicon pressure sensor *IEEE Trans Electron Dev* ED-32(7), 1191-1195, 1985
9 Petersen, K , Barth, P, Poydock, J , Brown, J , Mallon, J , Jr , and Bryzek, J Silicon fusion bonding for pressure sensors Record of the IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 1988, pp 144-147
10 Proud, R VRP transducers for low-pressure measurement *Sensors Magazine,* 20-22, 1991
11 Wolthuis, R , A , Mitchell, G L , Saaski, E , Hrati, J C , and Afromowitz, M A Development of medical pressure and temperature sensors employing optical spectral modulation *IEEE Trans Biomed Eng ,* 38(10), 974-981, 1991
12 Halg, B A silicon pressure sensor with an interferometric optical readout In *Transducers'91 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators Digest of Technical Papers* IEEE, New York, 1991, pp 682-684
13 Vaughan, J M *The Fabry-Perot Interferometers* Adam Hilger, Bristol, 1989
14 Saaski, E W, Hartl, J C , and Mitchell, G L A fiber optic sensing system based on spectral modulation Paper #86-2803, ISA, 1989
15 Von Smoluchowski, M *Ann-Phys* 35, 983, 1911
16 Buckley, O E *Proc Natl Acad Sci* , USA 2, 683, 1916
17 Leek, J H *Pressure Measurement in Vacuum Systems* Chapman & Hall , London, 1957,pp 70-74
18 Bayard, R T andAlpert, D *Rev Sci Instrum* 21, 571, 1950
19 Fremery, J K *Vacuum* 32, 685, 1946
20 Goehner, R , Drubetsky, E , Brady, H M, and Bayles, W H , Jr Vacuum measurement In *Mechanical Variables Measurement* Webster, ed CRC Press, Boca Raton, FL 2000

ГЛАВА 11

РАСХОДОМЕРЫ

Сделать сложную систему легко,
Гораздо сложнее сделать простую систему

11.1. Основы гидродинамики

Закон сохранения массы является одним из основных постулатов физики. Масса не может ни создаваться, ни разрушаться. Если в замкнутом объеме нет никаких входных и выходных отверстий, масса вещества в нем всегда будет оставаться постоянной. Однако если на границах замкнутого объема происходит втекание и вытекание массы, для постоянства массы в объеме сумма ее прихода и расхода должна всегда быть равна нулю, т.е. должно выполняться правило: сколько массы вещества поступило, столько должно и уйти. Тогда для потоков, входящих в систему и исходящих из нее, в течение одного и того же интервала времени будет выполняться следующее соотношение:

$$\frac{dM_{in}}{dt} = \frac{dM_{out}}{dt}, \qquad (11.1)$$

где M_{in} – масса вещества, поступившего в систему, M_{out} – масса вещества, покинувшего ее. На практике часто требуется измерять расход жидкостей (воды, бензина, растворителей и т.д), а также воздуха и газов (кислорода, азота, CO, CO_2 и т.д) [1].

В стационарных потоках скорость потока в заданной точке будет всегда постоянной, поэтому в любой точке подвижной среды всегда можно нарисовать линии потока (рис. 11.1А). Для стационарного потока распределение этих линий одинаково в любой момент времени. В любой точке z вектор скорости всегда направлен по касательной к линии потока. Рассмотрим замкнутый объем в пределах потока среды, сформированный линиями потока, и назовем его проточной трубой. Поскольку границы такой трубы состоят из линий потока, она ведет себя как обычная трубка определенной формы: текущая среда входит в трубку на одном конце через поперечное сечение A_1, а вытекает на другом ее конце через сечение A_2. Очевидно, что скорость движения среды в разных точках внутри трубки не обязательно будет одинаковой.

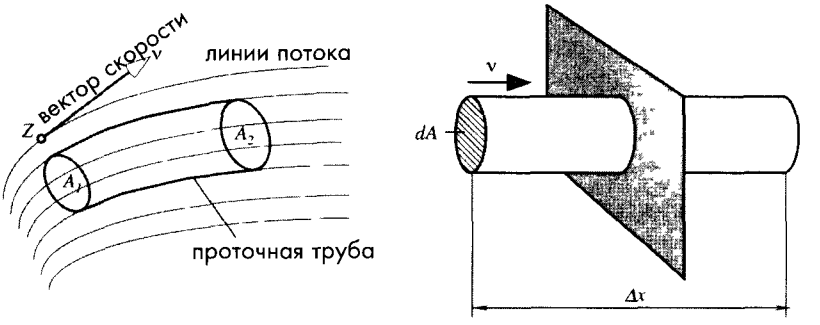


Рис. 11.1. Проточная труба (А), поток вещества через поперечное сечение (В)

Объем вещества, проходящего через заданное поперечное сечение трубки (рис. 11.1Б) в течение определенного интервала времени Δt, равен:

$$\Lambda = \frac{V}{\Delta t} = \int \frac{\Delta x dA}{\Delta t} = \int v dA \ , \tag{11.2}$$

где v – скорость движущейся среды через поперечное сечение площадью A, а Δx – перемещение объема V. На рис. 11.2 показано типовое распределение скоростей стационарного потока жидкости или газа внутри поперечного сечения. Средняя скорость потока в сечении A определяется следующим соотношением:

$$v_a = \frac{\int v dA}{A} \ . \tag{11 3}$$

При измерении скорости потока датчиком, размеры которого существенно меньше размеров трубки, можно получить либо завышенные, либо заниженные значения скорости, а среднее значение скорости v_a будет где-то между ними, поэтому на практике чаще определяется не скорость потока, а расход вещества через определенное сечение. *Расход* – это произведение средней скорости потока на площадь поперечного сечения. В системе СИ он измеряется в кубических метрах в секунду ($м^3/с$). Преобразовав выражение (11.3), можно вывести уравнение для расхода вещества:

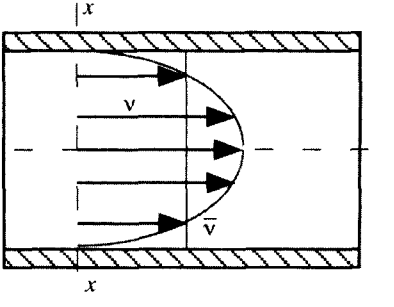


Рис. 11.2. Профиль скоростей потока внутри трубки

$$Av_a = \int v dA . \tag{11.4}$$

Расходомеры обычно меряют среднюю скорость потока v_a при известной площади поперечного сечения A.

Принцип действия расходомеров, работающих с несжимаемыми средами (водой, маслом и т.д.), редко основывается на определении перемещения объемов, для этого чаще всего применяется измерение расхода массы. Для несжимаемых жидкостей справедливо следующее соотношение между их массой и объемом:

$$M = \rho V\,, \tag{11.5}$$

где ρ – плотность жидкости. В Приложении приведены плотности некоторых материалов. Расход массы вещества определяется выражением:

$$\frac{dM}{dt} = \rho A\bar{v}\,. \tag{11.6}$$

В системе СИ расход массы измеряется в кг/с, а в американской системе единиц – в фунт/с. Для сжимаемых сред (газов) при заданном давлении определяются либо массовый, либо объемный расход.

Существует большое разнообразие датчиков, способных измерять скорость перемещения либо массы, либо объема. Однако независимо от типа используемого датчика определение расхода вещества всегда является сложной задачей, поскольку при этом требуется учитывать многие физические характеристики исследуемой и окружающей сред, форму трубок и свойства материалов, из которых они изготовлены, температуру среды и давление и т.д. При выборе датчика всегда необходимо внимательно изучить его параметры, указанные в документации производителя, и учесть все известные практические рекомендации, относящиеся к детекторам данного типа. В этой книге традиционные расходомеры механического типа рассматриваться не будут. Здесь будет дано описание датчиков, в составе которых нет подвижных компонентов, и которые не создают (или почти не создают) никаких помех потоку жидкой среды.

11.2. Датчики скорости потока по перепаду давления

Для стационарного потока невязкой и несжимаемой среды можно использовать уравнение Бернулли:

$$p + \rho\left(\frac{1}{2}v_a^{\,2} + gy\right) = const\,, \tag{11.7}$$

где p – давление потока в трубе, g=9.80665 м/с^2= 32.174 фут/с^2 – гравитационное ускорение, а y – высота перемещения среды. Это уравнение позволяет определять скорость потока по результатам измерения давления вдоль трубы.

Метод определения скорости потока по перепаду давлений подразумевает введение в поток жидкой среды некоторого сопротивления, которым может быть либо диафрагма, либо коническая трубка Вентури, либо пористая пробка. Для того чтобы понять суть этого метода, надо провести аналогию с законом Ома: Напряжение (давление) на фиксированном сопротивлении пропорционально току (потоку) через это сопротивление. Тогда измерив перепад давления на известном резистивном элементе, можно определить скорость потока. На рис. 11.3 показаны два типа элементов, создающих сопротивление потоку. В первом случае роль сопротивления играет

зауженная часть трубки, а во втором – пробка из пористого материала. Входы дифференциального датчика давления располагаются с двух сторон резистивного элемента. Когда жидкость течет через зону, оказывающую повышенное сопротивление потоку, ее скорость возрастает пропорционально увеличению этого сопротивления:

$$v_{1a} = v_{2a} R \,. \tag{11.8}$$

Перепад давления можно найти из уравнения Бернулли (здесь предполагается, что оба измерения проведены на одинаковой высоте, т.е. y=0):

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2}\left(v^2{}_{2a} - v^2{}_{1a}\right) = k\frac{\rho}{2} v^2{}_{2a}(1 - R^2)\,, \tag{11.9}$$

где κ – согласующий коэффициент, введение которого необходимо из-за небольшой разности значений реального и расчетного давлений. Из уравнения (11.9) можно вывести выражение для определения средней скорости:

$$v_{2a} = \frac{1}{\sqrt{k(1-R^2)}}\sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p} \tag{11.10}$$

Для определения расхода массы несжимаемого вещества за единицу времени уравнение (11.10) приводится к виду:

$$q = \xi A_2 \sqrt{\Delta p}\ , \tag{11.11}$$

где ξ– калибровочный коэффициент. Поскольку коэффициент ξ довольно сильно зависит от температуры, калибровка должна проводиться во всем рабочем температурном диапазоне. При проведении калибровки используются жидкости и газы с известными характеристиками. Для определения перепада давлений может применяться либо один дифференциальный датчик, либо два датчика абсолютного давления. Для линеаризации выходного сигнала датчика сигнал с его выхода передается в микропроцессор, который выполняет стандартную процедуру извлечения квадратного корня. Достоинствами метода определения расхода жидкостей по перепаду давлений являются отсутствие механических компонентов и возможность использования стандартных датчиков давления, а недостатком – необходимость нарушения потока резистивными элементами.

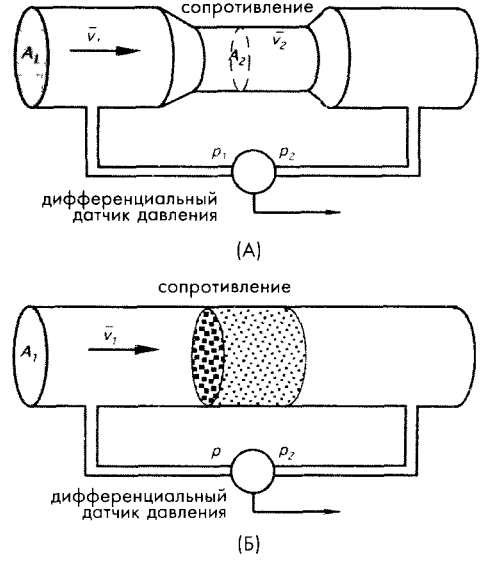


Рис. 11.3. Два типа элементов, оказывающих сопротивление потоку: узкий участок трубки (А) и пористая пробка (Б)

11.3. Тепловые расходометры

Один из способов исследования потока заключается во внесении маркера в какой-либо участок жидкости и наблюдении за его перемещением. В качестве маркера, например, можно использовать плавающие объекты, способные передвигаться со скоростью потока и быть стационарными по отношению к частицам жидкости. Время, затраченное маркером на перемещение между двумя заданными точками, соответствует скорости потока. Примеры таких плавающих объектов – поплавки, радиоактивные элементы и красители, меняющие оптические свойства среды (например, цвет). В качестве маркера можно также использовать жидкости или газы, концентрация или степень разбавления которых определяется соответствующими детекторами.

В медицине метод измерения расхода на основе определения уровня разбавления конкретных веществ используется в исследованиях гемодинамики. Однако в большинстве случаев введение посторонних веществ в исследуемую среду либо невозможно, либо запрещено. Альтернативным методом является изменение физических свойств движущейся среды и детектирование либо перемещения маркированного таким образом участка, либо скорости его разбавления. Наиболее подходящим для этих целей физическим свойством является температура.

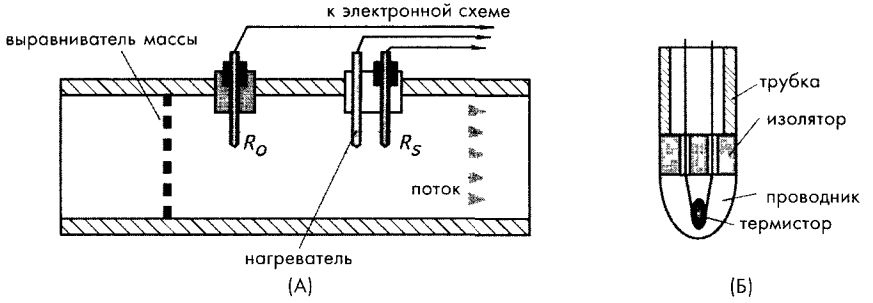


Рис. 11.4. Термоанемометр: А – принципиальная схема, Б – поперечное сечение детектора температуры

На рис. 11.4А показан термоанемометр, состоящий из трех небольших трубочек, внесенных в поток жидкой среды. Две трубочки из двух оснащены детекторами температуры: R_0 и R_s, которые контактируют с потоком, но изолированы от структурных элементов и трубки, в которой определяется скорость потока. Между двумя детекторами расположен нагревательный элемент. Оба детектора для уменьшения тепловых потерь соединены с электрическими проводами при помощи капли проводящего материала (рис. 11.4Б). Принцип действия датчика заключается в следующем. Первый детектор R_0 измеряет исходную температуру в потоке. Нагревательный элемент повышает температуру жидкости, которую измеряет второй детектор R_s. При отсутствии течения тепло от нагревателя за счет теплопроводности жидкости и гравитационной конвекции будет зарегистрировано обоими детекторами, но поскольку второй

детектор расположен ближе к нагревателю, температура, измеренная им, будет несколько выше, чем температура на первом датчике. При движении потока скорость распространения тепла возрастает за счет вынужденной конвекции. Чем больше скорость потока, тем выше тепловые потери и тем ниже температура, регистрируемая детектором R_s. Скорость потока определяется по измеренным потерям тепла.

Физический принцип термоанемометра основан на законе Кинга [2]:

$$\Delta Q = kl\left(1+\sqrt{\frac{2\pi\rho cdv}{k}}\right)(T_s - T_0), \qquad (11.12)$$

где κ и c – теплопроводность и удельная теплоемкость среды при заданном давлении, ρ – плотность среды, l и d – длина и диаметр датчика, T_s – температура поверхности датчика, T_0 – температура среды на некотором расстоянии от датчика, а v – скорость потока среды. Ученые Коллиз и Вильямс провели серию экспериментов для проверки закона Кинга [3] и показали, что он нуждается в некоторой корректировке. Для цилиндрического датчика, у которого отношение $l/d>>1$, модифицированное уравнение Кинга, преобразованное относительно скорости потока, выглядит следующим образом:

$$v = \frac{K}{\rho}\left(\frac{dQ}{dt}\frac{1}{T_s - T_0}\right)^{1.87}, \qquad (11.13)$$

где K – калибровочный коэффициент. Из этого выражения следует, что для определения скорости потока необходимо измерить градиент температуры между датчиком и подвижной средой и количество выделяемого тепла. На рис. 11.5А показана нелинейная зависимость скорости потока жидкой среды от тепловых потерь.

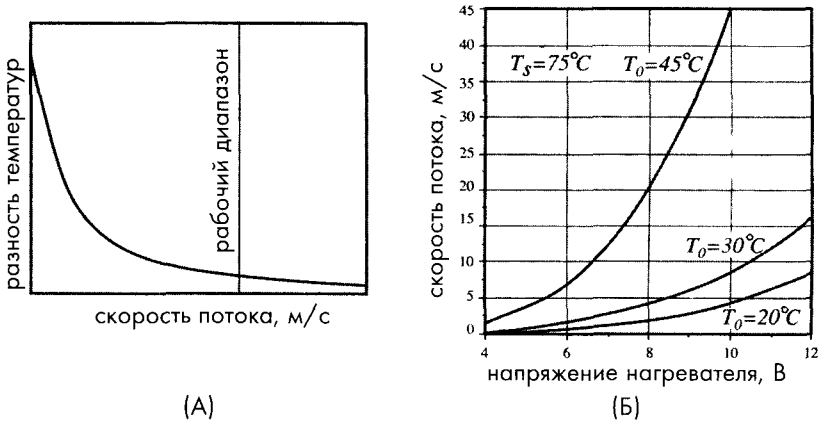


Рис. 11.5. Передаточная функция термоанемометра (А) и калибровочные кривые для детектора температуры термоанемометра с саморазогревом, определенные при трех разных уровнях нагрева (Б)

Для поддержания на детекторе R_s постоянной температуры T_s и получения достаточно большого градиента температур, необходимо компенсировать тепловые потери. Для этого к нагревательному элементу надо подводить соответствующую энергию. Также существуют анемометры, в которых нет отдельного нагревательного элемента. В таких датчиках детектор R_s работает в режиме саморазогрева; это означает, что электрический ток, проходя через сопротивление детектора, выделяет достаточное количество тепла для повышения его температуры до значения T_s. Именно при этой температуре второй детектор имеет сопротивление R_s. Пренебрегая потерями тепла в соединительных проводах и трубках, закон сохранения энергии для анемометра можно записать в следующем виде:

$$W = \frac{dQ}{dt}. \tag{11.14}$$

Из этого выражения следует, что электрическая мощность W, поступающая в датчик, равна его тепловым потерям, т.е. количеству тепла, уносимого потоком среды. С другой стороны, электрическую мощность можно определить из уравнения:

$$W = \frac{e^2}{R_s}, \tag{11.15}$$

где e – напряжение, приложенное к нагревательному элементу. Из уравнений (11.13)-(11.15) выводится соотношение между напряжением на саморазогревающемся детекторе и скоростью потока:

$$v_{2a} = \frac{K}{\rho}\left(\frac{e^2}{R_s}\frac{1}{T_s - T_0}\right)^{1\,87}. \tag{11.16}$$

На рис. 11.5Б приведен пример калибровочной кривой расходомера, использующего саморазогревающийся термистор (T_s=75°С), работающий в воздухе, температура которого T_0 менялась в диапазоне 20...45°С. Температура термистора поддерживалась постоянной во всем рабочем температурном интервале, что может быть выполнено при помощи самобалансирующегося резистивного моста [4]. Следует отметить, что T_s должна быть всегда выше максимальной температуры потока среды.

Из формулы (11.13) следует, что существуют два способа измерения скорости потока. В первом методе напряжение и сопротивление нагревательного элемента поддерживаются постоянными, в качестве выходного сигнала используется разность температур ($T_s - T_0$). А во втором методе при помощи регулятора, управляющего напряжением на нагревателе e, эта разность температур поддерживается постоянной. В этом случае выходным сигналом является напряжение e.

Метод с саморазогревающимися детекторами температуры, в качестве которых могут применяться резистивные детекторы температуры (РДТ) или термисторы, используется в микродатчиках. Для термисторов и РДТ необходим высокий ток возбуждения. Этот ток выполняет две функции: он измеряет сопротивление детектора с целью определения его температуры и используется для генерации тепла.

На рис.11.6 показано, как можно включить оба температурных детектора (нагреваемый и эталонный) в мостовую схему. При очень низких скоростях потока мост находится в неуравновешенном состоянии, поэтому на его выходе детектируется высокое напряжение. С ростом скорости потока нагреваемый детектор охлаждается, и его температура приближается к температуре эталонного детектора, что приводит к понижению выходного напряжения моста. На рис. 11.6Б показаны передаточные функции рассматриваемого датчика при работе с потоками разных сред. Производители датчиков обычно приводят калибровочные кривые для каждой исследуемой среды, однако для получения точных результатов всегда рекомендуется проводить калибровку анемометра на месте.

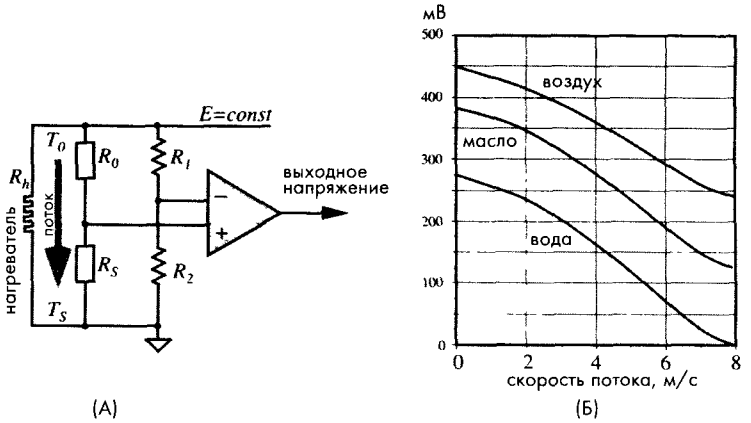


Рис. 11.6. Мостовая схема включения термоанемометра (А), передаточные функции датчика для разных сред (Б)

Для проведения точных температурных измерений можно использовать любой тип температурных детекторов: резистивных, полупроводниковых, оптических и т.д (см. главу 17). Однако большинство изготовителей датчиков применяют резистивные датчики, поскольку они обладают хорошей линейностью, воспроизводимостью и долговременной стабильностью в широком температурном диапазоне. Благодаря высокой чувствительности, термисторы часто используются как в промышленности и при проведении научных исследований, так и в медицине. Термисторы рекомендуется подключать по четырехпроводной схеме, особенно это важно при удаленном расположении датчика. Такой способ подключения позволяет решать проблемы, связанные с дополнительными сопротивлениями соединительных проводов, которые могут быть источниками существенных погрешностей. Четырехпроводный способ подключения датчиков описан в разделе 5.8.2 главы 5.

Конструкция датчика определяет его рабочий диапазон измерения. При повышении скорости потока до какого-то критического значения молекулы подвижной среды, проходя рядом с нагревательным элементом, не успевают поглотить достаточное количество тепловой энергии, чтобы сформировать существенную разницу температур между двумя детекторами. Поскольку градиент температур стоит

в знаменателе уравнения (11.13), при высоких скоростях потока это обстоятельство приводит к повышению ошибки вычислений и неминуемому падению точности измерений. Верхняя граница рабочего диапазона для конкретного типа среды обычно определяется экспериментально. Например, при нормальном атмосферном давлении и температуре 20°С термоанемометр может измерять скорость потока воздуха до 60 м/с.

Следует отметить, что тепловые расходомеры могут работать только с ламинарными потоками при отсутствии каких-либо завихрений. Поэтому в состав термоанемометров часто входят гасители завихрений или сетки, иногда называемые *выравнивателями массы* (рис. 11.4А).

Давление и температура подвижной среды оказывает сильное влияние на точность определения объемного расхода. Интересно отметить тот факт, что при измерении массового расхода точность мало зависит от давления, поскольку рост давления приводит к пропорциональному увеличению массы.

Для получения конечных результатов в систему обработки данных термоанемометра должны поступать, по крайней мере, три сигнала: температура исследуемой среды, разность температур и мощность, затраченная на нагрев. Эти сигналы мультиплексируются, конвертируются в цифровые коды и передаются в микропроцессорную систему, где проводится вычисление характеристик потока: скорости (м/с), объемного расхода ($м^3$/с) или массового расхода (кг/с).

Тепловые расходомеры по сравнению с остальными типами аналогичных измерителей обладают высокой чувствительностью и широким динамическим диапазоном. Они могут использоваться для измерения очень маленьких перемещений жидкостей и газов, а также высоких скоростей потоков. Основными достоинствами таких датчиков являются отсутствие подвижных компонентов и возможность измерения низких расходов. Расходомеры на основе вращающихся лопастей, поршней и дифференциальных датчиков давления при низких скоростях потока выдают очень маленький выходной сигнал и, следовательно, имеют в этом диапазоне низкую точность. Тепловые расходомеры незаменимы в случаях, когда требуется применение микродатчиков, где невозможно использовать устройства с подвижными компонентами, например, в автомобилях, в медицине и биологии.

11.4. Ультразвуковые расходомеры

Характеристики потоков могут быть определены при помощи ультразвуковых волн. Основная идея заключается в детектировании изменения частоты или сдвига фаз, вызываемых подвижной средой. Ультразвуковые датчики реализуются на основе либо эффекта Доплера (см. раздел 6.2 главы 6), либо определения изменений эффективной скорости ультразвука в среде. Эффективная скорость звука в подвижной среде равна скорости звука в этой среде плюс скорость среды относительно источника звука. Таким образом, распространение звуковой волны против потока среды приведет к уменьшению эффективной скорости звука, а вдоль потока – к увеличению. Разность между этими двумя эффективными скоростями звука равна удвоенной скорости потока среды. Поэтому ультразвуковые датчики для определения скорости потока измеряют скорость звука вдоль и против течения.

На рис. 11.7А показаны два ультразвуковых генератора, расположенные на двух противоположных сторонах трубы, по которой течет поток жидкой среды. В качестве ультразвуковых генераторов, как правило, используются пьезоэлектрические кристаллы. Каждый кристалл может использоваться либо для возбуждения ультразвуковых волн, либо для их приема. Другими словами, один и тот же кристалл при необходимости работает и как «громкоговоритель», и как «микрофон».

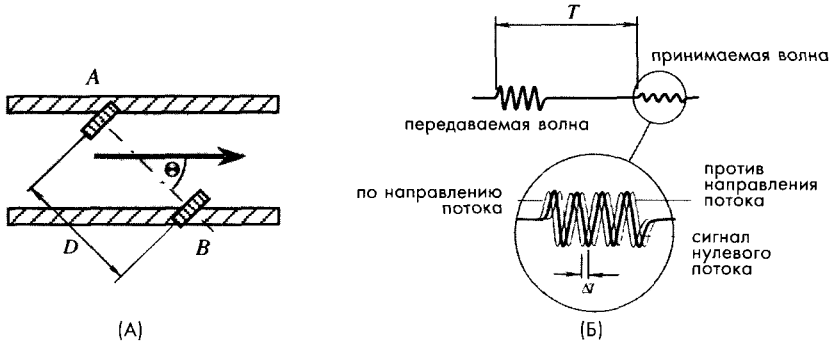


Рис. 11.7. Ультразвуковой расходомер. А – положение приемно-передающих кристаллов в потоке среды, Б – форма звуковых волн

Кристаллы расположены на расстоянии D друг от друга под углом θ по отношению к направлению потока. Также возможно располагать небольшие кристаллы прямо внутри трубы строго по направлению потока ($\theta = 0$). Время распространения звука между двумя кристаллами A и B связано со средней скоростью потока v_c следующим соотношением:

$$T = \frac{D}{c \pm v_c \cos\theta}, \tag{11.17}$$

где c – скорость звука в среде. Знак $\pm$ означает направление распространения звука: вдоль потока или против него. Скорость v_c – это скорость потока, усредненная вдоль пути распространения ультразвука. Гесснер [4] показал, что для ламинарного потока $v_c = 4v_a/3$, а для турбулентного – $v_c = 1.07v_a$, где v_a – средняя скорость потока через поперечное сечение. Определив разность между скоростями звука вдоль и против течения потока, можно найти, что [5]:

$$\Delta T = \frac{2Dv_c \cos\theta}{c^2 + v_c \cos^2\theta} \approx \frac{2Dv_c \cos\theta}{c^2}. \tag{11.18}$$

Это выражение справедливо для большинства случаев, когда $c >> v_c \cos\theta$. Для улучшения отношения сигнал/шум время распространения ультразвукового сигнала часто измеряется в двух направлениях, при этом оба пьезокристалла работают попеременно то приемниками, то передатчиками. Это можно реализовать при помощи переключательного устройства, показанного на рис. 11.8, который работает со сравнительно низкой частотой (например, 400 Гц). Синусоидальные ультразвуковые волны

(с частотой около 3 МГц) передаются в импульсном режиме с той же самой медленной тактовой частотой (400 Гц). Принятый ВЧ сигнал отстает от переданного на время T. Величина этой задержки зависит от скорости потока среды (рис. 11.7Б). Время T измеряется при помощи времяпролетного детектора, а синхронный детектор используется для определения разницы времен ΔT, затраченных на распространение сигнала вдоль и против течения потока. Такой ультразвуковой датчик обладает достаточно высокой точностью, его дрейф нуля составляет $5 \cdot 10^{-3}$ м/с^2 в течение 4-х часового интервала времени.

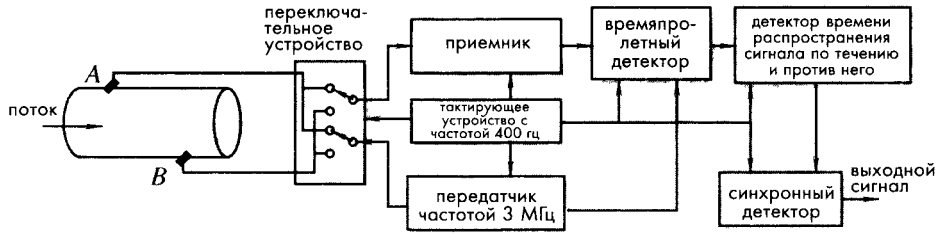


Рис. 11.8. Схема ультразвукового расходомера, в котором каждый кристалл играет роль и передатчика, и приемника

Альтернативный способ измерения расхода при помощи ультразвуковых датчиков заключается в определении разности фаз между переданным и принятым импульсным сигналом. Выражение для разности фаз можно вывести из уравнения (11.18):

$$\Delta f = \frac{4\pi f D v_c \cos\theta}{c^2}, \qquad (11.19)$$

где f – частота ультразвукового сигнала. Очевидно, что чем выше частота, тем лучше чувствительность датчика. Однако при повышении частоты усиливается ослабление звука в системе, что может привести к снижению отношения сигнал/шум.

В доплеровских расходомерах используется непрерывное излучение ультразвуковых волн. На рис. 11.9 показан расходомер, в котором излучатель и приемник расположены внутри потока. Также как и в доплеровском радиоприемнике здесь происходит сложение частот излученного и принятого сигналов. Для этого в схему включен нелинейный элемент – смеситель. Полосовой фильтр служит для ослабления ненужных гармоник выходного низкочастотного сигнала. Частота выходного сигнала определяется выражением:

$$\Delta f = f_s - f_r \approx \pm\frac{2 f_s v}{c}, \qquad (11.20)$$

где f_s и f_r – частоты излучающего и принимающего кристаллов, а знак $\pm$ относится к разным направлениям потока. Из выражения (11.20) видно, что разность частот прямо пропорциональна скорости потока. Очевидно, что размеры кристаллов должны быть гораздо меньше поперечного сечения трубы, в которой измеряется

скорость потока. Поэтому измеренная скорость является не средней, а локальной скоростью потока. На практике всегда требуется калибровать ультразвуковые датчики во всем температурном диапазоне для каждой конкретной среды и также требуется учитывать вязкость исследуемой жидкости.

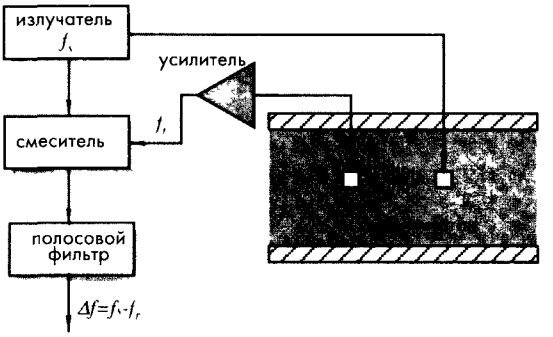


Рис. 11.9. Ультразвуковой доплеровский расходомер

Ультразвуковые пьезоэлектрические преобразователи изготавливаются в виде небольших керамических дисков, встроенных в корпус расходомера. Поверхность кристалла покрывается защитным материалом (например, силиконовой резиной). Достоинство ультразвукового датчика заключается в его способности измерять поток без прямого контакта с жидкостью.

11.5. Электромагнитные расходомеры

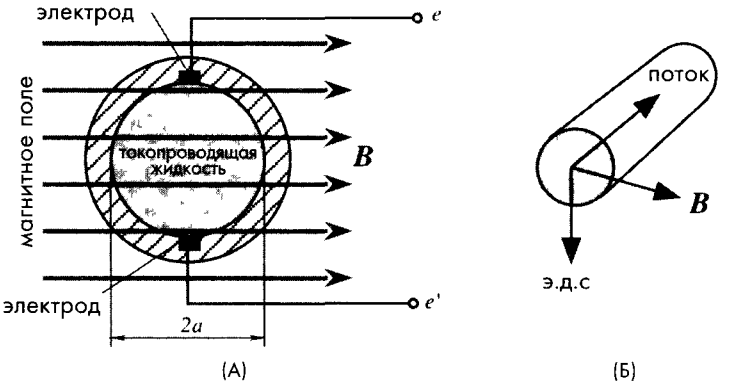


Рис. 11.10. Принцип работы электромагнитного расходомера: А – положение электродов перпендикулярно магнитному полю, Б – взаимосвязь между потоком и векторами электрического и магнитного полей

Электромагнитные датчики используются для измерения расхода проводящих жидкостей. Их принцип действия базируется на законах электромагнитной индукции Фарадея и Генри (см. раздел 3.4 главы 3). Когда проводник или в данном случае проводящая жидкость пересекает линии магнитного потока, в проводящем материале индуцируется э.д.с, пропорциональная скорости ее движения (уравнение (3.37) главы 3). На рис. 11.10 показана трубка, по которой течет токопроводящая жидкость, помещенная в магнитное поле **B**. В трубку встроены два электрода для снятия э.д.с., индуцированной в жидкости. Величину э.д.с. можно найти из выражения:

$$v = e - e' = 2a\mathbf{B}v\ , \tag{11.21}$$

где a – радиус трубки, v – скорость потока, $\mathbf{B}$ – вектор магнитной индукции.

При решении уравнений Максвелла было показано, что для случаев когда скорость потока неоднородна в пределах поперечного сечения, но симметрична относительно оси трубки, индуцируемая э.д.с. будет определяться выражением аналогичным (11.21), но с одним отличием: в нем v заменяется на среднюю скорость v_a (уравнение (11.3)

$$v_a = \frac{1}{\pi a^2}\int_0^a 2\pi v r dr\ , \tag{11.22}$$

где r – расстояние от центра трубки. Уравнение (11.21) можно выразить через объемный расход:

$$v = \frac{2\Lambda\mathbf{B}}{\pi a}\ . \tag{11.23}$$

Из уравнения (11.23) следует, что напряжение, регистрируемое на электродах, не зависит от профиля потока и удельной проводимости жидкости. При заданной геометрии трубки и известной величине магнитной индукции оно определяется только мгновенным объемным расходом.

Существует два основных способа получения напряжения на электродах. В одном из методов плотность магнитного потока поддерживается постоянной и индуцируемое напряжение также является либо постоянным, либо слабо меняющимся сигналом. Один из недостатков этого метода заключается в поляризации электродов из-за протекания по их поверхности хотя и слабого, но однонаправленного тока. Другой недостаток – низкочастотный шум, не позволяющий детектировать малые значения расходов.

Существует альтернативный способ возбуждения напряжения на электродах, заключающийся в использовании переменного магнитного поля. В этом случае на электродах индуцируется переменное напряжение (рис. 11.11). Для этого частота магнитного поля должна удовлетворять условиям теоремы Найквиста, т.е. она должна быть, по крайней мере, в два раза выше максимальной частоты изменения расхода. На практике частота возбуждающего сигнала выбирается в диапазоне 100...1000 Гц.

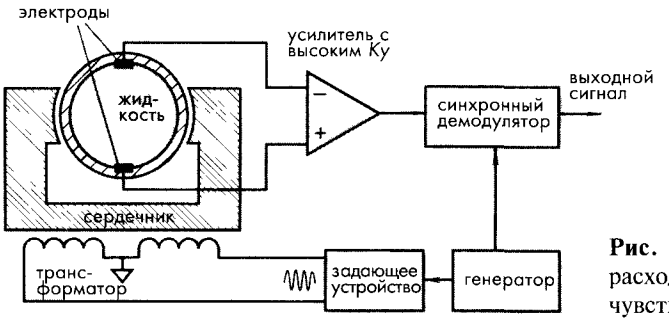


Рис. 11.11. Электромагнитный расходомер с синхронным (фазочувствительным) демодулятором

11.6. Микрорасходомеры

В системах управления производством прецизионных полупроводниковых устройств, химическими и фармацевтическими технологическими процессами, а также при проведении биомедицинских исследований требуются миниатюрные расходомеры. Большинство таких микродатчиков основаны на принципе переноса тепла, описанного в разделе 11.3, и изготавливаются на кремниевых подложках методами микротехнологий. Почти во всех микрорасходомерах в качестве детекторов температуры используются термопары [6], однако термоэлектрические коэффициенты стандартных термоэлементов (см. уравнение (3.91) главы 3), используемых в монолитных ИС (из кремния и алюминия), отличаются от коэффициентов традиционных термопар в 10...100 раз (в меньшую сторону). Поэтому результирующие выходные сигналы таких преобразователей обычно очень малы, что требует интеграции усилителей прямо на подложки самих датчиков.

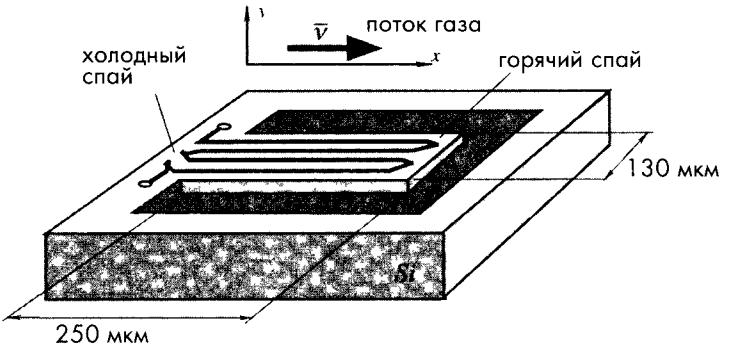


Рис. 11.12. Монолитный газовый расходомер

На рис. 11.12 показана конструкция микрорасходомера консольного типа. Толщина многослойной консоли может быть меньше 2 мкм [7]. Консоль подогревается со скоростью 26 К/мВт при подаче на встроенный резистор электрического напряжения. Типичная передаточная функция расходомера имеет отрицательный наклон порядка 4 мВ/м/с.

Тепло от датчика отводится тремя способами: за счет теплопроводности через балку консоли, за счет тепловой радиации, подчиняющейся закону Стефана-Больцмана, и через газовый поток $h(v)$:

$$P = L_b(T_s - T_b) + a\sigma\varepsilon(T_s^4 - T_b^4) + h(v)(T_s - T_b), \qquad (11.24)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, a – площадь поверхности балки, через которую происходит передача тепла в воздух, ε – коэффициент излучения поверхности, а v – скорость потока газа. Из законов сохранения энергии и массы можно вывести уравнение теплопередачи, определяющее распределение температур $T(x,y)$ в потоке газа рядом с поверхностью датчика:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{vnc_p}{k_g}\frac{\partial T}{\partial x} \quad для\ y > 0, \qquad (11.25)$$

где n – плотность газа, c_p – теплоемкость молекул газа, κ_g – теплопроводность газа. При условии, что градиент температуры вдали от поверхности датчика принимает нулевое значение, решение уравнения (11.25) можно записать в виде [7]:

$$\Delta V = B\left(\frac{1}{\sqrt{\mu^2+1}} - 1\right), \tag{11.26}$$

где V – входное напряжение, B – константа, L длина контакта датчика с газом, а $\mu = \frac{Lvnc_p}{2\pi k_g}$. Данные, посчитанные по формуле (11.26), практически совпадают с экспериментальными результатами.

На рис. 11.13А показана конструкция еще одного микротермоанемометра [8]. В его состав входят две пленки из титана толщиной 0.1 мкм, выполняющие функции и нагревателей, и детекторов температуры. Эти пленки расположены между двумя слоями SiO_2. Применение титана обусловлено его высоким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). Микронагреватели подвешены на четырех кремниевых перекладинах на расстоянии 20 мкм друг от друга. Сопротивление пленки из титана составляет около 2 кОм. На рис. 11.13Б показана упрощенная эквивалентная схема такого термоанемометра вместе с интерфейсом, в котором выходное напряжение ΔV связано линейной зависимостью с расходом газа.

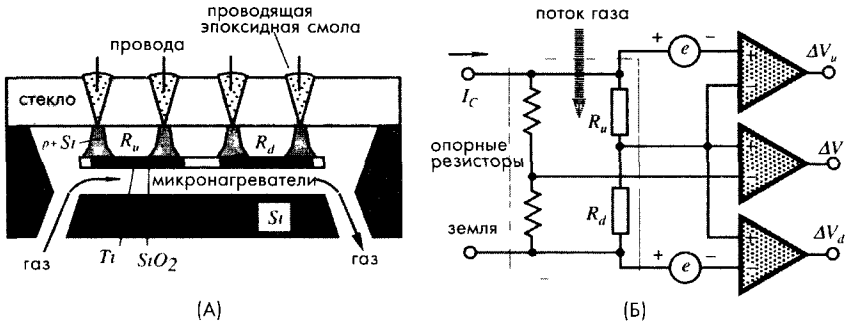


Рис. 11.13. Микротермоанемометр с саморазогревающимися титановыми резисторами: А – конструкция датчика, Б – эквивалентная схема датчика с интерфейсом: R_u и R_d – сопротивления нагревателей, расположенных выше и ниже по течению потока [7]

На рис. 11.14 показан микрорасходомер, реализованный на основе емкостного датчика давления [9]. Принцип действия такого датчика основан на методе измерения скорости потока по перепаду давления, описанного в разделе 11.2. Датчик изготовлен на кремниевой подложке, для формирования его структуры использовался метод травления с барьерным слоем из дифузионного бора. Газ под давлением P_1 через входное отверстие поступает в корпус датчика. Это же самое давление устанавливается вокруг кремниевой пластины, включая внешнюю сторону мембраны.

Газ проходит во внутреннюю камеру датчика через узкий канал, создающий давлению довольно большое сопротивление. В результате давление P_2 внутри камеры будет ниже P_1. Таким образом, на мембрану действует дифференциальное давление. Тогда расход потока можно определить по выражению (11.10).

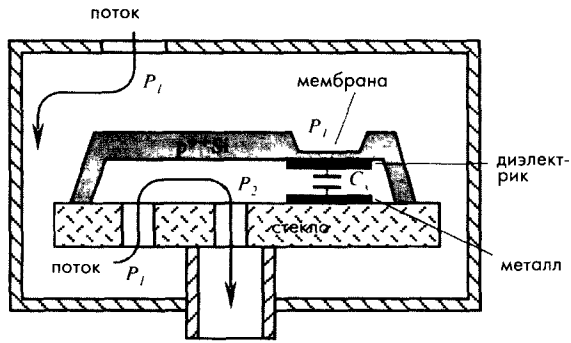


Рис. 11.14. Конструкция микрорасходомера с емкостным датчиком давления [9]

Разность давлений определяется емкостным датчиком давления, состоящим из легированной бором p^{++} кремниевой мембраны, подвешенной над металлической пластиной. Перепад давлений приводит к изменению емкости C_x между металлической пластиной и кремниевой структурой. Разрешение такого датчика составляет 1 мторр/фФ, а максимально измеряемое давление – около 4 торр. Полная разрешающая способность датчика равняется 14-15 разрядам, а точность измерения давления – 9-10 разрядам. При давлении, приблизительно в два раза превышающим максимальный перепад давлений, мембрана может коснуться металлической пластины, что приведет к электрическому замыканию. Чтобы этого не произошло, на нижнюю часть мембраны наносится диэлектрический слой. Стеклянная подложка служит для механической защиты мембраны от разрушения. В кремниевую подложку по стандартной КМОП технологии встраивается электронная схема, позволяющая проводить измерение емкости (см. рис. 5.32 главы 5)

11.7. Детектор изменения скорости потока газа

В некоторых случаях желательно определять качественные, а не количественные изменения в потоке воздуха или любого другого газа. Это можно выполнить при помощи детектора потока, на выходе которого выходной сигнал появляется только при изменении скорости потока газа. Пьезоэлектрический датчик фирмы Nippon Ceramic является примером такого детектора. В состав датчика входят два пьезоэлектрических (или пироэлектрических) элемента (Используемые в этом детекторе кристаллы, поляризованные в процессе изготовления, аналогичны кристаллам, применяемым в пьезоэлектрических и пироэлектрических датчиках. Однако здесь к ним не прикладывается ни механическое напряжение, ни тепло. Но тем не менее, для упрощения изложения материала далее они будут называться пьезоэлектрическими кристаллами). Один из кристаллов подвергается действию потока газа, а другой защищен от него резиновым покрытием. Здесь применяются два чувствительных элемента для дифференциальной компенсации влияния окружающей температуры. Пьезоэлектрические кристаллы включаются в электрическую схему последовательно навстречу друг другу; при этом они вырабатывают одинаковый заряд, в результате чего напряжение на резисторе смещения R_b в стационарном режиме равно нулю (рис. 11.15А). Оба пьезоэлемента,

резистор смещения и повторитель напряжения на полевом транзисторе, размещаются в металлическом корпусе TO-5 с вентиляционными отверстиями, через которые поток газа воздействует на чувствительный элемент S_1 (рис. 11.15Б).

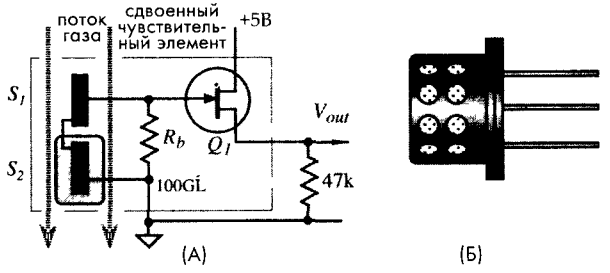


Рис. 11.15. Пьезоэлектрический детектор изменения скорости потока: А – схема датчика, Б – корпус датчика TO-5

Принцип действия рассматриваемого датчика проиллюстрирован на рис. 11.16. При отсутствии потока газа заряды на пьезоэлементе сбалансированы. Электрические диполи внутри элемента, ориентированные в процессе процедуры поляризации (раздел 3.6 главы 3), уравновешиваются свободными носителями зарядов внутри материала и заряженными молекулами газа на поверхности пьезокристалла. В результате напряжение на пьезоэлементах равно нулю, а выходное напряжение датчика V_{out} соответствует базовому уровню. Когда поток газа обтекает обе стороны сенсора S_1, молекулы газа увлекают за собой заряды с поверхности элемента, что приводит к появлению напряжения на его электродах, поскольку внутренние диполи перестают уравновешиваться внешними зарядами. Возникшая разность потенциалов отслеживается повторителем напряжения, реализованным на полевом транзисторе, выполняющим функцию преобразователя импедансов , что приводит к изменению сигнала на выходных выводах.

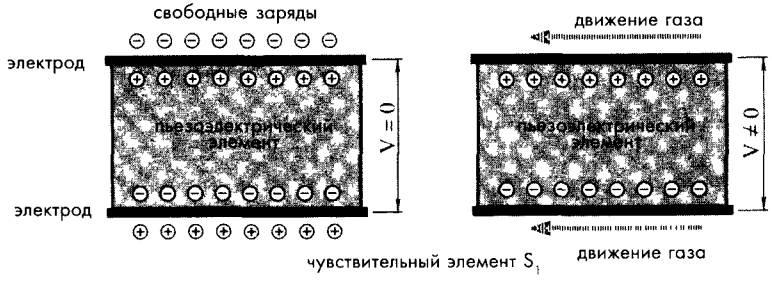


Рис. 11.16. В детекторе изменения скорости потока движущиеся молекулы газа срывают заряды с поверхности пьезоэлемента

11.8. Кориолисовские расходомеры

Расходомеры этого типа определяют массовый расход напрямую, а не через измерения скорости или объема [10]. Кориолисовские расходомеры не зависят ни от давления жидкости, ни от ее температуры, ни от ее вязкости и плотности. Поэтому такие датчики не требуют проведения повторных калибровок и подстройки под каждый конкретный тип жидкой среды. Хотя первые расходомеры работали только с жидкостями, в настоящее время они адаптированы и для работы с газами.

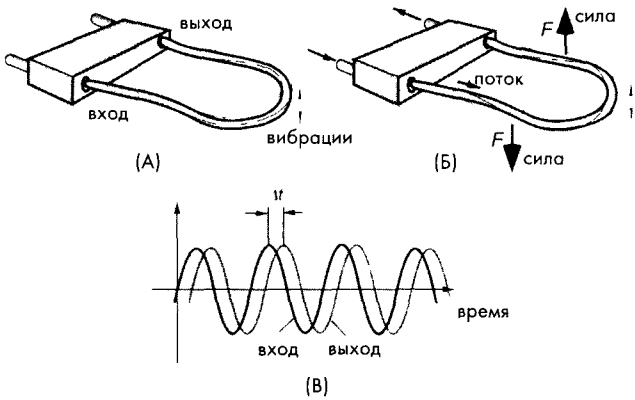


Рис. 11.17. Кориолисовская трубка при отсутствии в ней потока (А), изгиб трубки при протекании через нее потока (Б), сдвиг фазы колебаний, вызванный силами Кориолиса (В)

Свое название такие расходомеры получили в честь Гаспара Г. Кориолиса (1792-1843), французского физика. Типовой кориолисовский измеритель состоит из одной или двух вибрирующих трубок, обычно изготовленных из нержавеющей стали. Для получения точных результатов измерений важно защищать трубки и места их креплений от механического и химического воздействия потока жидкости. Чаще всего трубки имеют U-образную форму, хотя в принципе они могут быть и другого вида. Для газов применяются более тонкие трубки, чем для жидкостей. Трубки начинают вибрировать от воздействия на них внешнего электромеханического задающего устройства.

Жидкость (или газ) поступают в измеритель через впускное отверстие. Расход массы определяется по действию жидкости на вибрирующие трубки. При движении жидкости от входа к выходу, на нее действует вибрационное ускорение, все время меняющее свое направление. Поскольку потоки жидкости в двух ветвях трубки имеют противоположные направления, то и возникающие там силы Кориолиса также будут направлены в разные стороны. В результате чего под действием результирующей силы две части трубки смещаются друг относительно друга в соответствии с циклом вибраций.

Величина силы Кориолиса, индуцированная потоком, определяется следующим выражением:

$$F = 2m\omega\mathbf{v}, \tag{11.27}$$

где m- масса, ω – круговая частота вибраций, $\mathbf{v}$ – вектор средней скорости жидкости. Следовательно, величина изгиба трубки прямо пропорциональна массовому расходу через трубку. На рис. 11.17А показана трубка кориолисовского измерителя при отсутствии потока, а на рис. 11.17Б – при протекании через трубку потока жидкости или газа.

При отсутствии в трубке потока ее вибрации на входе и выходе совпадают, т.е. между ними нет никакого сдвига фаз. При появлении потока – трубка изгибается пропорционально величине массового расхода, поэтому между вибрациями ее входной и выходной ветвей появляется фазовый сдвиг (рис. 11.17В). Основным недостатком измерителей Кориолиса является их сравнительно высокая стоимость. Однако их универсальность при работе с разными типами сред позволяет применять их на заводах, где требуется измерять расходы самых разнообразных жидкостей и газов.

11.9. Расходомеры с мишенями

Расходомеры этого типа используются при работе с турбулентными потоками. Их области применения: мониторинг окружающей среды, метеорология, гидрология, морские исследования, где требуется определение скорости потоков воздуха или воды, а также их турбулентности в зоне, расположенной рядом с поверхностью [11]. В структуру таких расходомеров всегда входит твердое тело, часто называемое *мишенью*, которое вводится в поток изучаемой среды. При этом измеряется сила, действующая на тело в потоке жидкой среды. Полученное значение преобразуется в величину скорости потока. Важным достоинством таких датчиков является возможность проведения измерений расхода и скорости потока в двух, а то и в трех направлениях. Для проведения многомерных исследований необходимо обеспечить симметричность мишени во всех направлениях измерений. Уже почти в течение полувека такие многомерные расходомеры используются в промышленности, в коммунальной сфере, в аэрокосмических и других исследовательских лабораториях для измерения расхода однонаправленных и двунаправленных потоков жидкостей (включая криогенные), газов, паров (как насыщенных, так и перегретых).

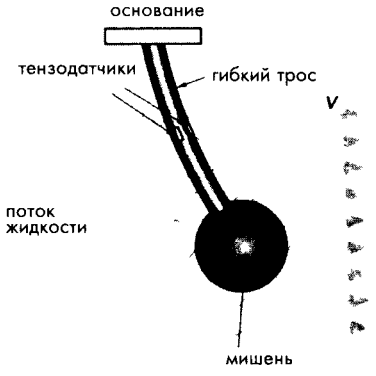


Рис. 11.18. Расходомер с мишенью

Принцип действия таких датчиков основан на измерении механического напряжения эластичного резинового троса, вызванного силой, приложенной к мишени, прикрепленной к нему (рис. 11.18). Идеальной мишенью является плоский диск [12], поскольку величина расхода не влияет на его коэффициент уноса. Для сферической симметричной мишени коэффициент уноса зависит от скорости потока, поэтому при использовании такой мишени датчик необходимо калибровать и оптимизировать для каждого конкретного случая применения. Измерения механического напряжения можно выполнять при помощи тензодатчиков, но при этом им надо обеспечить физическую защиту от влияния жидкой среды.

Сила, действующая на мишень в потоке несжимаемой жидкости, определяется выражением:

$$F_D = C_D \rho A V^2, \tag{11.28}$$

где ρ – плотность жидкости, V – скорость потока в точке измерения, A – площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную потоку, C_D – коэффициент уноса, являющийся безразмерным коэффициентом, величина которого зависит в основном от формы тела и его ориентации относительно направления потока. Пренебрегая массой троса, величину его деформации, вызванную действием силы на мишень, можно выразить в виде:

$$\varepsilon = \frac{3C_D \rho A V^2 (L - x)}{Ea^2 b}, \tag{11.29}$$

где L – длина троса, x – координата расположения тензодатчиков, E – модуль Юнга, a и b – геометрические коэффициенты мишени. Из выражения (11.29) видно, что напряжение троса и скорость потока связаны квадратичной зависимостью.

Литература

1 B enedict, R P *Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements,* 3rd ed John Wiley & Sons, New York, 1984

2 King, L V On the convention of heat from small cylinders in a stream of fluid *Phil Trans Roy Soc* A214, 373, 1914

3 Collis, D C and Williams, M J Two-dimensional convection from heated wires at low Reynolds' numbers 7 *Fluid Mech* 6, 357, 1959

4 Gessner, U The performance of the ultrasonic flowmeter in complex velocity profiles *IEEE Trans Bio-Med Eng* MBE-16, 139-142, 1969

5 Cobbold, R S C *Transducersfor Biomedical Measurements* John Wiley & Sons, New York, 1974

6 Van Herwaarden, A W and Sarro, P M Thermal sensors based on the Seebeck effect *Sensors Actuators* 10, 321-346, 1986

7 Wachutka, G, Lenggenhager, R , Moser, D, and Baltes, H Analytical 2D-model of CMOS micromachined gas flow sensors In *Transducers'91 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators Digest of Technical Papers* IEEE, New York, 1991

8 Esashi, M Micro flow sensor and integrated magnetic oxygen sensor using it In *Transducers'91 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators Digest of Technical Papers* IEEE, New York, 1991

9 Cho, S T and Wise, K D A high performance microflowmeter with built-in self test In *Transducers'91 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators Digest of Technical Papers,* IEEE, New York, 1991, pp 400^03 10 Yoder, J Coriolis Effect Mass Flowmeters In *Mechanical Variables Measurement,* J Webster, ed CRC Press, Boca Raton, FL, 2000

11 Philip-Chandy, R , Morgan,R and Scully, P J Drag force flowmeters In *Mechanical Variables Measurement,* J Webster, ed CRC Press, Boca Raton, FL, 2000

12 Clarke T Design and operation of target flowmeters In *Encyclopedia of Fluid Mechanics, Vol 1* Gulf Publishing, Houston, TX, 1986

ГЛАВА 12

АКУСТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

«Твои уши всегда тебе указывают правильное направление, но ты всегда должен знать, зачем тебе туда надо»
Антон Ван Вебер

В разделе 3.10 главы 3 приведены основные законы акустики. В этой главе будут рассмотрены акустические датчики, работающие в разных частотных диапазонах. Датчики, работающие в слышимом диапазоне, обычно называются *микрофонами*. Однако это название может употребляться и для детекторов ультразвуковых и инфразвуковых волн. По существу, микрофон является датчиком давления, приспособленным для преобразования звуковых волн в широком спектральном диапазоне, из которого обычно исключены очень низкие частоты (ниже нескольких герц). Микрофоны обычно характеризуются: чувствительностью, направленностью, полосой частот, динамическим диапазоном, размерами, стоимостью и т.д Для работы в разных средах используются различные конструкции акустических датчиков. Например для детектирования волн в воздухе или вибраций в твердых телах применяются *микрофоны*, а для работы в жидкой среде – гидрофоны (приставка «гидро» произошла от греческого названия мифологической водяной змеи Гидры). Основное отличие между обычным датчиком давления и акустическим преобразователем заключается в том, что последнему не приходится измерять постоянное или очень медленно меняющееся давление. Его рабочий частотный диапазон начинается с нескольких герц (иногда с десятков миллигерц), а заканчивается в районе нескольких мегагерц для ультразвуковых датчиков, и даже нескольких гигагерц для устройств, реализованных на поверхностных акустических волнах (ПАВ).

Поскольку акустические волны являются механическими волнами, любой микрофон или гидрофон имеет ту же основную структуру, что и датчик давления: в его состав входит диафрагма и преобразователь перемещений, преобразующий отклонение диафрагмы в электрический сигнал. Поэтому все акустические преобразователи отличаются только конструкцией этих двух компонентов. Хотя некоторые из них могут также включать дополнительные компоненты, такие как звукопоглотители, фокусирующие отражатели или линзы и т.д. Однако в этой главе будут рассмотрены только чувствительные элементы некоторых наиболее интересных акустических датчиков.

12.1. Резистивные микрофоны

В прошлом резистивные преобразователи давления довольно широко применялись в составе микрофонов. Такие преобразователи состояли из полупроводникового порошка (обычно графита), объемное удельное сопротивление которого менялось в зависимости от величины приложенного давления. (В настоящее время, описывая принцип действия резистивных микрофонов, мы бы написали, что графит обладает пьезорезистивными свойствами.) Такие устройства обладали очень ограниченным динамическим диапазоном, плохими частотными характеристиками и высоким уровнем шума. Сейчас в некоторых микродатчиках также используется пьезорезистивный принцип преобразования. Например, в датчиках, описанных в разделе 10.5 главы 10, пьезорезисторы, чувствительные к механическому напряжению, являются составной частью кремниевой диафрагмы.

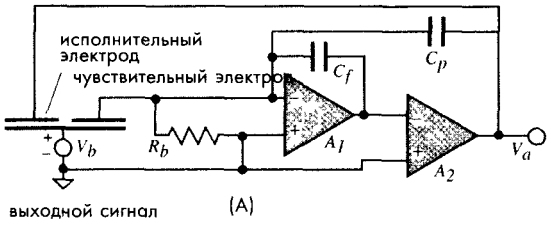
12.2 Электростатические микрофоны

Такие устройства иногда называются конденсаторными или емкостными микрофонами. С одной стороны, напряжение на параллельных пластинах конденсатора определяется выражением (3.19 главы 3). С другой стороны, в соответствии с уравнением (3.20) главы 3, емкость конденсатора зависит от расстояния d между пластинами. Решая совместно эти два уравнения, можно найти выражение для напряжения на конденсаторе:

$$V = q\frac{d}{\varepsilon_0 A}, \qquad (12.1)$$

где q – заряд на пластинах конденсатора, A – площадь пластин, а ε_0=8.8542 • 10^{-12} Кл^2/(Н • м^2)- электрическая постоянная (см. раздел 3.1 главы 3). Уравнение (12.1) лежит в основе принципа действия емкостных микрофонов. Таким образом, электростатический микрофон преобразует расстояние между пластинами в электрический сигнал, который усиливается последующими электронными цепями. Очевидно, что для работы такого устройства необходим источник электрического заряда q, от величины которого зависит чувствительность микрофона. Заряд может быть получен либо от внешнего источника питания, вырабатывающего напряжение в диапазоне 20...200 В, либо от внутреннего источника, способного выдавать аналогичный заряд, для чего в подложке микродатчика формируется электретный слой, представляющий собой поляризованный диэлектрический кристалл.

В настоящее время многие емкостные микрофоны реализуются на основе кремниевых диафрагм, которые преобразуют акустическое давление в перемещение и выполняют функцию подвижной пластины конденсатора. В работах [1-3] описаны некоторые перспективные разработки микрофонов данного типа. Для повышения чувствительности датчиков напряжение смещения должно быть максимально возможным; поскольку чем выше напряжение, тем больше отклонение диафрагмы. Однако это может привести к снижению динамического диапазона и надежности устройства. Также следует отметить, что уменьшение воздушного зазора между диафрагмой и подложкой ведет к увеличению акустического сопротивления в этом зазоре, что вызывает снижение механической чувствительности микрофона на высоких частотах. Например, при воздушном зазоре 2 мкм верхняя частота среза составляет 2 кГц [1].



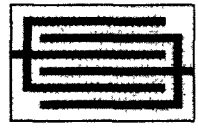


Рис. 12.1. Емкостной микрофон с механической обратной связью: А – схема, Б – гребенчатые электроды на диафрагме [4]

Одним из способов улучшения характеристик емкостного микрофона является применение механической обратной связи между выходом усилителя и диафрагмой [4]. На рис. 12.1А показана схема такого микрофона, а на рис. 12.1Б – его гребенчатые электроды. Один из электродов служит для преобразования перемещения диафрагмы в напряжение на входе усилителя A_1, а другой – для преобразования напряжения V_a в механическое отклонение диафрагмы за счет действия электростатических сил. Механическая обратная связь улучшает линейность и частотный диапазон микрофона, но при этом значительно снижает отклонения мембраны, что приводит к уменьшению чувствительности.

Для более подробного изучения емкостных микрофонов рекомендуется книга под редакцией Wong, Embleton [5]

12.3. Оптоволоконные микрофоны

При проведении прямых акустических измерений в условиях агрессивной окружающей среды, например, в турбореактивных или ракетных двигателях, требуются датчики, способные выдерживать высокие температуры нагрева и сильные вибрации. Данные результатов измерений, проведенных в таких неблагоприятных условиях, необходимы для гидродинамических расчетов, акустического тестирования конструкций и определения уровня шума двигателей. Для этих целей наилучшим образом подходят оптоволоконные интерферометрические микрофоны. В работе [6] дано описание одного из таких устройств, состоящего из одномодового интерферометра Майкельсона и плоской отражающей диафрагмы. Интерферометр отслеживает отклонения диафрагмы, которые напрямую связаны с величиной акустического давления. Датчик все время охлаждается водой для обеспечения защиты от перегрева оптических материалов и для стабилизации механических свойств диафрагмы.

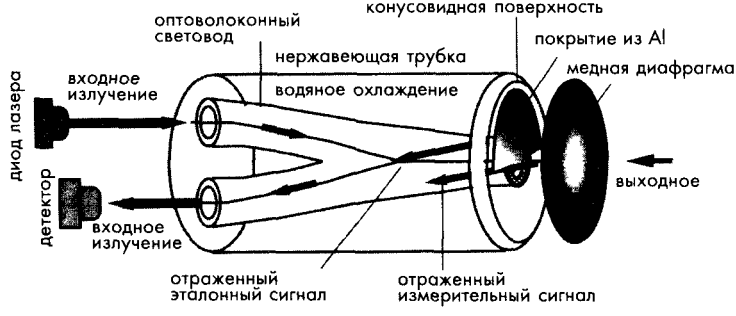


Рис. 12.2. Оптоволоконный интерферометрический микрофон. Перемещение медной диафрагмы преобразуется в интенсивность света на детекторе

Для получения интерференции между падающими и отраженными лучами света два световода соединяются вместе методом сплавления и на небольшом участке разъединяются, образуя клин (рис. 12.2). Световоды помещены в трубку из нержавеющей стали, охлаждаемую водой. Внутреннее пространство трубки заполняется эпоксидной смолой, а конец трубки тщательно полируется так, чтобы были видны оптоволокна. На часть другого конца трубки (тот, на котором световоды соединены вместе) наносится слой Al, формирующий отражающее зеркало. Открытая половина световода является чувствительной частью микрофона, а закрытая – эталонной. Такой датчик обладает очень низкой температурной чувствительностью, что достигается близким расположением друг к другу чувствительной и эталонной частей конструкции.

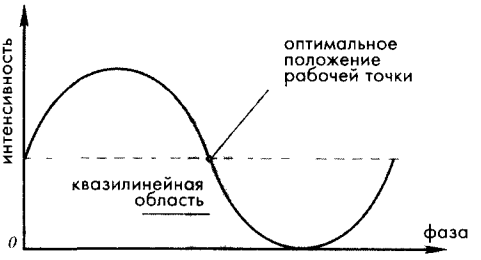


Рис. 12.3. Зависимость интенсивности излучения от фазы отраженного света

Излучение лазера (лазерного диода, работающего на длине волны 1.3 мкм) попадает в один из световодов и проходит через место соединения с другим оптоволокном на конец трубки. Часть излучения отражается от алюминиевого зеркала, а часть выходит за пределы световода и частично отражается от диафрагмы. Часть отраженного излучения, попавшего в выходной световод, доходит до поверхности детектора. В зависимости от положения диафрагмы будет меняться фазовый сдвиг между сигналами, отраженными от алюминиевого зеркала и медной диафрагмы.

На пути к детектору эти две отраженных волны интерферируют друг с другом, что приводит к модуляции интенсивности света, поступающего на детектор. Таким образом микрофон преобразует перемещение диафрагмы в интенсивность света. Теоретически, коэффициент сигнал/шум такого датчика составляет порядка 70-80 дБ, что позволяет детектировать перемещение диафрагмы, равное 1Å (10^{-10}М).

На рис. 12.3 показана типовая зависимость оптической интенсивности и детектора от фазы интерференционного сигнала. Для получения линейной передаточной функции рабочую точку необходимо выбирать вблизи середины интервала интенсивности, где наблюдается максимальная чувствительность и наилучшая линейность. Положение рабочей точки и величина наклона регулируются при помощи подстройки длины волны лазерного диода. Для сохранения пропорциональности датчика необходимо, чтобы отклонение диафрагмы не превышало четверти рабочей длины волны.

Диафрагма диаметром 1.25 мм изготавливается из медной фольги толщиной 0.05 мм. Использование меди обусловлено ее хорошей теплопроводностью и сравнительно низким коэффициентом упругости. Небольшой модуль упругости позволяет изготавливать более толстые диафрагмы, обеспечивающие лучшую теплоотдачу при сохранении таких же собственных частот и отклонений. Давление 1.4 кПа приводит к отклонению центральной части диафрагмы на 39 нм, что гораздо меньше четверти рабочей длины волны (1300 нм). Максимальная частота, которая может быть принята оптическим микрофоном, ограничена 100 кГц, что намного превышает требуемый рабочий диапазон при проведении акустического тестирования конструкций.

12.4. Пьезоэлектрические микрофоны

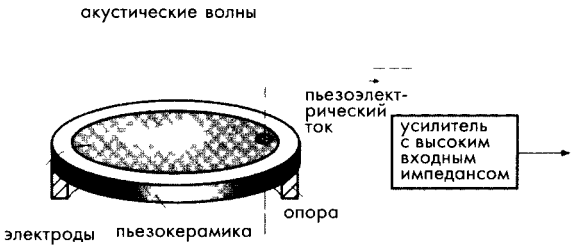


Рис. 12.4. Пьезоэлектрический микрофон

Для разработки простых микрофонов может использоваться пьезоэлектрический эффект. Пьезоэлектрический кристалл является прямым преобразователем механического напряжения в электрический заряд. Наиболее часто используемым материалом для изготовления датчиков является пьезоэлектрическая керамика, которая может работать на очень высоких частотах. По этой причине пьезоэлектрические датчики применяются для преобразования ультразвуковых волн (раздел 7.6 главы 7). Такие датчики также используются и в звуковом диапазоне, пьезоэлектрические микрофоны часто можно встретить в разнообразной аудиоаппаратуре. Примерами применения пьезоэлектрических акустических датчиков являются управляемые голосом устройства и аппараты для измерения кровяного давления. На рис. 12.4 показана схема простого микрофона, подходящего для этих случаев. Он состоит из пьезоэлектрического керамического диска с двумя электродами, нанесенными на него с двух сторон. Электроды соединяются с проводами либо при помощи токопроводящей эпоксидной смолы, либо методом пайки. Поскольку такие микрофоны обладают очень высоким выходным импедансом, они должны подключаться к усилителю с высоким входным импедансом.

Пьезоэлектрические пленки из поливинилидена фторида (PVDF) и сополимеров использовались в течение многих лет для производства звукоснимателей для музыкальных инструментов [7]. Одним из первых применений пьезопленок был звукосниматель для скрипки. Позже появились звукосниматели для акустических гитар. Пьезоэлектрические звукосниматели обладают очень высоким качеством воспроизведения, что послужило тому, что на их базе были разработаны датчики вибраций и акселерометры. Поскольку PVDF имеет очень низкую добротность, у таких преобразователей нет авторезонанса, как у керамических звукоснимателей. На рис. 12.5А показана конструкция экранированного звукоснимателя. Чувствительным является электрод, расположенный на внутренней стороне складной структуры. Он имеет несколько меньшие

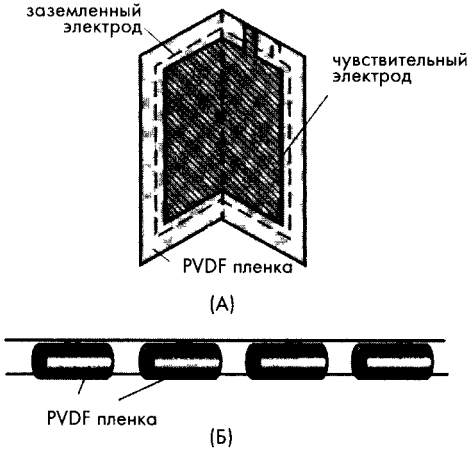


Рис. 12.5. Пьезоэлектрический звукосниматель складного типа (А), устройство гидрофона на основе свернутых PVDF пленок

размеры, чем второй электрод, выполняющий роль экрана. Такой звукосниматель обладает лучшей чувствительностью, чем традиционные звукосниматели. Для построения гидрофонов, работающих в воде, пленка может быть свернута в виде трубок, соединенных параллельно (рис. 12.5Б).

12.5. Электретные микрофоны

Электретные материалы являются близкими родственниками пьезо- и пироэлектриков. На самом деле все они являются электретными материалами с ярко выраженными либо пьезоэлектрическими, либо пироэлектрическими свойствами. Электрет – это диэлектрический материал кристаллической структуры с постоянной электрической поляризацией. Первое описание применения электретных материалов для изготовления микрофонов и наушников дано в 1928 году [8]. Электретные микрофоны – это электростатические преобразователи, состоящие из металлизированной электретной диафрагмы и металлической пластины, отделенных друг от друга воздушным зазором (рис. 12.6)

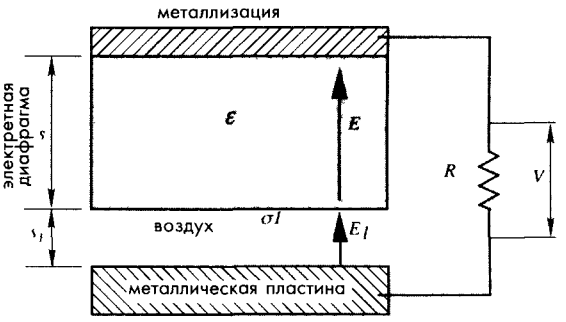


Рис. 12.6. Структура электретного микрофона. Толщина слоев на рисунке значительно увеличена для облегчения понимания принципа действия этого устройства. [9]

Верхний слой металлизации и металлическая пластина соединены друг с другом через резистор R. Напряжение на этом резисторе усиливается и используется в качестве выходного сигнала микрофона. Поскольку электрет является электрически поляризованным диэлектриком, плотность заряда на его поверхности σ_1 является постоянной величиной. Этот заряд приводит к формированию в воздушном зазоре электрического поля E_1. Когда акустическая волна ударяется о диафрагму, она отклоняется вниз, уменьшая воздушный зазор s_1 на величину Δs. Отклонение диафрагмы приводит к появлению на электродах напряжения:

$$V = \frac{s\Delta s}{\varepsilon_0 (s + \varepsilon s_1)} . \qquad (12.2)$$

Фазы изменения напряжения и отклонения диафрагмы совпадают. Если датчик обладает емкостью C, уравнение (12.2) изменится:

$$V = \frac{s\Delta s}{\varepsilon_0 (s + \varepsilon s_1)} \frac{2\pi fRC}{\sqrt{1 + (2\pi fRC)^2}} , \qquad (12.3)$$

где f – частота звуковой волны.

Возвратные силы, действующие на мембрану, определяются упругостью воздуха в зазоре, эффективная толщина которого равна s_0, и механическим напряжением мембраны T. Считая величину потерь незначительной, зависимость перемещения мембраны Δs от величины звукового давления Δp можно записать в виде [10]:

$$\Delta s = \frac{\Delta p}{(\gamma p_0 / s_0) + (8\pi T / A)}, \tag{12.4}$$

где γ – удельная теплоемкость, p_0 – атмосферное давление, A – площадь диафрагмы. Если считать, что чувствительность микрофона определяется выражением: $\delta_m = \Delta V / \Delta p$, ее значение в условиях резонанса можно найти из уравнения [9]:

$$\delta_m = \frac{s s_0 \sigma_1}{\varepsilon_0 (s + \varepsilon s_1) \gamma p_0}. \tag{12.5}$$

Из последнего выражения видно, что чувствительность микрофона не зависит от площади диафрагмы. Если масса мембраны равна M, резонансная частота определяется выражением:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{p_0}{s_0 M}}. \tag{12.6}$$

Эта частота должна быть значительно выше верхней частоты рабочего диапазона микрофона.

Электретные микрофоны отличаются от других аналогичных устройств тем, что им для работы не требуется дополнительного источника постоянного напряжения. Тогда как при таких же размерах и чувствительности на емкостной микрофон необходимо подавать напряжение выше 100 В. Механическое напряжение диафрагмы обычно довольно маленькое (около 10 Н/м), поэтому возвратная сила определяется, в основном, сжимаемостью воздушного зазора. Для изготовления диафрагмы иногда используют Teflon FEP (FEP – фторированный этилен пропилен). Температурная чувствительность электретных микрофонов составляет порядка 0.03 дБ/°С в диапазоне температур –10...+50°С [11].

Электретные микрофоны обладают рядом достоинств: они могут работать в широком частотном диапазоне от 10^{-3} Гц до сотен Мгц, у них плоская частотная характеристика (в пределах ± 1дБ), они обладают: низким уровнем нелинейных искажений, высокой виброустойчивостью, хорошей реакцией на импульсное возмущение и нечувствительностью к магнитным полям. Чувствительность электретных микрофонов составляет порядка нескольких мВ/мкбар.

Для работы в инфразвуковом диапазоне в металлической пластине электретных микрофонов проделываются отверстия для выравнивания давления. Также здесь часто требуется подача дополнительного напряжения смещения (как в емкостном микрофоне) для усиления поляризации.

Электретные микрофоны обладают высоким импедансом, поэтому интерфейсные схемы для работы с ними должны иметь высокий входной импеданс. До недавнего времени на входе интерфейсных плат всегда стояли полевые транзисто-

ры. Теперь все большую популярность завоевывают монолитные усилители. Примером таких усилителей служит LMV1014 (National Semiconductors), являющийся звуковым усилителем с очень низким потреблением тока (38 мкА), работающий от небольшой батарейки напряжением 1.7...5 В.

12.6. Твердотельные акустические детекторы

В настоящее время использование акустических датчиков гораздо шире, чем просто детектирование звука. Наибольшей популярностью сейчас пользуются микровесы и устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ), реализованные на принципе детектирования механических вибраций в твердых телах. Такие датчики используются для измерения перемещений, концентраций компонентов, механического напряжения, силы, температуры и т.д. Твердотельные детекторы часто входят в состав более сложных датчиков, например, химических анализаторов, акселерометров, датчиков давления и т.д. В химических и биологических датчиках акустические каналы, по которым распространяются механические волны, иногда покрываются специальными составами, вступающими в реакцию только с исследуемым веществом.

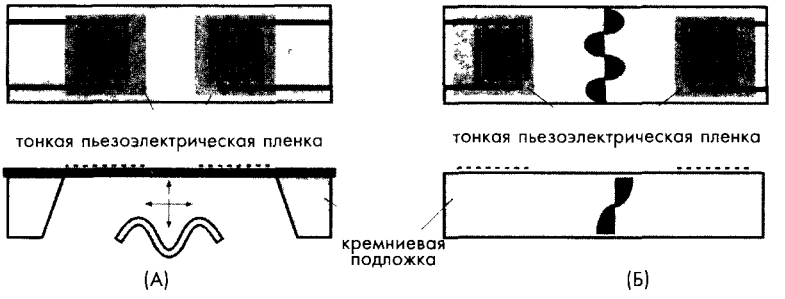


Рис. 12.7. Твердотельные акустические датчики: мембранного типа (А) и на ПАВ (Б)

Генераторы (обычно пьезоэлектрические) заставляют атомы твердых тел совершать вибрационные движения вокруг положения равновесия. Соседние атомы, за счет действия восстанавливающих сил, стремятся возвратить смещающиеся атомы в их исходное положение. В акустических датчиках внешние воздействия влияют на такие параметры распространяющихся волн, как фазовая скорость и/или коэффициент ослабления. Например, механические напряжения в теле акустических датчиков изменяют скорость распространения в них звука. В других датчиках, называемых гравиметрическими, сорбция молекул или прикрепление к ним бактерий ведет к уменьшению скорости акустической волны. А в акустических датчиках вязкости при контакте вязкой жидкости с активной зоной детектора упругих волн происходит уменьшение амплитуды этих волн.

Акустические волны, распространяющиеся в твердых телах, широко используются в электронных устройствах, таких как фильтры, линии задержки, микроприводы и т.д. Основным преимуществом акустических волн по сравнению с электромагнитными является их низкая скорость. Диапазон скоростей распространения акустических волн в твердых объектах лежит в пределах $1.5\times10^3...12\times10^3$ м/с,

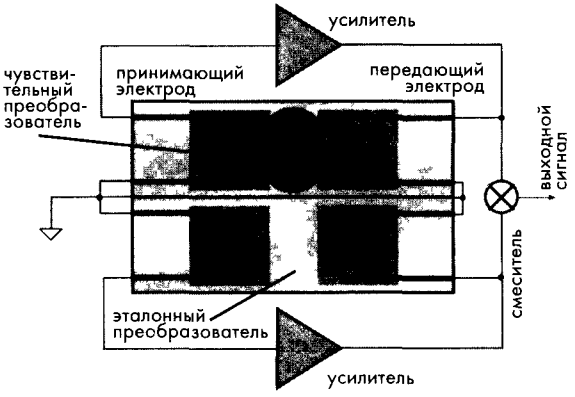


Рис. 12.8. Дифференциальный ПАВ датчик

а устройства на ПАВ используют интервал $3.8\times10^3...4.2\times10^3$ м/с [12]. Из этих цифр видно, что скорости распространения акустических волн в пять раз меньше скоростей электромагнитных волн. Это дает возможность изготавливать миниатюрные датчики, работающие на частотах до 5 ГГц.

При проектировании твердотельных акустических датчиков необходимо корректно согласовывать электронную часть схемы с механической структурой, где распространяются волны. Такие датчики чаще всего реализуются на основе пьезоэлектрического эффекта. Этот эффект носит обратимый характер (раздел 3.6 главы 3); это означает, что существует в двух направлениях: Механическое напряжение индуцирует электрические заряды, а приложенное электрическое поле вызывает напряжение в пьезоэлектрических кристаллах. В состав твердотельных акустических датчиков обычно входят два пьезоэлектрических преобразователя: один на передающем конце – для возбуждения акустических волн, другой на принимающем – для преобразования акустических волн в электрические сигналы.

Поскольку сам кремний не обладает пьезоэлектрическими свойствами, на его поверхность наносится тонкий слой из таких материалов, как оксид цинка (ZnO), нитрид алюминия (AlN) и оксиды титаната-цирконата свинца ($Pb(Zr,Ti)O_3$, часто называемые PZT керамикой. При нанесении тонких пленок на полупроводниковый материал необходимо учитывать следующие факторы:

1. Адгезионные свойства подложки
2. Устойчивость к внешним факторам (таким как жидкости и газы, контактирующие с чувствительной поверхностью датчиков во время их работы)
3. Условия окружающей среды (влажность, температура, механические удары и вибрации)
4. Величину коэффициента электромеханической связи с подложкой
5. Технологию нанесения пленок и последующую работу сними
6. Стоимость

Сила пьезоэлектрического эффекта в твердотельных акустических датчиках зависит от конфигурации электродов. В датчиках на ПАВ используются гребенчатые электроды, а в преобразователях, работающих на объемных акустических волнах, проходящих через все поперечное сечение устройства, – электроды достаточно большой площади, расположенные на противоположных сторонах детектора.

Существует несколько конфигураций акустических твердотельных датчиков, различающихся по типу распространения волн в материале. На рис. 12.7 показаны схемы двух вариантов датчиков: на основе волны изгиба (рис. 12.7А) и на ос-

нове ПАВ (рис. 12.7Б). В первом случае за счет напряжения, приложенного к левой паре электродов, происходит изгибная деформация очень тонкой мембраны. Вертикальное отклонение мембраны преобразуется в электрический сигнал, снимаемый с правой пары электродов. Как правило, толщина мембраны значительно меньше длины волны колебаний. Во втором случае акустические волны формируются на поверхности относительно толстой подложки. И в том, и в другом случае пространство между парами электродов является чувствительной зоной датчиков, реагирующей на внешние воздействия, такие как давление, вязкость жидкости, молекулы газа и микроскопические частицы.

ПАВ-сенсоры входят в состав многих приборов, например, они используются в генераторах в качестве времязадающих устройств Поскольку на распространение акустических волн оказывают влияние много внешних и внутренних факторов, полученные результаты измерений (изменения частоты выходного сигнала) могут быть неоднозначными и обладать большими погрешностями. Для решения этой проблемы применяют дифференциальные датчики, построенные на основе двух идентичных ПАВ преобразователей: один из которых является эталонным, а другой – чувствительным устройством, реагирующим на изменения внешних воздействий (рис. 12.8) Эталонный преобразователь экранируется от внешних сигналов, но подвергается воздействию таких общих факторов, как температура, старение и т д Частота выходного сигнала, равная разности частот двух ПАВ преобразователей, определяется только измеряемым сигналом и не зависит от влияния других посторонних факторов.

Литература

1 Hohm, D and Hess, G A subminiature condenser microphone with silicon nitrite membrane and silicon back plate 7 *Acoust Soc Am* 85, 476-480, 1989
2 Bergqvist, J and Rudolf, F A new condenser microphone in silicon *Sensors Actuators,* A21-A23, 123-125, 1990
3 Sprenkels, A J , Groothengel, R A , Verloop and A J , Bergveld, P Development ofanelectret microphone in silicon *Sensor Actuators,* 17(3&4), 509-512,1989
4 van der Donk, A G H , Sprenkels, A J , Olthuis, W, and Bergveld, P Preliminary results of a silicon condenser microphone with internal feedback In *Transducers'91 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators Digest of Technical Papers,* IEEE, New York, 1991, pp 262-265
5 Wong S K and Embleton T F W, eds *AIP Handbook of Condenser Microphones* ı AIP Press, New York, 1995
6 Hellbaum, R F et al An experimental fiber optic microphone for measurement of acoustic pressure levels in hostile environments In *Sensors Expo Proceedings,* Helmers Publishing, Peterborough, NH, 1991
7 *Piew Film Sensors Technical Manual* Measurement Specialties, Inc , Norris-town, PA, 1999, availabel at www msiusa com
8 Nishikawa, S and Nukiyama, S *Proc Imp Acad Tokyo* 4, 290, 1928
9 Sessler, G M , ed *Electrets* Springer-Verlag Berlin, 1980
10 Morse, P M *Vibration and Sound* McGraw-Hill, New York, 1948
11 Griese, H J , Proc 9th International Conference on Acoustics, 1977, paper Q29
12 Motamedi, M E and White, R M Acoustic sensors In *Semiconductor Sensors* S M Sze, ed John Wiley & Sons, New York, 1994, pp 97-151

ГЛАВА 13

ДАТЧИКИ ВЛАЖНОСТИ И СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ

13.1. Общие понятия о влажности

Вода входит в состав окружающего воздуха и является необходимым компонентом для всех живых существ: людей и животных. Комфортность окружающих условий определяется, в основном, двумя факторами: относительной влажностью и температурой. Вы можете себя чувствовать вполне комфортно при температуре -30°С в Сибири, где зимой воздух обычно очень сухой, но Вам будет совсем неуютно при температуре 0°С в Кливленде, расположенном на берегу озера, где очень влажно. (Естественно, что здесь учитываются только климатические факторы и не рассматриваются экономические, культурные и политические). Работа многих устройств (высокоимпедансных электронных схем, электростатических чувствительных элементов, высоковольтных приборов и т.д.) также сильно зависит от уровня влажности. Как правило, все характеристики приборов определяются при относительной влажности 50% и температуре 20-25°С. Рекомендуется поддерживать такие же условия и в рабочих помещениях (правда, здесь существуют исключения: например, в производственных комнатах Класса А влажность должна быть 38%, а в больничных операционных – 60%. Влага входит в состав большинства выпускаемых изделий и материалов. Можно сказать, что большую часть валового национального продукта любой страны составляет вода [1].

Для измерения влажности используются приборы, называемые *гигрометрами*. Первый гигрометр был создан Джоном Лесли (1760-1832) [2]. Чувствительный элемент гигрометра должен избирательно реагировать на изменение концентрации воды. Его реакцией может быть изменение внутренних свойств. Датчики для измерения влажности и температуры точки росы бывают емкостными, электропроводными, вибрационными и оптическими. Оптические газовые датчики определяют точку росы, в то время как оптические гигрометры измеряют содержание воды в органических растворах по поглощению излучения ближнего ИК диапазона в интервале 1.9...2.7 мкм [3] (см. рис. 14.18 главы 14).

Для количественного определения влажности и содержания воды применяются разные единицы. Влажность газов в системе СИ иногда выражается как количество паров воды в одном кубическом метре (г/м^3). Содержание воды в жидкостях и твердых телах обычно задается в процентах от общей массы. Содержание воды в плохо смешиваемых жидкостях определяется как количество частей воды на миллион частей веса (ppm).

Приведем несколько полезных определений:

Влага – это количество воды, содержащееся в жидкости или твердом теле, которое может быть удалено без изменения химических свойств вещества.

Удельная влажность r – это масса паров воды на единицу массы сухого газа.

Абсолютная влажность (массовая концентрация или плотность паров воды) – это масса паров воды *m* на единицу объема влажного газа *v*: $d_w=m/v$. Другими словами, абсолютная влажность – это плотность водяных паров. Для ее определения известное количество газа, например, воздуха, пропускается через влагопоглощающий материал (такой как силикагель), который взвешивается до и после этой процедуры. Абсолютная влажность выражается в г/м^3. Поскольку на результаты таких измерений оказывает влияние атмосферное давление, они редко используются в инженерной практике

Относительная влажность H – это отношение давления паров воды в воздухе P_w, измеренное при некоторой температуре (парциальное давление), к максимальному давлению насыщенного пара P_s при той же температуре. Относительная влажность (RH) всегда определяется в процентах:

$$H = 100\frac{P_w}{P_s}, \tag{13.1}$$

Величина *H* выражает содержание пара в виде процента от концентрации водяных паров, при которой происходит его насыщение (т.е. образование капель воды (росы) при заданной температуре). Существует еще одно определение RH: относительная влажность – это отношение мольной доли паров воды в заданном объеме к мольной доле насыщенных водяных паров в том же объеме. Сумма парциальных давлений влажного P_w и сухого воздуха P_a равна давлению в замкнутом объеме или атмосферному давлению P_{atm}, если этот объем незамкнут:

$$P_w + P_a = P_{атм}. \tag{13.2}$$

При температуре выше точки кипения пары воды вытесняют все остальные газы из заданного объема. Тогда вся атмосфера состоит только из перегретого пара. В этом случае, $P_w=P_{atm}$. При температурах , больших 100°C, P_s всегда выше $P_{атм}$, и максимальная относительная влажность никогда не может достичь 100%. При нормальном атмосферном давлении и температуре 100°C, максимальная относительная влажность равна 100%, в то время как при температуре 200°C она составляет только 6%. При температуре выше 374°C давление насыщенных паров термодинамически не определено.

Точка росы – это температура, при которой парциальное давление водяных паров становится максимальным, что соответствует состоянию насыщения пара, при котором пар и жидкая фаза воды находятся в равновесии. Точка росы – это температура, при которой относительная влажность воздуха равна 100%. Другими словами, точка росы определяет температуру воздуха, при которой он обладает максимальной влажностью. При охлаждении воздуха до точки росы, он становится насыщенным, что может привести к появлению тумана, росы или инея.

Точку замерзания можно определить как температуру, при которой при изобарическом охлаждении смеси газа и водяных паров (при постоянном давлении) образуется иней или лед (минуя стадию конденсации).

Используя следующие уравнения [4], можно определить температуру точки росы (DP) по величине относительной влажности и температуре. Все температуры должны быть выражены в °C. Давление насыщенных паров над поверхностью воды находится при помощи выражения:

$$EW = 10^{0\,66077+7\,5t/(237+t)} \tag{13.3}$$

Тогда точка росы определяется по аппроксимационной формуле:

$$DP = \frac{237.3(0\,66077 - \log_{10} EW_{RH})}{\log_{10} EW_{RH} - 8.16077} t, \tag{13 4}$$

где

$$EW_{RH} = \frac{(EW)(RH)}{100}$$

Относительная влажность обратно пропорциональна температуре Точка росы обычно определяется при помощи холодного зеркала. Однако при температуре точки росы ниже 0°С такие измерения становятся неточными, поскольку вода замерзает, что ведет к медленному образованию кристаллической решетки, напоминающей снежинку. Тем не менее при температурах ниже нуля вода еще длительное время может находиться в жидкой фазе. Это время зависит от перемешивания состава, скорости конвекции, температуры газа, загрязнения и т.д

Таблица 13.1. Относительная влажность насыщенных растворов солей

температура	(LiCl,H_2O)	(MgCl,$6H_2O$)	($Mg(NO_3)^2$, $6H_2O$)	(NaCl, $6H_2O$)	K_2SO_4
15	13	33 6 ±0 3	58	75 7 ±0 3	98 5 ±0 9
10	13	33 5±0 2	57	75 7±0 2	98 2±0 8
15	12	33 3±0 2	56	75 6±0 2	97 9±0 6
20	12	33 1±0 2	55	75 5±0 1	97 6±0 5
25	**11.3±0.3**	**32.8±0.3**	**53**	**75.3 ±0.1**	**97.3±0.5**
30	11 3±0 2	32 4±0 1	52	75 1±0 1	97 0±0 4
35	11 3±0 2	32 1±0 1	50	74 9±0 1	96 7±0 4
40	11 2±0 2	31 6±0 1	49	74 7±0 1	96 4±0 4
45	11 2±0 2	31 1±0 1	–	74 5±0 2	96 1±0 4
50	11 1±0 2	30 5±0 1	46	74 6±0 9	95 8±0 5
55	11 0±0 2	29 9±0 2	–	74 5 ±0 9	–

13.2. Емкостные датчики

Конденсаторы с воздушным зазором могут использоваться как датчики относительной влажности, поскольку от количества водяных паров в атмосфере зависит диэлектрическая проницаемость воздуха [5]:

$$k = 1 + \frac{211}{T}\left(P + \frac{48P_s}{T}H\right)10^{-6}, \tag{13 5}$$

где T – абсолютная температура (в Кельвинах), P – давление влажного воздуха (в мм рт.ст.), P_s – давление насыщенных водяных паров при температуре T (в мм рт.ст.), H – относительная влажность (в %). Из уравнения (13.5) видно, что диэлектрическая проницаемость влажного воздуха, а значит и его емкость, пропорциональны относительной влажности.

Пространство между пластинами конденсатора может быть заполнено не воздухом, а соответствующим диэлектрическим материалом, проницаемость которого сильно зависит от влажности окружающей среды. Например, существуют емкостные датчики, сформированные на основе гигроскопической полимерной пленки с нанесенными с двух сторон металлическими электродами. В работе [6] приведено описание такого датчика, реализованного на основе гидрофильной полимерной пленки толщиной 8...12 мкм, изготовленной из ацетобутирата целлюлозы и диметилфталата, используемого в качестве пластификатора. Размеры пленочного датчика составляют 12x12 мм. Методом осаждения в вакуумной камере на полимер наносятся электроды из пористого золота (толщиной 200Å) в форме диска диаметром 8 мм. Пленка подвешивается на специальных держателях, а электроды соединяются с выводами. Емкость такого датчика почти пропорциональна относительной влажности H:

$$C_h \approx C_0(1+\alpha_h H), \tag{13.6}$$

где C_0 – емкость при H=0.

На рис. 13.1 показана схема, позволяющая при помощи емкостного датчика измерять относительную влажность воздуха в диапазоне 5...90% с точностью 2%, а на рис. 13.2 приведены передаточные характеристики датчика и интерфейсной схемы. Номинальная емкость датчика при 75% RH составляет 500 пФ. Он обладает квазилинейной передаточной функцией со смещением при нулевой влажности, равным 370 пФ, и наклоном 1.7пФ/%RH. Показанная на рисунке схема выполняет две функции: преобразует емкость в напряжение и компенсирует емкость

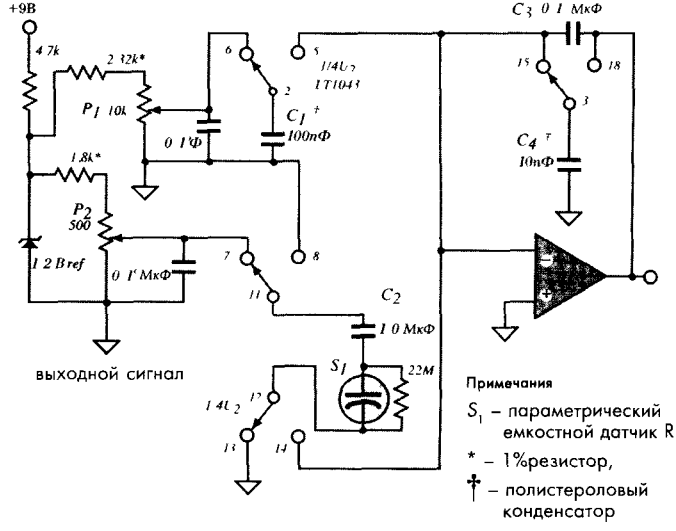


Рис. 13.1. Упрощенная схема измерения влажности при помощи емкостного датчика [6]

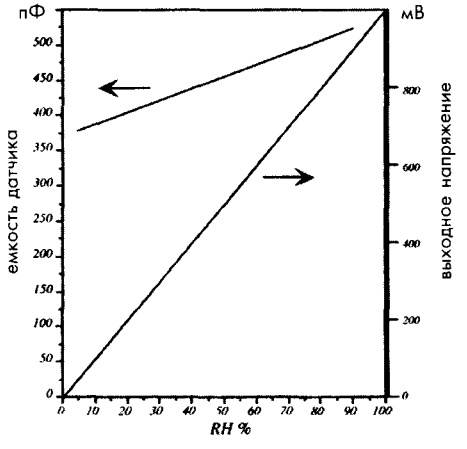


Рис. 13.2. Передаточная функция емкостного датчика и системы

смещения для получения нулевого выходного напряжения при нулевом уровне RH. Основной частью схемы является аналоговый ключ LT1043 с автосинхронизацией, подключающий несколько конденсаторов к точке суммирования – на вход ОУ U_1 (эта точка иногда называется виртуальной землей). Конденсатор C_1 используется для компенсации емкости смещения, а конденсатор C_2 включается последовательно с емкостным датчиком S_1. Среднее напряжение на датчике должно быть равно нулю, в противном случае электрохимические процессы могут вывести его из строя. Неполярный конденсатор C_2 защищает датчик от статического электричества. Переменный резистор P_2 регулирует величину тока, поступающего на датчик, а P_1 подстраивает ток смещения. Конденсатор C_3, стоящий в цепи ОС, используется для интегрирования результирующего заряда, а конденсатор C_4 поддерживает уровень выходного напряжения неизменным во время отсоединения точки суммирования ОУ от датчика.

Такой же подход может быть использован для определения содержания влаги в образцах различных материалов [7]. На рис. 13.3 показана схема емкостной системы измерений, где изменение диэлектрической проницаемости образца приводит к изменению частоты генератора. Этот метод измерения влажности широко применяется в системах контроля фармацевтической продукции. Диэлектрическая проницаемость большинства медицинских таблеток по сравнению с водой (рис. 3.7 главы 3) достаточно низкая (2...5). Образец исследуемого материала помещается между двумя пластинами, формирующими конденсатор, подсоединенный к *LC*-колебательному контуру. Счетчик измеряет частоту, по которой определяется величина влажности. Для уменьшения влияния таких параметров окружающей среды, как температура и атмосферная влажность, рекомендуется использовать дифференциальные датчики. В этом случае определяется разность частот $\Delta f = f_0 - f_1$, где f_0 – частота, измеренная при пустом контейнере, а f_1 – частота, измеренная с контейнером, заполненным исследуемым материалом. Этот метод имеет ряд ограничений: он весьма неточен при влажности ниже 0.5%; образец должен быть очищен от посторонних частиц с относительно высокой диэлектрической проницаемостью (например, от металла и пластика), а также геометрия образца не должна меняться во время проведения эксперимента.

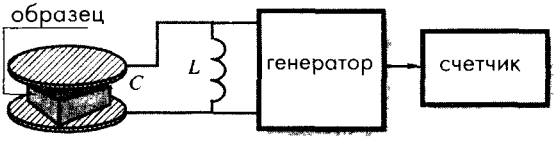


Рис. 13.3. Емкостная система измерения влажности

Тонкопленочный емкостной датчик влажности может быть изготовлен на кремниевой подложке [8]. Для этого на кремниевой подложке n-типа выращивается слой SiO_2 толщиной 3000Å (рис. 13.4Б), а на него наносятся два электрода из алюминия, хрома или легированного фосфором поликремния, для чего применяется метод осаждения из газовой фазы, проводимый при низком давлении (LPCVD). Толщина электродов, имеющих гребенчатую форму (рис. 13.4А), лежит в пределах 2000...5000 Å. Для обеспечения дополнительной компенсации изменения окружающей температуры на той же самой подложке формируются два термочувствительных резистора. На верхнюю часть датчика наносится диэлектрический слой толщиной 300...4000Å, для получения которого могут использоваться разные материалы, например, химически осажденные из газовой фазы SiO_2 или фосфорное силикатное стекло.

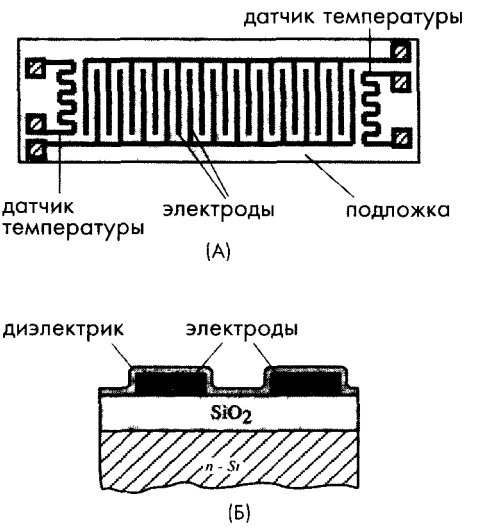


Рис. 13.4. Емкостной тонкопленочный датчик влажности: А – гребенчатые электроды, формирующие пластины конденсатора, Б – поперечное сечение датчика

На рис. 13.5 показана упрощенная эквивалентная схема тонкопленочного датчика влажности. Каждый компонент схемы является элементом *R*C-линии передач [9]. При увеличении относительной влажности распределение сопротивления поверхности уменьшается, а эквивалентная емкость между выводами 1 и 2 возрастает. Величина емкости зависит от частоты. Следовательно, при измерении низких значений влажности частота должна быть порядка 100 Гц, в то время как для высоких величин влажности, ее надо выбирать в пределах 1...10 кГц.

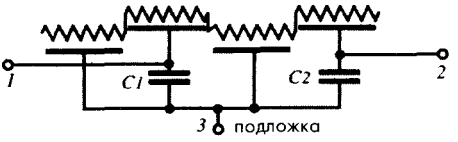


Рис. 13.5. Упрощенная эквивалентная электрическая схема емкостного тонкопленочного датчика влажности

13.3. Резистивные датчики влажности

Сопротивление многих неметаллических проводников, в основном, зависит от содержания в них воды (см. раздел 3.5.4 главы 3). На этом принципе реализуются резистивные датчики влажности или гигристоры. На рис. 13.6 показана схема гигристора. В нем используется материал, обладающий сравнительно низким удельным сопротивлением, которое сильно зависит от влажности окружающей среды. Слой такого материала довольно большой площади наносится сверху двух гребенчатых электродов. Когда он поглощает молекулы воды, сопротивление между электродами меняется, что регистрируется при помощи электронной схемы. Первый датчик

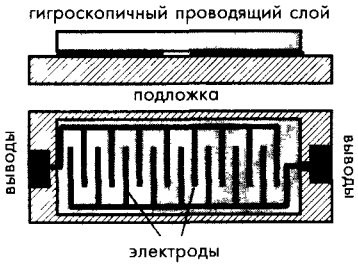


Рис. 13.6. Схема гигристора

такого типа был реализован Ф.В. Данмором в 1935 году; его гигроскопическая пленка состояла из 2...5% водного раствора LiCl [10]. В качестве пленки для гигристоров иногда применяют полистирол, обработанный серной кислотой для получения требуемых значений поверхностного удельного сопротивления.

Другим перспективным материалом для изготовления пленок для гигристоров являются твердые полиэлектролиты, поскольку их электропроводность достаточно сильно зависит от влажности. Долговременная стабильность и воспроизводимость таких элементов может быть значительно улучшена при использовании взаимопроникающих цепей полимеров, а также соответствующих конструкционых материалов. При проведении измерений на частоте 1 кГц на экспериментальном образце такой пленки было показано, что при изменении RH от 0 до 90% ее импеданс уменьшается с 10 МОм до 100 Ом.

На рис. 13.7А показан твердотельный датчик влажности, реализованный на кремниевой подложке, обладающей высокой электропроводностью [12], чтобы пропускать через себя ток от алюминиевого электрода, нанесенного на ее поверхности методом вакуумного осаждения металлов. На электрод наносится слой из оксида алюминия, сверху которого формируется второй электрод из пористого золота, не мешающего прохождению газов, но обеспечивающего хороший электрический контакт. Слой алюминия подвергается специальной обработке для получения пористой оксидной поверхности. Среднее поперечное сечение пор должно быть достаточным для прохода через них молекул воды. Электрические выводы формируются в кремниевой подложке и слое золота. Оксид алюминия, как и многие другие материалы, при контакте со смесью газов, содержащей водяные пары, поглощает воду. Количество поглощенных молекул воды пропорционально парциальному давлению водяных паров и обратно пропорционально абсолютной температуре. Оксид алюминия является диэлектрическим материалом. Его диэлектрическая проницаемость и поверхностное удельное сопротивление зависят от количества адсорби-

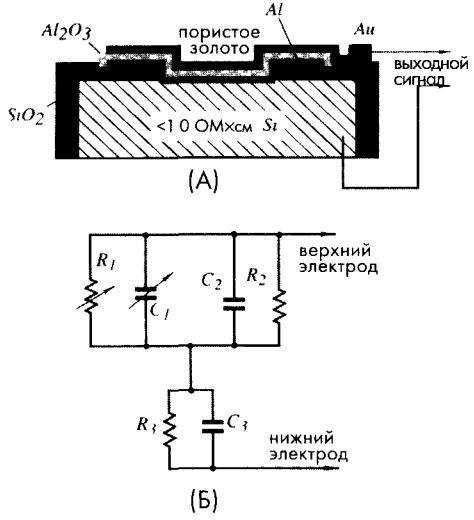


Рис. 13.7. А - структура тонкопленочного датчика влажности на основе тонких пленок из Al_2O_3, Б – упрощенная эквивалентная схема датчика влажности; R_1 и C_1 - переменные компоненты, реагирующие на изменение влажности; R_2 и C_2 сопротивление и емкость слоя оксид алюминия, расположенного между порами, на который вода не оказывает никакого влияния; R_3 и C_3 соответсвуют участкам оксида ниже пор, также влагонепроницаемым

рованной воды. По этой причине этот материал может применяться для изготовления чувствительных элементов датчиков влажности.

На рис. 13.7Б показана эквивалентная электрическая схема такого датчика [13]. Значения R_1 и C_1 определяются средними размерами пор в оксиде алюминия и его плотностью. Они зависят о количества молекул, прошедших через поры и осевших на поверхности. R_2 и C_2 – это сопротивление и емкость оксида, расположенного между пор, характеристики которого не зависят от уровня влаги. C_3 – эквивалентная последовательная емкость, определяемая при измерении полного сопротивления компонентов в условиях сухой атмосферы на очень высоких частотах. При приближении частоты к нулю сопротивление датчика становится очень высоким (более 10^8 Ом). Поэтому при измерении влажности необходимо учитывать и импеданс датчика. Все остальные резистивные и емкостные элементы, существующие в датчике, не реагирующие на изменения влажности, шунтируют R_1 и C_1, что приводит к уменьшению чувствительности преобразователя, а это, в свою очередь, вызывает снижение точности при низких значениях измеряемой величины. Поскольку показания влажности сильно зависят от температуры, в состав датчика обычно входят: сенсор влажности, термистор и эталонный конденсатор, защищенный от влияния влаги и обладающий низким температурным коэффициентом.

13.4. Термисторные датчики влажности

Датчики, реализованные на основе термисторов, измеряют влажность по изменению теплопроводности газов (рис. 13.8А) [14]. Такие датчики состоят из двух крошечных термисторов R_1 и R_2, закрепленных при помощи очень тонких проводов для снижения тепловых потерь за счет теплопроводности через корпус. Исследуемый газ через небольшие вентиляционные отверстия воздействует на левый термистор, при этом правый термистор размещается в герметичной камере с сухим воздухом. Оба термистора включены в мостовую схему, на которую подается напряжение $+E$. При прохождении через термисторы тока их температура повышается до 170°С относительно температуры окружающей среды. Балансировка моста проводиться в условиях сухого воздуха, в уравновешенном состоянии вы-

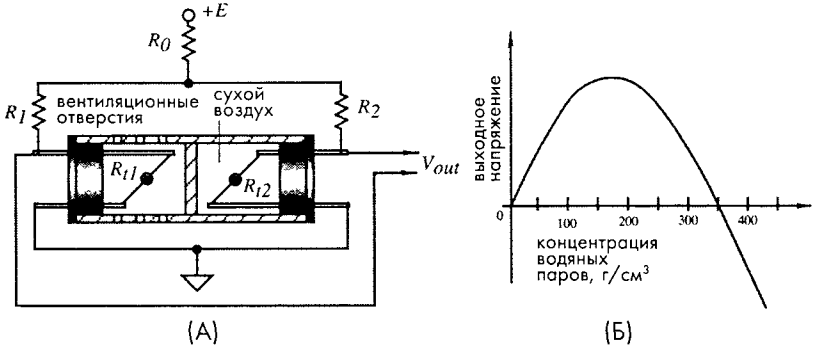


Рис. 13.8. Датчик абсолютной влажности с саморазогревающимися термисторами: А – схема и электрические соединения. Б – зависимость выходного напряжения от влажности

ходное напряжение должно быть равно нулю. При отклонении абсолютной влажности воздуха от нулевого значения происходит постепенное повышение выходного напряжения. Однако при концентрации паров 150 г/м^3 оно начинает падать, а при концентрации 345 г/м^3 – даже меняет свою полярность (рис. 13.8Б)

13.5. Оптический гигрометр

Большинство датчиков влажности обладают не очень хорошей воспроизводимостью. Например, величина их гистерезиса составляет от 0.5...1% RH. Поэтому при помощи них нельзя проводить прецизионные измерения. Для этих целей требуется применение косвенных методов определения влажности. Самым эффективным из них является вычисление абсолютной и относительной влажности по температуре точки росы. Как было указано ранее, точка росы определяется по температуре, при которой жидкая и газовая фазы воды (в данном случае любого вещества) находятся в равновесии. Температура, при которой пар и твердая фаза воды находятся в термодинамическом состоянии равновесия, называется точкой замерзания. Каждой температуре точки росы соответствует только одно значение давления насыщенного пара. Поэтому, измеряя температуру точки росы при известном значении давления, всегда можно найти абсолютную влажность. Оптический способ определения влажности является оптимальным методом, которому соответствует минимальный гистерезис. Стоимость оптического гигрометра намного выше, чем у предыдущих датчиков, но он позволяет отслеживать низкие уровни содержания воды в продукции, что приводит к повышению ее качества, делает эту цену вполне оправданной.

Основным элементом оптического гигрометра является зеркало, температура поверхности которого точно регулируется при помощи термоэлектрического насоса. Пороговая температура зеркала настраивается на температуру точки росы. Исследуемый воздух при помощи насоса прогоняется над поверхностью зеркала. Если температура зеркала пересекает точку росы, на его поверхности конденсируются капли воды. При этом отражающие свойства зеркала изменяются, поскольку капли воды рассеивают лучи света, что детектируется соответствующим фотодетектором. На рис. 13.9 показана упрощенная схема гигрометра с охлаждаемым зеркалом. Он состоит из термоэлектрического насоса, работающего на эффекте Пельтье. Этот насос отводит тепло от поверхности тонкого зеркала, внутрь которого встроен детектор температуры, входящий в состав цифрового термометра, отображающего температуру

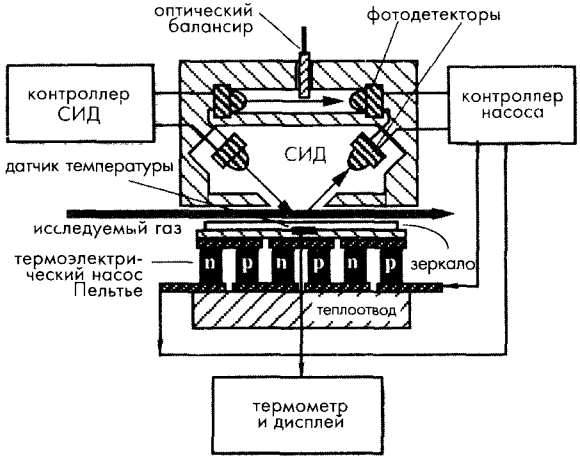


Рис. 13.9. Датчик точки росы с охлаждаемым зеркалом

зеркала. Данный датчик является дифференциальным устройством, в котором верхняя оптопара - светоизлучающий диод (СИД) и фотодетектор – используется для компенсации дрейфа, а вторая (нижняя)– для измерения коэффициента отражения зеркала. Симметричность датчика регулируется при помощи клиновидного оптического балансира, размещенного на пути лучей света верхней оптопары. Нижняя оптопара наклонена под углом 45° к зеркалу. При температуре выше точки росы, поверхность зеркала является сухой, а его отражающая способность – максимальной. Под управлением контроллера насос снижает температуру зеркала. При появлении капель воды отражающая способность зеркала резко падает, что вызывает уменьшение тока фотодектора. Сигнал фотодетектора поступает на контроллер, который теперь должен подавать на насос такой ток, чтобы температура зеркала оставалась равной точке росы, при которой не происходит ни дополнительной конденсации влаги, ни ее выпаривания с поверхности. В действительности, при этой температуре молекулы воды то прилипают к зеркалу, то отрываются от него, но среднее количество конденсата остается неизменным, т.е. устанавливается равновесие.

Поскольку полученная температура зеркальной поверхности точно определяет действительную точку росы, этот метод считается наиболее прецизионным способом измерения влажности. В рассмотренном датчике отсутствует гистерезис, а его чувствительность составляет 0.03°С от температуры точки росы. При известном давлении по точке росы можно определить все характеристики влажности: %RH, давление пара и т.д.

Этот метод имеет ряд недостатков: сравнительно высокую стоимость, возможность загрязнения зеркальной поверхности и достаточно высокое потребление электроэнергии тепловым насосом. Проблема, связанная с загрязнением, решается при помощи фильтров и специальной техники охлаждения зеркала, при которой температура сначала понижается ниже точки росы, чтобы выступило много конденсата, а потом резко нагревается. Это позволяет смыть загрязнение и оставить поверхность чистой [15].

13.6. Вибрационный гигрометр

Основная идея таких датчиков аналогична идее оптических гигрометров с охлаждаемым зеркалом. Разница между ними заключается в том, что точка росы определяется не по изменению оптического коэффициента отражения поверхности, а по измерению массы охлаждаемой пластины. Эта пластина изготавливается из тонкого кварцевого кристалла, являющегося частью колебательного контура. Поскольку в основе вибрации кварцевой пластины лежит пьезоэлектрический эффект, появилось еще одно название такого датчика – *пьезоэлектрический гигрометр*. Охладитель Пельтье (см. раздел 3.9 главы 3) с высокой степенью

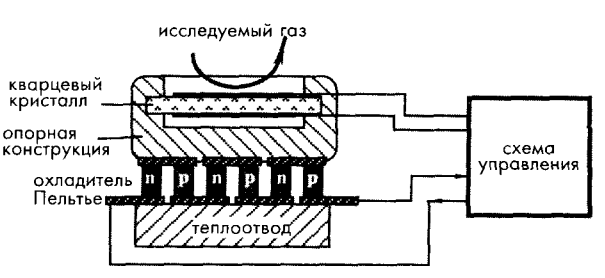


Рис. 13.10. Пьезоэлектрический датчик влажности с охлаждаемым зеркалом

точности контролирует температуру кварцевого кристалла (рис. 13.10). При понижении температуры до точки росы на поверхности пластины формируется тонкая пленка из конденсированной воды, что вызывает изменение массы кристалла. Это приводит к сдвигу резонансеой частоты колебательного контура от f_0 до f_1. Новая частота определяется толщиной слоя воды. Сдвиг по частоте приводит к изменению тока в охладителе Пельтье, стремящегося стабилизировать температуру на поверхности кристалла, близкой к точке росы. Из-за малых размеров кристалла и минимальной механической нагрузки этом датчике очень сложно в обеспечить адекватную тепловую связь между охладителем и кристаллом [16]. Принцип таких гигрометров может быть использован для построения датчиков на ПАВ, подобных описанным в главе 12 (рис. 12.8) В этом случае исследуемый газ должен проходить по активной зоне преобразователя.

Литература

1 Quinn, F C The most common problem of moisture/humidity measurement and control In *Moisture and Humidity, Proceedings of the 1985 International Symposium on Moisture and Humidity* Chaddock, J B ed , ISA, Washington, DC,1985,pp 1-5

2 Carter, E R, ed *Dictionary of Inventions and Discoveries Crane, Russak and Co* , New York, 1966

3 Baughman E H and Mayes, D NIR applications to process analysis *Am Lab* , 21(10), 54-58, 1989

4 Berry, F A , Jr *Handbook of Meteorology* McGraw-HiU, New York, 1945, p 43

5 *Conditioner Circuit,* Appl Handbook, Linear Technology, Inc , Milpitas, 1990

6 Sashida, T and Sakaino, Y An interchangeable humidity sensor for an industrial hygrometer In *Moisture and Humidity Proceedings of the International Symposium on Moisture and Humidity* Chaddock, J B ed , Washington, DC, 1985

7 Carr-Brion, K *Moisture Sensors in Process Control* Elsevier Applied Science, New York, 1986

8 Jachowicz, R S and Dumania, P Evaluation of thin-film humidity sensor type MCP- – MOS In *Moisture and Humidity Proceedings of the International Symposium on Moisture and Humidity* Chaddock, J B ed , ISA, Washington, DC, 1985

9 Jachowicz, R S and Senturia, S D Athin film humidity sensor *Sensors Actuators* 2, 1981, 1982

10 Norton, H N *Handbook of Transducers* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989

11 Sakai, Y , Sadaoka, Y , Matsuguchi, M , and Hirayama, K Water resistive humidity sensor composed of interpenetrating polymer networks of hydrophilic and hydrophobic methacrylate In *Transducers'91 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators Digest of Technical Papers,* IEEE, New York, 1991,pp 562-565

12 Fong, V Alz03 moisture sensor chip for inclusion in microcircuit package and the new MIL standard for moisture content In *Moisture and Humidity, Proceedings of the 1985 International Symposium on Moisture and Humidity* Chaddock, J B , ed , ISA, Washington, DC, 1985, pp 345-357

13 Harding, J C , Jr , Overcoming limitations inherent to aluminum oxide humidity sensors In *Moisture and Humidity, Proceedings of the 1985 Internation Symposium on Moisture and Humidity* Chaddock, J B , ed , ISA, Washington, DC, 1985,pp 367-378

14 Miura, T Thermistor humidity sensor for absolute humidity measurements and their applications In *Moisture and Humidity Proceedings of the International Symposium on Moisture and Humidity,* Chaddock, J B , ed , ISA, Washington, DC, 1985

15 Harding, J C , Jr , Achilled mirror dewpoint sensor/psychrometric transmitter for energy monitoring and control systems In *Moisture and Humidity Proceeding of the International Symposium on Moisture and Humidity,* Chaddock, J B , ed , ISA, Washington, DC, 1985

16 Porlier, C Chilled piezoelectric hygrometer sensor interface design In *Sensors Expo Proceedings* Helmers Publishing, 1991, paper 107B-7

ГЛАВА 14

ДЕТЕКТОРЫ СВЕТОВЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

«Нет ничего более практичного, чем хорошая теория»
Густав Роберт Кирхгоф

14.1. Введение

Детекторы электромагнитных волн, лежащих в спектральном диапазоне от ультрафиолетового до дальнего ИК излучений, называются световыми детекторами. С точки зрения разработчика датчиков поглощение фотонов чувствительным материалом приводит либо к повышению его температуры, либо к появлению новых квантовых частиц. Поэтому все детекторы световых излучений можно разделить на две группы: *квантовые* и *тепловые* преобразователи. Квантовые детекторы работают в интервале от УФ до среднего ИК диапазонов, в то время как тепловые датчики чаще используются в диапазонах среднего и дальнего ИК излучений, где их эффективность при комнатных температурах намного превышает эффективность квантовых преобразователей. В этой главе будут рассмотрены оба вида детекторов. Описание фотоумножителя – детектора фотонов, обладающего очень высокой чувствительностью, читатель может найти в разделе 15.1 главы 15.

В основе практически всех твердотельных квантовых детекторов (фотовольтаических и фотопроводящих) лежит квантовая теория излучения, базирующаяся на взаимодействии отдельных фотонов с кристаллической решеткой полупроводниковых материалов. Их принцип действия основан на явлении фотоэффекта, открытом А. Эйнштейном, за которое он получил Нобелевскую Премию. В 1905 году он предположил, что свет имеет квантовую природу, т.е. он состоит из потока элементарных частиц, каждая из которых обладает в заданных условиях определенной энергией. Эти частицы в дальнейшем были названы фотонами. Энергия одного фотона определяется следующим выражением:

$$E = h\nu \ , \tag{14.1}$$

где ν – частота света, а h =6.626075·10 ^{34} Дж·с – постоянная Планка, выведенная на основе волновой теории света. Столкновение фотона с поверхностью проводника может привести к образованию свободного электрона. Часть энергии фотона ϕ

используется на то, чтобы оторвать этот электрон с поверхности, а другая часть отдается электрону в виде кинетической энергии K_m. Фотоэлектрический эффект можно выразить в виде:

$$h\nu = \phi + K_m, \tag{14.2}$$

где ϕ называется *рабочей функцией* испускающей поверхности, а K_m – максимальной кинетической энергией электрона после его отрыва от поверхности. Аналогичные процессы происходят, когда полупроводниковый p-n переход подвергается воздействию светового излучения: фотон передает свою энергию электрону, и если эта энергия достаточно большая, электрон становиться свободным, что означает появление электрического поля.

Периодическая решетка кристаллических материалов определяет значения разрешенных зон энергий для электронов, находящихся внутри твердого тел. Энергия любого электрона лежит в пределах одной из разрешенных зон, которые отделены друг от друга интервалами запрещенных значений энергии (запрещенными зонами).

Если излучение определенной длины волны (с достаточно высокой энергией фотонов, см. уравнение (14.1)) падает на поверхность полупроводникового кристалла, концентрация заряженных частиц (электронов и дырок) в нем увеличивается, т.е. возрастает его удельная проводимость:

$$\sigma = e(\mu_e n + \mu_h p), \tag{14.3}$$

где e – заряд электрона, μ_e – подвижность электронов, μ_h – подвижность дырок, а n и p – концентрации электронов и дырок.

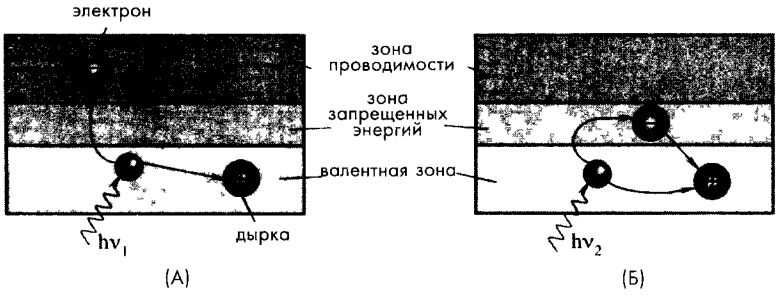


Рис. 14.1. Фотоэффект в полупроводниках с участием: А – фотонов с высокой энергией, Б – фотонов с низкой энергией

На рис. 14.1А показаны зоны энергий в полупроводниковом материале, здесь E_g – ширина запрещенной зоны, измеряемая в электронвольтах (эВ). Нижняя зона называется *валентной зоной*, которая соответствует электронам, связанным с кристаллической решеткой материала. В случае кремния или германия эти электроны участвуют в формировании ковалентных связей, обуславливающих внутриатомные связи внутри кристалла. Самый верхний слой называется *зоной проводимости*. Эта зона соответствует электронам, свободно перемещающимся по крис-

таллу. Электроны с такими энергиями участвуют в обеспечении электропроводности материала. Между этими зонами лежит *зона запрещенных энергий*, ширина которой определяется типом материала: либо полупроводника, либо диэлектрика. Количество электронов внутри кристалла соответствует полному заполнению всех возможных мест в валентной зоне. При отсутствии теплового возбуждения и у полупроводников, и у диэлектриков валентная зона является полностью заполненной, а зона проводимости – полностью пустой. В таких воображаемых условиях ни один из этих материалов не будет обладать электропроводностью.

В металлах энергетические уровни в зоне проводимости являются не полностью заполненными. Поэтому электроны могут свободно перемещаться внутри материала, поскольку для перехода с уровня на уровень им не требуется обладать очень высокой энергией. Этим объясняется высокая электропроводность металлов. В диэлектриках и полупроводниках для того чтобы попасть в зону проводимости, электронам приходится сначала преодолевать зону запрещенных энергий, которая для диэлектриков составляет порядка 5 эВ и более, а для полупроводников несколько ниже (см. таблицу 14.1). Этим и объясняется тот факт, что электропроводность полупроводников (не говоря уже о диэлектриках) на несколько порядков ниже, чем у металлов.

Таблица 14.1. Ширина зоны запрещенных энергий (эВ) и максимальные длины волн для различных полупроводников

материал	ширина зоны запрещенных энергий, эВ	максимальная длина волны, мкм
ZnS	36	0 345
CdS	2 41	0 52
CdSe	1 8	0 69
CdTe	1 5	0 83
Si	1 12	1 10
Ge	0 67	1 85
PbS	0 37	3 35
InAs	0 35	3 54
Te	0 33	3 75
PbTe	0 3	4 13
PbSe	0 27	4 58
InSb	0 18	6 90

Источник [1]

Если фотон, обладающий высокой энергией (большой частотой), ударяется о кристалл (рис. 14.1А), он выбивает из его валентной зоны электрон и передает ему достаточное количество кинетической энергии, чтобы он мог перескочить зону запрещенных энергий и попасть в зону проводимости, т.е. на более высокий энергетический уровень. В зоне проводимости электрон является свободным носителем заряда. Недостаток электрона в валентной зоне означает появление

там дырки, которая тоже может рассматриваться как свободный носитель противоположного электрону заряда. Увеличение количества дырок выражается в уменьшении удельного сопротивления материала. На рис. 14.1Б показано, что происходит, когда фотон обладает низкой энергией, недостаточной для преодоления электроном зоны запрещенных энергий. Как видно из рисунка, в этом случае свободные носители зарядов не образуются.

Ширина зоны запрещенных энергий служит тем порогом, ниже которого материал не является фоточувствительным. Однако не следует представлять порог в виде резкой границы. Во время фотоэффекта всегда выполняется закон сохранения моментов движения. Момент движения и плотность дырок и электронов в зонах валентности и проводимости являются максимальными в центре и падают до нуля у верхнего и нижнего краев зон. Поэтому вероятность возбужденному в валентной зоне электрону найти место в зоне проводимости гораздо выше в центре зон, чем по краям. Поэтому спектральная фоточувствительность материала начинает расти с энергии фотона E_g, постепенно доходит до максимума и потом снова падает до нуля при энергии, соответствующей разности между нижней энергией валентной зоны и верхней энергией зоны проводимости. Типовая спектральная характеристика полупроводникового материала показана на рис. 14.2. При введении в материал определенных примесей можно менять фоточувствительность материала. Этот способ можно использовать для изменения формы или получения сдвига спектральной характеристики кристалла. Все приборы, напрямую преобразующие фотоны электромагнитных излучений в носители зарядов, называются *квантовыми детекторами*. К таким устройствам относятся фотодиоды, фототранзисторы и фоторезисторы.

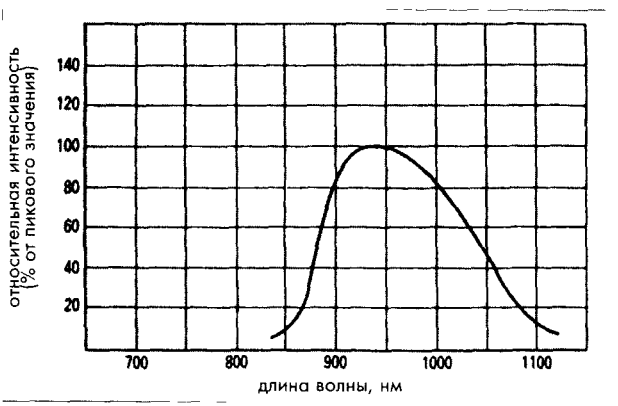


Рис. 14.2. Спектральная характеристика ИК фотодиода

При сравнении характеристик разных фотодетекторов рассматриваются следующие параметры:

Эквивалентная мощность шума (ЭМШ) – это количество света, эквивалентное уровню собственного шума детектора. Другими словами, ЭМШ – это уровень света, необходимый для получения отношения сигнал/шум, равного единице. Поскольку уровень шума пропорционален квадратному корню из ширины полосы пропускания, единицей измерения ЭМШ является Вт/$\sqrt{\text{Гц}}$:

$$ЭМШ = \frac{ток\ шума\ (A/\sqrt{Гц})}{чувствительность\ к\ излучению\ при\ \lambda_p\ (A/Вт)}. \qquad (14.4)$$

Обнаруживающая способность детектора D^* определяется площадью его чувствительного элемента и эквивалентной мощностью шума:

$$D^* = \sqrt{\frac{Площадь(см^2)}{ЭМШ}}. \qquad (14.5)$$

Обнаруживающая способность – это еще один способ определения отношения сигнал/шум датчика. D^* не является постоянной величиной во всем спектральном диапазоне рабочих частот, поэтому она определяется для конкретных частот. Единицей измерения обнаруживающей способности является см· $\sqrt{Гц}$/Вт. Считается, что чем выше D^*, тем лучше детектор

Длина волны среза (λ_c) – это максимальная рабочая длина волны спектральной характеристики, которая часто определяется как длина волны, при которой обнаруживающая способность падает на 10% от ее пикового значения.

Максимальный ток определяется для фотопроводящих детекторов, которые работают на постоянном токе. Рабочий ток никогда не должен превышать этого значения.

Максимальное обратное напряжение определяется для Ge и Si фотодиодов фотопроводящих ячеек. Превышение этого напряжения может привести к пробою фотодетектора и к значительному ухудшению его рабочих характеристик.

Чувствительность – это отношение выходного фототока (или выходного напряжения) к мощности падающего излучения при заданной длине волны. Единицей измерения чувствительности является либо А/Вт, либо В/Вт

Поле обзора – угловая мера пространства, в котором датчик реагирует на излучение

Емкость перехода C_j – аналогична емкости конденсатора с параллельными пластинами. Ее необходимо учитывать при исследованиях быстродействующих процессов.

14.2. Фотодиоды

Фотодиоды – это полупроводниковые оптические датчики. Это понятие включает в себя даже солнечные батареи. Однако в этом разделе вопросы преобразования мощности рассматриваться не будут. В упрощенном виде принцип действия фотодиодов можно описать следующим образом. При воздействии излучения соответствующей частоты на прямо смещенный p-n переход (в котором положительный вывод батареи подключен к зоне *p*), ток через фотодиод возрастет незначительно по сравнению с темновым током. Другими словами, ток смещения в этом случае будет намного превышать ток, генерируемый светом. При обратном смещении p-n перехода (рис. 14.3) ток возрастает очень сильно. Столкновение фотонов с поверхностью фотодиода приводит к образованию пар электрон-дырка на обоих концах перехода. При попадании электронов в зону проводимости, они начинают лететь в сторону положительного полюса батарей. Соответственно, созданный поток дырок направляется к отрицательному полюсу. Это означает появление в цепи фотодиода тока i_p. В темноте ток утечки i_0 не

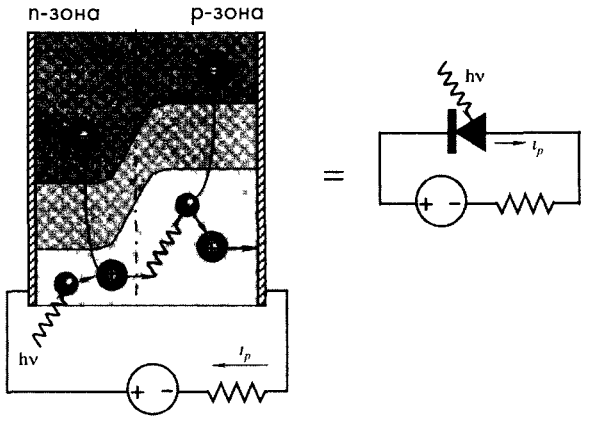


Рис. 14.3. Структура фотодиода

зависит от приложенного напряжения, а причиной его возникновения является тепловая генерация носителей зарядов. На рис. 14.4А показана эквивалентная электрическая схема обратно смещенного фотодиода, состоящая из двух источников тока и *RC*-цепи.

Процесс оптического детектирования заключается в прямом преобразовании оптической энергии (в виде потока фотонов) в электрический сигнал (поток электронов). Если вероятность того, что фотон, обладающий энергией hv, выбьет с поверхности детектора электрон, равна η, средняя скорость формирования электронов $<r>$ определяется следующим выражением [2].

$$< r >= \frac{\eta P}{hv}, \qquad (14\,6)$$

где P – оптическая мощность падающих лучей. При постоянной средней скорости формирования электронов вследствие воздействия на поверхность детектора потока фотонов, этот процесс носит случайный характер и подчиняется статистическому закону Пуассона. Поэтому вероятность образования m электронов в течение интервала измерения τ находится при помощи формулы:

$$p(m,\tau) = (< r > \tau)^m \frac{1}{m!} e^{<r>\tau} \qquad (14\,7)$$

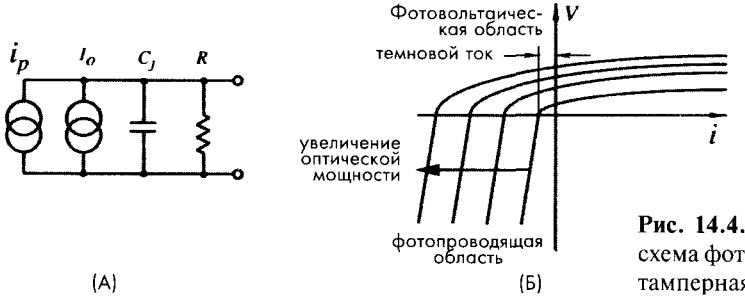


Рис. 14.4. А – эквивалентная схема фотодиода, Б – его вольтамперная характеристика

Статистические соотношения используются для определения минимального уровня детектирования сигнала, а, значит, и для нахождения чувствительности датчика. Однако, следует отметить, что *электрический ток пропорционален оптической мощности падающего на детектор излучения*:

$$i = < r > e = \frac{\eta e P}{h\nu}, \tag{14.8}$$

где e – заряд электрона. Изменение входной мощности на ΔP (например, из-за модуляции интенсивности в датчике) приводит к изменению выходного тока на Δi. Поскольку мощность пропорциональна квадрату тока, выходная электрическая мощность детектора связана с входной оптической мощностью квадратичной зависимостью, поэтому фотодиоды иногда называют квадратичными преобразователями.

На рис. 14.4Б показана вольтамперная характеристика типового фотодиода. Если к диоду при разомкнутой цепи подключить вольтметр, обладающий высоким входным импедансом, можно увидеть, что при увеличении оптической мощности, напряжение меняется по нелинейной (логарифмической) зависимости. При коротком замыкании цепи ($V = 0$) (например, когда диод подключается к преобразователю ток-напряжение – см. рис.5.10Б главы 5), ток связан с оптической мощностью линейной зависимостью. Вольтамперную характеристику фотодиода можно описать выражением:

$$i = i_0(e^{eV/k_bT)} - 1) - i_s, \tag{14.9}$$

где i_0 – обратный темновой ток, возникающий из-за тепловой генерации пар электрон-дырка, i_s – ток, соответствующий детектируемому оптическому сигналу, κ_b – постоянная Больцмана, а T – абсолютная температура. Объединяя уравнения (14.8) и (14.9), получим выражение:

$$i = i_0(e^{eV/k_bT)} - 1) - \frac{\eta e P}{h\nu}, \tag{14.10}$$

полностью описывающее работу фотодиода. Эффективность прямого преобразования оптической мощности в электрический сигнал всегда низкая. Обычно она лежит в пределах 5...10%, однако, в 1992 появилось сообщение о разработке фотоэлементов, обладающих эффективностью порядка 25%. Правда, при проектировании датчиков фотоэлементы, как правило, не используются. Вместо этого для повышения эффективности фотодиодов между p и n зонами диода вводят дополнительный слой, обладающий высоким удельным сопротивлением (I-слой). Такие диоды называются PIN-фотодиодами (рис. 14.5). Глубина, на которую фотон может проникать внутрь фотодиода, определяется его длиной волны. От значения этой величины зависит спектральная характеристика детектора (рис. 14.2).

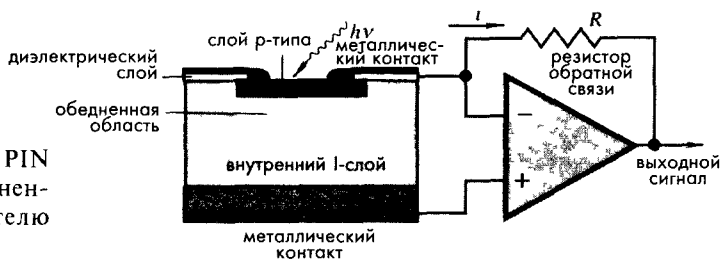


Рис. 14.5. Структура PIN фотодиода, подсоединенного к преобразователю ток-напряжение

В зависимости от назначения и конструкции все фотодиоды можно разделить на следующие группы:

1. PN фотодиоды, На внешнюю поверхность этих диодов наносится слой из SiO_2 (рис. 14.6А). Такие фотодиоды обладают низким уровнем темнового тока. Для увеличения быстродействия диодов увеличивают обедненную зону, что позволяет снизить емкость перехода (рис. 14.6Б). Для улучшения чувствительности диодов к УФ излучению снижают толщину p-слоя. На рис. 14.6В показан планарный диффузионный фотодиод типа pnn^+, имеющий низкую чувствительность к ИК излучению. Однако при уменьшении длины волны его чувствительность значительно возрастает; это объясняется тем, что толстый низкорезистивный слой n^+ кремния передвигает границу nn^+ слоя ближе к обедненной зоне.

2. PIN фотодиоды (рис. 14.6Г). Они являются улучшенной версией планарных диффузионных диодов с низкой емкостью. В них для увеличения быстродействия между *p* и *n* слоями формируется дополнительный *I* слой, обладающий высоким удельным сопротивлением. При обратном смещении перехода такие устройства работают даже лучше. PIN имеют низкий ток утечки и высокое напряжение пробоя.

3. Фотодиоды Шотки (рис. 14.6Д). В них на n-слой напыляется тонкий слой золота, позволяющий реализовать барьер Шотки. Из-за маленького расстояния между внешней поверхностью и барьером чувствительность к УФ излучению таких диодов очень высокая.

4. Лавинные фотодиоды (рис. 14.6Е). Свое название эта группа диодов получила из-за следующего явления: Если к p-n переходу приложено обратное напряжение, в обедненной зоне возникает сильное поле Это поле заставляет фотоны двигаться с большим ускорением, в результате чего их столкновение с атомами приводит к образованию вторичных носителей зарядов, которые также ускоряются и выбивают из атомов новые электроны и т.д. Благодаря такому лавинному процессу, ток через фотодиод значительно возрастает. Такие устройства работают как усилители, что делает их незаменимыми при детектировании очень низких уровней светового излучения.

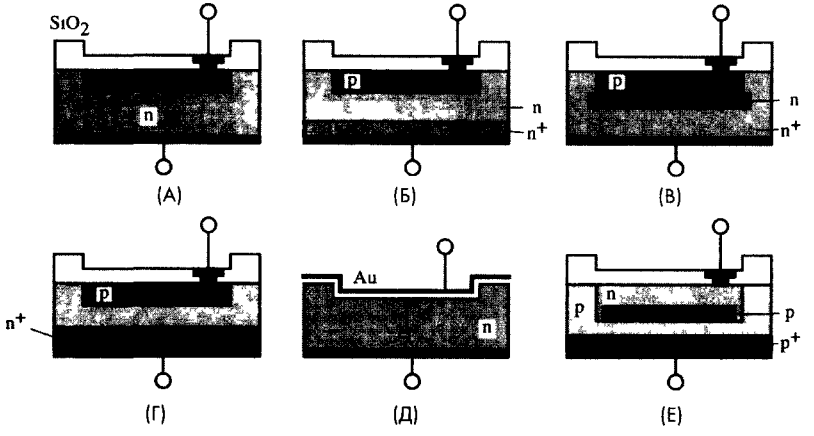


Рис. 14.6. Упрощенные структуры шести типов фотодиодов

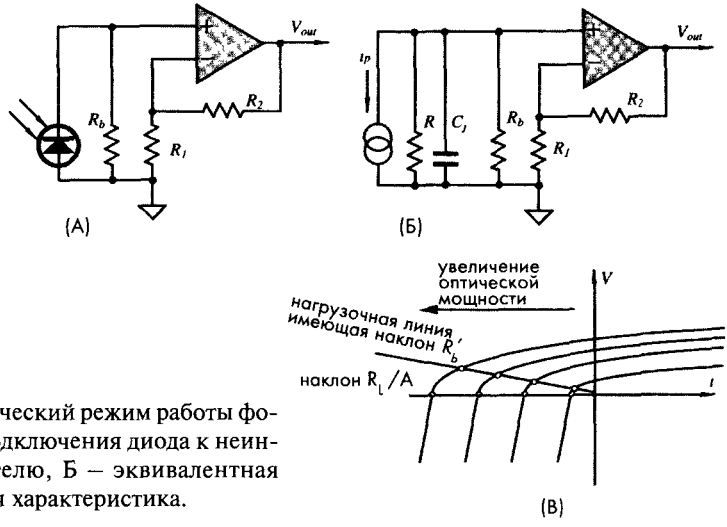


Рис. 14.7. Фотоэлектрический режим работы фотодиода: А – способ подключения диода к неинвертирующему усилителю, Б – эквивалентная схема, В – нагрузочная характеристика.

Существуют два основных режима работы фотодиодов: *фотоэлектрический* и *фотопроводящий*. В первом случае к фотодиоду не прикладывается никакого напряжения смещения. Это приводит к отсутствию темнового тока, поэтому здесь присутствует только тепловой шум. Такой режим дает возможность получить наилучшую чувствительность при низких уровнях излучения. Однако из-за увеличения емкости перехода ухудшаются быстродействие диода и чувствительность к излучениям длинных длин волн.

На рис. 14.7А показано включение фотодиода для работы в фотоэлектрическом режиме. Здесь диод выполняет роль токового генератора, вырабатывающего ток i_p (рис. 14.7Б). Нагрузочный резистор R_b, стоящий на входе ОУ, определяет напряжение на выводах фотодиода и наклон нагрузочной характеристики (рис. 14.7В).

В быстродействующих устройствах использование фотодиода в фотоэлектрическом режиме невозможно (из-за его большой емкости перехода C_j). При работе фотодиода с резистивной нагрузкой, как показано на рис. 14.7А, его полоса пропускания ограничивается, в основном, внутренней емкостью C_j. Фотодиод, фактически, является источником тока, а резистор R, обладающий большим сопротивлением, и емкость перехода шунтируют его. Значение емкости C_j в зависимости от площади фотодиода лежит в интервале 2...20000 пФ. Параллельно ей подключена входная емкость ОУ (на рисунке не показана), поэтому общая емкость C равна сумме двух емкостей. Сопротивлением диода, как правило, можно пренебречь, поскольку оно почти всегда гораздо ниже нагрузочного сопротивления R_b, поэтому $R_L \approx R_b$. Частотная характеристика схемы определяется ее входными цепями. Частота излома АЧХ и выходное напряжение определяются выражениями [4]:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R_L C},$$

$$V_{out} = \frac{-R_L i_p}{1 + j\dfrac{f}{f_1}}. \qquad (14.11)$$

Из этих выражений видно, что при расчете такой схемы всегда приходится искать компромисс между коэффициентом усиления и полосой пропускания. Это связано, с тем увеличение R_b приводит, с одной стороны, к росту коэффициента усиления, а, с другой стороны, к уменьшению частоты f_1. Это противоречие возникает из-за того, что напряжение сигнала подается не только на резистивную нагрузку, но и на входную емкость $C = C_j + C_{OY}$. Поэтому желательно разработать такую схему включения фотодиода, в которой напряжение поступало бы только на резистор и не заряжало бы емкости. Вариант такой схемы показан на рис. 14.8А. По своей сути эта схема является линейным преобразователем тока в напряжение. ОУ при помощи резистора ОС R_L преобразует ток диода в выходное напряжение. Конденсатор C_L введен в схему для компенсации сдвига фаз. В идеальном усилителе напряжения на обоих входах ОУ должны иметь одинаковые значения, поэтому при таком включении инвертирующий вход иногда называется виртуальной землей. Таким образом, в этой схеме фотодиод работает при нулевом напряжении на его выводах, что позволяет предотвратить заряд конденсатора и улучшить линейность преобразователя. Поскольку наклон линии обратно пропорционален коэффициенту усиления A ОУ с разомкнутой ОС, нагрузочная линия должна виртуально совпадать с осью тока. Это проиллюстрировано на рис. 14.7Б.

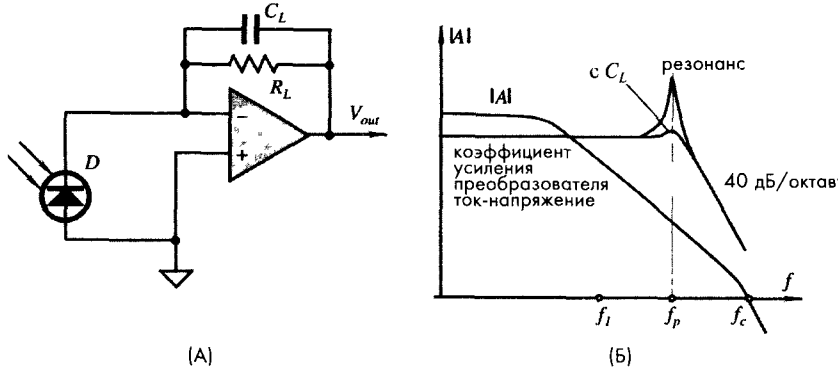


Рис. 14.8. Применение преобразователя тока в напряжение (А) и АЧХ двух схем включения фотодиодов (Б)

Однако на практике из-за большого, но конечного значения коэффициента усиления ОУ на выводах диода появляется небольшое напряжение. Поэтому частота излома АЧХ, на самом деле, определяется как:

$$f_p = \frac{A}{2\pi R_L C} \approx A f_1, \qquad (14.12)$$

где A – коэффициент усиления ОУ с разомкнутой ОС. Очевидно, что в этой схеме частота излома АЧХ увеличичивается по сравнению с f_1 в A раз. Следует отметить, что с ростом частоты коэффициент усиления A падает, а виртуальная нагрузка фотодиода становится индуктивной. Это происходит из-за фазового сдвига коэффициента усиления A. В большей части эффективного частотного диапазона усилителя коэффициент A имеет отставание по фазе, равное 90°. Когда усилитель инвертирует фазу на 180°, фазовое отставание коэффициента A превращается в опережение на 90°, что характерно для индуктивного импеданса. Такая индуктивная нагрузка и емкость входной цепи образуют колебательный контур с резонансной частотой f_p (рис. 14.8Б), наличие которого может на определенных частотах привести к возникновению колебаний выходного сигнала (рис. 14.9) нестабильности работы схемы. Для повышения стабильности схемы в цепь ОС параллельно резистору ставят компенсационный конденсатор C_L. Величина этого конденсатора определяется при помощи выражения:

$$C_L = \frac{1}{2\pi R_L f_p} = \sqrt{CC_c}\,, \qquad (14.13)$$

где $C_c = 1/(2\pi R_L f_c)$, а f_c – частота, соответствующая единичному коэффициенту усиления ОУ. На высоких частотах конденсатор C_L повышает сигнал на инвертирующем входе ОУ из-за шунтирования R_L.

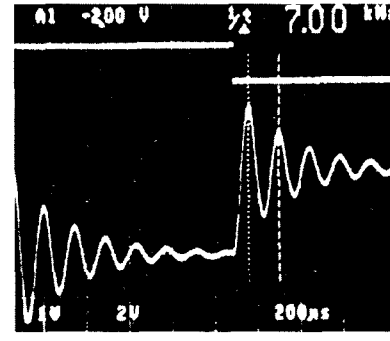


Рис. 14.9. Выходной сигнал фотодиода без использования компенсационной цепи. *(Напечатано с разрешения Hama-matsu Photonics K.K.)*

При использовании фотодиодов для детектирования низких уровней света необходимо внимательно рассчитывать шумовой порог. В фотодиодах основными являются два типа шумов: дробовой шум и шум Джонсона (см. раздел 5.9 главы 5). Также надо учитывать шумы ОУ и его навесных элементов (см. уравнение (5.75) главы 5).

При работе фотодиода в фотопроводящем режиме на него подается обратное напряжение смещения. Это ведет к расширению обедненной зоны, снижению емкости перехода, уменьшению последовательного сопротивления, сокращению времени нарастания сигнала и формированию линейной зависимости фототока от интенсивности излучений в широком диапазоне измеряемых значений. Однако при увеличении обратного смещения возрастает темновой ток, что ведет к усилению дробового шума. На рис. 14.10А показана схема включения фотодиода для работы в фотопроводящем режиме, а на рис. 14.10Б приведена нагрузочная характеристика диода. Обратное смещение фотодиода сдвигает нагрузочную линию в третий квадрант, где линейность вольтамперной характеристики выше, чем при работе в фотоэлектрическом режиме. Линия нагрузки пересекает ось напряжений в точке, соответствующей напряжению смещения E, а ее наклон обратно пропорционален коэффициенту усиления ОУ

без ОС. Верхний предел полосы пропускания фотодиода в фотопроводящем режиме достигает сотен мегагерц, что сопровождается увеличением отношения сигнал/шум.

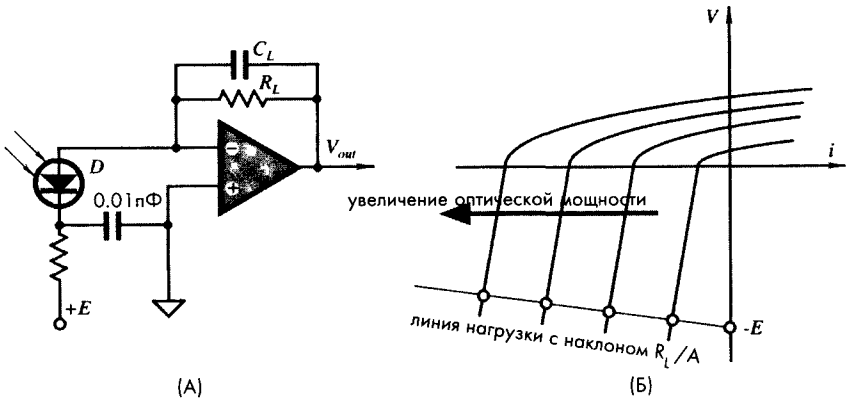


Рис. 14.10. Фотопроводящий режим работы фотодиодов: А – схема, Б – нагрузочная характеристика

14.3. Фототранзистор

Фотодиод напрямую преобразует фотоны в носители зарядов – один фотон образует одну пару электрон-дырка. Фототранзисторы помимо фотоэлектрического преобразования выполняют функцию усиления тока, что значительно повышает чувствительность детектора. Переход коллектор-база является обратно смещенным диодом, работающим как описано в предыдущем разделе. При включении транзистора в схему с источником питания (батареей), внутри контура, в состав которого входит переход база-эмиттер, начинает течь фотоиндуцированный ток. Усиление тока в фототранзисторе происходит также как в традиционном биполярном транзисторе. В результате этого коллекторный ток значительно возрастает.

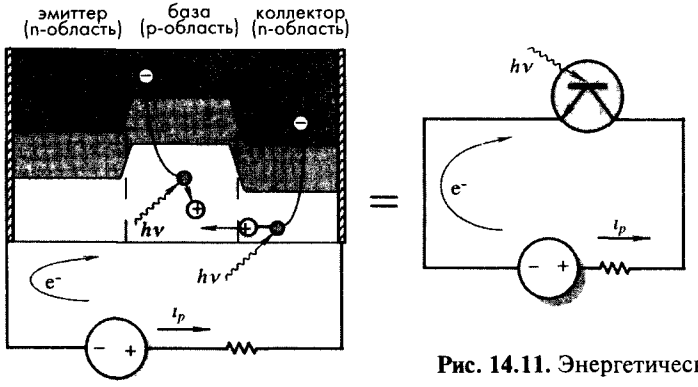


Рис. 14.11. Энергетические зоны фототранзистора

На рис. 14.11 показаны энергетические зоны фототранзистора. Фотоиндуцированный ток базы возвращается на коллектор через эмиттер и внешнюю часть схемы. При этом электроны, попадающие в базовую область со стороны эмиттера, выталкиваются электрическим полем в зону коллектора. Чувствительность фототранзистора определяется эффективностью работы перехода база-коллектор и коэффициентом усиления по постоянному току транзистора. Поэтому можно утверждать, что чувствительность является функцией коллекторного тока.

Коллекторный ток связан с окружающей температурой линейной зависимостью с положительным наклоном, равным 0.00667/°C. Поскольку температурный коэффициент фототока коллектор-база составляет только ≈0.001/°C, такая температурная зависимость коллекторного тока, в основном, объясняется ростом коэффициента усиления по току при увеличении температуры. Вольтамперные характеристики фототранзисторов (зависимости коллекторного тока от напряжения на коллекторе) имеют тот же вид, что и у обычных транзисторов. Поэтому для расчета схем с фототранзисторами можно применять традиционные методы разработки транзисторных цепей, за исключением того, что здесь база является входом для фотоиндуцированного тока, текущего со стороны коллектора. Фотоэлектрический процесс протекает, в основном, в зоне коллектор-база, поэтому чем шире эта область, тем больше носителей зарядов будет образовано. Очевидно, что всегда надо стремиться увеличивать, насколько это возможно, площадь окошка для попадания света. Фототранзисторы бывают двух типов: с двумя и тремя выводами. В последнем случае фототранзистор может использоваться не только как фоточувствительный элемент, но и как обычный биполярный транзистор, что обеспечивает разработчику дополнительную гибкость при проектировании электронных цепей. Однако в качестве фотодатчиков чаще применяются фототранзисторы с двумя выводами.

На рис. 14.12 показана эквивалентная схема фототранзистора с плавающей базой. Два конденсатора C_e и C_c соответствуют емкостям переходов база-эмиттер и база-коллектор и являются факторами, ограничивающими быстродействие устройства. Максимальную частоту рабочего диапазона можно оценить при помощи выражения:

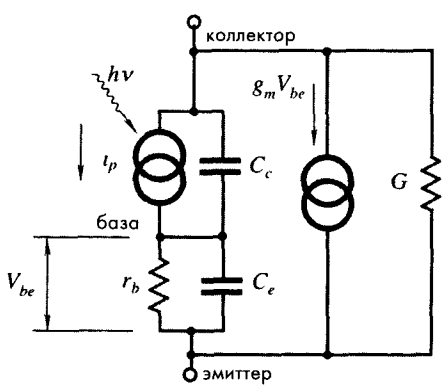


Рис. 14.12. Эквивалентная схема фототранзистора

$$f_1 \approx \frac{g_m}{2\pi C_e}, \qquad (14.14)$$

где f_1 определяется произведением тока, коэффициента усиления и полосы пропускания, а g_m – крутизна характеристики прямой передачи транзистора.

Для повышения чувствительности фотодетектора, особенно когда нет потребности в высоком быстродействии устройства, рекомендуется применять интегрированный детектор Дарлингтона. Такой детектор состоит из фототранзистора, эмиттер которого соединен с базой биполярного транзистора. Коэффициент усиления схемы Дарлингтона равен произведению коэффициентов усиления двух транзисторов, что позволяет значительно увеличить чувствительность фотодетектора.

Для многих применений очень важной характеристикой является пространственное разрешение как источника света, так и детектора. Оптические компоненты позволяют существенно повысить эффективность работы фотодетекторов. Давайте, например, рассмотрим точечный источник света, который необходимо обнаружить при помощи фотодетектора (рис. 14.13А). Из уравнения (14.10) видно, что выходной сигнал датчика пропорционален световой мощности принятого излучения, которая, в свою очередь, пропорциональна площади поверхности приемника. На рис. 14.13Б показан способ значительного увеличения площади при помощи фокусирующей линзы. Эффективность одиночной линзы определяется ее коэффициентом преломления n. Суммарное повышение чувствительности можно оценить по уравнениям (4.5) и (4.8) из главы 4:

$$k \approx \frac{A}{a}\left[1-2\left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2\right], \tag{14.15}$$

где A и a – эффективные площади линзы и чувствительной зоны фотодетектора. Для стекла и большинства пластмасс при работе в видимом и ближнем ИК спектральных диапазонах это выражение может быть значительно упрощено:

$$k \approx 0.92\frac{A}{a}. \tag{14.16}$$

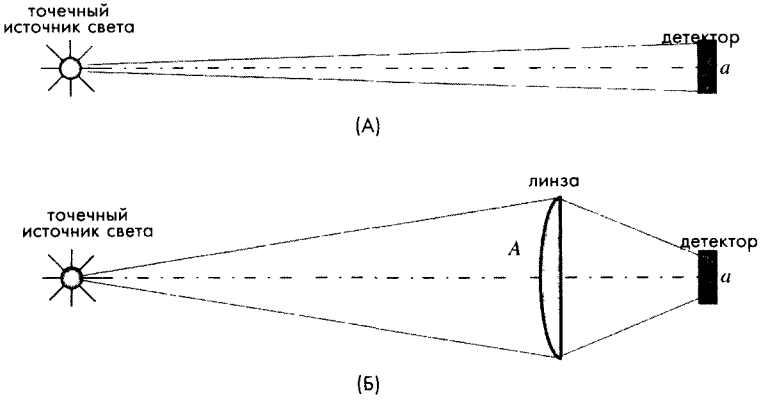


Рис. 14.13. Эффективность детектора зависит от площади поверхности чувствительной зоны a (А) и площади фокусирующей системы А (Б)

Следует отметить, что для эффективной работы всей системы необходимо внимательно рассчитать местоположение линзы, в противном случае, она может принести больше вреда, чем пользы. Например, многие фотодетекторы имеют встроенные линзы для работы с параллельными лучами. Дополнительная линза, поставленная перед таким детектором, приведет к появлению непараллельности лучей на входе фотодатчика, в результате чего произойдет рассогласование оптической системы и ухудшение ее рабочих характеристик. Поэтому при применении дополнительных оптических устройств всегда необходимо учитывать собственные оптические характеристики детектора.

14.4. Фоторезисторы

Также как и фотодиод, фоторезистор является фотопроводящим устройством. Для изготовления фоторезисторов, как правило, применяется сульфид кадмия (CdS) и селенид кадмия (CdSe) (информация о CdS фоторезисторах приводится с разрешения Hamamatsu Photonics K.K). Эти материалы являются полупроводниками, сопротивление которых меняется при попадании на их поверхность света, т.е. фотоэффект здесь заключается в изменении удельного сопротивления материала. Очевидно, что фоторезисторы необходимо подключать к источникам питания. На рис. 14.4А показана схема фоторезистивного элемента. Из рисунка видно, что в нем на поверхности двух противоположных концов фотопроводника нанесены электроды. В темноте такой элемент имеет очень высокое сопротивление, и, следовательно, при подключении к нему источника напряжения V, темновой ток в цепи, наличие которого объясняется тепловыми явлениями, будет очень низким. При попадании света на поверхность фоторезиста, в цепи потечет ток i_p.

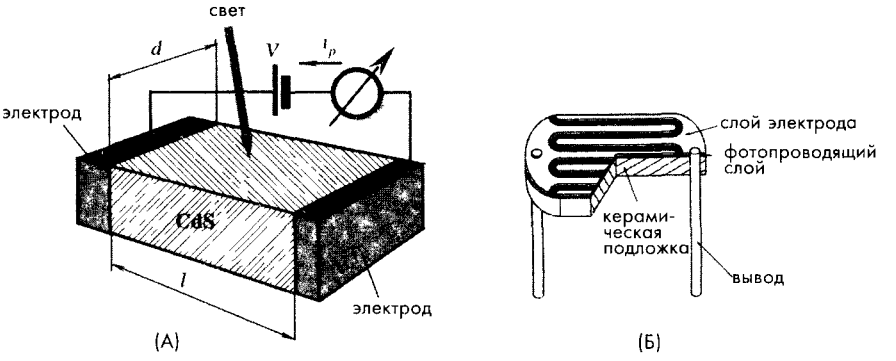


Рис. 14.14. Структура фоторезистора (А); фоторезистор серпантинной формы (Б)

Причина увеличения тока заключается в следующем. Непосредственно под зоной проводимости кристалла находится донорный уровень, а над валентной зоной располагается акцепторный уровень. В условиях темноты эти уровни являются практически заполненными электронами и дырками, что объясняет высокое сопротивление полупроводникового кристалла.

При освещении фотопроводящего кристалла его материал поглощает летящие фотоны, в результате чего энергия электронов валентной зоны возрастает, что позволяет им переместиться в зону проводимости. При этом в валентной зоне остаются свободные дырки. Этот процесс и объясняет повышение удельной проводимости материала. Акцепторный уровень, расположенный рядом с валентной зоной, не может удержать электроны, поэтому в валентном слое происходит не так много рекомбинаций пар электрон-дырка, а количество свободных электронов в зоне проводимости значительно возрастает. Поскольку ширина зоны запрещенных энергий для CdS составляет 2.41 эВ, длина волны границы поглощения равна $\lambda=c/\nu\approx515$ нм, т.е. находится в видимом спектральном диапазоне. Следовательно, при помощи CdS-резисторов можно детектировать излучение с длиной волны, меньшей 515 нм. Другие фоторезистивные материалы имеют иные значения предельных длин волн. Например, Si и Ge наиболее эффективны в ближнем ИК диапазоне излучений.

Проводимость полупроводника определяется выражением:

$$\Delta\sigma = ef(\mu_n\tau_n + \mu_p\tau_p), \tag{14.17}$$

где μ_n и μ_p – коэффициенты подвижности свободных электронов и дырок (см/В×с), а τ_n и τ_p – продолжительности жизни электронов и дырок (с), e – заряд электрона, а f – количество образующихся носителей заряда в единице объема в течение одной секунды. Для CdS элементов $\mu_n\tau_n >> \mu_p\tau_p$, поэтому проводимостью за счет дырок можно пренебречь, а датчики считать полупроводниками n-типа. Тогда становится справедливым уравнение:

$$\Delta\sigma = ef\mu_n\tau_n. \tag{14.18}$$

Чувствительность b фоторезистора может быть выражена через количество электронов, образованных при поглощении одного фотона (за время жизни электрона):

$$b = \frac{\tau_n}{t_t}, \tag{14.19}$$

где $t_t = l^2/V\mu_n$ – время пролета электроном расстояния между электродами l, а V – приложенное напряжение. Отсюда можно вывести еще одно выражение:

$$b = \frac{\mu_n\tau_n V}{l^2}. \tag{14.20}$$

Например, при μ_n = 300 см^2/В×с, $\tau_n = 10^{-3}$с, l = 0.2 мм, а V=1.2 В, чувствительность будет равна 900. Это означает, что при поглощении одного фотона происходит высвобождение 900 электронов, обеспечивающих проводимость материала. Отсюда видно, что фоторезистор является очень чувствительным детектором, работающим как фотоумножитель.

Можно показать, что для улучшения чувствительности и снижения сопротивления резистивного элемента расстояние между электродами необходимо уменьшать, а ширину детектора d – увеличивать. Для выполнения этих условий детектор должен быть очень коротким и очень широким. Для этого фотодетектору часто придают форму серпантина (рис. 14.14Б).

В зависимости от методов изготовления фоторезистивные элементы можно разделить на три группы: монокристаллические, спеченные и напыленные. Спеченные фоторезистивные элементы обладают наибольшей чувствительностью и простотой формирования больших чувствительных зон, а также сравнительно низкой стоимостью. Технология изготовления CdS элементов состоит из следующих этапов:

1. Порошок CdS высокой чистоты смешивается с соответствующими компонентами и флюсом
2. Полученная смесь растворяется в воде
3. Раствор в виде пасты наносится на поверхность керамической подложки и выдерживается некоторое время до высыхания
4. После этого подложка с нанесенной пастой помещается в печь с высокой температурой, где происходит процесс спекания для получения структуры, состоящей из нескольких кристаллов. На этом этапе происходит формирование фотопроводящего слоя.
5. На полученную структуру наносятся электроды и крепятся выводы
6. Датчик размещается в пластиковом или металлическом корпусе с или без окошка.

Для изменения спектральной характеристики фоторезистора в смесь порошка, формируемую на первом этапе, вводят некоторые добавки. Например, введение селенида или даже замена CdS на CdSe приводит к сдвигу спектральной характеристики в область более длинных волн (в оранжевый и красный диапазон).

Две схемы, показанные на рис. 14.15, приведены для иллюстрации способов применения фоторезисторов. Схема А является схемой автоматического включения света при снижении освещенности (часть схемы, выключающей свет на рисунке не показана). Схема Б соответствует схеме маяка, реализованного на основе мультивибратора, включающегося в темноте при повышении сопротивления фоторезистора.

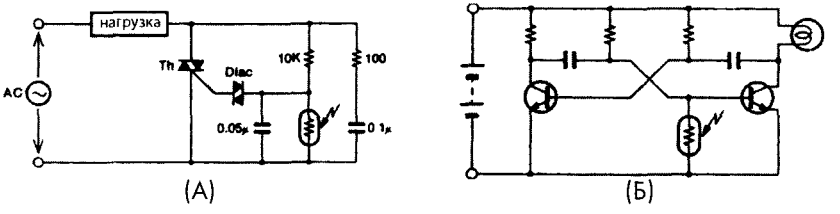


Рис. 14.15. Примеры применения фоторезисторов: А – схема управления включением света, Б – схема маяка.
(Напечатано с разрешения Hamamatsu Photonics K.K)

14.5. Охлаждаемые детекторы

Для работы с объектами, испускающими фотоны с энергией в диапазоне 2 эВ и выше, подходят квантовые детекторы, используемые при комнатной температуре. Для меньших энергий (для более длинных волн) требуются полупроводниковые устройства, обладающие более узкой зоной запрещенных энергий. Однако

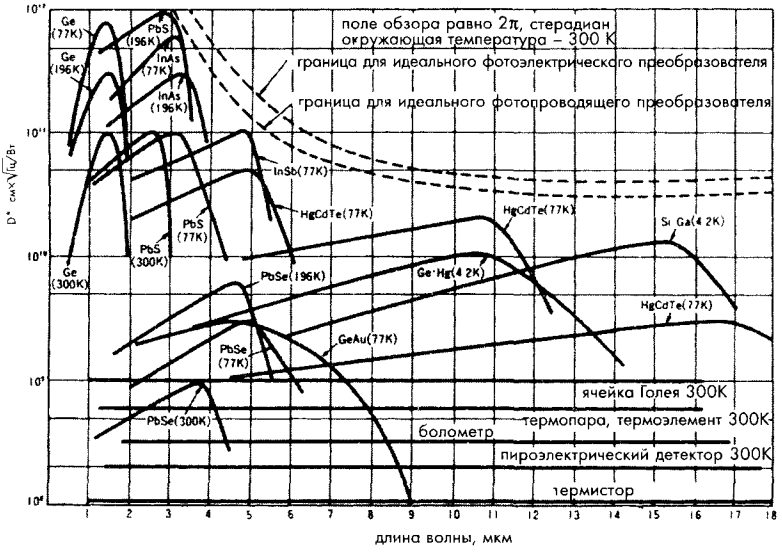


Рис. 14.16. Рабочие диапазоны некоторых ИК детекторов

даже в квантовых детекторах с достаточно небольшой зоной запрещенных энергий при комнатной температуре собственные внутренние шумы намного превышают полезный сигнал. Другими словами, детектор в этом случае будет измерять собственное тепловое излучение. Уровень шума зависит от температуры, поэтому при детектировании фотонов с низкой энергией отношение сигнал/шум может стать таким маленьким, что о точности измерений говорить не приходится. По этой причине при работе в среднем и дальнем ИК спектральном диапазоне детектор не только должен обладать узкой зоной запрещенных энергий, но его необходимо охлаждать до температуры, при которой внутренние шумы уменьшаются до приемлемого уровня. На рис. 14.16 показаны типичные спектральные характеристики некоторых детекторов с рекомендуемыми рабочими температурами. Принцип действия криогенно охлаждаемых детекторов почти такой же как, и у фоторезисторов, за исключением того, что они определяют излучение больших длин волн и работают при значительно более низких температурах. Поэтому конструкции охлаждаемых детекторов и фоторезисторов сильно отличаются друг от друга. В зависимости от требуемой чувствительности и рабочей длины волны выбирается один из следующих типов охлаждаемых детекторов, изготовливаемых на основе: сульфида свинца (PbS), арсенида индия (InAs), германия (Ge), селенида свинца (PbSe) или сплава МСТ из ртути-кадмия-теллурида (HgCdTe).

Охлаждение смещает частотные характеристики в сторону больших длин волн и улучшает чувствительность детектора. Однако быстродействие PbS и PbSe детекторов при охлаждении несколько снижается. В детекторах для понижения температуры могут применяться разные методы: охлаждение сухим льдом, жидким азотом или сжиженным гелием (рис. 14.17), а также термоэлектрическое охлаждение, основанное на эффекте Пельтье (см. раздел 3.9 главы 3). В таблице 14.2 приведены типичные характеристики МСТ детекторов.

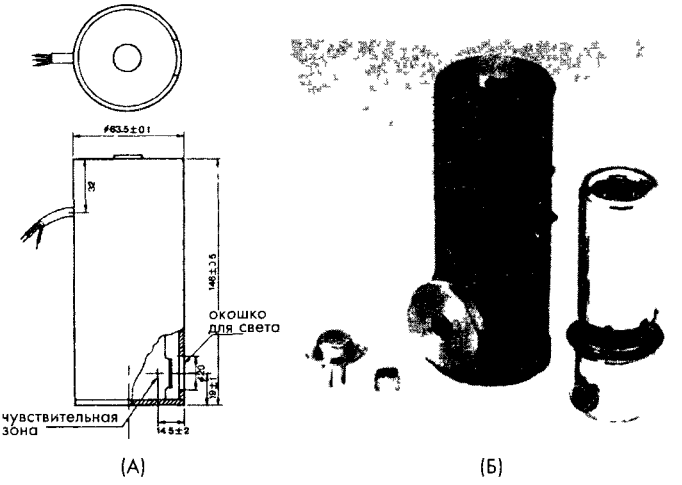


Рис. 14.17. Криогенно охлаждаемые МСТ квантовые ИК детекторы: А – чертеж детектора с охладителем Дьюара (размеры приведены в мм), Б – внешний вид детектора Дьюара и герметичного датчика излучений *(Напечатано с разрешения Hamamatsu Photonics K K)*

Таблица 14.2. Типовые характеристики МСТ детекторов, работающих в дальнем ИК спектральном диапазоне

Чувствительная зона, мм	Температура, °С	λ_p, мкм	λ_c, мкм	Поле обзора, °	Темновое сопротивление, кОм	Время нарастания, мкс	Макс. ток, мА	D^* при λ_p
1×1	–30	3,6	3,7	60	1	10	3	10^9
1×1	–196	15	16	60	20	1	40	3×10^9

Детекторы с криогенным охлаждением применяются для измерения оптической мощности в широком спектральном диапазоне, определения температуры тепловых процессов и получения тепловых образов, детектирования количественного содержания воды и проведения газового анализа.

На рис. 14.18 показаны спектры поглощения разных молекул газов. Из рисунка видно, что молекулы воды сильнее всего поглощают фотоны с длинами волн 1.1, 1.4, 1.9 и 2.7 мкм. Поэтому для определения содержания воды, например, в каком-то топливе, на исследуемый и эталонный образцы направляется монохромныйй свет. Отраженный свет детектируется и находится отношение отраженных излучений в разных зонах поглощения. Анализатор газов, исследуя поглоще-

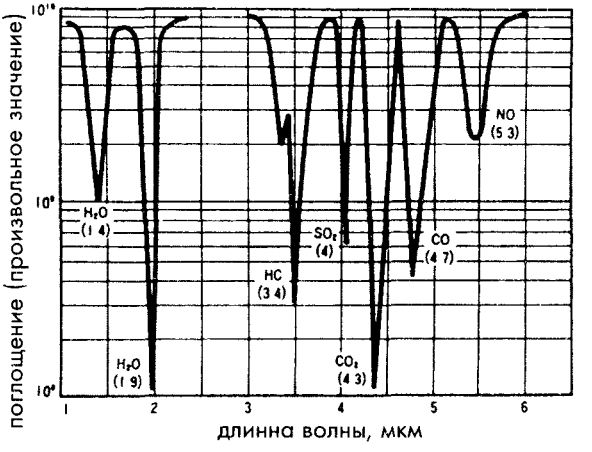


Рис. 14.18. Спектр поглощения молекул газа

ние в ИК области спектра, определяет плотность газов (в данном случае, водяных паров). Таким же образом можно определять состав выхлопных газов автомобиля (CO, HC, CO_2), проводить контроль загрязнения атмосферы (CO, SO, NO_2), утечек топлива (CH_4, C_3H_2) и т.д.

14.6. Детекторы ИК-излучений

Тепловые ИК детекторы первоначально использовались для определения ИК излучений среднего и дальнего ИК диапазонов и для проведения бесконтактных температурных измерений, которые в течение последних 60 лет стали называться *пирометрическими*. Это название произошло от греческого слова *pur*, обозначающего огонь. Соответствующие термометры получили название пирометров. В настоящее время бесконтактные методы измерения температуры используются очень широко: от определения минусовых температур до детектирования температуры различных пламен. Поэтому такие методы получили название *радиационной термометрии*.

Типовые ИК бесконтактные датчики температуры состоят из следующих частей:

1. *Чувствительного элемента*, реагирующего на электромагнитные излучения ИК диапазона. Основными требованиями, предъявляемыми к нему, являются: быстродействие, воспроизводимость, высокая чувствительность и хорошая долговременная стабильность.

2. *Опорной конструкции*, поддерживающей чувствительный элемент и обеспечивающей доступ к нему излучения. Конструкция должна обладать низкой теплопроводностью для снижения тепловых потерь.

3. *Корпуса*, защищающего чувствительный элемент от воздействия окружающей среды. Корпус должен быть герметичным. Его часто заполняют сухим воздухом или инертным газом (аргоном или азотом)

4. *Защитного окошка*, прозрачного для излучения исследуемого диапазона длин волн. На поверхность окна часто наносят специальное покрытие с целью улучшения его пропускающей способности для волн определенной длины и фильтрации излучений нежелательного диапазона спектра.

В областях, лежащих ниже среднего ИК диапазона спектра, чувствительность тепловых детекторов гораздо ниже, чем у квантовых датчиков. Их принцип действия основан на превращении теплового излучения в тепло с последующим преобразованием уровня тепла или теплового потока в электрический сигнал, для чего применяются традиционные методы тепловых измерений. Для детектирования теплового излучения подходит практически любой датчик температуры. Однако из уравнения (3.133) главы 3 видно, что поток ИК волн, поглощенный тепловым детектором, пропорционален геометрическому фактору A, который при равномерном пространственном распределении излучения равен площади чувствительного элемента датчика. Например, если датчик тепловых излучений, обладающий идеальной поглощающей способностью и площадью чувствительного элемента 5 мм^2, находящийся при температуре 25°C, поместить внутрь камеры с температурой 100°C, он получит мощность излучения, равную 3.25 мВт. Температура датчика будет расти до тех пор, пока не наступит состояние теплового равновесия между ним и окружающей средой. Как быстро

это произойдет, зависит, главным образом, от теплоемкости датчика. Следует отметить, что на практике температура чувствительного элемента никогда не становится равной температуре исследуемого объекта. Реальный датчик, в отличие от идеального, обладает далеко не идеальным теплообменом с источником тепла. Хотя между объектом и чувствительным элементом происходит теплопередача за счет радиационного излучения, значительная часть тепла уходит на прогрев опорной конструкции, проводов, гравитационную конвекцию и через паразитные излучения. Поэтому равновесная температура будет находиться где-то между температурой объекта и исходной температурой теплового детектора.

Все тепловые детекторы излучений можно разделить на два класса: пассивные ИК (ПИК) и активные ИК (АИК) детекторы. Пассивные датчики поглощают входящее излучение и превращают его в тепло, в то время как активные детекторы вырабатывают тепло при помощи специальных схем возбуждения.

14.6.1. Ячейки Голея

Ячейки Голея являются широкополосными детекторами ИК излучений. Они обладают очень высокой чувствительностью, но также довольно хрупкой конструкцией. Принцип действия ячеек Голея основан на детектировании теплового расширения газа, заключенного в замкнутом объеме. Поэтому такие датчики иногда называются термопневматическими детекторами. На рис. 14.19 показана схема детектора излучений, реализованного на базе ячейки Голея, состоящей из замкнутой камеры с двумя мембранами: верхней и нижней. На верхнюю мембрану наносится слой, поглощающий тепло, а поверхность нижней мембраны делается зеркальной (например, покрывается Al).

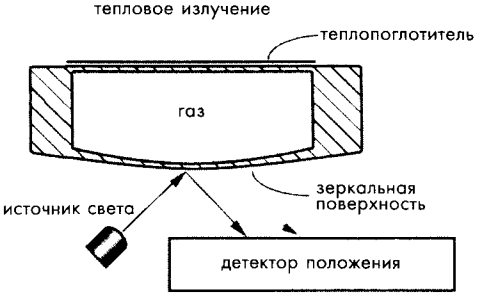


Рис. 14.19. Детектор излучений среднего и дальнего ИК диапазонов на основе ячейки Голея

Источник света направлен на зеркальную поверхность. Падающий луч света отражается от поверхности и попадает на детектор положения. На верхнюю мембрану действует исследуемое ИК излучение, поглощаемое ее покрытием. Поглощенное тепло приводит к повышению температуры мембраны, которая, в свою очередь, нагревает газ, заключенный в камере. Газ расширяется и его давление увеличивается. Увеличение внутрикамерного давления приводит к деформации нижней мембраны. Изменение кривизны зеркальной поверхности мембраны оказывает влияние на направление отраженного луча света, который теперь попадает на другое место чуствительной зоны датчика положения. Величина отклонения положения отраженного луча зависит от степени деформации мембраны и, следовательно, от интенсивности поглощенного излучения. Такие датчики могут изготавливаться по технологии производства микросистем (см. главу 18). Степень деформации мембраны иногда измеряется и другими методами, например, при помощи интерферометра Фабри-Перо (см. раздел 7.5 главы 7)

14.6.2. Детекторы излучений на основе термоэлементов

Термоэлементы относятся к классу пассивных ИК детекторов. Их принцип действия аналогичен принципу термопар. Фактически, термоэлемент представляет собой несколько последовательно соединенных термопар. Первоначально такая конструкция была предложена Джоулем для увеличения выходного сигнала термоэлектрических датчиков. Он соединил последовательно несколько термопар и термически объединил их горячие спаи. Современные термоэлементы имеют совсем другую конструкцию. Теперь их основное предназначение – тепловое детектирование излучений среднего и дальнего ИК диапазонов спектра.

На рис. 14.20А показана схема детектора на основе термоэлемента. Такой датчик состоит из рамы, обладающей сравнительно большой тепловой массой, на которой сформированы «холодные» спаи. Эта рама присоединена либо к термостату с известной температурой, либо к эталонному датчику температуры. На раме крепится тонкая мембрана, обладающая низкой теплоемкостью и теплопроводностью, на поверхности которой располагаются «горячие» спаи. Названия горячих и холодных спаев являются историческими, напоминающими о том, что термоэлементы произошли от термопар. На самом деле в таких детекторах места соединений редко бывают горячими или холодными.

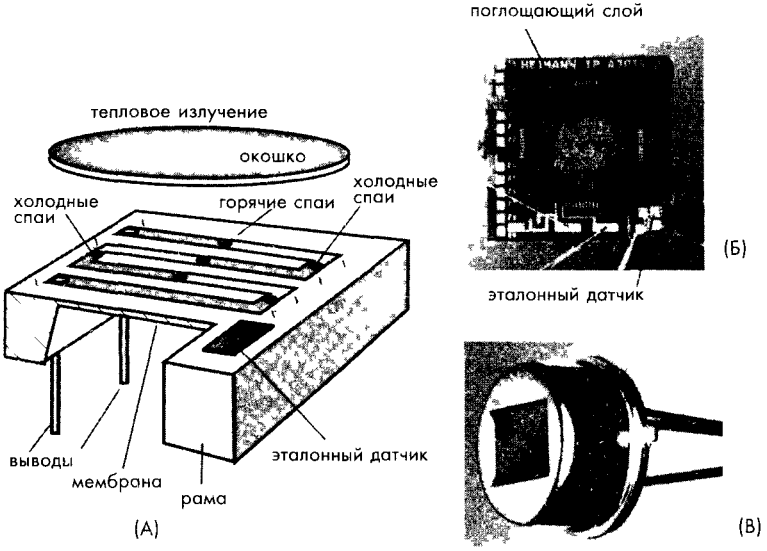


Рис. 14.20. Термоэлемент для детектирования теплового излучения: А – схема с эталонным датчиком температуры (*x* и *y* являются разными материалами), Б – микродатчик излучений на основе термоэлемента (отметим, что здесь полупроводниковый эталонный датчик температуры сформирован на раме, на которую нанесены холодные спаи, а горячие спаи с нанесенным на них поглощающим покрытием расположены в центре мембраны), В – детектор в корпусе TO-5

Принцип действия датчиков на основе термоэлементов ничем не отличается от принципа любого пассивного ИК детектора. ИК излучение поглощается или испускается мембраной. При этом происходит изменение ее температуры. Поскольку на мембране расположены горячие спаи, разность температур между ними и холодными спаями приводит к возникновению термоэлектрического напряжения. Температура мембраны зависит от ее теплоемкости, теплопроводности и мощности ИК излучения.

Для получения термоэлементов с высокой чувствительностью и низким уровнем шума спаи должны изготавливаться из материалов, обладающих высоким термоэлектрическим коэффициентом α, низкой теплопроводностью и низким объемным удельным сопротивлением. При этом термоэлектрические коэффициенты пар соединений должны иметь противоположные знаки. К сожалению, большинство металлов, обладающих низким удельным электрическим сопротивлением (золото, медь, серебро), имеют очень низкие термоэлектрические коэффициенты. У металлов с более высоким удельным сопротивлением (висмут и сурьма) термоэлектрические коэффициенты гораздо выше, поэтому именно они и используются чаще других при производстве термоэлементов. Легирование этих металлов Se и Te позволяет увеличить термоэлектрический коэффициент до 230 мкВ/К [5].

Методы изготовления термоэлементов со спаями из металлов могут быть разными, но все они основаны на технологии вакуумного напыления с использованием масок для формирования слоев из термоэлектрических материалов. Количество спаев варьируется от 20 до нескольких сотен. На «горячие» спаи часто наносится абсорбционный слой для улучшения поглощения ИК излучения. Например, они могут быть зачернены при помощи органических красителей.

Термоэлементы являются устройствами, работающими на постоянном токе, выходной сигнал которых достаточно хорошо отслеживает температуру «горячего» спая. Термоэлемент можно представить в виде источника напряжения, управляемого тепловым потоком, соединенного последовательно с резистором фиксированного номинала. Датчик размещается в герметичном металлическом корпусе с прочным прозрачным окном (из кремния, германия или селенида цинка) (рис. 14.20В). Выходное напряжение датчика пропорционально попадающему на него излучению. Диапазон рабочих частот детектора, в основном, зависит от теплоемкости и теплопроводности мембраны, определяющих тепловую постоянную времени. Датчики на основе термоэлементов обладают довольно низким уровнем шума, который соответствует тепловому шуму эквивалентного сопротивления детектора (т.е. порядка 20...50 кОм). В таблице 14.3 приведены параметры типовых датчиков этого вида.

Выходной сигнал датчиков на основе термоэлементов зависит от разности температур источника теплового излучения и чувствительной поверхности. Поэтому передаточная функция термоэлемента является трехмерной поверхностью, форма которой определяется законом Стефана-Больцмана (см. рис. 2.1 главы 2).

В настоящее время висмут и сурьма часто заменяются на кремний. Кремниевые термоэлементы обладают большей эффективностью и надежностью [6]. В Приложении приведены термоэлектрические коэффициенты указанных элементов. Как видно из соответствующей таблицы, указанные коэффициенты для

кристаллического и поликристаллического кремния имеют очень большие значения, тогда как их объемные удельные сопротивления довольно низкие. Достоинство кремниевых термоэлементов – это возможность применять для их изготовления стандартные технологии производства ИС, что позволяет значительно снижать стоимость таких устройств. При помощи введения определенных примесей можно регулировать величину удельного сопротивления и термоэлектрического коэффициента. Однако изменение удельного сопротивления происходит гораздо быстрее, чем меняется термоэлектрический коэффициент. Поэтому для оптимизации соотношения высокая чувствительность- низкий уровень шума необходимо очень аккуратно подбирать концентрацию легирующих компонентов.

Таблица 14.3. Типовые параметры термоэлементов

Параметр	Значение	Единица измерения	Условия
Чувствительная зона	0,5 2	мм^2	
Чувствительность	50	В/Вт	6 14 мкм, 500К
Шум	30	нВ/Гц$^{1/2}$	25°С, среднеквадратическое значение
Эквивалентное сопротивление	50	кОм	25°С
Тепловая постоянная времени	60	мс	
Температурный коэффициент удельного сопротивления	0 15	%/К	
Температурный коэффициент чувствительности	-0 2	%/К	
Рабочий диапазон температур	-20 +80	°С	
Температуры хранения	-40 100	°С	
Цена	2 20	$US	

На рис. 14.20Б показан детектор ИК излучений, реализованный на основе полупроводникового термоэлемента (Perkin-Elmer Optoelectronics, Wiesbaden, Germany), изготовленный по технологии производства микросистем. Центральная часть кремниевой подложки удаляется методом анизотропного травления с обратной стороны кристалла. При этом остается только двухслойная мембрана толщиной 1 мкм, состоящая из SiO_2-Si_3N_4, обладающая низкой теплопроводностью. На эту мембрану наносятся тонкие проводники из двух разных термоэлектрических материалов (поликремния и алюминия). Такие датчики обладают очень низкои температурной чувствительностью, что позволяет им работать в широком температурном диапазоне.

14.6.3. Пироэлектрические датчики ИК-излучений

Пироэлектрические датчики также относятся к классу пассивных ИК детекторов На рис. 14.21А показана типовая конструкция твердотельных пироэлектри-

ческих детекторов. Они размещаются в металлических корпусах TO-5 или TO-39, что обеспечивает хорошее экранирование и защиту от окружающей среды. Окошко, пропускающее излучение, обычно изготавливается из кремния. Внутреннее пространство корпуса часто заполняется сухим воздухом или азотом. Обычно используют два чувствительных элемента, соединенных последовательно или параллельно навстречу друг другу, для лучшей компенсации быстрых изменений тепловых потоков и механических нагрузок, возникающих из-за акустических шумов и вибраций. Иногда один из элементов покрывается красителем для увеличения поглощающей способности, а второй экранируется от излучений, а для улучшения его отражающей способности на него наносится слой золота. Иногда пироэлектрический чувствительный элемент изготавливается из нихромовых электродов, нанесенных с двух сторон пироэлектрика. Нихром обладает высокой излучающей (поглощающей) способностью, и поэтому электроды из него выполняют сразу две функции: поглощают тепловое излучение и собирают электрические заряды. При использовании таких детекторов в датчиках движения излучение воздействует через окошко на оба пироэлектрических элемента.

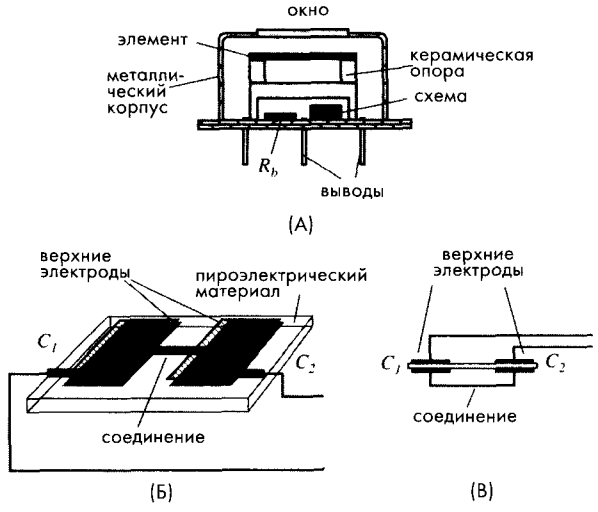


Рис. 14.21. Двойной пироэлектрический датчик: А- конструкция датчика в металлическом корпусе, Б – металлические электроды нанесены на противоположные стороны материала, В – эквивалентная схема двойного элемента

Двойной элемент часто изготавливается на одной подложке из кристаллического материала (рис. 14.21Б). Металлические электроды, нанесенные с двух сторон материала, формируют два последовательно соединенных конденсатора C_1 и C_2. На рис. 14.21В показана эквивалентная схема двойного пироэлектрического элемента. Такая конструкция дает возможность хорошо отбалансировать оба элемента и, следовательно, устранить все синфазные помехи. Следует отметить, что чувствительные зоны расположены только в пространстве между электродами, остальная часть пироэлектрического материала, непокрытая электродами, в генерации полезного сигнала не участвует. Пироэлектрические детекторы очень чувствительны к механическим нагрузкам и вибрациям, что очень осложняет их проектирование. В дополнение к этому все пироэлектрики также являются и пьезоэлектриками, поэтому для них характерен, так называемый микрофонный шум. Для борьбы с такими помехами кристаллический элемент отделяют от внешних частей детектора, особенно важно обеспечить отсутствие механических связей между пироэлектриком и металлическим корпусом, а также между ним и выводами.

Пироэлектрический элемент, состоящий из кристалла пироэлектрика с двумя электродами, можно представить в виде конденсатора, включенного параллельно с резистором утечки. Величина этого резистора составляет порядка $10^{12}...10^{14}$ Ом. На практике датчик подсоединяется к схеме, в состав которой входит резистор смещения R_b и преобразователь импеданса (на рис. 14.21А эта схема так и называется «схема»). В качестве преобразователя может использоваться либо повторитель напряжения (например, на основе полевого транзистора), либо преобразователь ток-напряжение. Повторитель напряжения (рис. 14.22А) преобразует высокий выходной импеданс датчика (параллельное соединение емкости C и резистора R_b) в выходное сопротивление повторителя (в нашем примере определяемое резистором 47 кОм и межэлектродной проводимостью транзистора). Достоинствами такой схемы являются простота, невысокая стоимость и низкий уровень шума. Однако у нее есть и два серьезных недостатка. Первый недостаток – зависимость быстродействия схемы от так называемой *электрической постоянной времени*, которая определяется как произведение емкости датчика C и резистора смещения R_b:

$$\tau_e = CR_b. \qquad (14.21)$$

Например. если двойной датчик имеет следующие характеристики : C=40 пФ, R_b=50ГОм, его τ_e=2 с, что соответствует частотной характеристике системы первого порядка с частотой среза на уровне 3 дБ, равной 0.08 Гц, что является очень низким значением. По этой причине повторители напряжения могут применяться только в тех случаях, когда быстродействие не является определяющим фактором, например, при детектировании движения людей (см. главу 6).Вторым недостатком схемы является большое напряжение смещения на выходном резисторе. Это напряжение зависит от типа транзистора и температуры. Таким образом, выходное напряжение определяется суммой двух напряжений: напряжения смещения, которое может достигать нескольких вольт, и переменного пироэлектрического напряжения порядка милливольт.

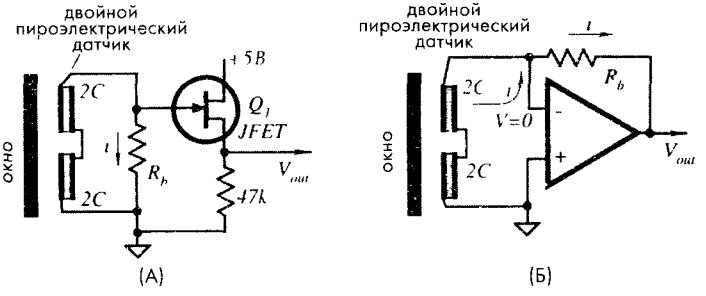


Рис. 14.22. Преобразователи импеданса для пироэлектрических датчиков: А – повторитель напряжений на полевом транзисторе, Б – преобразователь ток-напряжение на ОУ

Преобразователь ток-напряжения является более дорогой, но также и более эффективной схемой подключения пироэлектрического детектора (рис. 14.22Б).

Его преимущества – лучшее быстродействие и нечувствительность к емкости пироэлектрического элемента. Датчик подключается к инвертирующему входу ОУ, обладающему свойствами так называемой виртуальной земли (подобные схемы были рассмотрены на рис. 14.5, 14.8 и 14.10), поэтому напряжение на этом входе является постоянным и практически равным напряжению на неинвертирующем входе, который в данном случае заземлен. Таким образом, назначение цепи ОС заключается в поддержании напряжения на датчике, равным нулю. Выходное напряжение в этом случае отслеживает электрический ток (поток зарядов), вырабатываемый датчиком (рис. 3.28 главы 3). Такое включение датчика обеспечивает очень низкий уровень тока смещения ОУ (порядка 1 пА). Три основных достоинства такой схемы: быстродействие, нечувствительность к емкости датчика и низкое напряжение смещения. Однако преобразователь ток-напряжение имеет не только широкую полосу пропускания, но и обладает более высоким уровнем шума.

На очень низких частотах обе рассмотренные схемы преобразуют пироэлектрический ток i_p в выходное напряжение, определяемое законом Ома:

$$V_{out} = i_p R_b \,. \tag{14.22}$$

Например, если i_p = 10 пА, а R_b = 50 ГОм, выходное напряжение составляет 500 мВ. Обе схемы должны обеспечивать во всем температурном диапазоне низкий входной ток смещения I_B, поэтому предпочтительнее использовать КМОП-транзисторы и ОУ, поскольку их токи смещения составляют порядка 1 пА.

Следует отметить, что выходные сигналы обоих преобразователей могут быть довольно разнообразной формы (рис. 14.23). Выходное напряжение повторителя отслеживает напряжение на чувствительном элементе и R_b (рис. 14.23А). Оно характеризуется двумя наклонами: передним наклоном, определяемым электрической постоянной времени τ_e=CR_b, и задним наклоном, зависящим от тепловой постоянной времени τ_T. Напряжение на чувствительном элементе в схеме с преобразователем ток-напряжение в отличие от схемы с повторителем всегда поддерживается близким к нулю, а входной импеданс этой схемы имеет очень низкое значение. Другими словами, повторитель напряжений работает как вольтметр, а преобразователь ток-напряжение – как амперметр. Поэтому выходной сигнал преобразователя *I-V* имеет очень резкий передний фронт, определяемый паразитной емкостью в цепи резистора R_b, в то время как его задний фронт также задается τ_T. Отсюда видно, что выходное напряжения преобразователя *I-V* отслеживает форму тока пироэлектрического чувствительного элемента (рис. 14.23Б)

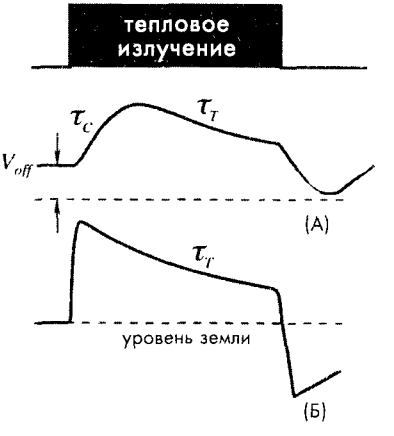


Рис. 14.23. Выходные сигналы повторителя напряжения (А) и преобразователя ток-напряжение (Б) при подаче на них прямоугольного импульса теплового излучения

Изготовление гигаомных резисторов является очень непростой задачей. Такие резисто-

ры высокого качества должны обладать хорошей устойчивостью к факторам окружающей среды, низким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) и низким коэффициентом сопротивления по напряжению (КСН), который определяется как:

$$\xi = \frac{R_1 - R_{01}}{R_{01}} \times 100\%, \qquad (14.23)$$

где R_1 и R_{01} – сопротивления, измеренные при 1 и 0.1 В. Обычно КСН бывают отрицательными. Это означает, что при увеличении напряжения на резисторе его сопротивление падает (рис. 14.24А). Поскольку выходной сигнал пироэлектрического датчика пропорционален произведению пироэлектрического тока на сопротивление резистор смещения, величина КСН влияет на нелинейность общей передаточной функции и датчика, и интерфейсной схемы. Высокоимпедансные резисторы изготавливаются методом нанесения тонкого слоя полупроводниковых красителей на керамическую (либо из оксида алюминия) подложку, обжигания полученной структуры в печи с последующим нанесением на нее защитного покрытия. Такое гидрофобное покрытие толщиной не менее 50 мкм помогает защитить резистор от влаги, поскольку даже очень небольшое количество молекул воды способны окислить полупроводниковый слой, что приводит к значительному повышению сопротивления и ухудшению долговременной стабильности. На рис. 14.24Б показана структура типового высокоимпедансного резистора.

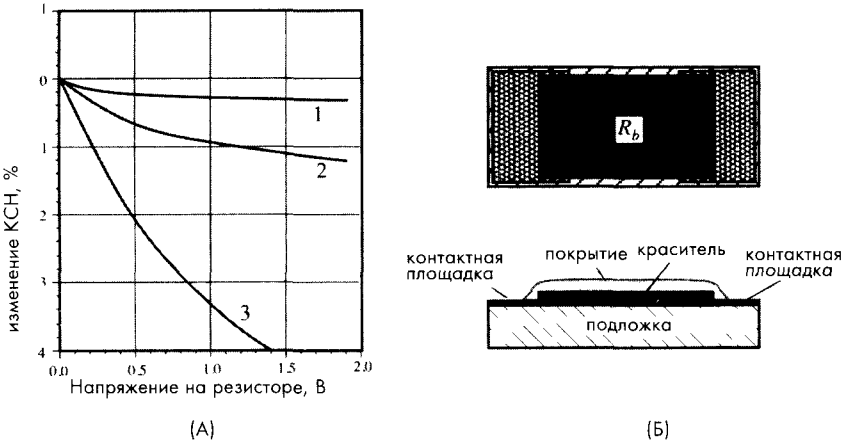


Рис. 14.24. Высокоимпедансный резистор: А – КСН для трех типов резисторов, Б – структура резистора на алюминиевой подложке

В приложениях, где не требуется высокая точность измерений, например, в детекторах движения, резистор смещения может быть заменен на один или два кремниевых диода с нулевым смещением, включенных навстречу друг другу.

На практике при детектировании тепловых излучений, как правило, применяются два типа пироэлектрических датчиков, рассчитанных для работы в разных условиях [7]:

1. Быстродействующие детекторы, измеряющие излучения высокой интенсивности, но очень короткой длительности лазерных импульсов (порядка наносекунд), повторяющихся с частотой порядка 1 МГц. Такие датчики, обладающие высокой линейностью, изготавливаются из монокристаллических пироэлектриков, таких как танталат лития. В состав таких детекторов обычно входят теплоотводы.

2. Чувствительные детекторы, определяющие тепловые излучения низкой интенсивности, но изменяющиеся со сравнительно низкой скоростью. Примеры – ИК термометры и датчики движения [8-10]. Для обеспечения высокой чувствительности такие датчики должны иметь хорошую тепловую связь с источником излучений. Для этих целей используются такие оптические устройства, как фокусирующие линзы и волноводы. При этом необходимо минимизировать передачу тепла в окружающую среду, для чего требуется очень внимательно проектировать корпуса таких детекторов. При соответствующем проектировании чувствительность данных детекторов приближается к чувствительности квантовых датчиков с криогенным охлаждением [7]. Серийно выпускаемые пироэлектрические датчики изготавливаются на основе монокристаллов, таких как $LiTaO_3$ и TGS, или на базе PZT керамики. Иногда применяются и пленки из PVDF, поскольку они дают возможность реализовать датчики, обладающие высоким пространственным разрешением и хорошим быстродействием.

14.6.4 Болометры

Болометры – это миниатюрные резистивные детекторы температуры (РДТ) или термисторы (см. раздел 16.1.3 главы 16), а также другие типы температурно чувствительных резисторов, используемых, в основном, для измерения среднеквадратичных значений интенсивности электромагнитных излучений в широком спектральном диапазоне от среднего ИК до микроволн. Области применения таких детекторов включают определение ИК температуры, построение тепловых образов, измерение локальных полей при высокой мощности излучений, тестирование СВЧ устройств. Они используются в устройствах управления лучами ВЧ антенн, проверки мощных военных СВЧ систем, в медицинских приборах и т.д. Принцип действия всех болометров основан на фундаментальном физическом законе, связывающем величину поглощенного электромагнитного сигнала с рассеиваемой мощностью [11]. Резистивные детекторы выполняют следующие преобразования:

1. Электромагнитное излучение воздействует на резистор. Резистор поглощает это излучение и конвертирует его в тепло
2. Тепло повышает температуру резистора. Она становится выше температуры окружающей среды.
3. Увеличение температуры уменьшает омическое сопротивление болометра.

Увеличение температуры соответствует мощности электромагнитного излучения. Это изменение температуры может быть измерено любым подходящим методом, описанным в главе 16. В этом разделе будут кратко описаны наиболее распространенные способы изготовления болометров, которые довольно сильно изменились с тех пор, когда Лэнглэй изобрел первое такое устройство (с этого момента уже прошло более 100 лет)

На рис. 14.25А показана основная схема включения болометра. Она состоит из болометра (температурно чувствительного резистора) с номинальным сопротивлением R, эталонного стабильного резистора R_0 и источника напряжения смещения E. Напряжение V на резисторе R_0 является выходным сигналом схемы. Оно максимально при равенстве двух резисторов. Чувствительность болометра к входящим электромагнитным излучениям может быть определена по формуле [12]:

$$\beta_v = \frac{\alpha\varepsilon Z_T E}{4\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}, \tag{14.24}$$

где $\alpha=(dR/dT)/R$ – ТКС болометра, ε – коэффициент излучения поверхности, Z_T – тепловое сопротивление болометра, определяемое его конструкцией, τ – тепловая постоянная времени, зависящая от Z_T и теплоемкости болометра, а ω - частота.

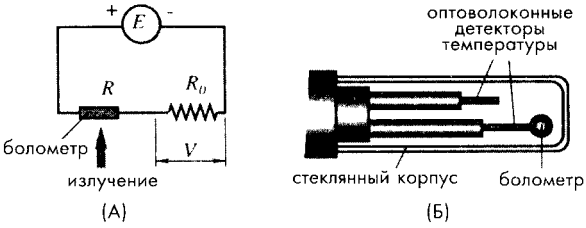


Рис. 14.25. Эквивалентная схема болометра с электрическим смещением (А) и конструкция оптического болометра (Б)

Поскольку рост температуры болометра происходит в соответствии со следующим выражением:

$$\Delta T = T - T_0 \approx P_E Z_T = \frac{E^2}{4R} Z_T, \tag{14.25}$$

а выражение для сопротивления болометра можно записать как (см. уравнение (16.14) главы 16):

$$R = R_0(1+\alpha_0\Delta T), \tag{14.26}$$

уравнение (14.24) преобразуется к следующему виду:

$$\beta_V = \frac{1}{2}\varepsilon\alpha\sqrt{\frac{R_0 Z_T \Delta T}{(1+\alpha_0\Delta T)\left[1+(\omega\tau)^2\right]}}. \tag{14.27}$$

Поэтому для увеличения чувствительности болометра необходимо повышать его электрическое сопротивление и тепловой импеданс.

Традиционно болометры изготавливаются в виде миниатюрных термисторов, подвешенных на крошечных проводках. Другим популярным методом реализации болометров является использование технологии нанесения тонких пленок [12,13] (обычно нихромовых). Во многих современных болометрах терморезистивный тонкопленочный материал наносится на микромембрану из кремния или

стекла, поддерживаемую рамкой из кремния. Широкое распространение такого подхода объясняется популярностью датчиков, использующих матрицы для получения тепловых изображений объектов. В случаях где не требуется высокая чувствительность, а стоимость не является критичным фактором, часто применяются болометры с платиновыми пленками. Платина обладает хотя и невысоким, но хорошо воспроизводимым ТКС.

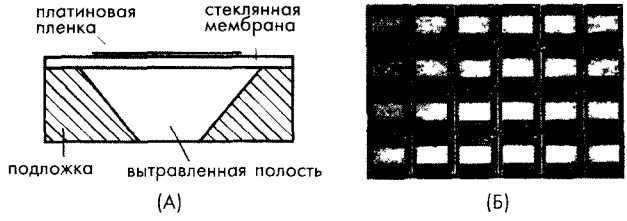


Рис. 14.26. Платиновый болометр: А – стеклянная мембрана над полостью, полученной методом травления, Б– матрица из болометров

Платиновая пленка толщиной 500Å наносится на поверхность тонкой стеклянной мембраны. Для придания этому слою требуемой формы применяются фотолитографические методы. Мембрана закрепляется над полостью, вытравленной в кремниевой подложке, при помощи крошечных проводков, т.е. мембрана как бы плавает над этой V-образной полостью. Такой способ крепления помогает свести до минимума тепловую связь чувствительного элемента с подложкой. На рис. 14.26Б показана микрофотография матрицы платиновых болометров, применяемой для получения тепловых изображений.

В качестве температурочувствительных элементов могут применяться резисторы на основе поликремния, германия, TaNO и т.д При выборе материалов для болометров всегда необходимо учитывать их совместимость со стандартными КМОП технологиями для того, чтобы была возможность выпускать монолитные устройства, включающие в себя сами детекторы и их интерфейсные схемы. Одним из приемлемых сочетаний является поликремний с нанесенными на него пленками из германия (рис. 14.27)

Как видно из уравнения (14.27), узким местом при разработке болометров (а также любых других точных датчиков температуры) всегда является обеспечение хорошей тепловой изоляции чувствительного элемента от опорной конструкции, соединительных проводов и интерфейсных схем, поскольку тепловые потери могут привести к возникновению больших погрешностей и снижению чувствительности. Одним из методов решения этой проблемы является исключение всех металлических проводников и измерение температуры болометра при помощи оптоволоконной техники. Подобное устройство было реализовано фирмой Luxtron (Mountain View, CA, патент США 4816634). В конструкции, показанной на рис. 14.25Б, миниатюрный болометр подвешен на конце оптического зонда, и его температура измеряется флуоресцентнооптическим датчиком температуры (см. раздел 16.4.1 главы 16), а другой аналогичный оптический датчик определяет окружающую температуру для нахождения ΔT.

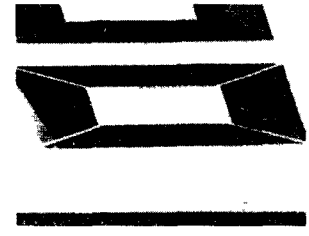


Рис. 14.27. Болометр на основе пленки из германия, расположенной над кремниевой полостью
(Напечатано с разрешения профессора J.Shie)

14.6.5. Активный датчик излучения дальнего ИК диапазона

В активных ИК детекторах процесс измерения потока теплового излучения отличен от процесса, описанного для пассивных датчиков. В отличие от пассивного ИК элемента, температура которого определяется как температурой объекта, так и окружающей температурой, в активном датчике температура поверхности чувствительного элемента в течение всего процесса измерения поддерживается на одном заданном уровне T_s. Для этого в детектор встроен нагревательный элемент, мощность которого регулируется схемой управления (рис. 14.28А). Процесс выработки управляющего сигнала состоит в измерении температуры поверхности элемента и сравнении ее с внутренней эталонной температурой. Иногда температура поверхности поддерживается выше максимально ожидаемой температуры объекта, однако, для большинства практических случаев достаточно, чтобы T_s была выше температуры окружающей среды на несколько десятых градуса. Поскольку температура элемента всегда выше температуры окружающей среды, он начинает отдавать свое тепло наружу, а не поглощать его, как это делают пассивные детекторы. Тепло от поверхности сенсора уходит тремя путями: через теплопроводность, через конвекцию и через тепловое излучение. Третью-то составляющую и необходимо измерить. В отличие от первых двух способов теплопередачи, которые всегда направлены наружу от чувствительного элемента (поскольку он всегда теплее окружающей среды), радиационная передача тепла может идти в любом направлении, которое зависит, в основном, только от температуры объекта. Поток теплового излучения подчиняется фундаментальному закону Стефана-Больцмана, описанного в уравнении (3.138) главы 3.

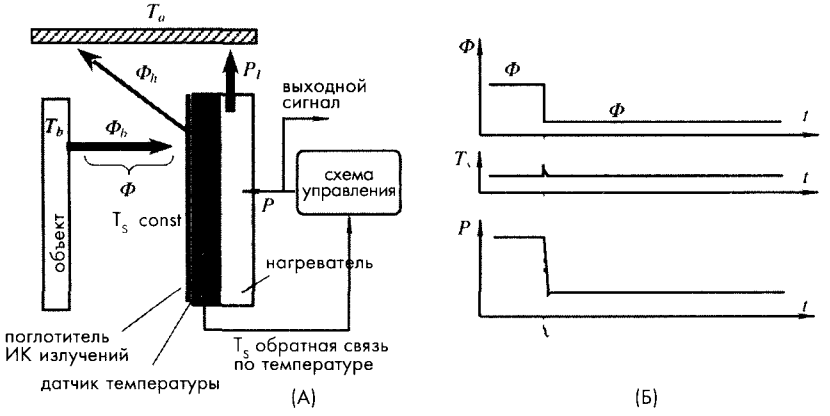


Рис. 14.28. Активный ИК элемент излучает тепловой поток Φ_η внутрь корпуса и поглощает поток Φ_b от объекта (А), временные диаграммы для излучаемого потока, температуры поверхности и приложенной мощности (Б)

Часть мощности излучения уходит от элемента внутрь корпуса датчика, в то время как другая часть поступает от объекта (или уходит к нему). Важно отметить, что суммарный тепловой поток (теплопрводность+конвекция+излучение) всегда имеет направление от объекта, т.е. имеет отрицательный знак.

Если в состав активного датчика ввести охладитель (например, термоэлектрический элемент, работающий на принципе Пельтье (см. раздел 3.9 главы 3)), температура поверхности сенсора может поддерживаться ниже окружающей температуры. Однако, с практической точки зрения, всегда легче нагревать элемент, чем охлаждать его. Далее будут рассмотрены активные ИК датчики, поверхность которых подогревается либо при помощи дополнительного нагревательного элемента, либо за счет явления саморазогрева [8, 14-16].

Динамическая температура поверхности T_s любого теплового элемента, и активного, и пассивного, может быть описана дифференциальным уравнением первого порядка:

$$cm\frac{dT_s}{dt} = P - P_L - \Phi \ , \tag{14.28}$$

где P – мощность, получаемая элементом от источника питания или цепи возбуждения (если они есть), P_L – тепловые потери за счет теплопроводности и конвекции, m и c – масса и удельная теплоемкость сенсора, а $\Phi=\Phi_\eta+\Phi_b$ – суммарный тепловой поток излучений. Положительный знак мощности P означает, что он направлен к элементу.

В пассивных ИК детекторах, например, в пироэлектрических или на основе термоэлементов, никакой внешней мощности не подводится (т.е. $P = 0$), поэтому быстродействие датчика, характеризуемое тепловой постоянной времени τ_T, определяется только его теплоемкостью и тепловыми потерями. В активных ИК элементах после периода разогрева до температуры T_s схема управления стремится удержать температуру поверхности датчика на том же самом уровне, что означает:

$$\frac{dT_s}{dt} = 0 \ . \tag{14.29}$$

Тогда уравнение (14.28) становится алгебраическим:

$$P = P_L + \Phi \ . \tag{14.30}$$

В отличие от пассивных ИК детекторов активные датчики работают как бесконечные источники тепла. Из вышесказанного следует, что в идеальных условиях выходной сигнал активных детекторов не зависит от тепловой массы и не является функцией времени. При эффективной работе схемы управления в постоянных условиях окружающей среды (P_L=const) приложенная электрическая мощность успевает отслеживать с высокой степенью точности изменения потока излучения Φ. Амплитуда изменения этой мощности и является выходным сигналом датчика. Из уравнения (14.30) видно, что, теоретически, активные ИК детекторы являются более быстродействующими по сравнению с пассивными датчики. Однако эффективность активных детекторов определяется как собственной конструкцией, так и устройством блока управления. Нерадиационные потери являются функцией окружающей температуры T_a и коэффициента потерь α_s:

$$P_L = \alpha_s(T_s - T_a) \ . \tag{14.31}$$

Для выработки тепла для подогрева поверхности активного сенсора в состав датчика может быть встроен нагревательный элемент, обладающий электрическим сопротивлением R. При работе датчика электрическая мощность, рассеиваемая на этом резистивном элементе, является функцией напряжения на его выводах:

$$P = V^2 / R. \tag{14.32}$$

Предположим, что активный ИК чувствительный элемент используется в радиационном термометре. Значит, его выходной сигнал должен быть пропорционален измеряемой температуре объекта T_b. Считаем, что $T=T_b$, $T_s>T_a$. Тогда, подставляя уравнения (3.138) главы 3, (14.31), (14.32) в уравнение (14.30), после некоторых преобразований получим выражение для температуры объекта в виде зависимости от напряжения на нагревательном элементе:

$$T_b = \sqrt[4]{T_s^4 - \frac{1}{A\sigma\varepsilon_s\varepsilon_b}\left[\frac{V^2}{R} - \alpha_s(T_s - T_a)\right]}. \tag{14.33}$$

α_s – это коэффициент передачи тепла от детектора в окружающую среду (корпус), т.е. коэффициент теплопроводности. В состав схемы управления обычно входят следующие компоненты: блок установки эталонной температуры, усилитель рассогласований и исполнительное устройство. Также в нее может быть включен дополнительный RC-контур, используемый для стабилизации работы всего детектора и предотвращения возникновения колебательных режимов [17].

Следует отметить, что активные ИК датчики вместе с их схемами управления являются прямыми преобразователями мощности излучений в электрическое напряжение, работающими с достаточно высокой эффективностью. Для них характерна чувствительность порядка 3000 В/Вт, что гораздо выше чем у термоэлементов, для которых этот параметр составляет порядка 100 В/Вт. Применение технологии изготовления микросистем позволяет существенно повысить эффективность ИК детекторов излучения. На самом деле активные ИК детекторы являются близкими родственниками болометрам, описанным в предыдущем разделе. Для того чтобы превратить болометр в активный детектор, под ним необходимо сформировать нагревательный элемент, что может быть реализовано методом нанесения дополнительного резистивного слоя.

14.7. Детекторы газового пламени

Такие детекторы входят в состав систем обеспечения пожарной безопасности. По многим параметрам детекторы пламени являются более чувствительными устройствами, чем датчики дыма, особенно на открытых пространствах, где концентрация дыма может долго не достигать пороговых значений, необходимых для подачи сигнала тревоги.

Для обнаружения горящего газа можно воспользоваться уникальной особенностью пламени, заключающейся в том, что значительная часть его оптического спектра расположена в УФ спектральном диапазоне (рис. 14.29). После прохождения через атмосферу Земли солнечный свет теряет большую часть своего спектра УФ излучений,

расположенную ниже 250 нм, в то время как компоненты УФ излучения газового пламени имеют длины волн вплоть до 180 нм. Это дает возможность реализовать детектор с узкой полосой пропускания, реагирующий только на излучение пламени и нечувствительный к солнечному или электрическому свету.

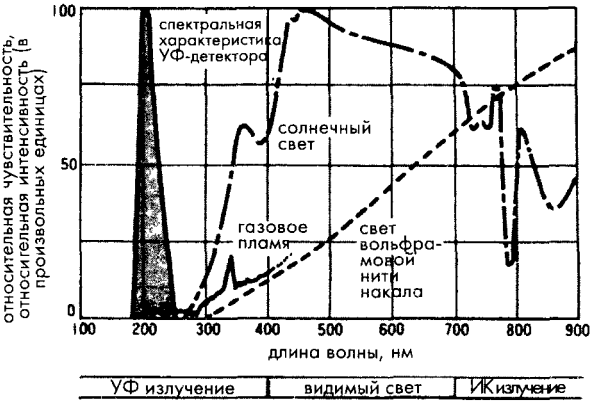


Рис. 14.29. Спектр электромагнитных излучений различных источников (напечатано с разрешения Hamamatsu Photonics K.K.)

На рис. 14.30А показан пример такого устройства, являющегося детектором УФ излучений, построенным на основе фотоэлектрического эффекта в металлах и явления умножения электронов в газах (см. главу 14). Детектор представляет собой трубку с разреженным газом. Стенки этой трубки прозрачны для УФ излучения, что обеспечивает широкий обзор, как в горизонтальном, так и вертикальных направлениях (рис. 14.30В). Во время работы на это устройство необходимо подавать высокое напряжение, а при нормальных условиях его выходной сигнал равен нулю. При воздействии на него УФ излучения пламени фотоны, обладающие высокой энергией, начинают бомбардировать катод, выбивая из него электроны, свободно передвигающиеся внутри трубки с газом. При столкновении с этими электронами атомы газов получают дополнительную энергию, что приводит к возникновению газовой люминесценции в УФ спектральном диапазоне, что вызывает увеличение электронов, которые, в свою очередь,

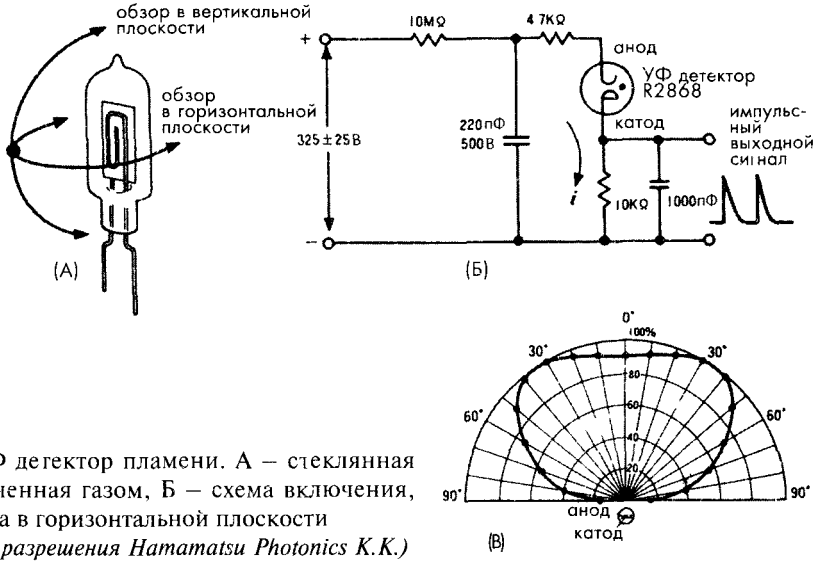


Рис. 14.30. УФ детектор пламени. А – стеклянная трубка, заполненная газом, Б – схема включения, В – угол обзора в горизонтальной плоскости *(Напечатано с разрешения Hamamatsu Photonics K.K.)*

усиливают люминесценцию. Таким образом запускается лавинный процесс умножения электронов, сопровождающийся возникновением зоны электропроводимости между анодом и катодом. Следовательно, при воздействии на чувствительный элемент излучения пламени он начинает работать как токовый ключ, вырабатывающий положительные пики напряжения на своих выходах (рис. 14.30Б). Из вышесказанного следует, что газовые детекторы при обнаружении пламени вырабатывают УФ излучение малой интенсивности, безопасное для людей, которое, однако, может привести к срабатыванию соседних подобных устройств.

Литература

1 Chappell, A , ed *Optoelectronics Theory and Practice* McGraw-Hill, New York, 1978

2 Spillman, W B Jr Optical detectors In *Fiber Optic Sensors, E Udd, ed John* Wiley & Sons, New York, 1991, pp 69-97

3 Verdeyen, J T *Laser Electronics,* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1981

4 Graeme, J Phase compensation optimizes photodiode bandwidth Electronic Design News *(EON),* pp 177-183, 1992

5 Volklein, A WiegandA , and Baier, V *Sensors Actuators A* 29, 87-91, 1991

6 Schieferdecker, J , Quad, R , Holzenkampfer, E , and Schulze M Infrared thermopile sensors with high sensitivity and very low temperature coefficient *Sensors Actuators A 46-47,* 422-427,1995

7 Meixner, H , Mader, G , and Kleinschmidt, P Infrared sensors based on the pyro-electric polymer poly vinylidene fluoride (PVDF) *Siemens Forsch Entwicl Ber Bd* 15(3), 105-114, 1986

8 Fraden, J Noncontact temperature measurements in medicine In *Bioinstru-mentation and Biosensors,* D Wise, ed Marcel Dekker, New York, 1991 pp 511-549

9 Fraden, J Infrared electronic thermometer and method for measuring temperature U S patent 4,797,840, 1989

10 Fraden, J Motion detector, U S patent 4,769,545, 1988

11 Astheimer R W Thermistor infrared detectors *Proc SPIE443* 95-109 1984

12 Shic, J -S and Weng, P K Fabrication of micro-bolometer on silicon substrate by anizotropic etching technique In *Transducers'91 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators Digest of Technical Papers IEEE, New York, 1991, pp 627-630*

13 *Vogt, T P, Shifrin, GA , and Leon, B J* Generalized theory of metal-film bolometers *J Opt Soc Am 52,957-964,1962*

14 Fraden, J Active far infrared detectors In *Temperature Its Measurement and Control in Science and Industry* J F Schooley, ed American Institute of Physics, Washington, DC, 1992, Vol 6, Part 2, pp 831-836

15 Fraden, J Radiation thermometer and method for measuring temperature U S patent 4,854,730, 1989

16 Fraden, J Active infrared motion detector and method for detecting movement U S patent 4,896,039, 1990

17 Mastrangelo, C H and Muller, R S Design and performance of constant-temperature circuits for microbridge-sensor applications In *Transducers'91 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators Digest of Technical Papers* IEEE, New York, 1991, pp 471-474

ГЛАВА 15

ДЕТЕКТОРЫ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

На рис. 3.41 главы 3 показан спектр электромагнитных волн. В его левой стороне расположена зона γ-излучений. Однако существуют электромагнитные волны с еще более короткими длинами волн. В дополнение к этому спонтанные излучения некоторых веществ не всегда имеют электромагнитную природу. Речь идет о ядерном излучении, испускаемом ядрами атомов некоторых материалов, которое бывает двух типов: в виде заряженных частиц (α, β и протонов) и в виде частиц, не имеющих заряда, называемых нейтронами. Часть этих частиц являются сложными, например, α -частицы, представляющие собой ядра атомов гелия, состоящих из двух нейтронов и двух протонов, другие частицы, такие как β-частицы, устроены гораздо проще (β-частица – это либо электрон, либо позитрон). Рентгеновское и γизлучения относятся к электромагнитным излучениям ядерного типа. В свою очередь, рентгеновское излучение в зависимости от длины волны делится на жесткое, мягкое и ультрамягкое. Ядерное излучение часто называется ионизационным. Это название возникло из-за того, что при прохождении элементарных частиц через различные среды, поглощающие их энергию, возникают новые ионы, фотоны или свободные радикалы.

Некоторые элементы, существующие в природе, являются нестабильными. Такие элементы при своем медленном разложении испускают часть своих ядер. Это явление называется *радиоактивностью.* Оно было открыто в 1896 году Генри Беккерелем, который обнаружил, что атомы урана (с атомным числом $Z = 92$) вырабатывают излучение, затемняющее фотографические пластины. В дополнение к естественным радиоактивным веществам были получены искусственные. Ядра таких веществ вырабатываются в ядерных реакторах и являются очень нестабильными элементами. Вне зависимости от источника происхождения и возраста радиоактивных материалов они разлагаются по одному и тому же математическому закону, определяющему связь между количеством нераспавшихся ядер N и числом ядер dN, распадающихся за короткий интервал времени dt . Было показано экспериментально, что

$$dN = -\lambda N dt \ , \tag{15.1}$$

где λ – коэффициент распада данного вещества. Из уравнения (15.1) можно найти, что λ - это доля ядер, распадающихся за единицу времени:

$$\lambda = -\frac{1}{N}\frac{dN}{dt}. \qquad (15.2)$$

В системе СИ единицей измерения радиоактивности является беккерель, равный активности радионуклида, распадающегося со скоростью одно спонтанное превращение в секунду. Таким образом, беккерель выражается в единицах времени: 1 беккерель равен 1/с. Для преобразования беккереля в старую историческую единицу Кюри: беккерель необходимо умножить на коэффициент $3.7 \cdot 10^{10}$ (см. Приложение). Доза поглощения измеряется в греях. Один грей соответствует дозе поглощения, при которой энергия на единицу массы, полученная веществом за счет ионизационного излучения, равна 1 Джоулю на килограмм, т.е. грей равен Дж/кг. При определении дозы облучения, полученной от воздействия рентгеновских и γ-излучений, используют единицу Кулон/кг, равную дозе облучения, приведшей к возникновению в 1 кг сухого воздуха заряда в 1 Кулон. В системе СИ единица Кл/кг заменила старую единицу, называемую рентген.

Принцип работы датчиков радиоактивных излучений определяется способом взаимодействия исследуемых частиц с материалом самого детектора. В работах [1] и [2] читатель может найти более подробную информацию о методах детектирования радиоактивности.

Существуют три основных типа детекторов радиоактивных излучений: сцинтилляционные счетчики, газовые и полупроводниковые детекторы. Также в соответствии с принципом действия все детекторы можно разделить на две группы: детекторы столкновений и дозиметры. Первые определяют наличие радиоактивных частиц, в то время как вторые измеряют мощность излучений. Поэтому существует еще одна классификация детекторов радиоактивных излучений: качественные и количественные.

15.1. Сцинтилляционные детекторы

Принцип действия этой группы детекторов основан на способности некоторых материалов преобразовывать ядерное излучение в свет. Поэтому на основе сцинтилляционного материала и оптического детектора фотонов можно реализовать датчик радиоактивных излучений. Однако следует отметить, что несмотря на высокую эффективность преобразований, интенсивность полученного в результате облучения материала света всегда очень мала. Поэтому в состав сцинтилляционных датчиков для усиления сигнала до требуемого уровня обычно входит фотоумножитель.

Идеальный сцинтилляционный материал должен обладать следующими свойствами:

1. Он должен эффективно преобразовывать кинетическую энергию заряженных частиц в детектируемый свет
2. Это преобразование должно быть линейным; это значит, что интенсивность полученного света должна быть в широком динамическом диапазоне пропорциональна входной мощности излучений
3. Для обеспечения высокого быстродействия детектора время послесвечения материала должно быть коротким

4. Коэффициент преломления материала должен быть близок к коэффициенту стекла, что необходимо для эффективного оптического согласования сцинтилляционной камеры с трубкой фотоумножителя.

В сцинтилляционных детекторах, в основном, используются три типа материалов: неорганические кристаллы галоидных соединений щелочей (самым популярным является иодид натрия), органические растворы, в которых радиоактивное вещество смешивается с жидким сцинтиллятором, и органические кристаллы (например, антрацен), пластифицированные небольшим количеством других материалов. Неорганические материалы обладают не только большей чувствительностью, но и большим временем послесвечения, что не дает возможности реализовать на их основе быстродействующие детекторы. Органические материалы лишены этого недостатка, но их чувствительность, как правило, гораздо ниже.

Одним из главных недостатков сцинтилляционных счетчиков является их низкое разрешение по энергии излучения. Эффективность сцинтилляционных преобразователей является не очень высокой. Для образования одного регистрируемого носителя (фотоэлектрона) необходима энергия более 1000 эВ. При этом количество носителей, созданных за время взаимодействия излучения с материалом, редко превышает нескольких тысяч. Например, разрешение по энергии для сцинтилляторов на основе иодида натрия при детектировании γ-излучения мощностью 0.662 МэВ ограничено 6%, что, в основном, определяется статистическими флуктуациями фотоэлектронов. Единственным методом снижения данного статистического ограничения является увеличение количества регистрируемых носителей, приходящихся на одну радиоактивную частицу. Как этого можно добиться, описано в разделе 15.2.4.

На рис. 15.1 показана упрощенная схема сцинтилляционного детектора, соединенного с фотоумножителем. Сцинтилляционная камера прикреплена к передней стенке фотоумножителя, в которую встроен фотокатод, на который подается нулевой потенциал (потенциал земли). Внутри трубки фотоумножителя установлено множество специальных выпуклых пластин, называемых динодами, расположение которых друг относительно друга напоминает форму жалюзей. Каждый динод подсоединен к источнику положительного напряжения. Чем дальше динод расположен от фотокатода, тем выше его потенциал. Последним элементом трубки фотоумножителя является анод, на который подан максимальный положительный потенциал, иногда достигающий нескольких тысяч вольт. Все компоненты фотоумножителя находятся внутри стеклянной вакуумной трубки, там же могут располагаться и некоторые дополнительные элементы, такие как фокусирующие электроды, экраны и т.д.

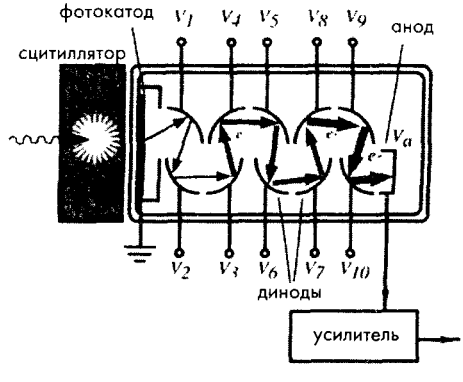


Рис. 15.1. Сцинтилляционный детектор с фотоумножителем

Фотоумножитель фактически является умножителем электронов, поскольку внутри его трубки нет никаких

фотонов, а есть только электроны. Рассмотрим следующий пример. Считаем, что γ-частицы обладают кинетической энергией 0.5 МэВ. При их воздействии на сцинтилляционный кристалл образуются свободные фотоны. Эффективность сцинтиллятора на основе кристалла иодида натрия с примесью таллия составляет 13%. Значит, в видимый свет преобразуется энергия, равная 0.5×0.13 = 0.065 МэВ=65 кэВ. Поскольку средняя энергия излучения видимого диапазона спектра составляет порядка 4 эВ, то, очевидно, что на одну γ-частицу приходится около 15000 фотонов. Это слишком мало для регистрации обычным фотодетектором, поэтому здесь необходимо использовать фотоумножитель. Из 15000 фотонов, как правило, только 10000 достигают фотокатода, функция которого заключается в преобразовании фотонов в малоэнергетичные электроны. Поскольку эффективность фотокатода составляет 20%, он вырабатывает порядка 2000 электронов на одну γ-частицу. Трубка фотоумножителя является линейным устройством, и ее коэффициент усиления почти не зависит от количества размноженных электронов.

Поскольку на все диноды поданы положительные потенциалы, электроны, покинувшие фотокатод, притягиваются первым динодом. При столкновении этих электронов с поверхностью динода освобождаются несколько новых электронов, улетающих навстречу второму диноду и т.д., т.е. начинается лавинное образование свободных заряженных частиц Таким образом, процесс фотоумножения электронов происходит именно на динодах. Коэффициент умножения обычно составляет порядка 10^6. В результате до анода доходит порядка 2×10^9 электронов, создающих довольно большой электрический ток, регистрируемый соответствующими электронными схемами. Коэффициент усиления фотоумножителя определяется как

$$G = \alpha\delta^N, \tag{15.3}$$

где N – это количество динодов, α – доля электронов, собранных фотоумножителем, δ – эффективность материала динодов (т.е. число освобождаемых электронов на одно столкновение). Величина δ обычно лежит в пределах 5...55. Коэффициент усиления зависит от приложенного напряжения, поскольку δ является почти линейной функцией от напряжения между динодами.

В настоящее время используются несколько видоизмененные фотоумножители (ФУ), получившие название канальных (КФУ), в которых устранены практически все недостатки традиционных ФУ. На рис. 15.2А показана структура КФУ, состоящего из фотокатода, извилистой структуры усилительного канала и анода. Здесь также как и в ФУ, показанном на рис. 15.1, преобразование фотонов в фотоэлектроны происходит на фотокатоде, которые далее, ускоряясь за счет приложенного электрического поля, достигают анода. Вместо сложной динодной системы в КФУ используется извилистый тонкий полупроводниковый канал. При прохождении этого канала электроны ударяются о его стенки, и при каждом таком столкновении с поверхности стенок канала выбиваются вторичные электроны. Поскольку количество электронов все время возрастает, этот процесс носит лавинообразный характер. Коэффициент усиления такого КФУ бывает более 10^9. Результирующий ток снимается с анода. КФУ часто изготавливаются герметичными и имеют более прочную конструкцию по сравнению с хрупкими традиционными ФУ. Влияние магнитных полей на такие детекторы незначительно.

На рис. 15.2 показаны два типа КФУ, один из которых является герметичным устройством, а второй – негерметичным. Достоинство КФУ – низкий уровень фонового шума. Под термином фоновый шум подразумевается уровень выходного сигнала при отсутствии падающего света. В традиционных ФУ составляющая фонового шума, возникающего в динодной системе, имеет довольно большое значение. В КФУ фоновый шум возникает, в основном, из-за теплового излучения фотокатода. Поскольку КФУ изготавливаются в виде монолитных конструкций, в них не возникает эффекта накапливания заряда, характерного для обычных ФУ. Поэтому КФУ являются очень стабильными устройствами, которым не свойственны внезапные всплески выходного сигнала. При этом, благодаря отсутствию шума, характерного для динодов, легко отделить электронный шум от полезного сигнала. Все это ведет к высокой долговременной стабильности устройства.

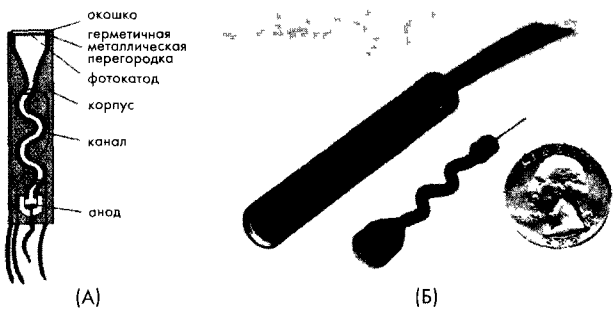


Рис. 15.2. Канальный фотоумножитель А – поперечное сечение, Б – внешний вид устройств с герметичным корпусом и без него (напечатано с разрешения Perkin Elmer, Inc)

15.2. Ионизационные детекторы

Детекторы этого класса основаны на способности некоторых газов и твердых тел вырабатывать ионные пары при воздействии на них ионизационного излучения. Далее положительные и отрицательные ионы при помощи электростатического поля отделяются друг от друга и их количество измеряется.

Ионизация появляется при прохождении заряженных частиц на большой скорости сквозь атомы вещества. Возникающие при этом электромагнитные силы отрывают электроны от атомов, формируя при этом пары ионов. Примечательно, что при этом одна радиоактивная частица, пока не кончится ее энергия, способна создать сразу несколько ионных пар. Незаряженные частицы (такие как нейтроны) при столкновении с ядрами также формируют пары ионов.

15.2.1. Ионизационные камеры

Такие детекторы являются наиболее ранними и широко распространенными датчиками ионизирующих излучений. Радиоактивные частицы при прохождении через камеру вызывают ионизацию и возбуждение молекул газа. Для запуска процесса ионизации частица должна обладать энергией, как минимум, равной энергии ионизации молекул газа. Для большинства используемых в детекторах газов

энергия ионизации составляет порядка 10 20 эВ [2] Однако существуют и другие механизмы, при которых попадающие внутрь камеры частицы теряют свою энергию при прохождении через газ не на его ионизацию, т е на отделение электронов от атомов, а , например, на перемещение электронов на более высокий энергетический уровень Поэтому средняя энергия, которую теряет частица, на образование одной электронной пары (*W*-энергия) всегда выше энергии ионизации газа Величина *W*-энергии определятся типом газа (таблица 15 1), видом излучения и его энергией

Таблица 15.1. Величина W-энергии для разных газов

	W-энергия, эВ/ионная пара	
Газ	Быстрые электроны	α-частицы
A	27,0	25 9
He	32,5	31 7
N_2	35,8	36,0
Воздух	35,0	35 2
CH_4	30,2	29,0

Источник [2]

В присутствии электрического поля перемещение положительных и отрицательных ионов приведет к возникновению электрического тока В заданном объеме скорость образования ионных пар является постоянной Для этого скорость образования ионных пар должна уравновешиваться скоростью либо их распада вследствие рекомбинации, либо выхода за пределы объема за счет процессов диффузии и миграции При незначительном уровне рекомбинации и эффективном сборе всех зарядов в системе устанавливается стационарный ток, являющийся точной мерой скорости образования ионных пар На рис 15 3 показана принципиальная схема ионизационной камеры и зависимости тока от напряжения, полученные в ней В объеме газа, расположенном между двумя электродами, создается электрическое поле Последовательно с источником напряжения *E* и электродами подключен амперметр В отсутствии процесса ионизации через полученную электрическую цепь ток не течет, поскольку между электродами находится неэлектропроводная среда Радиоактивные частицы, попадая внутрь камеры, при-

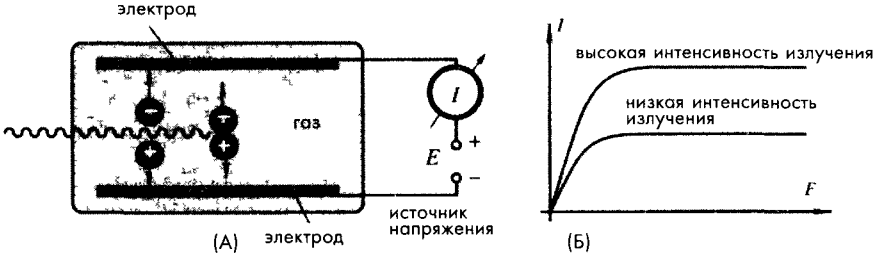


Рис. 15.3. Упрощенная схема ионизационной камеры (А), зависимость тока от напряжения (Б)

водят к образованию положительных и отрицательных ионов, которые под действием электрического поля направляются к соответствующим электродам, что вызывает появление в цепи электрического тока. Как видно из рис. 15.3Б, при относительно низких значениях приложенного напряжения ионы рекомбинируют довольно сильно, поэтому выходной ток пропорционален напряжению. При увеличении разности потенциалов число рекомбинаций уменьшается до тех пор, пока все ионы не станут долетать до электродов, после чего ток перестает зависеть от напряжения, хотя его величина будет, по прежнему, определяться интенсивностью излучения. Эта зона называется зоной насыщения. Именно эта зона является областью нормальной работы ионизационной камеры.

15.2.2. Пропорциональные камеры

Пропорциональные камеры, заполненные газом, относятся к детекторам, работающим в импульсном режиме, принцип действия которых основан на умножении электронов в газе. Поэтому такие камеры также называются пропорциональными счетчиками. Благодаря эффекту фотоумножения, выходной сигнал пропорционального детектора намного превышает сигнал обычной ионизационной камеры. Такие счетчики, в основном, используются при детектировании и спектроскопии мягкого рентгеновского излучения, а также для обнаружения нейтронов. В отличие от ионизационных камер пропорциональные счетчики работают при высоких напряжениях, значительно ускоряющих электроны, возникающие в результате столкновений. Поскольку эти электроны после ускорения обладают достаточно большой энергией, они могут вовлечь в процесс ионизации нейтральные молекулы газов, создавая при этом дополнительные ионные пары. Следовательно, процесс ионизации носит лавинный характер, что приводит к резкому возрастанию тока через электроды. Такая ионизация называется лавиной Таунсенда. В пропорциональном счетчике лавинообразный процесс заканчивается, как только электрон достигает анода. Поскольку в таком детекторе электрон должен достичь уровня ионизации газа, существует пороговое напряжение, после которого начинается этот лавинообразный процесс. Для газов, используемых в пропорциональных счетчиках, при атмосферном давлении этот пороговый уровень составляет порядка 10^6 В/м.

На рис. 15.4 показаны зоны действия различных газовых счетчиков. При очень низких напряжениях поле не может помешать рекомбинации ионных пар. По достижении уровня насыщения все ионы достигают электродов. При дальнейшем увеличении напряжения происходит явление фотоумножения.

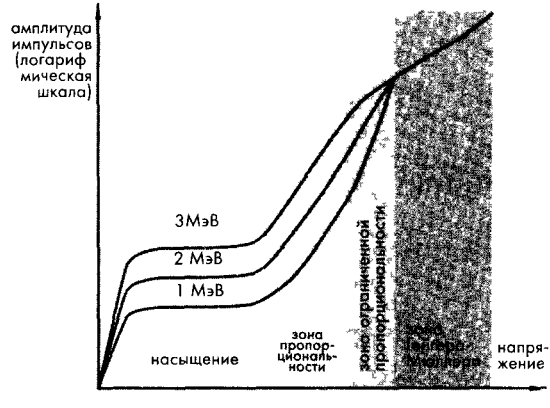


Рис. 15.4. Зоны рабочих напряжений для газовых детекторов [2]

До некоторого уровня напряжения процесс умножения фотоэлектронов будет линейным, а количество собранных зарядов пропорциональным количеству исходных ионных пар. Если приложенное напряжение продолжать увеличивать, из-за медленной скорости положительных ионов линейность процесса фотоумножения нарушится.

15.2.3. Счетчики Гейгера-Мюллера

Счетчик Гейгера-Мюллера (Г-М) был изобретен в 1928 году и до сих пор применяется очень широко, что объясняется его простотой, низкой стоимостью и простой эксплуатации. Счетчики Г-М отличаются от остальных ионизационных камер использованием гораздо более высоких напряжений возбуждения (рис. 15.4). В рабочей области счетчиков Г-М амплитуда выходных импульсов не зависит от энергии ионизационного излучения, а является только функцией приложенного напряжения. Такие детекторы, как правило, изготавливаются в форме трубки, в центре которой расположена проволочка, выполняющая роль анода (рис. 15.5). Трубка заполняется инертным газом, таким как гелий или аргон, в который часто добавляются дополнительные компоненты, действующие как гасящие реагенты для предотвращения повторного запуска счетчика в процессе детектирования. Повторный запуск может привести к возникновению большого количества ложных импульсов, вместо одного желаемого. Процедуру гашения можно выполнить несколькими методами. Вот некоторые из них: сокращение времени воздействия высокого напряжения, использование высокоимпедансных резисторов, включенных последовательно с анодом, и добавление гасящего реагента в концентрации 5-10%. Молекулы многих органических газов обладают свойствами, позволяющими им быть гасителями лавинных процессов. Среди них самыми популярными являются этиловый спирт и этиловый эфир муравьиной кислоты.

Типовой лавинный процесс запускается одним первичным электроном. При этом создается большое количество вторичных ионов, а также много молекул газа переходят в возбужденное состояние. В течение нескольких наносекунд эти молекулы возвращаются в свое исходное состояние, выпуская лишнюю энергию в виде УФ излучения. Эти испущенные фотоны играют важную роль в цепных реакциях, происходящих в счетчике Г-М. При поглощении фотонов поверхностью катода или молекулами газа происходит высвобождение электронов, летящих навстречу аноду, которые при этом запускают новые лавинные процессы. Быстрое распространение цепных реакций ведет к возникновению лавинных процессов по всему объему трубки. Вторичные ионы формируют цилиндрическую область, окружающую анод, в которой запускаются все новые и новые лавинные процессы.

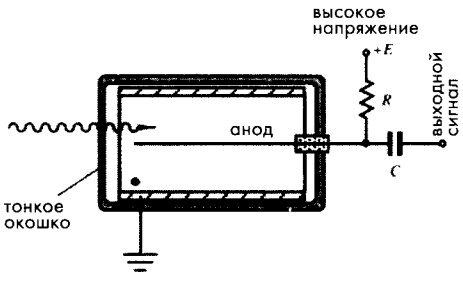


Рис. 15.5. Схема счетчика Гейгера-Мюллера. Символ « • » указывает газ

Такая цепная реакция продолжается до некоторого момента времени, определяемого количеством лавинных

процессов и независящего от энергии частицы-инициатора. Поэтому импульсы тока на выходе счетчика Г-М имеют всегда одинаковую амплитуду. Следовательно, счетчики Г-М являются качественными, а не количественными детекторами радиоактивных излучений.

В счетчиках Г-М одна частица, обладающая достаточной энергией, может создать около 10^9-10^{10} ионных пар. Поскольку одна ионная пара, сформированная в трубке счетчика, способна вызвать полный разряд детектора Гейгера, считается, что эффективность счетчика Гейгера может быть равной 100%. Однако счетчики Г-М редко используются для детектирования нейтронов, поскольку при этом они обладают низкой эффективностью. Эффективность счетчиков Г-М при детектировании γ-излучений повышается при применении трубок, стенки катода внутри которых изготовлены из материала с большим атомным номером. Например, для детектирования γ-частиц часто используются катоды из висмута (Z=83) в комбинации с газами, также имеющими большие атомные номера, такими как ксенон и криптон. Эффективность счета таких детекторов достигает 100% при энергиях фотонов ниже 10 кэВ.

15.2.4. Полупроводниковые детекторы радиоактивности

Наилучшей разрешающей способностью среди современных детекторов радиационных излучений обладают полупроводниковые датчики. В полупроводниковых материалах основными носителями информации являются пары электрон-дырка, создаваемые вдоль траектории полета заряженной частицы через детектор. Заряженная частица может быть либо первичным излучением, либо вторичной частицей. Пары электрон-дырка в некотором отношении являются аналогами ионных пар в газовых детекторах. Когда к полупроводниковому материалу приложено электрическое поле, созданные носители зарядов начинают перемещаться в определенных направлениях, что означает возникновение электрического тока. Датчики, построенные на этом принципе, называются твердотельными или полупроводниковыми диодными детекторами. Принцип действия таких детекторов аналогичен принципу полупроводниковых детекторов светового излучения. Он базируется на перемещении электронов с одного энергетического уровня на другой при получении или потере энергии (см. раздел 14.1 главы 14).

При прохождении заряженной частицы сквозь полупроводник по пути ее следования возникает много пар электрон-дырка (см. рис. 14.1 главы 14). Процесс образования пар может быть как прямым, так и косвенным, при котором частица участвует в формировании электронов высоких энергий, постепенно теряющих свою энергию на создание новых пар электрон-дырка. Интересно отметить, что вне зависимости от механизма формирования пар электрон-дырка на создание одной пары первичная заряженная частица затрачивает одинаковую среднюю энергию, которую часто по аналогии с газоразрядными детекторами называют «энергией ионизации». Основное достоинство полупроводниковых детекторов заключается в очень малой величине этой энергии. Ее значение для кремния и германия составляет порядка 3 эВ, тогда как в газовых детекторах энергия, необходимая для создания ионной пары, равна 30 эВ.

Поэтому при одной и той же мощности исходного излучения в полупроводниковых детекторах возникнет в 10 раз большее количество носителей зарядов.

Для получения твердотельного детектора в полупроводниковом материале необходимо сформировать, по крайней мере, два электрода. В процессе детектирования выводы этих электродов подсоединяются к источнику напряжения, обеспечивающего протекание в цепи электрического тока. Однако на практике материалы из чистого кремния или германия не используются, что связано с довольно большими токами утечек, вызванных относительно низким удельным сопротивлением этих полупроводников (например, для кремния оно составляет около 50 кОм•см). При приложении к электродам такого детектора внешнего напряжения, в цепи может возникнуть ток, в 3...5 раз превышающий величину тока, индуцированного излучением. Поэтому детекторы этого типа реализуются на основе p-n переходов с обратным смещением, что позволяет значительно снизить токи утечек. Фактически, детектор является полупроводниковым диодом, проводящим ток (имеющим низкое удельное сопротивление) при подключении анода (p-зоны перехода) к положительному выводу источника питания, а катода (n-зоны) – к отрицательному выводу. При обратном подключении ток через диод практически не течет (т.е. он обладает высоким удельным сопротивлением). При сильном обратном смещении диода (значительно превышающем допуски производителя) происходит его пробой, что приводит к резкому увеличению тока утечки; это вызывает катастрофическое ухудшение рабочих характеристик детектора или даже выход его из строя.

В настоящее время выпускаются кремниевые диоды нескольких конфигураций: диоды с диффузионным переходом, диоды с поверхностным запирающим слоем, ионно-имплантированные детекторы, детекторы с эпитаксиальным слоем и др. Первые два указанных типа детекторов широко применяются при детектировании α-частиц и других слабопроникающих излучений. Хорошие полупроводниковые детекторы радиоактивных излучений должны обеспечивать:

1. отличную передачу заряда
2. линейность между мощностью излучения и количеством пар электрон-дырка
3. отсутствие свободных носителей зарядов (низкий ток утечки)
4. генерацию максимального числа пар электро-дырка на единицу излучения
5. высокую эффективность детектирования
6. хорошее быстродействие
7. большую зону сбора зарядов
8. низкую стоимость

Во время эксплуатации полупроводниковых детекторов необходимо учитывать следующие их особенности: наличие зоны нечувствительности и возможность радиационного повреждения устройства. При попадании в детектор тяжелые заряженные частицы или другие слабопроникающие излучения могут потерять значительную часть своей энергии еще до того, как они достигнут чувствительной зоны датчика. Энергия теряется на металлическом электроде, а также в довольно толстом слое кремния, расположенном непосредственно под электродом. Самый простой и распространенный способ борь-

бы с этим явлением заключается в изменении угла попадания излучения в детектор [2]. Когда направление излучения перпендикулярно поверхности детектора (угол падения равен нулю), потери мощности в мертвой зоне определяются выражением:

$$\Delta E_0 = \frac{dE_0}{dx} t, \tag{15.4}$$

где t – толщина мертвой зоны. Если угол попадания излучения в детектор станет равным θ, выражение, описывающее потери энергии, примет вид:

$$\Delta E(\theta) = \frac{\Delta E_0}{\cos\theta} \tag{15.5}$$

Уравнение для нахождения разности между измерениями, полученными при разных углах попадания излучения в детектор имеет вид:

$$E' = \left[E_0 - \Delta E_0\right] - \left[E_0 - \Delta E(\theta)\right] = \Delta E_0 \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1\right). \tag{15.6}$$

Из этого выражения видно, что меняя угол θ во время проведения серии измерений, можно получить зависимость E' от (1/cos θ)-1 в виде прямой линии с наклоном, равным ΔE_0. Используя табличные данные для dE_0/dx, по уравнению (15.4) можно определить толщину мертвой зоны.

Любое превышение эксплуатационных режимов может привести к разрушению решетки кристаллической структуры из-за явлений пробоя, связанных с прохождением через кристалл измеряемых излучений. Такие повреждения сравнительно редко встречаются при работе с легкими ионизирующими излучениями (β-частицы и γ-лучи), однако при исследовании тяжелых частиц они могут стать серьезной проблемой. Например, длительное воздействие на детектор компонентов ядерного синтеза приводит к значительном росту тока утечки, а, следовательно, и сильному ухудшению разрешающей способности датчика. При серьезных радиационных повреждениях в спектре исследуемых моноэнергетических частиц могут появиться дополнительные пики.

Как отмечалось ранее, диоды с диффузионным переходом и диоды с поверхностным запирающим слоем не подходят для детектирования проникающего излучения. Причина этого заключается в узкой активной зоне таких детекторов, которая редко превышает 2...3 мм, что недостаточно для проведения, например, γ-лучевой спектроскопии. Для работы с проникающими видами излучений необходимо применять полупроводниковые детекторы с дрейфующими ионами. В таких детекторах формируется дополнительный толстый слой со сбалансированным количеством примесей, добавляющих полупроводниковому материалу свойства того или иного типа проводимости (p или n). Цель легирования – получение полупроводника, которому не присущи свойства никакого типа проводимости. Однако на практике идеальный p-n баланс достичь никогда не удается. Проводимость материалов из чистого кремния

и германия чаще бывает p-типа. Поэтому для получения сбалансированного материала в него необходимо ввести атомы доноров. В качестве донора чаще всего используется литий, атомы которого методом диффузии вводятся в кристалл p-типа. При этом количество введенных атомов лития намного превышает число исходных акцепторов, что соответствует созданию рядом с чувствительной поверхностью зоны проводимости n-типа. После этого температура повышается и на переход подается напряжение обратного смещения. Это приводит к тому, что литий начинает медленно дрейфовать в сторону зоны p-проводимости. Таким образом достигается нейтрализация исходной проводимости кристалла. Этот процесс может длиться в течение нескольких недель. Для последующего поддержания полученного баланса детектор должен храниться при низкой температуре, например, для германия эта температура равна 77 K. Поскольку кремний обладает очень низкой подвижностью ионов, детекторы, реализованные на его основе, могут храниться и работать при комнатной температуре. Однако атомный номер кремния (14) намного ниже атомного номера германия (32), что означает его более низкую эффективность при детектировании γ-лучей, поэтому кремниевые детекторы редко используются в γ-спектроскопии.

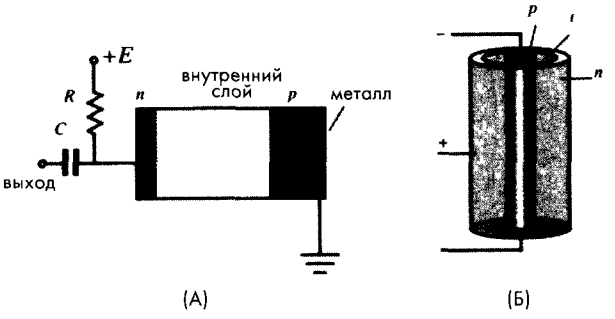


Рис. 15.6. Детектор с PIN переходом: А – структура детектора, Б – коаксиальная конфигурация детектора

На рис. 15.6А показана упрощенная схема детектора, реализованного на основе полупроводникового материала, легированного литием. Он состоит из трех зон, кристалл с «нейтральной» проводимостью расположен посередине. Для увеличения рабочего объема детектор иногда изготавливают в форме цилиндра (рис. 15.6Б). Таким образом были реализованы Ge(Li) детекторы с рабочим объемом до 150 $см^3$.

Несмотря на популярность кремниевых и германиевых детекторов, они являются далеко неидеальными с определенных точек зрения. Например, для снижения токов утечек германиевые детекторы должны работать при криогенных температурах; а кремниевые детекторы, в свою очередь, не эффективны при обнаружении γ-излучений. Существуют и другие полупроводниковые материалы, которые могут использоваться для детектирования радиоактивных излучений при комнатной температуре. Среди них: CdTe, HgI_2, GaAs, Bi_2S_3 и GaSe. Характеристики некоторых полупроводниковых материалов приведены в таблице 15.2

Самым популярным полупроводником для изготовления детекторов радиоактивных излучений в настоящее время является теллурид кадмия. Он обладает довольно высоким атомным номером (48 и 52), а также относительно большой шириной зоны запрещенных энергий (1.47 эВ), поэтому детекторы на его основе могут работать при комнатной температуре. Современная технология позволяет

выращивать кристаллы CdTe очень высокой чистоты, из которых изготавливаются детекторы с PIN переходом. Для компенсации излишка акцепторов здесь также может использоваться метод введения сбалансированных примесей; в данном случае роль донора выполняет хлор. Выпускаемые в настоящее время CdTe детекторы имеют диаметр 1...50 мм и работают при температурах до 50°C без значительного увеличения шума. Существуют два типа CdTe детекторов: с легированием хлором и без него. Второй тип имеет высокое объемное удельное сопротивление (до 10^{10}Ом·см), однако его разрешающая способность невелика. Разрешение детекторов с легированием гораздо выше, но их удельное сопротивление, к сожалению, ниже (10^8 Ом·см), что ведет к увеличению тока утечки. К тому же они склоны к поляризации, что может существенно ухудшить их рабочие характеристики.

Таблица 15.2. Энергетические свойства некоторых полупроводниковых материалов

Материал (рабочая температура в K)	Z	Ширина зоны запрещенных энергий, эВ	Энергия на создание одной пары электрон-дырка, эВ
Si(300)	14	1 12	3 61
Ge(77)	32	0 74	2 98
CdTe(300)	48-52	1 47	4 43
HgI_2(300)	80-53	2 13	6 5
GaAs(300)	31-33	1 43	4 2

В твердотельных детекторах также возможно добиться эффекта фотоумножения, как в газовых датчиках. Аналог пропорционального счетчика, называемый *лавинным детектором*, применяется для мониторинга излучений низких энергий. Коэффициент усиления таких детекторов обычно лежит в диапазоне нескольких сотен. Для получения такого усилительного эффекта внутри полупроводникового материала создается сильное электрическое поле. На основе детекторов ридиактивных излучений также возможно построение позиционно-чувствительных датчиков, принцип действия которых аналогичен преобразователям, работающим в ближнем ИК диапазоне спектра, описанным в разделе 7.5.6 главы 7.

Литература

1 Evans, R D *The Atomic Nucleus* McGraw-Hill, New York, 1955
2 Knoll, G F *Radiation Detection and Measurement* 3rd ed , John Wiley & Sons, New York, 1999

ГЛАВА 16

ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Когда ученый думает над проблемой, он задает вопрос,—«Почему?»
Когда инженер решает задачу, он спрашивает, —«А почему нет?»

В доисторические времена тепло было для людей основой их жизни, поэтому даже тогда они пытались оценить его интенсивность, измеряя температуру. Возможно самым простым и самым распространенным способом определения температуры является измерение теплового расширения различных веществ. На этом принципе реализованы все жидкостные стеклянные термометры. В электрических преобразователях применяются несколько другие принципы детектирования. В настоящее время широко распространенны следующие датчики температуры: резистивные, термоэлектрические, полупроводниковые, оптические и пьезоэлектрические детекторы.

Измерение температуры всегда заключается в передаче небольшой порции тепловой энергии от объекта к датчику, который должен преобразовать эту энергию в электрический сигнал. Когда контактный детектор (зонд) помещается внутрь объекта или на него, между объектом и зондом происходит передача тепла за счет теплопроводности. При этом чувствительный элемент, входящий в состав зонда, либо разогревается, либо охлаждается. То же самое происходит и при передаче тепла при помощи излучения: тепловая энергия в виде ИК излучения либо поглощается датчиком, либо выделяется им в зависимости от температуры объекта и типа оптической связи. Любой датчик, независимо от его размеров, вносит возмущение в зону измерения, что приводит к возникновению ошибок при определении температуры. Это касается любых способов детектирования: и радиационных, и конвективных и теплопроводных. Таким образом, разработчик должен всегда стремиться минимизировать погрешность измерений, применяя соответствующие конструкции датчиков и методы компенсации погрешностей.

Существует два основных метода измерения температуры: *равновесный* и *прогнозируемый*. В равновесном методе измерение температуры проводится, когда между измеряемой поверхностью и чувствительным элементом, находящимся в зонде, наступает тепловое равновесие, т.е. между датчиком и объектом измерения нет существенной разности температур. В методе прогнозирования в процессе

проведения измерений тепловое равновесие не наступает, а значение текущей температуры определяется по скорости изменения температуры датчика. С момента размещения чувствительного элемента на объекте до наступления теплового равновесия между объектом и датчиком может пройти довольно много времени, особенно, если контактные площадки сухие. Например, медицинский электронный термометр определяет температуру в ванне с водой за 10 секунд, в то время как для измерения подмышечной температуры требуется, по крайней мере, 3...5 минут.

Рассмотрим источники возможных ошибок при измерении температуры контактным способом. Одна из причин возникновения ошибок заключается в том, что датчик, как правило, соединяется не только с объектом, температуру которого он измеряет, но и с другими предметами. Другая причина кроется в использовании соединительных кабелей (рис. 16.1А). Чувствительный элемент, подсоединяемый к объекту с температурой T_B, обладает своей собственной температурой T_S. Для проведения точных измерений необходимо достичь состояния теплового равновесия, при котором эти две температуры станут практически равными. Один конец кабеля соединяется с зондом, а другой конец подвергается действию температуры окружающей среды T_0, которая может значительно отличаться от температуры объекта. Таким образом, соединительный кабель не только передает электрический сигнал датчика, но и часть тепла от элемента или к нему. На рис. 16.2Б показана тепловая схема, включающая в себя объект, датчик, окружающую среду и тепловые сопротивления r_1 и r_2, которые отображают способность вещества проводить тепловую энергию и определяются как величины, обратные коэффициентам теплопроводности, т.е. $r=1/\alpha$. Если объект теплее окружающей среды, тепловой поток будет направлен туда, куда указывает стрелка.

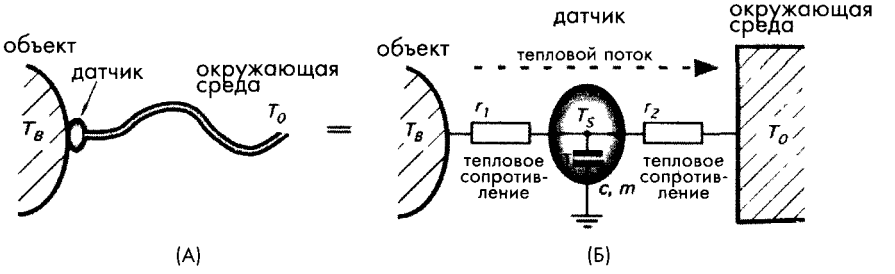


Рис. 16.1. Датчик температуры имеет тепловые контакты как с объектом, так и с соединительным кабелем (А), эквивалентная тепловая схема (Б)

Схема на рис. 16.1Б напоминает электрическую схему, и для расчета ее параметров также применяются законы электрических цепей, такие как законы Кирхгофа и Ома (Интересно отметить, что закон Кирхгофа был первоначально выведен не для электрической цепи, а для водопровода). Теплоемкость вещества, по аналогии с электрическими цепями, отображается в виде конденсатора. Считая, что все температуры уже вышли на определенный стационарный уровень, к этой системе можно применить закон сохранения энергии, из которого следует, что тепловая энергия, переданная объектом датчику, должна быть равна энергии,

отданной датчиком в окружающую среду. Исходя из этого, можно записать следующее уравнение:

$$\frac{T_B - T_S}{r_1} = \frac{T_B - T_0}{r_1 + r_2}. \tag{16.1}$$

Из которого можно вывести выражение для температуры датчика:

$$T_S = T_B - (T_B - T_0)\frac{r_1}{r_2} = T_B - \Delta T \frac{r_1}{r_2}, \tag{16.2}$$

где ΔT – разность температур между объектом и окружающей средой. Подробнее рассмотрим уравнение (16.2). Анализируя его, можно сделать несколько заключений. Во-первых, температура датчика всегда отличается от температуры объекта. Исключение составляет случай, когда температуры окружающей среды и объекта равны (т.е. $\Delta T = T_B - T_0 = 0$). Во-вторых, при любом ΔT температура датчика будет приближаться к температуре объекта только в том случае, когда отношение r_1/r_2 стремится к нулю. Это означает, что для снижения погрешности измерения необходимо улучшать тепловую связь между объектом и датчиком и, по возможности, отделять датчик от окружающей среды, что часто очень нелегко выполнить.

Все вышесказанное справедливо для стационарных условий. Теперь рассмотрим динамический процесс, когда температура меняется во времени. Такая ситуация происходит при изменении температуры окружающей среды или объекта, а также в момент присоединения датчика к объекту, когда его температура еще не успела стабилизироваться. При контакте чувствительного элемента с объектом между ними происходит теплообмен. Количество переданного при этом тепла определяется разностью температур элемента (T_S) и объекта (T_B):

$$dQ = \alpha_1 (T_B - T_S) dt, \tag{16.3}$$

где $\alpha_1 = 1/r_1$ – теплопроводность в зоне контакта датчика и объекта. Если удельная теплоемкость датчика равна c, а масса – m, количество поглощенного им тепла можно найти из выражения:

$$dQ = mcdT. \tag{16.4}$$

Без учета тепловых потерь датчика в окружающую среду через соединительный кабель и вспомогательные структуры, т.е. предполагая, что $r_2 = \infty$, на основе уравнений (16.3) и (16.4) можно получить следующее дифференциальное уравнение первого порядка:

$$\alpha_1 (T_1 - T)\, dt = mcdT. \tag{16.5}$$

Определим тепловую постоянную времени как:

$$\tau_T = \frac{mc}{\alpha_1} = mcr_1, \tag{16.6}$$

тогда дифференциальное уравнение (16.5) примет вид:

$$\frac{dT}{T_1 - T} = \frac{dt}{\tau_T}. \tag{16.7}$$

Решение этого уравнения можно записать как:

$$T_S = T_B - \Delta T e^{-t/\tau_T}, \tag{16.8}$$

где предполагается, что первоначально датчик находится при температуре T_B. На рис. 16.2А показан переходный процесс установления температуры датчика, соответствующий уравнению (16.8). Постоянная времени τ_T определяется временем, за которое температура T достигает уровня, равного 63.2% от первоначальной разности температур ΔT_0, Чем меньше постоянная времени, тем быстрее датчик набирает требуемую температуру.

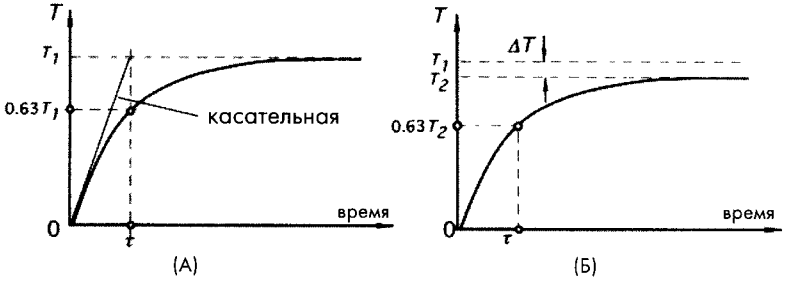


Рис. 16.2. Переходные характеристики чувствительного элемента: А – идеальная связь датчика с объектом (нет тепловых потерь), Б – чувствительный элемент отдает часть своего тепла в окружающую среду

Из уравнения (16.8) следует, что при t->∞, температура датчика становиться равной температуре объекта: T=T_1. Теоретически, для достижения полного теплового равновесия между объектом и датчиком требуется бесконечно большое время. Но поскольку обычно требуется проводить измерения с заданной точностью, в большинстве случаев считают, что через интервал времени, равный 5...10 постоянным времени, наступает квазиравновесное состояние. Например, в момент времени t=5τ, температура датчика будет составлять 0.7% от ΔT_0, а при t=10τ, разница между температурами уже равна 0.005%.

Теперь рассмотрим ситуацию, при которой датчик теряет часть тепла в окружающую среду, т.е. $r_2 \neq \infty$. В этом случае тепловая постоянная времени определяется как:

$$\tau_T = \frac{mc}{\alpha_1 + \alpha_2} = mc\frac{r_1}{1 + r_1 / r_2}. \tag{16.9}$$

Переходный процесс выхода температуры на режим показан на рис. 16.8Б. Отметим, что в данном случае температура датчика никогда не станет равной температуре объекта, сколько бы времени не прошло.

Типовой контактный датчик температуры состоит из следующих компонентов (рис. 16.3А):

1. Чувствительного элемента: материала, реагирующего на изменение его собственной температуры. Хороший элемент обладает низкой удельной теплоемкостью, малой массой, большой теплопроводностью, высокой и прогнозируемой чувствительностью
2. Контактов: проводящих пластинок или проводов, связывающих чувствительный элемент с внешней электронной схемой. Контакты должны обладать минимально возможными теплопроводностью и электрическим сопротивлением. Также они часто выполняют роль опорной конструкции.
3. Защитного корпуса: специальной оболочки или покрытия, физически разделяющего чувствительный элемент от окружающей среды. Хороший корпус имеет низкое тепловое сопротивление (высокую теплопроводность) и хорошие диэлектрические свойства. Он должен быть влагонепроницаемым, чтобы вода и другие факторы окружающей среды не могли сказаться на работе чувствительного элемента.

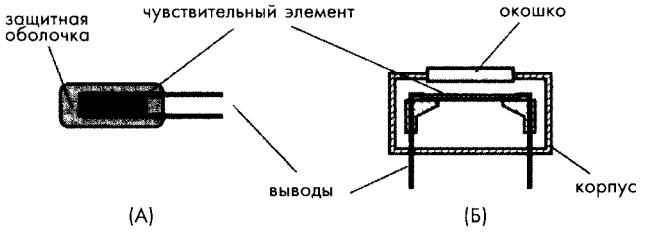


Рис. 16.3. Основные структуры датчиков температуры: А – контактный датчик, Б – бесконтактный датчик (детектор теплового излучения)

На рис. 16.3Б показан *бесконтактный* датчик температуры, представляющий собой оптический детектор теплового излучения, подробно описанный в главе 14. В его состав также входит чувствительный элемент, реагирующий на изменение собственной температуры. Основное отличие контактных и бесконтактных датчиков заключается в способе передачи тепла от объекта к элементу: в контактных датчиках задействован механизм теплопроводности через физический контакт, в бесконтактных тепло передается через излучение или оптическим методом.

Для улучшения быстродействия датчиков тепловых излучений толщину чувствительного элемента делают минимальной, в то время как для повышения чувствительности увеличивают его площадь поверхности. В дополнение к чувствительному элементу в состав бесконтактного теплового датчика может входить оптическое окошко и встроенная интерфейсная схема. Внутренняя часть корпуса датчика обычно заполняется сухим воздухом или азотом.

Все датчики температуры можно разделить на два класса: *абсолютные* и *относительные* детекторы. Абсолютные датчики измеряют температуру относительно либо абсолютного нуля, либо любой другой точки на температурной шкале, например, относительно 0°C (273.15°K), 25°C и т.д. Примерами абсолютных датчиков являются термисторы и резистивные детекторы температуры (РДТ). Относительные датчики измеряют разность температур двух объектов,

один из которых называется эталонным. Типичным представителем относительных датчиков является термопара.

16.1. Терморезистивные датчики

Перед началом изучения этого раздела желательно ознакомиться с разделом 3.5.2 главы 3.

Хамфри Дэви еще в 1821 году заметил, что электрическое сопротивление различных металлов зависит от температуры [1]. Вильям Сименс в 1871 году разработал первый платиновый резистивный термометр. А в 1887 году Хью Каллендар опубликовал статью [2], в которой он описал способы практического применения платиновых термометров. Достоинствами терморезистивных датчиков являются высокая чувствительность, простота создания интерфейсных схем и долговременная стабильность. Такие датчики можно разделить на три группы: РДТ, детекторы на p-n переходах и термисторы.

16.1.1. Резистивные детекторы температуры

Этот термин обычно относится к металлическим детекторам, которые бывают проволочными и тонкопленочными. Поскольку удельное сопротивление всех металлов и большинства сплавов зависит от температуры, на их основе можно разрабатывать чувствительные элементы для измерения температуры (см. Приложение). Хотя для изготовления температурных детекторов подходят практически все металлы, но все же, в основном, для этих целей используется только платина. Это объясняется воспроизводимостью ее характеристик, долговременной стабильностью и прочностью. Для измерения температур выше 600°C применяются вольфрамовые РДТ. Все РДТ обладают положительными температурными коэффициентами. Выпускаются несколько типов РДТ:

1. Тонкопленочные РДТ, изготовленные из тонких слоев платины или ее сплавов, нанесенных на подходящую подложку, например, на кремниевую микромембрану. РДТ часто формируются в виде серпантинной структуры для получения высокого отношения длины к ширине
2. Проволочные РДТ, в которых платиновая проволока намотана внутри керамической трубочки и прикреплена к ней при помощи высокотемпературного клея. Такая конструкция позволяет изготавливать датчики, обладающие очень высокой стабильностью.

В соответствии с Международной практической температурной шкалой (IPTS-68) прецизионные датчики температуры должны калиброваться при температурах, определяемых воспроизводимыми равновесными состояниями некоторых материалов. В этой шкале температуры в Кельвинах обозначаются символом T_{68}, а в градусах Цельсия – t_{68}. Международный Комитет по Весам и Мерам в сентябре 1989 года принял новую Международную температурную шкалу (ITS-90). В ней температура в градусах Цельсия обозначается как t_{90}. В таблице 16.2 приведены различия между этими двумя шкалами, которые важны при проведении прецизионных измерений.

Таблица 16.1. Эталонные температурные точки

Описание точки	°C
Тройная точка водорода	-259,34
Точка кипения нормального водорода	-252,753
Тройная точка кислорода	-218,789
Точка кипения азота	-195,806
Тройная точка аргона	-189,352
Точка кипения кислорода	-182,962
Точка сублимации углекислого газа	-78,476
Точка замерзания ртути	-38,836
Тройная точка воды	0,01
Точка замерзания воды (смеси воды и льда)	0,00
Точка кипения воды	100,0
Тройная точка бензольной кислоты	122,37
Точка замерзания индия	156,634
Точка замерзания олова	231,968
Точка замерзания висмута	271,442
Точка замерзания кадмия	321,108
Точка замерзания свинца	327,502
Точка замерзания цинка	419,58
Точка замерзания сурьмы	630,755
Точка замерзания алюминия	660,46
Точка замерзания серебра	961,93
Точка замерзания золота	1064,43
Точка замерзания меди	1084,88
Точка замерзания никеля	1455
Точка замерзания палладия	1554
Точка замерзания платины	1769

**Троиная точка определяется равновесным состоянием трех фаз твердои, жидкой и газовой*

Таблица 16.2. Разница температур между шкалами IPTS-68 и ITS-90

	t_{90} (°C)	-10	0	10	20	30	40
T_{90}	$-t_{68}$ (°C)	0 002	0 000	-0 002	-0 005	-0 007	-0 010

Источник Saunders, P The International Temperature Scale of 1990, ITS-90 WOCE Newsletter 10, 1990

Уравнение (3 58) главы 3 является хорошим аппроксимационным выражением второго порядка для платины В промышленности принято использовать отдельные аппроксимации для низких и высоких температур Каллендар-ван Дасен предложил следующее аппроксимационное выражение для передаточной функции платинового детектора

В диапазоне –200 0°C

$$R_t = R_0\left[1 + At + Bt^2 + Ct^3(t-100)\right] \qquad (16\ 10)$$

А в диапазоне 0 630°C это выражение становится идентичным уравнению (3 58) главы 3

$$R_t = R_0\left[1 + At + Bt^2\right] \qquad (16\ 11)$$

Константы A, B и C определяются свойствами платины Ту же самую аппроксимацию можно представить в следующем виде

$$R_t = R_0\left\{1 + \alpha\left[t - \delta\left(\frac{t}{100}\right)\left(\frac{t}{100} - 1\right) - \beta\left(\frac{t}{100}\right)^3\left(\frac{t}{100} - 1\right)\right]\right\}, \qquad (16\ 12)$$

где t – температура в °C, а коэффициенты A, B и C определяются как

$$A = \alpha\left(1 + \frac{\delta}{100}\right), \quad B = -\alpha\delta \times 10^{-4}, \quad C = -\alpha\beta \times 10^{-8} \qquad (16\ 13)$$

Значение δ получается при калибровке детектора при высоких температурах (например, в точке замерзания цинка(419 58°C)), а коэффициент β – при калибровке при отрицательнои температуре

Для согласования со шкалой ITS-90 аппроксимацию Каллендар-ван Дасена необходимо уточнить Это довольно сложная процедура, подробности которой читатель может найти в описании этой шкалы В других странах приняты другие документы по РТД Например, в Европе это BS 1904 1984, DIN 43760-1980, IEC751 1983, а в Японии JISC1604-1981 В США разные компании разработали свои собственные стандарты на коэффициенты α Например, в стандарте SAMA StandardRC21-4-1966 величина α=0 003923°C^{-1}, в то время как в европейском стандарте DIN α=0 003850°C^{-1}, а в Британском стандарте – α=0 003900°C^{-1}

Таблица 16.1. Эталонные температурные точки

Описание точки	°C
Тройная точка водорода	-259,34
Точка кипения нормального водорода	-252,753
Тройная точка кислорода	-218,789
Точка кипения азота	-195,806
Тройная точка аргона	-189,352
Точка кипения кислорода	-182,962
Точка сублимации углекислого газа	-78,476
Точка замерзания ртути	-38,836
Тройная точка воды	0,01
Точка замерзания воды (смеси воды и льда)	0,00
Точка кипения воды	100,0
Тройная точка бензольной кислоты	122,37
Точка замерзания индия	156,634
Точка замерзания олова	231,968
Точка замерзания висмута	271,442
Точка замерзания кадмия	321,108
Точка замерзания свинца	327,502
Точка замерзания цинка	419,58
Точка замерзания сурьмы	630,755
Точка замерзания алюминия	660,46
Точка замерзания серебра	961,93
Точка замерзания золота	1064,43
Точка замерзания меди	1084,88
Точка замерзания никеля	1455
Точка замерзания палладия	1554
Точка замерзания платины	1769

**Тройная точка определяется равновесным состоянием трех фаз: твердой, жидкой и газовой.*

Таблица 16.2. Разница температур между шкалами IPTS-68 и ITS-90

	t_{90} (C)	-10	0	10	20	30	40
T_{90}	$-t_{68}$ (C)	0 002	0 000	-0 002	-0 005	-0 007	-0 010

Источник Saunders, P The International Temperature Scale of 1990, ITS-90 WOCE Newsletter 10, 1990

Уравнение (3.58) главы 3 является хорошим аппроксимационным выражением второго порядка для платины. В промышленности принято использовать отдельные аппроксимации для низких и высоких температур. Каллендар-ван Дасен предложил следующее аппроксимационное выражение для передаточной функции платинового детектора:

В диапазоне –200...0°C:

$$R_t = R_0\left[1 + At + Bt^2 + Ct^3(t-100)\right] \tag{16.10}$$

А в диапазоне 0...630°C это выражение становится идентичным уравнению (3.58) главы 3:

$$R_t = R_0\left[1 + At + Bt^2\right] \tag{16 11}$$

Константы A, B и C определяются свойствами платины. Ту же самую аппроксимацию можно представить в следующем виде:

$$R_t = R_0\left\{1 + \alpha\left[t - \delta\left(\frac{t}{100}\right)\left(\frac{t}{100} - 1\right) - \beta\left(\frac{t}{100}\right)^3\left(\frac{t}{100} - 1\right)\right]\right\}, \tag{16 12}$$

где t – температура в °C, а коэффициенты A, B и C определяются как:

$$A = \alpha\left(1 + \frac{\delta}{100}\right), \quad B = -\alpha\delta \times 10^{-4}, \quad C = -\alpha\beta \times 10^{-8} \tag{16 13}$$

Значение δ получается при калибровке детектора при высоких температурах (например, в точке замерзания цинка(419.58°C)), а коэффициент β – при калибровке при отрицательной температуре.

Для согласования со шкалой ITS-90 аппроксимацию Каллендар-ван Дасена необходимо уточнить. Это довольно сложная процедура, подробности которой читатель может найти в описании этой шкалы. В других странах приняты другие документы по РТД. Например, в Европе это: BS 1904:1984, DIN 43760-1980, IEC751:1983, а в Японии JISC1604-1981. В США разные компании разработали свои собственные стандарты на коэффициенты α. Например, в стандарте SAMA StandardRC21-4-1966 величина α=0.003923°C^{-1}, в то время как в европейском стандарте DIN α=0.003850°C^{-1}, а в Британском стандарте – α=0.003900°C^{-1}.

Обычно РТД калибруются при стандартных температурах, которые можно воспроизвести в лабораторных условиях с высокой степенью точности (см. таблицу 16.1). Калибровка в таких точках позволяет очень точно определить коэффициенты аппроксимации α и δ.

Типичные допуски для проволочных РДТ равны ±10 МОм, что соответствует ±0.025°С. Для обеспечения высокой точности измерений необходимо тщательно проектировать корпус РДТ, уделяя особое внимание его теплоизоляции. Это особенно важно при проведении измерений на высоких температурах, когда сопротивление изоляции резко падает. Например, резистор 10-МОм при температуре 550°С обладает погрешностью порядка 3 МОм, что соответствует температурной ошибке: –0.0075°С .

16.1.2. Кремниевые резистивные датчики

Кремний широко используется для изготовления датчиков температуры, обладающих положительным температурным коэффициентом (ПТК) сопротивления. В настоящее время кремниевые резистивные датчики часто встраиваются в микроструктуры для осуществления температурной компенсации или проведения прямых измерений температуры. Также существуют дискретные кремниевые датчики, например, детекторы температуры KTY фирмы Philips. Такие датчики обладают довольно хорошей линейностью (которая может быть улучшена при помощи простых термокомпенсационных цепей) и высокой долговременной стабильностью (обычно ±0.05K в год). ПТК кремниевых резисторов позволяет их использовать в системах, обеспечивающих безопасность нагревательных устройств: среднее превышение температуры (до 200°С) приводит к увеличению их сопротивления, за счет чего осуществляется функция самозащиты.

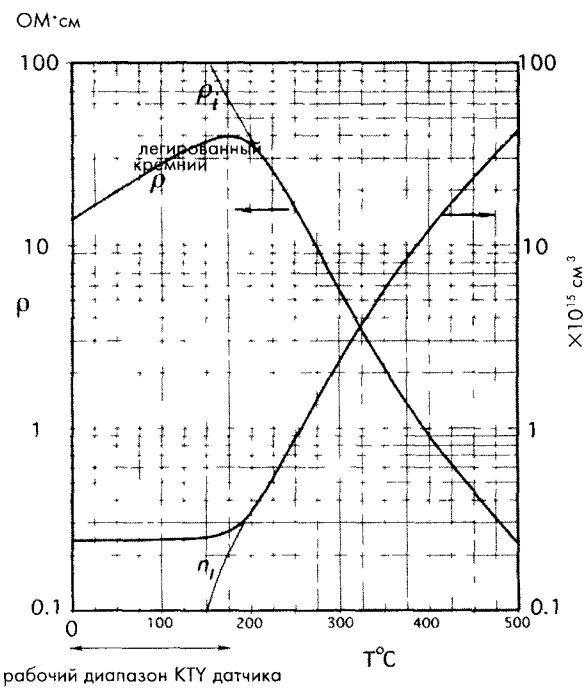


Рис. 16.4. Удельное сопротивление и количество свободных носителей зарядов в кремнии, легированном примесями n-типа

Чистый кремний, как монокристаллический, так и поликремний, сам по себе обладает отрицательным температурным коэффициентом (ОТК) сопротивления (рис. 18.1Б главы 18). Однако пос-

ле легирования примесями n-типа, в определенном температурном диапазоне его температурный коэффициент становится положительным (рис. 16.4). Этот эффект объясняется снижением подвижности носителей зарядов при понижении температуры. При высоких температурах количество свободных носителей зарядов увеличивается за счет спонтанно образуемых носителей, поэтому в этом температурном диапазоне преобладают собственные полупроводниковые свойства кремния. Таким образом, при температурах ниже 200°C, удельное сопротивление кремния имеет ПТК, а при температурах выше 200°C он становится отрицательным. KTY датчик состоит из кристалла кремния n-типа размером 500×500×240 мкм, металлизированного с одной стороны и с контактной площадкой с другой стороны. При такой конструкции датчика создается эффект «растягивания» сопротивления, в результате которого внутри кристалла устанавливается коническое распределение тока, значительно снижающее зависимость характеристик от производственных допусков. При больших токах и высоких температурах KTY датчик становится чувствительным к направлению тока. Для решения этой проблемы применяется сдвоенный датчик, в котором два чувствительных элемента включаются последовательно навстречу друг другу. Такие датчики часто используются в автомобилях.

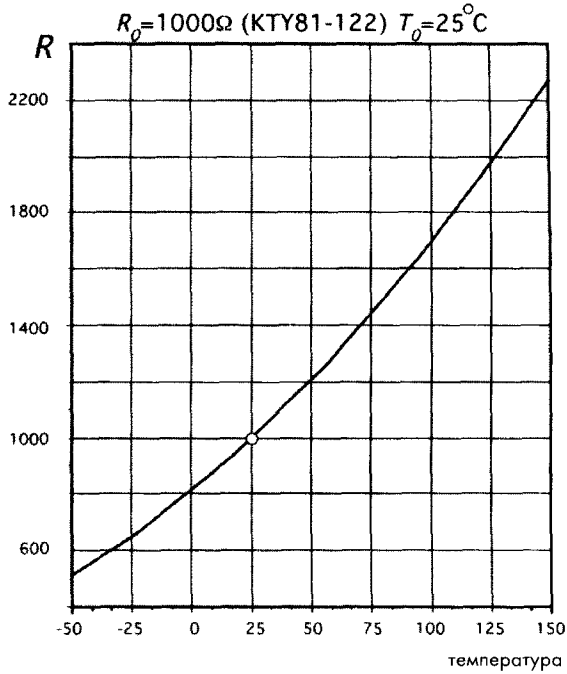


Рис.16.5. Передаточная функция кремниевого датчика температуры

Типичная чувствительность кремниевого датчика с ПТК составляет порядка 0.7%/°C, т.е. его сопротивление меняется на 0.7% при изменении температуры на 1°C. Передаточную функцию KTY датчика можно аппроксимировать полиномом второго порядка:

$$R_T = R_0\left[1 + A(T - T_0) + B(T - T_0)^2\right], \qquad (16.14)$$

где R_0 и T_0 – сопротивление в Омах и температура в Кельвинах, измеренные в эталонной точке. Например, рабочий диапазон датчиков KTY-81 составляет – 55...+150°C, $A = 0.007874\text{K}^{-1}$, $B = 1.874\times10^{-5}\text{K}^{-2}$. На рис. 16.5 показана типовая передаточная функция кремниевого резистивного датчика.

16.1.3. Термисторы

Термин *термистор* образовался в результате соединения двух слов: тепловой и резистор. Это название дано металл-оксидным детекторам, имеющим форму капель, стержней, цилиндров, прямоугольных пластин и толстых пленок. Термисторы относятся к классу датчиков абсолютной температуры, показания которых соответствуют абсолютной температурной шкале. Все термисторы делятся на две категории: с отрицательным температурным коэффициентом (ОТК) и положительным температурным коэффициентом (ПТК) сопротивления. Для проведения прецизионных измерений используются термисторы только с ОТК.

16.1.3.1. Термисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления

Обычные металоксидные термисторы обладают ОТК. Это значит, что при увеличении температуры их сопротивление падает. Сопротивление термисторов с ОТК, также как и любых других резисторов, определяется их физическими размерами и удельным сопротивлением материала. Зависимость между величиной сопротивления и температурой является сильно нелинейной (см. рис. 3.18 главы 3).

При проведении прецизионных измерений или при работе в широком температурном диапазоне нельзя напрямую использовать характеристики термисторов, приведенные в документации на них, поскольку типовые допуски на номинальные значения серийно выпускаемых изделий при температуре 25°C составляют порядка ±20%. Поэтому для достижения высокой точности измерений термисторы необходимо индивидуально калибровать в широком температурном диапазоне. Правда, существуют и прецизионные термисторы, характеристики которых в заводских условиях подгоняются методом шлифовки до требуемых размеров. Этот процесс проводится под непрерывным контролем за номинальными значениями сопротивлений при заданной температуре. Однако такая процедура настройки термисторов приводит к значительному повышению их стоимости. Поэтому на практике чаще применяется метод индивидуальной калибровки термисторов. В процессе калибровки измеряется сопротивление термистора при помещении его в среду точно известной температурой (для этих целей часто применяется камера с мешалкой, в которую может быть залита вода, но чаще минеральное масло или специальный состав, например, Flourent®). Если требуется многоточечная калибровка, эта процедура выполняется при разных температурах. Естественно, что качество проведенной калибровки сильно зависит от точности эталонного термометра. Для определения сопротивления термистор включается в измерительную цепь, по изменению тока в которой и судят о величине сопротивления. В зависимости от заданного уровня точности и стоимости калибровка термистора может проводиться на основе одной из известных аппроксимационных моделей.

При использовании термистора в качестве датчика абсолютной температуры предполагается, что при прохождении через него электрического тока, его собственная температура не изменится, что означает, что он не внесет в систему значительных тепловых возмущений, способных повлиять на точность измерений.

В этом случае говорят, что термистор обладает «нулевой мощностью». Увеличение температуры термистора в установившемся режиме вследствие явления саморазогрева описывается уравнением:

$$\Delta T_H = r\frac{N^2V^2}{S}, \tag{16.15}$$

где r – тепловое сопротивление между термистором и окружающей средой, V- приложенное постоянное напряжение, S – сопротивление термистора при измеряемой температуре, а N – рабочий цикл измерений (например, $N = 0.1$ означает, что постоянное напряжение подается на термистор только на время, равное10% от полного времени измерений). При проведении измерений по постоянному току $N = 1$.

Из уравнения (16.15) видно, что для выполнения условий «нулевой мощности» необходимо, чтобы:

- термистор обладал высоким удельным сопротивлением,
- термистор и объект измерения имели хорошую тепловую связь друг с другом (что должно снизить значение r),
- измерения проводились при небольшом постоянном напряжении, подаваемом в течение короткого интервала времени.

Далее будет показано, как эффект саморазогрева сказывается на величине сопротивления терморезистора, но пока будем считать, что он приводит к появлению лишь незначительных погрешностей.

При использовании термисторов в каких-либо измерительных системах необходимо знать их передаточные функции, которые являются аналитическими выражениями, связывающими величину сопротивления и температуру. Для описания передаточной функции термисторов были предложены несколько математических моделей. Следует отметить, что все математические модели являются только аппроксимациями, и, как правило, чем проще модель, тем ниже ее точность. С другой стороны, при использовании более сложных моделей значительно усложняется калибровка термисторов. Все существующие модели термисторов построены на экспериментально доказанном факте, что логарифм сопротивления термистора связан с его абсолютной температурой следующей полиномиальной зависимостью:

$$\ln S = A_0 + \frac{A_1}{T} + \frac{A_2}{T^2} + \frac{A_3}{T^3}. \tag{16.16}$$

На этом выражении построены три модели, описываемые далее.

16.1.3.1.1. *Простая модель*

В относительно узком температурном диапазоне и при некоторой потере точности можно отбросить два последних члена уравнения (16.16) [3]:

$$\ln S \cong A + \frac{\beta_m}{T}, \tag{16.17}$$

где A – константа, а β - характеристическая температура материала (в Кельвинах). Если известна величина сопротивления термистора S_0 при калибровочной температуре T_0, можно записать зависимость сопротивления от температуры в следующем виде:

$$S = S_0 e^{\beta_m (1/T - 1/T_0)}. \tag{16.18}$$

Очевидное достоинство этой модели – необходимость проведения калибровки термистора только в одной точке. Однако здесь предполагается знание коэффициента β_m. Если он неизвестен, приходится проводить вторую калибровку для нахождения его значения:

$$\beta_m = \frac{\ln(S_1 / S_0)}{(1/T_1 - 1/T_0)}, \tag{16.19}$$

где T_0 и S_0 и T_1 и S_1 – две пары температур и сопротивлений, полученных в двух калибровочных точках, находящихся на кривой, соответствующей уравнению (16.18). Считается, что значение β_m не зависит от температуры, но оно может меняться от изделия к изделию в пределах производственных допусков, которые обычно составляют ±1%. Температура термистора определяется по измеренному сопротивлению S при помощи следующего выражения:

$$T = \left(\frac{1}{T_0} + \frac{\ln(S / S_0)}{\beta_m} \right)^{-1}. \tag{16.20}$$

Погрешность аппроксимации, представленной выражением (16.20), мала в окрестности температуры калибровки, но значительно увеличивается при расширении рабочего диапазона (рис. 16.7).

Коэффициент β отвечает за кривизну характеристики термистора, но не является параметром, напрямую соответствующим его чувствительности, которая определяется температурным коэффициентом α. Коэффициент α может быть найден при дифференцировании уравнения (16.18):

$$\alpha_r = \frac{1}{S}\frac{dS}{dT} = -\frac{\beta}{T^2}. \tag{16 21}$$

Из уравнения (16.21) следует, что чувствительность термистора зависит как от β, так и от температуры. Термистор обладает лучшей чувствительностью на низких температурах, тогда как при увеличении температуры его чувствительность резко падает. Уравнение (16.21) также показывает, насколько меняется сопротивление S при изменении температуры на один градус. В термисторах с ОТК чувствительность α во всем температурном диапазоне меняется от -2% (в зоне высоких температур шкалы) до –8%/°С (в зоне низких температур шкалы), поэтому можно утверждать, что такие детекторы являются очень чувствительными устройствами, почти на порядок более чувствительными по сравнению с РДТ. Это особенно важно для применений, требующих высоких значений выходного сигнала в относительно

узком температурном диапазоне. Примером может служить медицинский электронный термометр.

16.1.3.1.2. *Модель Фрайдена*

В 1998 году автор этой книги предложил следующее усовершенствование простой модели [4]. Оно основывается на экспериментальном факте, что характеристическая температура β не является постоянной, а зависит от измеряемой температуры (рис. 16.6). В зависимости от фирмы-изготовителя и типа термистора эта функция может иметь как положительный наклон (как показано на рисунке), так и отрицательный. Идеальный случай, когда β совсем не зависит от температуры, на практике, фактически, не встречается.

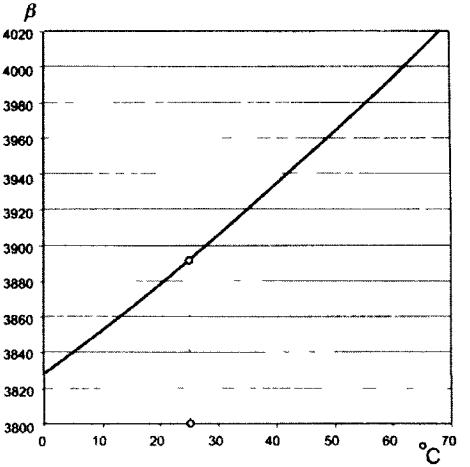


Рис. 16.6. Зависимость коэффициента β от температуры

Из уравнений (16.16) и (16.17) следует, что характеристическая температура материала термистора может быть аппроксимирована следующим выражением:

$$\beta = A_1 + BT + \frac{A_2}{T} + \frac{A_3}{T^2}, \tag{16.22}$$

где A и B являются константами. Оценка этого выражения показала, что во многих практических случаях третий и четвертый члены намного меньше первых двух, поэтому ими часто можно пренебречь. Тогда уравнение (16.22) принимает вид линейной функции:

$$\beta = A_1 + BT. \tag{16.23}$$

Это предположение позволяет значительно улучшить универсальность простой модели. Для определения линейной зависимости $\beta(T)$ в любой точке необходимо знать значение β_b хотя бы при одной температуре T_b, а также наклон прямой $\beta(T)$ – γ. Тогда уравнение (16.23) может быть записано в виде:

$$\beta = \beta_b\left[1+\gamma\,(T-T_b)\right]. \tag{16.24}$$

Для нахождения наклона γ можно воспользоваться выражением:

$$\gamma = \left(\frac{\beta_x}{\beta_y} - 1\right)\frac{1}{T_c - T_a}, \tag{16.25}$$

где β_x и β_y – два значения характеристической температуры материала, соответ-

где A – константа, а β - характеристическая температура материала (в Кельвинах). Если известна величина сопротивления термистора S_0 при калибровочной температуре T_0, можно записать зависимость сопротивления от температуры в следующем виде:

$$S = S_0 e^{\beta_m (1/T - 1/T_0)}. \tag{16.18}$$

Очевидное достоинство этой модели – необходимость проведения калибровки термистора только в одной точке. Однако здесь предполагается знание коэффициента β_m. Если он неизвестен, приходится проводить вторую калибровку для нахождения его значения:

$$\beta_m = \frac{\ln(S_1 / S_0)}{(1/T_1 - 1/T_0)}, \tag{16.19}$$

где T_0 и S_0 и T_1 и S_1 – две пары температур и сопротивлений, полученных в двух калибровочных точках, находящихся на кривой, соответствующей уравнению (16.18). Считается, что значение β_m не зависит от температуры, но оно может меняться от изделия к изделию в пределах производственных допусков, которые обычно составляют ±1%. Температура термистора определяется по измеренному сопротивлению S при помощи следующего выражения:

$$T = \left(\frac{1}{T_0} + \frac{\ln(S / S_0)}{\beta_m} \right)^{-1}. \tag{16.20}$$

Погрешность аппроксимации, представленной выражением (16.20), мала в окрестности температуры калибровки, но значительно увеличивается при расширении рабочего диапазона (рис. 16.7).

Коэффициент β отвечает за кривизну характеристики термистора, но не является параметром, напрямую соответствующим его чувствительности, которая определяется температурным коэффициентом α. Коэффициент α может быть найден при дифференцировании уравнения (16.18):

$$\alpha_r = \frac{1}{S}\frac{dS}{dT} = -\frac{\beta}{T^2}. \tag{16.21}$$

Из уравнения (16.21) следует, что чувствительность термистора зависит как от β, так и от температуры. Термистор обладает лучшей чувствительностью на низких температурах, тогда как при увеличении температуры его чувствительность резко падает. Уравнение (16.21) также показывает, насколько меняется сопротивление S при изменении температуры на один градус. В термисторах с ОТК чувствительность α во всем температурном диапазоне меняется от -2% (в зоне высоких температур шкалы) до –8%/°С (в зоне низких температур шкалы), поэтому можно утверждать, что такие детекторы являются очень чувствительными устройствами, почти на порядок более чувствительными по сравнению с РДТ. Это особенно важно для применений, требующих высоких значений выходного сигнала в относительно

узком температурном диапазоне. Примером может служить медицинский электронный термометр.

16.1.3.1.2. *Модель Фрайдена*

В 1998 году автор этой книги предложил следующее усовершенствование простой модели [4]. Оно основывается на экспериментальном факте, что характеристическая температура β не является постоянной, а зависит от измеряемой температуры (рис. 16.6). В зависимости от фирмы-изготовителя и типа термистора эта функция может иметь как положительный наклон (как показано на рисунке), так и отрицательный. Идеальный случай, когда β совсем не зависит от температуры, на практике, фактически, не встречается.

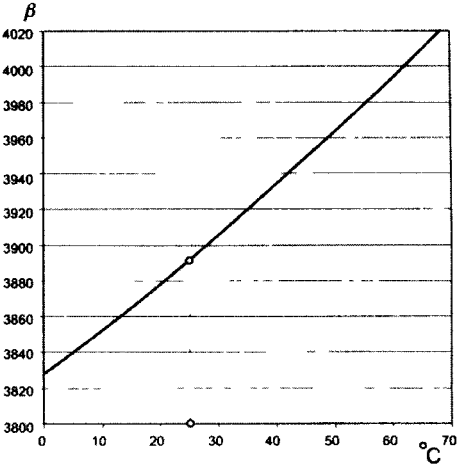


Рис. 16.6. Зависимость коэффициента β от температуры

Из уравнений (16.16) и (16.17) следует, что характеристическая температура материала термистора может быть аппроксимирована следующим выражением:

$$\beta = A_1 + BT + \frac{A_2}{T} + \frac{A_3}{T^2}, \tag{16.22}$$

где A и B являются константами. Оценка этого выражения показала, что во многих практических случаях третий и четвертый члены намного меньше первых двух, поэтому ими часто можно пренебречь. Тогда уравнение (16.22) принимает вид линейной функции:

$$\beta = A_1 + BT. \tag{16.23}$$

Это предположение позволяет значительно улучшить универсальность простой модели. Для определения линейной зависимости $\beta(T)$ в любой точке необходимо знать значение β_b хотя бы при одной температуре T_b, а также наклон прямой $\beta(T) - \gamma$. Тогда уравнение (16.23) может быть записано в виде:

$$\beta = \beta_b\left[1 + \gamma\,(T - T_b)\right]. \tag{16.24}$$

Для нахождения наклона γ можно воспользоваться выражением:

$$\gamma = \left(\frac{\beta_x}{\beta_y} - 1\right)\frac{1}{T_c - T_a}, \tag{16.25}$$

где β_x и β_y – два значения характеристической температуры материала, соответ-

ствующие двум температурам T_a и T_c. (Отметим, что β и T определяются в Кельвинах. Если температура обозначается как t, используется шкала в Цельсиях). Для определения коэффициента γ требуется проводить измерения в трех характерных точках, однако, нет необходимости определять его для каждого отдельного термистора, поскольку он зависит только от материала резистора и технологического процесса изготовления, поэтому его можно считать более или менее постоянным для больших серий термисторов определенного типа. Таким образом, обычно достаточно найти один коэффициент γ для целой серии термисторов, и по нему определять характеристики каждого конкретного детектора.

Подставляя уравнение (16.23) в выражение (16.16), получим аппроксимационную формулу для термистора:

$$\ln S \cong A + \frac{\beta_m[1-\gamma(T_b - T)]}{T}. \qquad (16.26)$$

Решая уравнение (16.26) относительно сопротивления S, получим зависимость сопротивления термистора от температуры:

$$S = S_0 e^{\beta_m[1+\gamma(T-T_0)](1/T-1/T_0)}, \qquad (16.27)$$

где S_0 – сопротивление при калибровочной температуре T_0, а β_m - характеристическая температура, определенная по двум калибровочным температурам T_0 и T_1 (см. уравнение (16.19)). Это уравнение подобно уравнению (16.18) простой модели, за исключением нового коэффициента γ. Даже несмотря на то, что коэффициент γ находится по трем точкам (для серии детекторов), для каждого отдельного термистора необходимо проводить по два калибровочных измерения. Модель Фрайдена подходит для случаев, когда требуется проводить большое количество точных измерений. Достоинством этого метода также является его низкая стоимость. Отметим, что калибровочные температуры T_0 и T_1 следует выбирать ближе к концам рабочего диапазона, а температуру T_B для определения β – в середине. В таблице 16.3 приведены уравнения для этой модели.

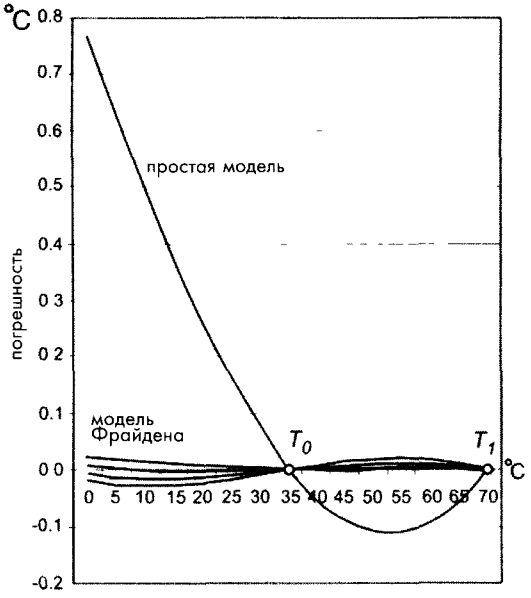


Рис. 16.7. Погрешности простой модели и модели Фрайдена для четырех термисторов, откалиброванных при двух температурах t_0 и t_1 для определения β_m. Погрешности модели Стейнхарта-Харта слишком малы и поэтому не показаны на этом рисунке

16.1.3.1.3. *Модель Стейнхарта-Харта*

Стейнхарт и Харт в 1968 году предложили модель термистора для океанографических исследований, работающего в диапазоне температур −3...30°C, которая на самом деле справедлива и для гораздо более широкого температурного интервала. Их модель основана на уравнении (16.16), решенного относительно температуры:

$$T = \left[\alpha_0 + \alpha_1 \ln S + \alpha_2 (\ln S)^2 + \alpha_3 (\ln S)^3\right]^{-1}. \qquad (16.28)$$

Стейнхарт и Харт показали, что без ощутимой потери точности это выражение может быть записано в виде:

$$T = \left[b_0 + b_1 \ln S + b_3 (\ln S)^3\right]^{-1}. \qquad (16.29)$$

При корректном использовании уравнения (16.29) в диапазоне температур 0...70°C можно добиться точности порядка 0.001° [6]. Для нахождения коэффициентов b необходимо провести калибровку термистора при трех температурах и решить систему из полученных трех уравнений (см. таблицу 16.3). Поскольку модель Стейнхарта-Харта обеспечивает очень высокую точность определения температуры, она положена в основу промышленного стандарта для калибровки прецизионных термисторов. Проведенные исследования показали, что погрешность этой модели даже в более широком температурном диапазоне не превышает 0.002° [7]. Тем не менее, широкого практического применения эта модель не нашла, поскольку для ее использования необходимо проводить калибровку каждого термистора при трех и более температурах.

Выбор той или иной аппроксимационной модели диктуется уровнем требуемой точности и стоимостью. Величина стоимости напрямую зависит от количества необходимых точек калибровки. Процесс калибровки требует довольно больших временных затрат, этим и объясняется его высокая стоимость. Благодаря мощности современных микропроцессоров, сложность математических вычислений не играет решающей роли. Когда не требуется высокая точность измерений, а главным является их низкая стоимость, или когда измерения ведутся в узком температурном диапазоне (±5...10°C от калибровочной температуры), хорошо работает простая модель. Модель Фрайдена предпочтительнее в случаях, когда нужна высокая точность при относительно низкой стоимости. Соответственно модель Стейнхарта-Харта применяется для проведения прецизионных измерений, где стоимость не является решающим фактором (рис. 16.7).

При использовании простой модели необходимо знать значение I_m и сопротивление термистора при одной калибровочной температуре T_0. При работе с моделью Фрайдена плюс к вышеперечисленному требуется знать коэффициент γ, который определяется не для каждого конкретного термистора, а для целой серии таких элементов. В модели Стейнхарта-Харта для каждого термистора проводят три калибровки при трех разных температурах. В таблице 16.3 приведены уравнения для вычисления калибровочных коэффициентов и измеряемой температуры на основе полученных значений сопротивлений. Конечно, можно каждый раз решать все эти уравнения напрямую. Однако для большинства случаев разработаны специальные справочные таблицы. Для снижения размеров этих таблиц часто применяется кусочно-линейная аппроксимация.

Таблица 16.3. Термисторы с ОТК. Руководство по применению трех моделей

	Простая модель	Модель Фрайдена	Модель Стейнхарта-Харта
Максимальная погрешность в диапазоне 0 70°C	±0 7°C	±0 03°C	±0 003°C
Количество характеристических температур	2	3	0
Количество калибровочных температур	2	2	3
Зависимость сопротивления от температуры	$S = S_0 e^{\beta_m (1/T \ 1/T_0)}$	$S = S_0 e^{\beta_m [1+\gamma (T \ T_0)](1/T \ 1/T_0)}$	$S = S_0 e^{(A_0 + A_1/T + A_2/T^2 + A_3/T^3)}$
Характеристика партии термисторов			
Характеристические точки	–	S_a при T_a, S_b при T_b, S_c при T_c для температурного диапазона от T_a до T_c, где T_b находится в середине этого диапазона	–
Характеристические факторы	–	$\gamma = \left(\frac{\beta_x}{\beta_y} - 1\right)\frac{1}{T_c - T_a}$, где $\beta_x = \frac{\ln(S_c/S_b)}{(1/T_c - 1/T_b)}$, $\beta_y = \frac{\ln(S_a/S_b)}{(1/T_a - 1/T_b)}$	–
Калибровка отдельных термисторов			
Калибровочные точки	S_0 при T_0, S_1 при T_1	S_0 при T_0, S_1 при T_1	S_1 при T_1, S_2 при T_2, S_3 при T_3
Аналитические выражения для вычисления температуры T (в Кельвинах) по измеренным значениям сопротивлений S			
Ввести S, характеристические параметры и коэффициенты калибровки	$T = \left(\frac{1}{T_0} + \frac{\ln(S/S_0)}{\beta_m}\right)^{1}$, $\beta_m = \frac{\ln(S_1/S_0)}{(1/T_1 - 1/T_0)}$	$T = \left(\frac{1}{T_0} + \frac{\ln(S/S_0)}{\beta_m[1-\gamma(T_1 - T_r)]}\right)^{1}$, где $T_r = \left(\frac{1}{T_0} + \frac{\ln(S/S_0)}{\beta_m}\right)^{1}$, $\beta_m = \frac{\ln(S_1/S_0)}{(1/T_1 - 1/T_0)}$	$T = \left[A + B + C(\ln S)^3\right]^{1}$, $C = \left(G - \frac{ZH}{F}\right)\left\{\left(\ln S_1^{\ 3} \ \ln S_2^{\ 3}\right) - \left[-\frac{Z}{F}\left(\ln S_1^{\ 3} - \ln S_3^{\ 3}\right)\right]\right\}^{1}$, $B = Z^{\ 1}\left[G - C\left(\ln S_1^{\ 3} - \ln S_2^{\ 3}\right)\right]$, $A = T_1^{\ 1} - C\ln S_1^{\ 3} - B\ln S_1$, $Z = \ln S_1 - \ln S_2$, $F = \ln S_1 - \ln S_3$, $H = T_1^{-1} - T_3^{\ 1}$, $G = T_1^{\ 1} - T_2^{\ 1}$

16.1.3.1.4. *Изготовление термисторов с отрицательным температурным коэффициентом*

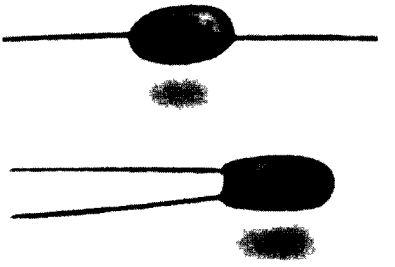


Рис. 16.8. Две разновидности бусинкового термистора со стеклянным покрытием

В зависимости от способа изготовления все термисторы с ОТК делятся на три основных группы. Первая группа – это термисторы бусинкового типа. Бусинки могут быть ничем непокрытыми, с защитным слоем из эпоксидной смолы (рис.16.8) или размещены в металлическом корпусе. Выводы всех термисторов данного типа изготавливаются из платинового сплава, запеченного в керамику. В процессе изготовления маленькие порции смеси оксида металла и подходящего связующего наносятся на параллельные слегка натянутые проводники. После высыхания или частичного спекания вся лента бусинок снимается с опорной конструкции и помещается в печь для окончательного спекания. Во время такой температурной обработки оксид металла прочно скрепляется с платиновыми проводниками. После чего вся лента разрезается на отдельные бусинки, на которые наносится соответствующее покрытие.

Другой тип термисторов – это чип-термисторы с поверхностными контактами для крепления проводников. Обычно чипы изготавливаются методом пленочного литья, с последующей трафаретной печатью, напылением, покраской или вакуумной металлизацией поверхностных электродов. После чего чипы разрезаются для получения требуемых геометрических размеров. Если это необходимо, чипы могут быть заземлены.

Термисторы третьего типа состоят из слоя полупроводникового материала, нанесенного на соответствующую подложку из стекла, алюминия, кремния и т.д. Такие термисторы, в основном, используются в интегрированных датчиках и ИК тепловых детекторах.

Среди всех термисторов с металлизированными поверхностными контактами наихудшей стабильностью обладают чипы без покрытия. Термисторы с эпоксидным покрытием демонстрируют среднюю стабильность. Термисторы бусинкового типа могут работать при высоких температурах (до 550°С). Детекторы с металлизированным поверхностным контактом используются до 150°С. Бусинковые термисторы являются самыми быстродействующими из перечисленных детекторов, однако их стоимость намного выше, чем у чип-термисторов, и в дополнение к этому их номинальное значение трудно поддается регулировке. Подгонка номинального значения выполняется механической шлифовкой термистора при заданной температуре (обычно при 25°С) с целью изменения геометрических размеров для получения требуемого значения сопротивления.

При работе с термисторами, обладающими ОТК, необходимо учитывать все возможные источники ошибок. Одна из них – старение, которое для низкокачественных датчиков может составлять порядка 1%. На рис. 16.9 показано измене-

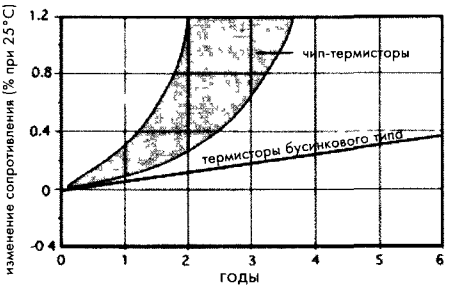


Рис. 16.9. Долговременная стабильность термисторов

ние величины сопротивления (в %) от срока службы для чип термисторов с эпоксидным покрытием и термисторов бусинкового типа в стеклянных корпусах. Обеспечение защиты от окружающей среды и температурная подготовка термисторов являются надежными методами стабилизации характеристик детекторов. Для проведения температурной тренировки датчики помещаются в камеру с температурой +300°С, по крайней мере, на 700 часов. Для осуществления лучшей защиты термисторы могут быть размещены в корпусах из нержавеющей стали и залиты эпоксидной смолой.

16.1.3.2. Явление саморазогрева в термисторах с отрицательным температурным коэффициентом

Как упоминалось ранее, явление саморазогрева термистора может сказываться на его рабочих характеристиках. Термисторы относятся к датчикам активного типа, для работы которых требуется сигнал возбуждения. Этим сигналом, как правило, служит либо постоянный, либо переменный ток, протекающий через термистор, который приводит к выделению тепла, а, значит, и к разогреву детектора. Это повышение температуры датчика часто приводит к появлению погрешностей при измерении температуры объекта. Правда, в некоторых случаях явление саморазогрева используется для построения датчиков, реагирующих на изменения тепловых потоков, ИК излучений и других внешних воздействий.

Рассмотрим процессы, проходящие в термисторах, при подаче на них электрического напряжения. На рис. 16.10А показана схема, состоящая из источника напряжения E, термистора R_T и внутреннего сопротивления источника R. При включении источника питания (момент *вкл* на рис. 16.10Б) в соответствии с законом сохранения энергии вся тепловая энергия схемы (H) должна равняться электрической мощности, вырабатываемой источником питания:

$$\frac{dH}{dt} = P = \frac{V^2{}_T}{R_T} = V_T i, \tag{16.30}$$

где V_T – падение напряжения на термисторе.

Тепловая энергия состоит из двух составляющих: тепловых потерь (H_L) в окружающую среду и тепловой энергии (H_S), поглощенной термистором. Поглощенная часть энергии накапливается в тепловой емкости C датчика. Тогда уравнение баланса мощности можно записать в следующем виде:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{dH_L}{dt} + \frac{dH_S}{dt}. \tag{16.31}$$

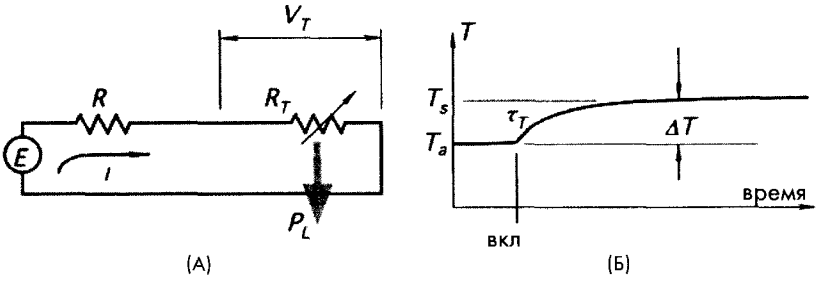


Рис.16.10. А – Ток, протекающий через термистор, вызывает его саморазогрев, Б – Температура термистора увеличивается в соответствии с тепловой постоянной времени τ_T P_L – тепловые потери в окружающую среду

Тепловые потери термистора в окружающую среду пропорциональны разности температур ΔT термистора T_S и окружающей среды T_a

$$P_L = \frac{dH_L}{dt} = \delta \Delta T = \delta (T_S - T_a), \tag{16 32}$$

где δ - *коэффициент рассеяния*, равный отношению рассеиваемой мощности к градиенту температур (при известном значении температуры окружающей среды) Этот коэффициент зависит от конструкции датчика, длины и толщины проводов, материала термистора, опорных элементов, величины теплового излучения с поверхности термистора и относительного движения среды, в которую помещен термистор

Скорость поглощения тепла термистором пропорциональна тепловой емкости детектора

$$\frac{dH_S}{dt} = C\frac{dT_S}{dt} \tag{16 33}$$

Именно это тепло приводит к повышению температуры термистора Подставляя выражения (16 32) и (16 33) в уравнение (16 30), получим

$$\frac{dH}{dt} = P = EI = \delta (T_S - T_a) + C\frac{dT_S}{dt} \tag{16 34}$$

Это дифференциальное уравнение описывает тепловое поведение термистора Найдем решение этого уравнения для двух условий Первое условие заключается в том, что электрическая мощность, приложенная к датчику, является постоянной величиной (P=const) Тогда решение уравнения (16 34) имеет следую щий вид

$$\Delta T = (T_S - T_a) = \frac{P}{\delta}\left[1 - e^{\delta / Ct}\right], \tag{16 35}$$

где e – основание натурального логарифма. Из этого выражения видно, что температура датчика будет расти по экспоненциальному закону (рис. 16.10Б), характеризуемому тепловой постоянной времени $\tau_T=C(1/\delta)$, где величина $1/\delta=r_T$ – тепловое сопротивление между датчиком и окружающей средой. На рис. 16.10Б показана экспоненциальная переходная характеристика.

Через достаточно большой интервал времени температура выйдет на стационарный режим, т.е. станет равной T_S, а $dT_S/dt = 0$. При этом тепловые потери и приложенная электрическая мощность сравняются друг с другом:

$$\delta(T_S - T_a) = \delta\Delta T = V_T i \ . \qquad (16.36)$$

Если на термистор, обладающий большим сопротивлением, подать низкое напряжение, ток, протекающий через него, будет также мал. Таким образом можно получить очень небольшой градиент температуры ΔT, что приведет к значительному уменьшению эффекта саморазогрева. Если саморазогревом термистора пренебречь, уравнение (16.34) можно переписать в виде:

$$\frac{dT_S}{dt} = -\frac{\delta}{C}(T_S - T_a) \ . \qquad (16.37)$$

Решение этого дифференциального уравнения описывается экспоненциальной функцией (уравнение (16.8)). Это значит, что выходной сигнал датчика отслеживает изменения окружающей температуры с некоторой постоянной времени τ_T. Поскольку эта постоянная времени зависит от связи термистора с окружающей средой, она, как правило, определяется для конкретных условий. Например, $\tau_T = 1$ с при температуре 25 °С в невозмущенном воздухе или $\tau_T = 0.1$ с при T=25°С в хорошо перемешанной воде. Следует всегда помнить, что все вышеприведенные уравнения соответствуют упрощенной модели тепловых потоков. На самом деле, выходной сигнал термистора никогда не бывает строго экспоненциальным.

При разработке датчиков на основе термисторов всегда используется одна из его трех основных характеристик:

1. Зависимость сопротивления от температуры. На рис. 16.12 показан вид такой зависимости для термисторов с ОТК. В датчиках, реализованных на основе этой характеристики, эффект саморазогрева, практически, отсутствует. При этом необходимо выбирать термисторы с высоким номинальным сопротивлением, а конструкция детектора должна обеспечивать максимальную связь чувствительного элемента с объектом измерения. Данная характеристика используется, в основном, для построения детекторов температуры. Термометры, термостаты и тепловые прерыватели являются примерами применения этой зависимости.
2. Зависимость тока от времени (или сопротивления от времени). На рис. 16.10Б показан пример этой характеристики.
3. Зависимость напряжения от тока. Эта характеристика важна либо для детекторов, реализованных на основе явления саморазогрева, либо для датчиков, где этим эффектом пренебречь нельзя. Выражение (16.36) является уравне-

нием баланса между приложенной электрической энергией и тепловыми потерями. При известной зависимости сопротивления от температуры и при незначительных изменениях δ (что справедливо для многих практических случаев), из уравнения (16.36) можно получить зависимость статического напряжения от тока. Эта характеристика обычно строится в логарифмических координатах по обоим осям. В таком графике линии, соответствующие постоянным сопротивлениям, имеют наклон +1, а линии постоянной мощности – наклон –1 (рис. 16.11).

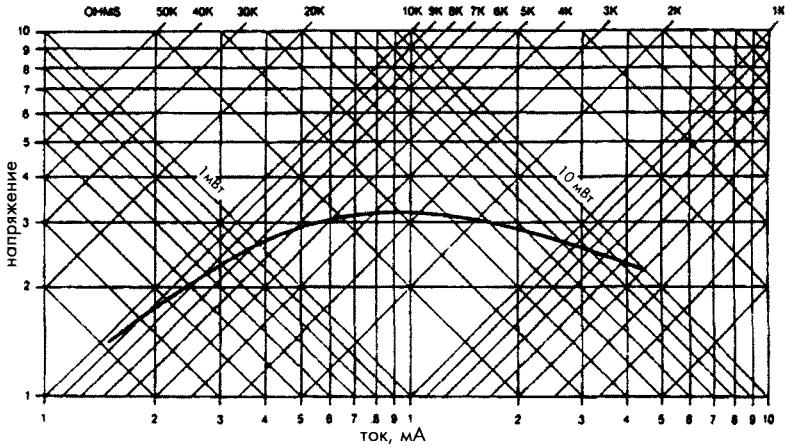


Рис. 16.11. Зависимость напряжения от тока для термисторов с ОТК, работающих в спокойной воздушной среде при температуре 25 °С. Нелинейность характеристики объясняется эффектом саморазогрева

При очень низких токах (левая сторона рис. 16.11) мощность рассеяния термистора мала, и характеристика для каждого значения температуры является касательной к линии постоянного сопротивления, т.е. в этой области термистор ведет себя как обычный резистор, и напряжение V_T пропорционально току i.

При увеличении тока эффект саморазогрева термистора усиливается, что ведет к уменьшению его сопротивления. Поскольку величина сопротивления перестает быть постоянной, характеристика $V_T(i)$ начинает отклоняться т прямой линии. Наклон этой зависимости (dV_T/di), соответствующий величине сопротивления, снижается при увеличении тока. Возрастание тока ведет к падению сопротивления, которое, в свою очередь, вызывает увеличение тока. В некоторой точке сопротивление термистора становится равным нулю. Эта точка характеризуется максимальным значением напряжения V_p и током i_p. Дальнейшее увеличение тока приводит к продолжению уменьшения наклона характеристики. Это означает, что величина сопротивления становится отрицательной (правая сторона рис. 16.11). Если ток продолжить увеличивать ток дальше, начинают играть роль сопротивления соединительных проводов, поэтому никогда нельзя допускать работу термистора в таких режимах. В документации на серийно выпускаемые термисторы обычно указывается максимальное значение допустимой мощности.

Из уравнения (16.36) видно, что термисторы с сильным саморазогревом могут использоваться для детектирования изменений δ (в составе вакуумных манометров (датчиках Пирани), анемометрах, расходомерах), ΔT (в измерителях мощности СВЧ излучений) или V_T (в электрических схемах автоматического управления коэффициентом усиления, регуляторах и ограничителях напряжения) и т.д.

16.1.3.3. Термисторы с положительным температурным коэффициентом

Все металлы относятся к материалам с положительным температурным коэффициентом (ПТК). Из соответствующей таблицы Приложения видно, что все они обладают низкими значениями температурных коэффициентов сопротивления (ТКС). РДТ, описанные ранее, также имеют небольшой ПТК. В отличие от них многие керамические материалы в определенном температурном диапазоне обладают довольно значительными ПТК. Термисторы с ПТК обычно изготавливаются на базе поликристаллических керамических материалов, основные компоненты которых (титанат бария или твердые растворы титаната бария и стронция), обладающие высоким удельным сопротивлением, легируются дополнительными примесями для придания им свойств полупроводников [8]. При температурах, превышающих точку Кюри композиционных материалов, их ферроэлектрические свойства меняются очень быстро, что приводит к значительному увеличению сопротивления, иногда на несколько порядков. На рис. 16.12 показаны передаточные характеристики для трех типов температурных детекторов: с ОТК, ПТК и РДТ. Как видно из рисунка, для термисторов с ПТК очень сложно подобрать математическую аппроксимацию, поэтому для них в документации обычно приводятся следующие характеристики:

1. Сопротивление при нулевой приложенной мощности, R_{25}. При этом значении влияние эффекта саморазогрева незначительно.
2. Минимальное сопротивление R_m, при котором термистор меняет знак своего температурного коэффициента (точка m)
3. Температура перехода T_t, начиная с которой начинается быстрое изменение сопротивления. Она приблизительно совпадает с точкой Кюри материала. Значения температуры перехода обычно лежат в интервале −30...+160°C (Keystone Carbon Co.)
4. ТКС, определяемый как:

$$\alpha = \frac{1}{R}\frac{\Delta R}{\Delta T}. \tag{16.38}$$

   Этот коэффициент сильно зависит от температуры и часто определяется в точке x (т.е. там, где он обладает максимальным значением). Он может достигать значений 2/°C, что означает 200% изменение сопротивления на °C.
5. Максимальное напряжение E_m, соответствующее предельно допустимому значению, выдерживаемому термистором.
6. Тепловые характеристики: теплоемкость, коэффициент рассеяния δ (определенный для заданных условий связи детектора с окружающей средой) и тепловая постоянная времени (характеризующая быстродействие термистора при определенных условиях)

Следует отметить, что для термисторов с ПТК важными факторами являются: температура окружающей среды и эффект саморазогрева. Любой из них влияет на положение рабочей точки термистора.

На рис. 16.13 показаны вольтамперные характеристики термистора с ПТК при разных температурах окружающей среды, по которым можно оценить его температурную чувствительность. В соответствии с законом Ома обычный резистор с близким к нулю ТКС обладает линейной вольтамперной характеристикой. При ОТК коэффициент кривизны положительный, а при ПТК – отрицательный. При подключении термисторов с ОТК к идеальному источнику напряжения (обладающему практически нулевым выходным сопротивлением и способностью вырабатывать любой ток без изменения величины напряжения) явление саморазогрева, возникающее из-за рассеяния Джоулева тепла, приводит к уменьшению сопротивления, что, в свою очередь, вызывает увеличение тока и большему нагреву детектора. Если термистор с ОТК имеет плохой теплоотвод, может произойти его перегрев и даже разрушение.

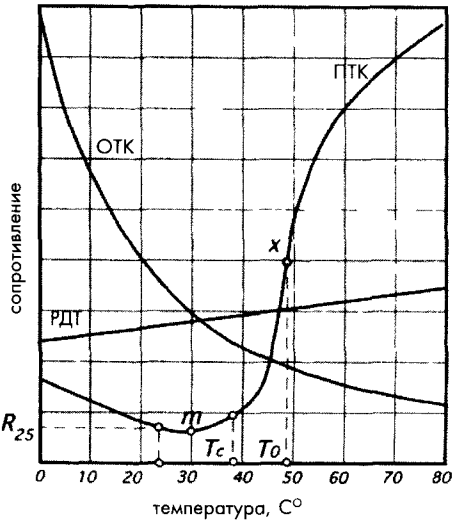


Рис. 16.12. Передаточные функции для термисторов с ОТК, ПТК и РДТ

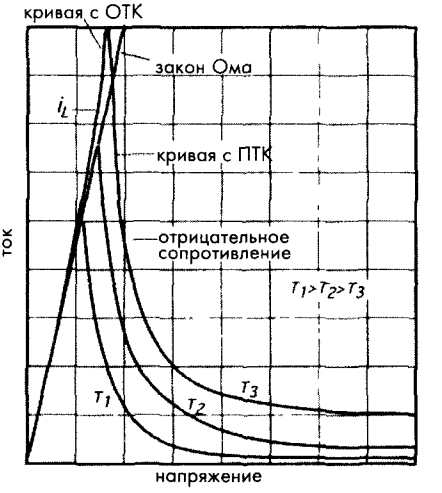


Рис. 16.13. Вольтамперная характеристика детектора с ПТК

В отличие от термисторов с ОТК, детекторы с ПТК при подключении к идеальным источникам напряжения ведут себя как саморегулирующиеся устройства. Например, нить накаливания раскаленной лампы не перегорает из-за того, что увеличение ее температуры ведет к росту сопротивления, ограничивающего ток. Эффект саморегулирования значителен в термисторах с ПТК. Из рис. 16.13 видно, что в относительно узком температурном диапазоне, термистор с ПТК обладает отрицательным сопротивлением, т.е.

$$R_x = -\frac{V_x}{i}. \qquad (16.39)$$

В этой зоне устройства обладают внутренней отрицательной обратной связью, т.е. работают саморегулирующимися термостатами. При этом любой рост напряжения

на термисторе приводит к выделению тепла, которое, в свою очередь, вызывает увеличение сопротивления и уменьшению тепловых потерь, в результате чего возникает динамическое равновесие, позволяющее удерживать температуру устройства на постоянном уровне T_0 (рис. 16.12). Эта температура соответствует точке x, в которой касательная к кривой имеет максимальный наклон.

Следует отметить, что термисторы с ПТК обладают максимальной эффективностью при больших значениях T_0 (около 100°С), а при меньших температурах их эффективность (наклон характеристики $R(T)$ в точке x) резко падает. По своей физической природе термисторы с ПТК предпочтительнее использовать при температурах, значительно превышающих температуру окружающей среды.

Приведем четыре примера применения термисторов с ПТК:

1. В устройствах защиты электронных схем термисторы с ПТК могут играть роль неразрушаемых предохранителей, реагирующих на токи, значения которых превышают допустимые уровни. На рис. 16.14А показан термистор с ПТК, включенный последовательно с источником напряжения E, подающего на нагрузку ток i. При комнатной температуре термистор обладает очень низким сопротивлением (порядка 10...140 Ом). При токе i падение напряжения на нагрузке составляет V_L, а на термисторе - V_x. Считаем, что $V_L >> V_x$. Мощность, рассеиваемая на термисторе: $P=V_x i$, отдается в окружающую среду. При этом температура термистора возрастает, но очень на небольшую величину. Однако при значительном увеличении окружающей температуры или сильном изменении тока нагрузки происходит резкий рост температуры термистора до величины T_τ, по достижении которой его сопротивление начинает расти, что предотвращает дальнейшее увеличение тока. При коротком замыкании в нагрузке $V_x = E$, а ток i падает до минимального значения. Это значение будет сохраняться до тех пор, пока сопротивление нагрузки не придет в норму, после чего, термистор восстановит свои исходные характеристики. Однако при этом необходимо выполнение условия $E<0.9E_{max}$, иначе может произойти разрушение термистора.
2. В миниатюрных термостатах с саморазогревом (рис. 16.14Б), используемых в микроэлектронике, биомедицине, химических исследованиях и т.д, также используются термисторы с ПТК с соответственно подобранной температурой перехода. Термостат состоит из кюветы, теплоизолированной от окружающей среды и связанной с термистором. Для устранения сухого контакта между термистором и кюветой делают слой из специальной смазки. Выводы термистора подключаются к источнику напряжения, напряжение которого можно оценить при помощи выражения:

$$E \geq 2\sqrt{\delta(T_\tau - T_a)R_{25}}\ , \qquad (16.40)$$

где δ - коэффициент рассеяния, зависящий от теплоизоляции термистора от окружающей среды, а T_a – температура окружающей среды. Рабочая точка термостата определяется физическими свойствами керамического материала (точкой Кюри). Благодаря внутренней тепловой обратной связи, устройство

может работать в сравнительно широком диапазоне напряжений и окружающих температур. Естественно, что окружающая температура должна быть всегда меньше T_r.

3. Термисторы с ПТК из-за большой длительности переходных процессов, определяемых временем между подачей напряжения и переходом устройства в рабочее состояние, часто требует подключения схем задержки.
4. Расходомеры и детекторы уровня жидких сред, работающие на принципе детектирования теплового рассеяния, также часто реализуются на основе термисторов с ПТК.

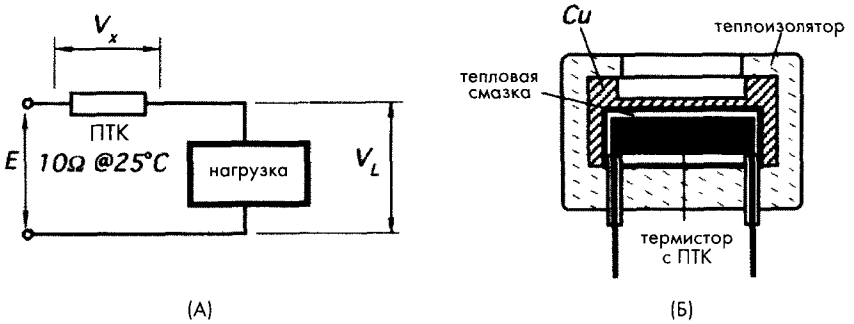


Рис. 16.14. Применение термисторов с ПТК: А – в схемах ограничения тока, Б – в микротермостатах

16.2. Термоэлектрические контактные датчики

Поскольку термоэлектрические контактные датчики состоят, по крайней мере, из двух разных проводников и двух соединений (пар) этих проводников, их часто называют *термопарами*. Они являются пассивными датчиками, т.к. сами вырабатывают напряжение в ответ на изменение температуры и не требуют для этого внешнего источника питания. Термопары относятся к классу относительных датчиков, поскольку их выходное напряжение определяется разностью температур между двумя спаями и практически не зависит от абсолютной температуры каждого соединения. При измерении температуры при помощи термопары один ее спай служит эталоном, и его температуру необходимо определять при помощи отдельного детектора абсолютной температуры, например, термистора, РДТ и т.д. или его надо поместить в материал, находящийся в физическом состоянии, температура которого точно известна (см. в соответствующей таблице Приложения). В разделе 3.9 главы 3 подробно описан термоэлектрический эффект, лежащий в основе физического принципа действия термопар, а в соответствующей таблице Приложения перечислены наиболее популярные термопары. Более подробное описание различных термопар и их применений можно найти во многих книгах, например, в [1], [9] и [10]. Приведем некоторые важные рекомендации по использованию наиболее распространенных типов термопар:

Тип T: Cu (+) и константан (-). Такие термопары устойчивы к коррозии (поэтому могут применяться для работы во влажной атмосфере) и пригодны для измерения отрицательных температур. При работе на воздухе в агрессивной среде

их верхний предел рабочего диапазона ограничен 370°C (700°F), что связано с окислением медного элемента. В других окружающих условиях термопары типа T могут использоваться при более высоких температурах.

Тип J: Fe (+) и константан (-). Термопары этого типа подходят для работы в вакууме, а также в различных средах: и инертных, и окислительных, и восстановительных. Их рабочий температурный диапазон лежит в интервале 0...760°C. При температуре около 540°C начинается быстрый процесс окисления железных термоэлементов. Если требуется, чтобы термопары работали длительное время в условиях высоких температур, для их изготовления необходимо применять провода с большим поперечным сечением. Термопары типа J не рекомендуется использовать для измерения температур ниже точки замерзания воды из-за их хрупкости и подверженности ржавлению. В этом температурном диапазоне лучше работают термоэлементы типа T.

Тип E: 10% Ni/Cr (+) и константан (–). Эти термопары рекомендуется использовать в температурном диапазоне –200...900°C в окислительных или инертных атмосферах. В восстановительной атмосфере и в вакууме они имеют те же ограничения, что и термопары типа K. Термопары типа E могут применяться для измерения отрицательных температур, благодаря тому, что они не подвержены коррозии при работе в атмосфере с повышенным содержанием влаги. Они способны вырабатывать наибольшую среди всех известных типов термопар э.д.с., поэтому термоэлементы типа E являются самыми популярными (см. рис. 3.36 главы 3)

Тип K: 10% Ni/Cr (+) и 5% Ni/Al/Si (–). Такие термопары применяются для работы в окислительной и полностью инертных средах для измерения температур в диапазоне –200...1260°C. Благодаря своей устойчивости к окислению их часто используют при температурах выше 540°C. Однако термопары типа K нельзя применять в восстановительных и сернистых атмосферах, а также в вакууме.

Тип R и *S*: Pt/Rh (+) и Pt (-). Эти термопары предназначены для непрерывной работы в окислительной и инертной среде в температурном диапазоне 0...1480°C

Тип B: Pt/Rh (+) и 6% Pt/Rh (-). Термопары типа B подходят для непрерывной работы в окислительной и инертной атмосфере в температурном диапазоне 870...1700°C. Их также можно использовать для проведения кратковременных измерений в вакууме. Такие термопары не рекомендуется применять в восстановительной среде, содержащей пары металлов и неметаллов. Их нельзя вставлять в металлические защитные корпуса или чехлы.

16.2.1. Законы термоэлектричества

Для практического использования термопар необходимо знать три основных закона, устанавливающих правила их подключения. Следует подчеркнуть, что интерфейсные электронные схемы всегда должны подсоединяться к двум *идентичным* проводникам. Эти проводники, как правило, формируют одно из плечей термопарного контура, используемого для подключения измерительного устройства. На рис. 16.15A это разомкнутое плечо обозначено как A.

Закон 1. Явление термоэлектричества характерно только для неоднородных электрических цепей.

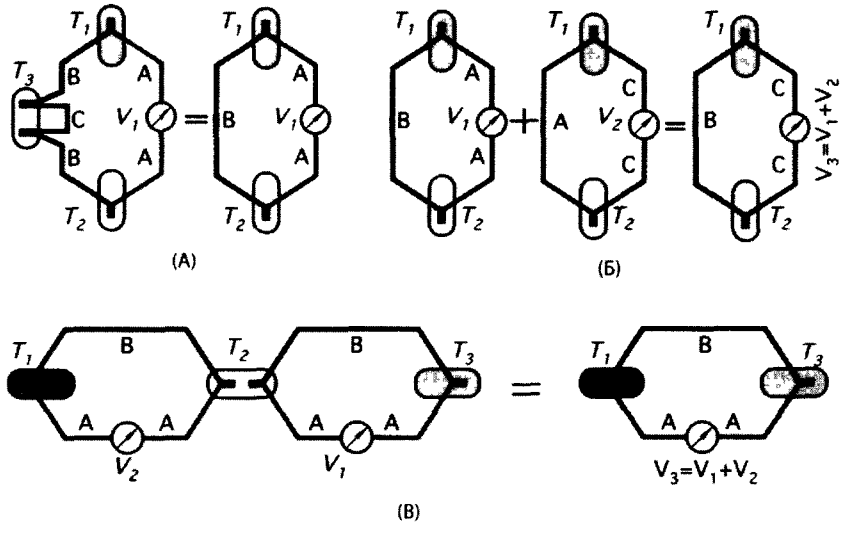


Рис. 16.15. Иллюстрации правил соединения термопар

Из этого закона следует, что для получения разности потенциалов Зеебека необходимо использовать неоднородный материал. В случае однородного проводника при любом распределении температуры вдоль его длины результирующее напряжение будет всегда нулевым. Соединение двух разных проводников обеспечивает возникновение термо э.д.с.

Закон 2. Алгебраическая сумма всех термо э.д.с. цепи, состоящей из любого количества термопар (соединений разных материалов), будет всегда равна нулю, если все соединения находятся при одинаковой температуре.

Это значит, что в любое плечо термоэлектрического контура можно внести дополнительный материал С, не боясь изменить результирующее напряжение V_1 при условии, что оба новых соединения будут иметь одинаковую температуру (T_3 на рис. 16.15А). Здесь нет никаких ограничений на количество внесенных проводников, необходимо только поддерживать одинаковую температуру в местах их подключения. Из этого закона также следует, что термоэлектрические соединения могут выполняться любым способом, даже с использованием промежуточных материалов (например, припоев): сваркой, пайкой, скруткой, сплавлением и т.д.. При этом метод соединения не будет влиять на точность термопар. Из закона 2 вытекает правило *введения дополнительных материалов* (рис. 16.15Б): Если известны термо э.д.с (V_1 и V_2) двух проводников (В и С) при их подсоединении к эталонному проводнику А, результирующее напряжение при непосредственном контакте проводников В и С будет равно алгебраической сумме термо э.д.с V_1 и V_2.

Закон 3. Если два соединения разных материалов, находящихся при температурах T_1 и T_2, вырабатывают термо э.д.с V_2, а при температурах T_2 и T_3 результирующая термо э.д.с. равна V_1, то при температурах T_1 и T_3 выходное напряжение V_3 определяется суммой двух термо э.д.с V_1 и V_2 (рис. 16.15В).

Этот закон иногда называется законом промежуточных температур. Он позволяет калибровать термопары в одном температурном диапазоне, а использовать в другом. Из этого закона также следует, что в термоэлектрическую цепь могут быть внесены дополнительные провода без изменения ее точностных характеристик.

На основе этих трех законов может быть построено множество практических схем, применяемых для измерения, например, средней температуры объекта, разности температур между двумя объектами, а также для включения в измерительную цепь детекторов температуры других типов для определения температуры эталонных спаев.

Следует отметить, что термоэлектрические напряжения всегда очень малы, поэтому такие детекторы, особенно при использовании длинных соединительных проводов, подвержены влиянию различных помех. В разделе 5.9 главы 5 даны рекомендации по повышению помехоустойчивости термопарных цепей. Для усиления выходного сигнала иногда используют последовательное соединение нескольких термопар, но при этом необходимо обеспечивать, чтобы все эталонные и все чувствительные соединения находились при соответствующих температурах. Такие структуры получили название: *термоэлементы*. Исторически повелось, что эталонные соединения называются *холодными* спаями, а чувствительные – *горячими*.

На рис. 16.16А показана эквивалентная схема термопары и термоэлемента, состоящая из источников напряжений e_h и e_c, соответствующих разности потенциалов Зеебека горячего и холодных спаев, и последовательного резистора. Результирующее напряжение схемы V_p является функцией измеряемой разности температур. Предполагается, что выводы схемы изготавливаются из того же самого материала, например, железа.

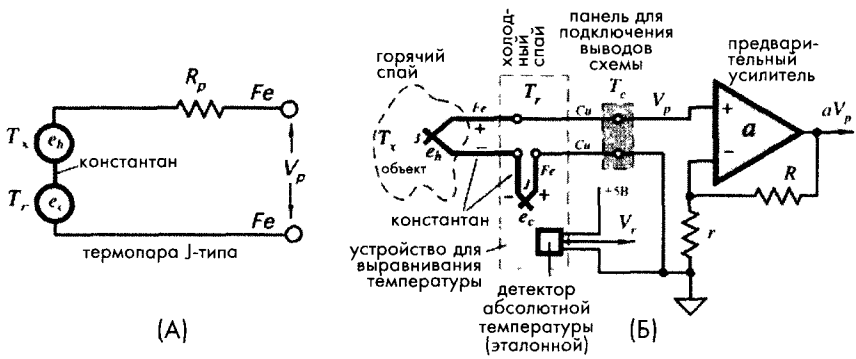


Рис. 16.16. Применение термопар: А – эквивалентная схема термопары, Б – термопарный термометр, в котором для измерения температуры эталонного соединения используется полупроводниковый детектор LM35DZ

16.2.2. Схемы подключения термопар

В прошлом холодные спаи термопар опускались в сосуды с тающим льдом для поддержания их температуры, равной 0°С (отсюда появилось название «холодные» спаи). Но это очень неудобно, а для многих практических схем и вовсе невозможно. Простое решение этой проблемы вытекает из второго и третьего законов термоэлетричества. Холодный спай может находится при любой температуре, даже при

температуре окружающей среды, единственное условие: значение этой температуры должно быть известно. Поэтому часто для измерения температуры холодного спая используется дополнительный детектор (например, терморезистивный или полупроводниковый) без компенсационных цепей.

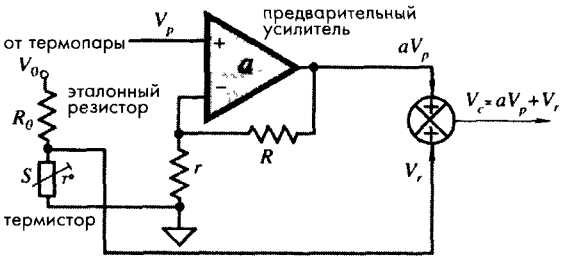


Рис. 16.17. Суммирование сигналов термитстора и термопары

На рис. 16.16Б показана схема подключения термопары к электронному интерфейсу. Как видно из схемы, холодный спай термопары и дополнительный детектор находятся практически при одинаковой температуре, для этого они часто располагаются на одной медной подложке. Для устранения сухих контактов и обеспечения лучшей теплопроводности используется специальная смазка или эпоксидная смола. В рассматриваемом примере в качестве детектора для измерения эталонной температуры применяется полупроводниковый датчик LM35DZ (National Semiconductor, Inc). Схема имеет два выходных сигнала: напряжение Зеебека V_p и эталонное напряжение V_r. Из рисунка видно, что все соединения внутри схемы выполняются одинаковыми медными проводами. На обоих выводах схемы необходимо поддерживать одинаковую температуру T_c, необязательно равную температуре холодного спая. Это обстоятельство очень важно при проведении дистанционных измерений, когда температура интерфейсной схемы может значительно отличаться от температуры холодного спая термопары.

Для определения температуры со схемы снимаются два сигнала: напряжение на термопаре V_p и напряжение с выхода эталонного детектора V_r. Эти два сигнала поступают от датчиков разного типа, имеющих различные передаточные характеристики. Термопары для большинства практических случаев можно считать линейными преобразователями с нормализованной чувствительностью α_p (В/К), в то время как выражение чувствительности эталонного детектора определяется его типом. Например, чувствительность термистора α_r при рабочей температуре T задается уравнением (16.21) и имеет размерность Ом/К. Существует несколько способов обработки выходных сигналов. Самый точный метод заключается в раздельном измерении сигналов, последующем определении эталонной температуры T_r по характеристической зависимости эталонного датчика и нахождении разности температур Δ по напряжению на термопаре V_p:

$$\Delta = T_x - T_r = \frac{V_p}{\alpha_p} . \qquad (16.41)$$

Откуда и находится абсолютная температура измеряемого объекта T_x. Значение чувствительности термопары может быть найдено из соответствующей таблицы Приложения.

При работе в сравнительно узком температурном диапазоне сигналы термопары и эталонного детектора температуры могут быть подключены ко входам одного ОУ (рис. 16.17). Поскольку чувствительности этих устройств α_p и α_r достаточно сильно различаются, необходимо применять масштабирующее устройство. Коэффициент усиления ОУ *a* должен выбираться, исходя из соотношения:

$$a\alpha_p = \alpha_r . \tag{16.42}$$

Желательно, чтобы $R_0 = S_0$ (S_0 – это сопротивление термистора при калибровочной температуре T_0 в Кельвинах; например, при T_0= 298.15 K (25°C) или в середине рабочего диапазона). После дифференцирования выражения для напряжения V_r и подстановки уравнения (16.21) получим следующее соотношение для нахождения коэффициента усиления:

$$a = \frac{V_0}{\alpha_p}\frac{\beta}{T_0^2}\frac{R_0 S_0}{(R_0 + S_0)^2} \approx \frac{V_0}{4\alpha_p}\frac{\beta}{T_0^2}, \tag{16.43}$$

где V_0 – постоянное напряжение, а β - характеристическая температура термистора. Измеряемая температура может быть найдена по одному из уравнений, приведенных в таблице 16.3, соответствующих типу используемого термистора. Температура вычисляется по сопротивлению термистора S_c, определяемого по выходному напряжению V_c:

$$S_c = R_0 \frac{V_c}{V_0 - V_c} . \tag{16.44}$$

16.2.3. Термопарные сборки

Термопарная сборка обычно состоит из следующих компонентов: чувствительного элемента (спая), защитной трубки (керамической или металлической оболочки), теплосборника (необходимого элемента прецизионных датчиков, изготавливаемого в виде просверленного стержня, хорошо отполированного с целью снижения коррозии) и выводов (контактов, имеющих разную форму соединения: скрученного типа, разомкнутого типа, в виде разъемов и т.д.). На рис. 16.18 показаны несколько примеров термопарных сборок. Проводники остаются либо оголенными, либо покрываются изоляционным материалом. Для работы в условиях высоких температур используются керамические изоляторы, обладающие достаточной гибкостью. Проводники термопар без электрической изоляции могут быть источниками измерительных погрешностей. Назначение изоляторов также заключается в защите от воздействия влаги, абразивных веществ, сильных перепадов температур, химических реагентов, механических напряжений и ядерного излучения. Для проведения прецизионных измерений необходимо учитывать свойства и ограничения используемых изоляционных материалов. Некоторые изоляторы обладают естественной влагонепроницаемостью. Тефлон, поливинил хлорид и некоторые типы полиимидов являются представителями этой группы.

При использовании изоляционных материалов волоконного типа для защиты от влаги применяют пропитки специальными составами на основе резины и силикона. Однако следует заметить, что даже при однократном воздействии очень высоких температур на такие материалы происходит испарение этой пропитки, и материал теряет свои защитные свойства.

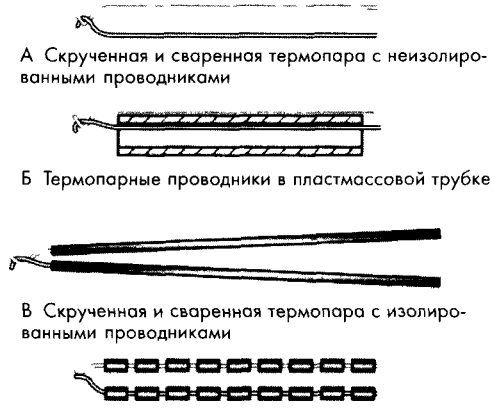


Рис. 16.18. Некоторые типы термопарных сборок

К сожалению, изоляционные материалы не всегда могут предотвратить попадание влаги внутрь сборки. Например, если термопара проходит через зоны высокой и низкой температуры, может произойти конденсация водяных паров, что может привести к возникновению погрешностей измерения. В этих случаях требуется герметизация термопарной сборки.

Самыми распространенными изоляторами для термопар, работающих при высоких температурах, являются стекловолокно, волокнистое кварцевое стекло и асбест (который надо использовать с соответствующими мерами предосторожности, чтобы не нанести вред человеческому здоровью). В дополнение к этому термопары должны быть защищены от влияния агрессивных атмосфер. Защитные трубки выполняют две функции: предохраняют термопары от механического разрушения и экранируют проводники от окружающей среды. Защитные трубки выполняются из углеродистой стали (для работы в окислительной среде в температурном диапазоне до 540°С), нержавеющей стали (для температур до 870°С), нержавеющей стали на основе трехвалентного железа (AISI 400) и никелевых сплавов типа Nichrome (Driver-Harris Company), Inconel (International Nickel Company) и т.д. (для работы в окислительных средах при температурах до 1150 °С).

Практически все термопары на основе металлических проводников либо подвергаются высокотемпературной обработке, либо проходят специальную температурную подготовку, целью которой является стабилизация характеристик термопар. Обычно такой подготовки бывает достаточно, но иногда перед проведением прецизионных измерений рекомендуется провести отжиг термопары. Хотя термопары новых типов на основе Pt и Pt/Rh отжигаются при изготовлении, во многих лабораториях перед проведением калибровки проводят дополнительный отжиг всех термопар R,S и B типов, который обычно заключается в электрическом нагреве термопары в воздухе. При этом термопары обычно закрепляются между двумя зажимными устройствами, расположенными довольно близко друг к другу, таким образом, чтобы при нагреве их натяжение было минимальным. Температура нагрева проводников определяется при помощи оптического пирометра. Большинство механических напряжений в проводниках значительно снижается в течение первых нескольких минут прогрева при температуре 1400...1500°С.

Тонкопленочные термопары формируются на основе соединения двух пленок разных металлов. Такие термопары бывают двух типов: в пленок на съемном носителе и в виде матрицы с датчиком, встроенным в тонкий многослойный материал. Толщина металлической фольги, применяемой для изготовления термопар, составляет порядка 5 мкм, поэтому она обладает очень маленькой массой и теплоемкостью. Тонкая плоская термопара формирует плотный тепловой контакт с поверхностью измеряемого объекта. Термопары из фольги обладают хорошим быстродействием (типовое значение постоянной времени равно 10 мс) и могут использоваться с любым стандартным электронным интерфейсом. При измерении температуры датчиком, обладающим небольшой массой, всегда надо учитывать тепловые потери через соединительные провода. Поскольку пленочные термопары имеют большую величину отношения длины к толщине (порядка 1000), тепловые потери на проводах обычно очень малы.

Для присоединения пленочных термопар к объекту разработано несколько способов. Это и применение различных цементирующих материалов, и плазменное нанесение керамических покрытий. Для упрощения эксплуатации плоские термопары часто формируют на промежуточном носителе из полиимидной пленки, обладающем прочностью, гибкостью и постоянными геометрическими размерами, а также устойчивостью к нагреванию и инертностью. В процессе крепления термопары к объекту этот промежуточный слой просто удаляется при помощи небольшого нагрева. Освобожденная плоская термопара наносится на тонкую пленку; формируя при этом изолированное соединение. При выборе цементов для крепления термопар необходимо внимательно изучать их состав, чтобы там не было никаких коррозионных компонентов. Например, не рекомендуется использовать цементы на основе ортофосфорной кислоты в термопарах, в которых одним из проводников является медь.

16.3. Полупроводниковые датчики температуры на основе p-n перехода

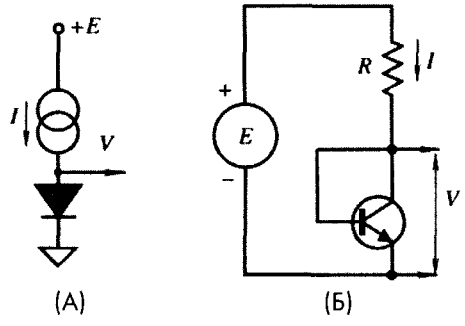


Рис. 16.19. Датчики температуры на основе прямосмещенного p-n перехода: А – диод, Б – транзистор, включенный по схеме диода

Характеристики полупроводникового p-n перехода в диодах и биполярных транзисторах довольно сильно зависят от температуры [11]. Если прямосмещенный переход соединить с генератором постоянного тока (рис. 16.19А) (см. раздел 5.3.1 главы 5), выходное напряжение, снимаемое с него, будет прямо пропорционально изменению его температуры (рис. 16.20). Достоинством такого датчика является его линейность, что дает возможность проводить его калибровку только по двум точкам для определения наклона прямой и ее пересечения с координатной осью (наклон прямой характеризует чувствительность детектора).

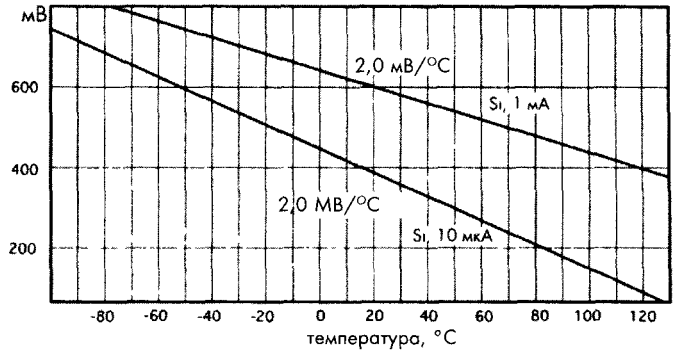


Рис. 16.20. Зависимость напряжения от температуры для прямосмещенного полупроводникового перехода, снятая в условиях постоянного тока

Зависимость тока от напряжения для p-n перехода в диоде можно выразить в следующем виде:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right), \tag{16.45}$$

где I_0 – ток насыщения, величина которого сильно зависит от температуры. Можно показать, что зависимость напряжения на переходе от температуры имеет следующий вид:

$$V = \frac{E_g}{q} - \frac{2kT}{q}\left(\ln K - \ln I\right), \tag{16.46}$$

где E_g – ширина зоны запрещенных энергий для кремния при температуре абсолютного нуля (0 К), q – величина заряда электрона, K – константа, независящая от температуры. Из уравнения (16.46) видно, что при работе p-n перехода в условиях постоянного тока, напряжение на нем пропорционально его температуре, а наклон этой зависимости определяется следующим выражением:

$$b = \frac{dV}{dT} - \frac{2k}{q}(\ln K - \ln I). \tag{16.47}$$

Например, для кремниевого перехода, работающего при токе 10 мкА, температурная чувствительность равна –2.3 мВ/°С, а при токе 1 мА, она падает до –2.0 мВ/°С. Любой диод или биполярный транзистор могут быть использованы в качестве датчиков температуры. На рис. 16.19Б показана схема детектора температуры на базе транзистора, в которой вместо источника тока используется источник напряжения и резистор R. Ток, протекающий через транзистор, можно найти из выражения:

$$I = \frac{E - V}{R}. \tag{16.48}$$

Рекомендуется работать при токе 100 мкА. Тогда при $E = 5$ В и $V \approx 0.6$ В, сопротивление $R = (E\text{-}V)/I = 44$ кОм. При увеличении температуры напряжение V пада-

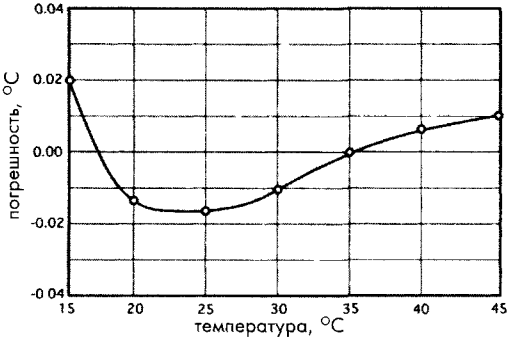


Рис. 16.21. Зависимость погрешности измерений от температуры, построенная для датчика температуры, реализованного на основе кремниевого транзистора PN100

ет, что приводит к незначительному увеличению тока I. В соответствии с уравнением (16.47) это вызывает некоторое снижение чувствительности, которая выражается в появлении нелинейности. Этой нелинейностью в ряде случаев можно пренебречь, однако иногда при обработке сигналов ее приходится учитывать. Благодаря простоте и очень низкой стоимости, транзисторные (диодные) датчики температуры получили довольно широкое распространение. На рис. 16.21 показана зависимость погрешности измерений датчика температуры, реализованного на основе транзистора PN100, от температуры при рабочем токе 100 мкА. Как видно из рисунка, погрешность измерений довольно мала, и во многих случаях можно даже обойтись без коррекции нелинейности.

Детекторы температуры на основе диодов часто встраиваются в кремниевую подложку монолитных датчиков для осуществления температурной компенсации. Например, такие детекторы методом диффузии формируются на мембранах кремниевых микродатчиков давления для компенсации температурной зависимости пьезорезистивных элементов.

Напряжение на транзисторах всегда пропорционально абсолютной температуре в Кельвинах. На основе этого свойства можно реализовать недорогой, но достаточно точный датчик температуры. В этом датчике можно либо непосредственно измерять напряжение, либо предварительно преобразовать напряжение в ток, по величине которого определять температуру [12]. Такой полупроводниковый датчик температуры построен на основе зависимости между напряжением база-эмиттер (V_{BE}) и коллекторным током биполярного транзистора. На рис. 16.22А показана упрощенная схема детектора температуры. В этом датчике транзисторы Q_3 и Q_4 формируют, так называемое, токовое зеркало, вырабатывающее два одинаковых тока $I_{C1}=I$ и $I_{C2}=I$, которые поступают на транзисторы Q_1 и Q_2. Величина коллекторных токов определяется сопротивлением R. В монолитной схеме транзистор Q_2, как правило, состоит из нескольких идентичных транзисторов (например, 8), включенных параллельно. Поэтому плотность тока в Q_1 будет в восемь раз больше, чем на каждом из транзисторов, входящих в состав Q_2. Разность напряжений база-эмиттер двух транзисторов Q_1 и Q_2 равна:

$$\Delta V_{BE} = V_{BE1} - V_{BE2} = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{rI}{I_{ceo}}\right) - \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{I}{I_{ceo}}\right) = \frac{kT}{q}\ln r, \qquad (16.49)$$

где r – множитель тока (8 в нашем примере), $к$ – постоянная Больцмана, q – заряд электрона, T – температура в Кельвинах. Ток $I_{сео}$ одинаков для обоих транзисторов. Ток, протекающий через резистор R, создает на нем напряжение V_T = 179 мкВ/К, величина которого не зависит от токов на коллекторах. Исходя из этого, можно найти выражение для суммарного тока, протекающего через датчик:

$$I_T = 2\frac{V_T}{R} = \left(2\frac{k}{qR}\ln r\right)T \quad . \tag{16.50}$$

При r=8 и R = 358 Ом, данный датчик обладает линейной передаточной функцией: I_T/T = 1 мкА/К.

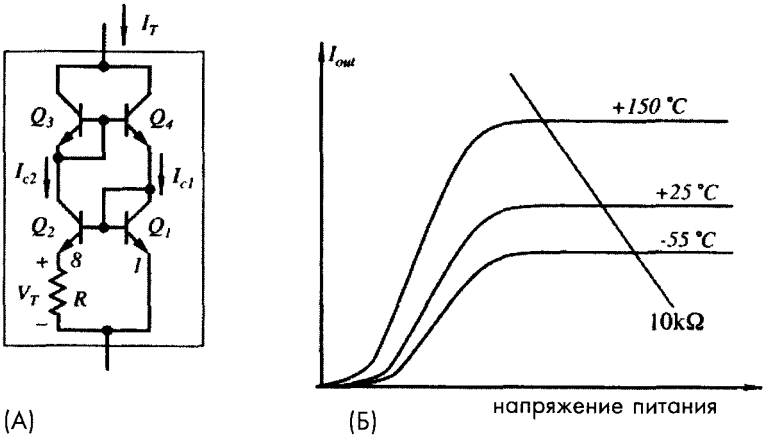


Рис. 16.22. Упрощенная схема полупроводникового датчика температуры (А) и зависимости тока от напряжения (Б)

На рис. 16.22Б показаны зависимости тока от напряжения, построенные для разных температур. Отметим, что значение выражения в круглых скобках в уравнении (16.50) в данном конкретном случае является постоянной величиной и может быть точно подстроено в процессе изготовления для получения требуемого наклона I_T/T. Ток I_T легко преобразуется в напряжение. Например, если последовательно с датчиком включить резистор номиналом 10 кОм, напряжение на нем будет прямо пропорционально абсолютной температуре.

Работа упрощенной схемы, показанной на рис. 16.22А, соответствует

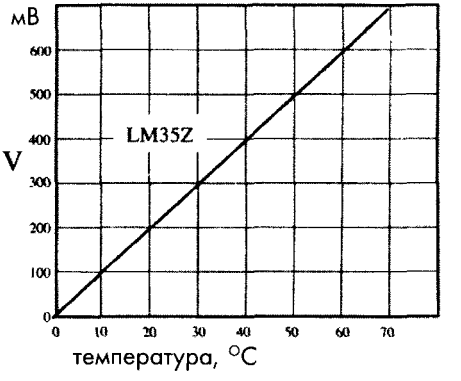


Рис. 16.23. Типовая передаточная функция полупроводникового датчика температуры LM35DZ (*Напечатано с разрешения National Semiconductors, Inc*)

уравнениям (16.49) и (16.50) только в случае использования идеальных транзисторов, у которых $\beta = \infty$. Поскольку таких транзисторов не бывает, в схемы, применяемые на практике, приходится вводить много дополнительных компонентов. Многие фирмы выпускают датчики температуры, реализованные на этом принципе. Среди них LM35 (National Semiconductors) – с выходом по напряжению и AD590 (Analog Devices) – с токовым выходом.

На рис. 16.23 показана передаточная функция датчика LM35Z, чувствительность которого настроена на уровень 10 мВ/°С. Погрешность нелинейности такого датчика невелика, обычно она не выходит за пределы ±0.1°С. Передаточную функцию такого датчика можно описать следующим выражением:

$$V_{out} = V_0 + aT, \qquad (16.51)$$

где T – температура в градусах Цельсия. В идеале V_0 равно нулю, однако, на практике его значение колеблется в пределах ±10 мВ, что соответствует погрешности 1°С. Величина наклона a, как правило, находится в пределах 9.9...10.1 мВ/°С.

16.4. Оптические датчики температуры

Температуру можно измерять контактными и бесконтактными методами. Бесконтактные ИК оптические датчики были рассмотрены в разделах 3.12.3 главы 3, 4.9 главы 4 и 14.6 главы 14. Бесконтактные датчики температуры применяются в случаях, когда необходимо проводить измерения быстродействующих процессов. Без таких детекторов нельзя обойтись при работе в агрессивных средах, в условиях сильных электрических, магнитных и электромагнитных полей и при воздействии высокого напряжения, т.е там где либо велика вероятность возникновения серьезных помех при непосредственном контакте с исследуемым объектом, либо невозможно обеспечить безопасность оператора. Такие датчики также необходимы там, где до объекта измерений просто невозможно добраться. Помимо ИК детекторов существуют датчики, хотя и контактные по своей природе, но использующие фотоны в качестве носителей информации о температуре.

16.4.1 Флуоресцентные датчики

Эти датчики реализуются на основе свойства некоторых фосфорных компонентов излучать свет в ответ на возбуждение лучами видимого диапазона спектра. Такие компоненты наносятся на поверхность объекта, температуру которого необходимо измерить. После чего объект подвергается воздействию УФ импульсного излучения. Возникшее в результате этого облучения послесвечение детектируется и анализируется. Форма импульса послесвечения зависит от температуры. Время спада импульса послесвечения в широком температурном диапазоне является параметром, обладающим очень высокой воспроизводимостью [13, 14]. В качестве чувствительного материала в флуоресцентных датчиках применяется фторгерманат магния, активированный четырехвалентным марганцем. Фосфор длительное время применялся только как корректор цвета ртутных ламп, используемых для освещения улиц. Порошок фосфора получается в ходе реакции в твердой фазе

при температуре 1200 °С. Он является относительно инертным и термоустойчивым веществом, безопасным с биологической точки зрения. Он не разрушается от воздействия большинства химических реагентов и длительного УФ излучения. Он переходит в возбужденное состояние при облучении его светом УФ или синей области спектра. Флуоресцентное свечение фосфора находится в дальнем красном спектральном диапазоне, а его интенсивность спадает по экспоненциальному закону.

Для снижения возможности возникновения перекрестных помех между сигналами возбуждающего и флуоресцентного излучений, на их пути устанавливаются полосовые фильтры, пропускающие волны только заданных зон спектра (рис. 16.24А). В качестве источника возбуждения применяется ксеноновая импульсная лампа, которая может одновременно использоваться несколькими оптическими каналами в составе комплексных систем измерения. Процесс измерения температуры заключается в определении скорости ослабления флуоресцентного свечения (рис. 16.24Б). Это значит, что значение температуры находится по постоянной времени τ, величина которой в температурном диапазоне –200...+400°С уменьшается в пять раз. Измерение времени выполняется при помощи электронной схемы, как правило, с очень высокой точностью. Поэтому датчики флуоресцентного типа позволяют измерять температуру с хорошей разрешающей способностью и точностью порядка ± 2°С в широком температурном диапазоне без проведения калибровки.

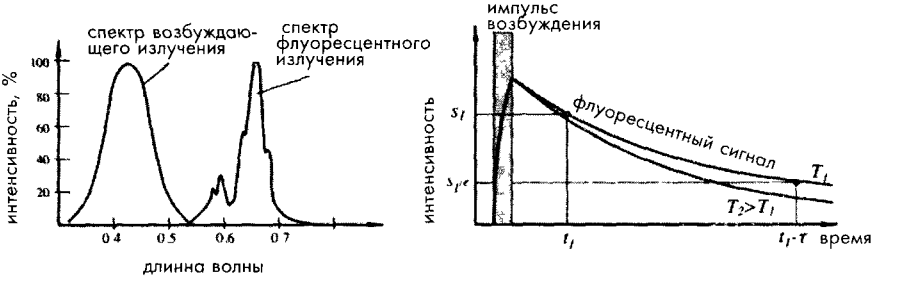


Рис. 16.24. Флуоресцентный метод измерения температуры: А – спектральные характеристики возбуждающего и флуоресцентного излучений, Б – спад послесвечения по экспоненциальному закону для двух температур T_1 и T_2, e – основание натурального логарифма, t - постоянная времени характеристики спада [13]

Поскольку постоянная времени не зависит от интенсивности возбуждающего излучения, возможна реализация датчиков самых разнообразных конструкций. Например, фосфорный состав может наносится непосредственно на поверхность объекта, при этом оптическая система проводит измерения бесконтактным способом (рис. 16.25А). Это дает возможность проведения непрерывного мониторинга температуры объекта без внесения возмущений в зону измерений. В другой конструкции фосфор наносится на конец упругого зонда, способного вступать в плотный контакт с объектом (рис. 16.25Б и 16.25В).

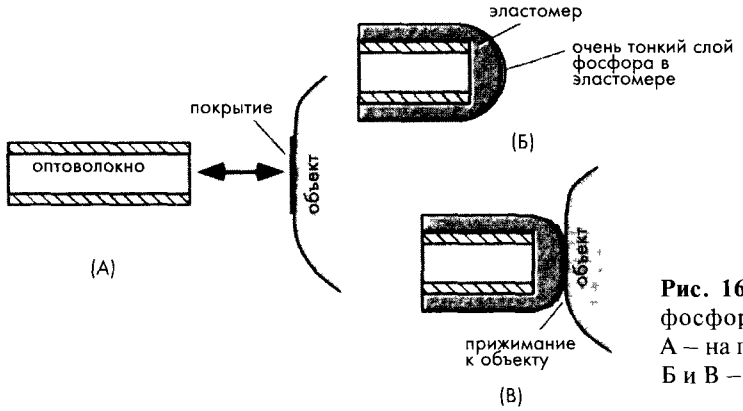


Рис. 16.25. Расположение фосфорных компонентов: А – на поверхности объекта. Б и В – на конце зонда [13]

16.4.2. Интерферометрические датчики

Другой метод оптического измерения температуры заключается в модуляции интенсивности света, возникающей вследствие интерференции двух лучей света. Один луч является эталонным, а другой пропускается через среду, параметры которой зависят от температуры, что вызывает появление фазового сдвига между сигналами. Величина этого фазового сдвига, а, значит, и параметры интерференционного сигнала, определяются температурой. В качестве чувствительного элемента интерферометрического датчика температуры часто используют тонкий слой кремния [15, 16], поскольку его коэффициент преломления зависит от температуры, что приводит к изменению длины пути луча.

На рис. 16.26 показана схема тонкопленочного оптического датчика, состоящего из трех слоев пленок, нанесенных на концы многомодового оптоволоконного волновода со ступенчатым изменением показателя преломления с диаметром сердцевины 100 мкм, и диаметром покрытия – 140 мкм [17]. Первый слой формируется из кремния, второй их диоксида кремния. Пленка из FeCrAl наносится в самом конце для защиты нижележащих слоев от окисления. Такие оптоволокна могут использоваться при температурах до 350°С. Однако при использовании волноводов с золотым покрытием рабочий диапазон увеличивается до 650°С. В качестве источников излучения здесь применяются светоизлучающие диоды с длиной волны излучения порядка 860 нм, а анализ результирующего сигнала проводится при помощи спектрометра.

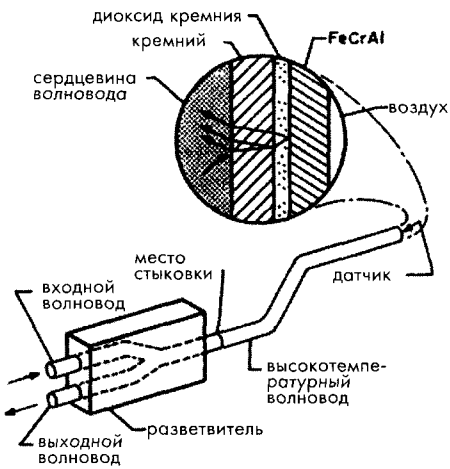


Рис. 16.26. Схема тонкопленочного оптического датчика температуры

16.4.3. Датчики на основе растворов, изменяющих цвет от температуры

Такие датчики применяются в биомедицинских системах. В качестве хроматического раствора часто применяют $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ (раствор хлорида кобальта). Принцип действия таких датчиков основан на характерной для определенных хроматических растворов температурной зависимости коэффициентов поглощения излучений видимого диапазона спектра (400...800 нм)(рис. 16.27А). Очевидно, что в состав таких датчиков должны входить: источник излучения, детектор и раствор хлорида кобальта, имеющий тепловую связь с объектом измерения. На рис. 16.27Б и 16.27В показаны два варианта хроматических датчиков температуры.

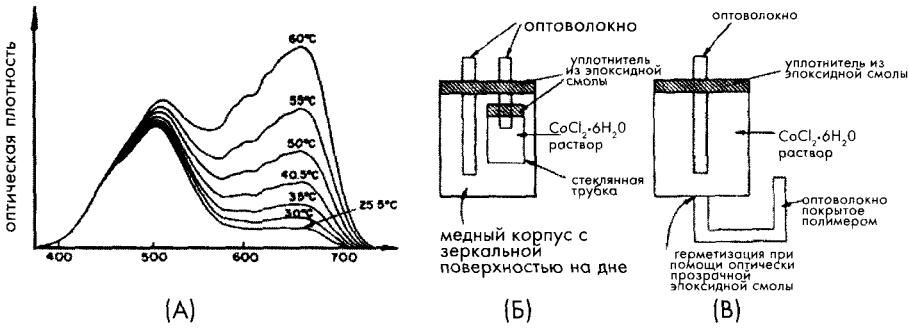


Рис. 16.27. Датчики на основе растворов, цвет которых зависит от температуры: А – абсорбционный спектр раствора хлорида кобальта, Б – датчик с отражающей поверхностью, В – датчик проходного типа [18]

16.5. Акустические датчики температуры

При работе в экстремальных условиях (в диапазоне криогенных температур, при высоких уровнях радиации в ядерных реакторах и т.д.), а также при проведении измерений в замкнутом герметичном объеме, где невозможно разместить контактные датчики или использовать ИК детекторы, бывает очень сложно определять температуру. В таких случаях обычно применяют акустические датчики температуры, принцип действия которых основан на зависимости скорости звука от температуры среды, через которую он распространяется. Например, для сухого воздуха при нормальном атмосферном давлении эта зависимость имеет вид:

$$v \approx 331.5\sqrt{\frac{T}{273.15}}, \; м/с, \tag{16.52}$$

где v – скорость света, а T – абсолютная температура.

Акустический датчик температуры (рис. 16.28) состоит из трех компонентов: ультразвуковых передатчика и приемника, а также герметичной трубки, заполненной газом. Передатчик и приемник представляют собой керамические пьезоэлектрические пластины, акустически несвязанные с трубкой, что обеспечивает

распространение звука преимущественно через газ внутри трубки. В качестве газа чаще всего используется сухой воздух. В альтернативной конструкции датчика передающий и принимающий кристаллы встраиваются внутрь замкнутои камеры с известным содержимым, температуру которого необходимо измерить. В случае, когда объем и масса внутренней среды поддерживаются постоянными, не требуется применения промежуточной трубки. В случаях когда без нее не обойтись, ее необходимо защищать от механических деформаций и потери герметичности при воздействии очень высоких температур. Подходящим материалом для трубки является инвар.

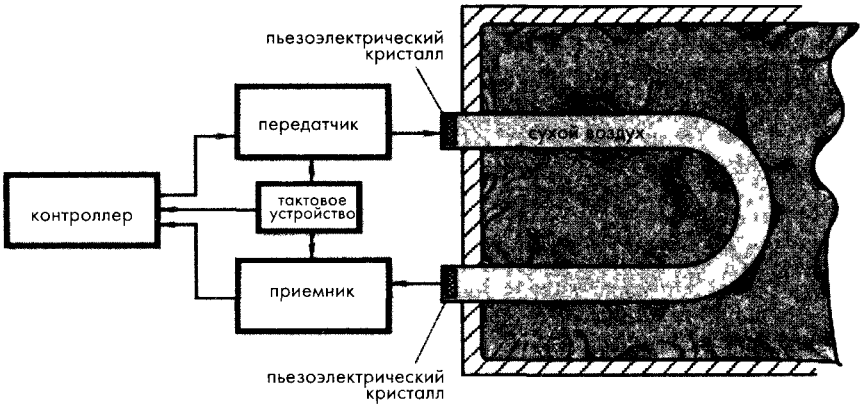


Рис. 16.28. Акустический термометр с ультразвуковым детектором

Тактовое устройство работает на низкой частоте (порядка 100 Гц). Его импульсы запускают передатчик и блокируют приемник. Передающий кристалл изгибается и тем самым запускает ультразвуковую волну, распространяющуюся вдоль трубки На принимающий кристалл приходит сигнал разрешения, и он преобразует дошедшую до него акустическую волну в электрический сигнал, который усиливается и передается в схему управления. Блок управления по времени распространения волны вдоль трубки вычисляет скорость звука, по которой при помощи калибровочных коэффициентов, хранящихся в специальных таблицах, находится искомая температура. Альтернативный акустический детектор температуры реализован на основе одного пьезоэлектрического кристалла, попеременно работающего то приемником, то передатчиком. В этом случае пустой конец трубки заваривается. Ультразвуковые волны отражаются от заваренного конца трубки и возвращается обратно на кристалл, который к этому моменту времени переключается в режим приемника. Электронная интерфейсная схема [19] преобразует полученные импульсы в сигнал, соответствующий температуре внутри трубки.

На основе поверхностных акустических волн (ПАВ) и плоскостных волн строятся миниатюрные датчики температуры (см. главу 11). Их принцип деиствия базируется на температурной модуляции некоторых механических параметров времязадающих элементов электронных генераторов [20, 21], что приводит к изменению их частоты. Фактически, такие интегральные акустические датчики являются прямыми преобразователями температуры в частоту. Типичная чувствительность таких датчиков лежит в пределах нескольких кГц на градус.

16.6. Пьезоэлектрические датчики температуры

При пьезоэлектрическом эффекте наблюдается зависимость частоты вибраций кварцевого кристалла от температуры. Именно на основе этого явления и реализуются пьезоэлектрические датчики температуры. Поскольку кварц является анизотропным материалом, резонансная частота пластины сильно зависит от угла среза кристалла (его кристаллографической ориентации). Поэтому выбирая срезы AT- и BT- , можно получить кристаллы, обладающие незначительной температурной чувствительностью. И наоборот, при использовании кристаллов других срезов можно реализовать датчики с ярко выраженной зависимостью частоты от температуры. Температурную зависимость резонансной частоты от температуры часто аппроксимируют полиноминальной зависимостью третьего порядка:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = a_0 + a_1 \Delta T + a_2 \Delta T^2 + a_3 \Delta T^3 \quad , \qquad (16\ 53)$$

где ΔT и Δf – температура и частотный сдвиг, f_0 – частота калибровки, а a – коэффициенты аппроксимации. Первый пьезоэлектрический детектор температуры был реализован в 1962 году на основе кристалла с Y-срезом [22]. После этого кампания Hewlett-Packard разработала очень удачный линейный датчик на основе кристалла с LC-среза [23]. При использовании кристаллов Y-срезов третьим и четвертым членами выражения (16.53) можно пренебречь. Чувствительность такого датчика составляет 35 ppm/°C, а рабочий температурный диапазон – от –80°C ... +230°C при точности калибровки 0.02°C. С применением микропроцессоров линейность становится не так важна, а главным фактором является чувствительность Так в нелинейных датчиках температуры, реализованных на основе слегка повернутых кристаллов Y-среза с Q=–4°C, была получена чувствительность 90ppm/°C [24]. Перспективными также являются резонаторы, использующие изгибные и торсионные моды колебаний. [25,26]

Следует отметить, что в пьезоэлектрических датчиках температуры всегда очень сложно организовать хорошую тепловую связь кристалла с объектом измерения, поэтому они обладают худшим быстродействием по сравнению с термисторами и термоэлектрическими детекторами.

Литература

1 Benedict, R P *Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements,* 3rd ed John Wiley & Sons, New York, 1984

2 Callendar, H L On the practical measurement of temperature *Phil Trans R Soc London* 178, 160, 1887

3 Sapoff, M Thermistor thermometers In *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook* J G Webster, ed , CRC Press, Boca Raton, FL, 1999, pp 32 25-32 41

4 Fraden, J A two-point calibration of negative temperature coefficient thermistors *Rev Sci Instrum* 71(4), 1901-1905, 2000

5 Steinhart, J S and Hart, S R *Deep Sea Res* , 15, 497, 1968

6 Mangum, B W *Rev Sci Instrum* 54(12), 1687, 1983

7 Sapoff, M , Siwek, W R , Johnson, H C , Slepian, J , and Weber, S In *Temperature Its Measurement and Control in Science and Industry* J E Schooley, ed American Institute of Physics, New York, 1982, Vol 5, p 875

8 *Keystone NTC and PTC Thermistors Catalogue* Keystone Carbon Company, St Marys PA 1984

9 Caldwell, F R *Thermocouple Materials* NBS monograph 40 National Bureau of Standards, Washington, DC, 1962

10 *Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement,* 4th ed ASTM Manual Series MNL 12-93 ASTM, Philadelphia, 1993

11 Sachse, H B *Semiconducting Temperature Sensors and Their Applications* Wiley-Interscience, New York, 1975

12 Timko, M P A two terminal IC temperature transducer *IEEE J Solid- State Circuits* SC-11, 784-788, 1976

13 Wickersheim, K A and Sun, M H Fluoroptic thermometry *Med Electron ,* 84-91, Febr 1987

14 Femicola, V C et al Investigations on exponential lifetime measurements for fluorescence thermometry *Rev Sci Instrum* 71(7), 2938-2943, 2000

15 Schultheis, L , Amstutz, H , and Kaufmann, M Fiber-optic temperature sensing with ultrathin silicon etalons *Opt Lett* 13(9), 782-784,1988

16 Wolthuis, R , A , Mitchell, G L , Saaski, E , Harti, J C , and Afromowitz, M A Development of medical pressure and temperature sensors employing optical spectral modulation *IEEE Trans Biomed Eng* 38(10), 974-981, 1991

17 Beheim, G , Fritsch, K , and Azar, M T A sputtered thin film fiber optic temperature sensor *Sensors Magazine,* 37—43, Jan 1990

18 Hao, T and Lui, C C An optical fiber temperature sensor using a thermochromic solution *Sensors Actuators A* 24, 213-216, 1990

19 Williams, J Some techniques for direct digitization of transducer outputs In *Linear Technology Application Handbook* Linear Technology Inc , 1990

20 Venema, A , et al Acoustic-wave physical-electronic systems for sensors *Fortschritte der Akustik der 16 Deutsche Arbeitsgemeinschaft fur Akustik,* pp 1155-1158,1990

21 Vellekoop, M J , et al All-silicon plate wave oscillator system for sensor applications Proc IEEE Ultrasonic Symposium, 1990

22 Smith, W L and Spencer, L J Quartz crystal thermometer for measuring temperature deviation in the 10-3 to 10-6 °C range *Rev Sci Instrum* 268 270, 1963

23 Hammond, D L and Benjaminson, A Linear quartz thermometer *Instrum Control Syst 3S, 115,1962*

24 Ziegler H Alow-cost digital sensor system *Sensors Actuators, 5,*169-178,1984

25 Ueda, T , Kohsaka, F, Iino, T , and Yamazaki, D Temperature sensor utilizing quatz tuning fork resonator Proc 40th Ann Freq Control Symp , 1986, pp 224-229

26 EerNisse E P , and Wiggins, R B A resonator temperature transducer with no activity dips Proc 40th Ann Freq Control Symp , 1986, pp 216-223

ГЛАВА 17

ХИМИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Химические датчики реагируют либо на определенные химические вещества, либо на химические реакции. Их назначение – идентификация и количественное определение химических реагентов в газовой и жидкой фазах (химические датчики для твердых веществ практически не используются).

В научных и прикладных исследованиях химические датчики используются во многих областях: от мониторинга загрязнения атмосферы до обнаружения взрывчатых веществ. Такие датчики применяются для проведения регулярных анализов образцов газов в лабораторных условиях и для определения распространения пятен опасных химических реагентов в почве или водоемах. Новые сферы применения химических датчиков – обнаружение местоположения насекомых – переносчиков опасных заболеваний, например, термитов по выделению ими газов в процессе переваривания клетчатки, а также мониторинг менструального цикла у коров для повышения эффективности искусственного оплодотворения.

В промышленности химические датчики используются для контроля за технологическими процессами при производстве пластмасс, а также при литье металлов, где количество диффундированных газов влияет на некоторые параметры металлов, например, на их прочностные характеристики. Они применяются для мониторинга среды в рабочих помещениях, для определения концентраций опасных для здоровья людей компонентов. Сфера применения химических датчиков постоянно растет: тестирование и контроль за качеством продуктов питания, за распространением пестицидов в сельском хозяйстве и т.д.

В медицине химические датчики применяются для тестирования состояния здоровья людей по анализам состава крови и газов, находящихся в легких. Такие датчики также используются при определении уровня алкоголя в крови и для диагностирования проблем пищеварения.

В военных областях химические датчики используются для обнаружения топливных складов и ядовитых веществ в воздухе, применяемых при проведении военных операций. Такие датчики используются для мониторинга подземных вод на территории военных баз, а также для контроля за токсичностью многих производств, особенно ядерных, с целью исследования влияния тех или иных компонентов на окружающую среду и здоровье людей.

** Эта глава написана совместно с Майклом С. Вогтом, профессором Argonne National Laboratory*

17.1. Характеристики химических датчиков

Для описания большинства химических датчиков используются общие для всех детекторов характеристики: стабильность, воспроизводимость, линейность, гистерезис, насыщение, время реакции и диапазон измерений (см. главу 2). Но также существуют два параметра, характерные только для этой группы датчиков: избирательность и чувствительность к определенному химическому реагенту, входящему в состав сложных композиций.

Избирательность – это способность детектора реагировать только на определенное химическое вещество и не реагировать на все остальные. *Чувствительность* характеризуется либо минимальной концентрацией детектируемого вещества, либо минимальным изменением его концентрации (этот параметр часто называют *разрешающей способностью*), достаточных для надежного детектирования датчиком. Следует отметить, что если в предыдущих разделах синонимом термина «чувствительность» был наклон линейной передаточной функции, то для химических датчиков аналогом чувствительности является разрешающая способность.

Избирательность является самой важной характеристикой химических датчиков. На практике обычно проверяют реакцию датчиков на увеличение концентраций исследуемых реагентов, поскольку гораздо проще повышать концентрацию веществ в эталонном образце, чем уменьшать ее. Очевидно, что химических датчиков с идеальной селективностью не существует.

17.2. Проблемы химических датчиков

Основная проблема химических датчиков заключается в том, что *исследуемые химические реакции меняют сам датчик*, к сожалению, часто необратимо. Например, электрохимические элементы на основе жидких электролитов (материалов, проводящих электрический ток не за счет электронов, а при помощи ионов) при каждом измерении теряют небольшое количество электролита, поэтому надо либо постоянно доливать его, либо использовать датчики другого типа, такие как химические детекторы на основе полевых транзисторов.

Другой проблемой является то, что химические датчики могут подвергаться воздействию неограниченного количества различных комбинаций химических реагентов, все из которых просто невозможно смоделировать. При этом за счет загрязнений различных типов, либо забивающих поры пленочных детекторов, либо изменяющих чувствительную поверхность (например, кремний в циркониевых датчиках создает неудаляемую пленку) могут происходить серьезные изменения рабочих параметров датчиков, определенных в процессе калибровки.

В каталитических датчиках, используемых для детектирования углеводородов, платиновые электроды и нагревательные элементы начинают испаряться при повышении температуры выше 1000°C, что сильно ограничивает их срок службы и снижает долговременную стабильность [1]. Скорость испарения возрастает в присутствии газов некоторых горючих веществ. Потери платины приводят к изменению сопротивления проводов, что вызывает смещение показаний датчиков, а также прогар нагревательных платиновых катушек.

Химическое загрязнение является проблемой многих датчиков, например, в детекторах каталитического типа кремний и тетраэтилсвинец, осаждаясь на поверхности чувствительных элементов, замедляют процесс окисления углеводородов, что ведет к занижению показаний. Иногда для предотвращения попадания загрязняющих реагентов в химические датчики встраивают специальные фильтры, задерживающие ненужные вещества, не оказывая при этом никакого влияния на исследуемые компоненты.

Химические датчики на основе поверхностных акустических волн (ПАВ), подвергаются механическому загрязнению чувствительных адсорбирующих пленок исследуемыми реагентами, что приводит к необратимому изменению их массы, а, следовательно, и уходу от калибровочных параметров. То же самое происходит и с чувствительными покрытиями оптоволоконных детекторов, постоянно загрязняемых неудаляемыми компонентами, снижающими их отражательную способность, что приводит к ложному детектированию исследуемых реагентов.

Существует еще одна проблема, характерная только для химических датчиков, заключающаяся в том, что большинство химических реакций протекают только при условии использования стехиометрических смесей со сбалансированными уровнями концентраций реагентов. Например, в реактивных углеводородных детекторах для проведения измерений необходимо, чтобы концентрация углеводородов соответствовала концентрации кислорода в смеси. При большой концентрации углеводородов (или недостаточной концентрации кислорода) в реакцию вступит только часть углеводородов, что приведет к занижению результатов измерений.

17.3. Классификация химических детекторов

Существует две классификации химических датчиков: по типу явления, лежащего в основе их принципа действия, и по методу измерения. Все химические детекторы можно разделить на две большие группы: прямого измерения (простые) и косвенные (составные). Каждая группа, в свою очередь, делится на устройства химического и физического типа (рис. 17.1).

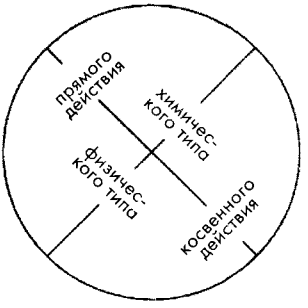


Рис. 17.1. Классификация химических датчиков

Датчики прямого действия основаны на свойствах некоторых химических реакций менять параметры электрической цепи: сопротивления, напряжения, тока или емкости (рис. 17.2). Такие датчики используют дополнительные схемы для согласования выходных электрических сигналов с интерфейсной схемой, но в них нет никаких преобразователей, конвертирующих одну форму энергии в другую. Датчики же косвенного типа (рис. 17.3) основаны на химических реакциях, не вызывающих непосредственного изменения электрических параметров, поэтому в их состав всегда входят дополнительные преобразователи, конвертирующие побочные явления реакций (изменение физических размеров, сдвиг частоты, модуляцию света, изменение температуры и даже массы) в электрические сигналы.

Рис. 17.2. Датчики прямого действия

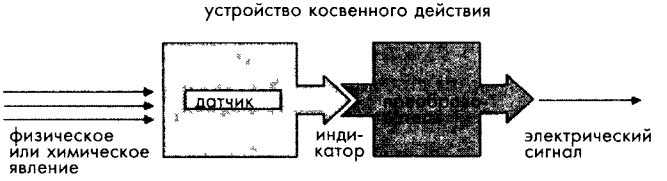


Рис. 17.3. Датчики косвенного действия

В некоторых самых простых детекторах химического типа исследуемый химический реагент вступает в прямую химическую реакцию с чувствительным элементом, что вызывает значительное изменение их выходных сигналов. При этом часто возникают необратимые изменения самих датчиков и ухудшение их стабильности. Недостатком детекторов химического типа является их неполная восстанавливаемость после проведения измерений, вызванная частичным использованием их компонентов (уменьшение электролита в электрохимических элементах или размеров электродов).

В детекторах физического типа химические реакции не протекают, но в присутствии определенных химических реагентов происходит изменение их физических свойств. Детекторы этой группы обладают меньшим дрейфом характеристик и лучшей стабильностью по сравнению с датчиками химического типа. Однако, как правило, они достаточно дороги из-за необходимости использования дополнительных преобразователей и обладают невысоким быстродействием.

17.4. Датчики прямого действия

По типу воздействия на электрические характеристики чувствительного элемента датчики прямого деиствия делятся на: *кондуктометрические* (переменный параметр – сопротивление или импеданс чувствительного элемента), *амперометрические* (переменный параметр – ток , протекающий через чувствительный элемент) и *потенциометрические* (переменный параметр – напряжение на паре электродов). При помощи соответствующих электронных схем переменные параметры легко преобразуются из одной формы в другую. Существует множество химических и физических реакций, на базе которых можно реализовать датчики прямого действия.

17.4.1. Металл-оксидные химические датчики

Металл-оксидные газовые датчики на основе диоксида олова (SnO_2) появились в конце 1960-х годов [2]. Они являются простыми и прочными устройствами, довольно легко согласуемыми с любыми электрическими схемами. Такие детекторы

основаны на свойстве некоторых оксидов металлов в присутствии определенных газов (таких, как CH_3SH и C_2H_5OH) менять свои электрические характеристики. При нагреве в воздухе кристаллов оксида металла, например, SnO_2, до заданной достаточно высокой температуры поверхность кристалла начинает адсорбировать атомы кислорода, в результате чего она становится заряженной, что уменьшает ток электронов. При воздействии на поверхность детектора определенных газов происходит снижение ее потенциала, что значительно повышает проводимость кристалла.

Для нахождения соотношения между электрическим сопротивлением пленки и измеряемой концентрацией газов можно воспользоваться следующим эмпирическим выражением:

$$R_s = A[C]^{-\alpha}, \tag{17.1}$$

где R_s – электрическое сопротивление детектора, A – константа, определенная для данного химического состава, C – концентрация исследуемых газов, а α – наклон характеристической кривой сопротивления, построенной для данного оксида металла и конкретного газа.

Поскольку в таких детекторах меняется удельное сопротивление кристалла, они не могут работать самостоятельно, а должны быть включены в состав дополнительной электронной схемы. В роли такой схемы, как правило, используется мост Уитстона, в одно из плечей которого встраивается детектор. Изменение сопротивления детектора приводит к разбалансу моста (рис. 17.4А). Для температурной балансировки мостовой схемы применяется термистор с отрицательным температурным коэффициентом (см. главу 16) с параллельным линеаризующим резистором.

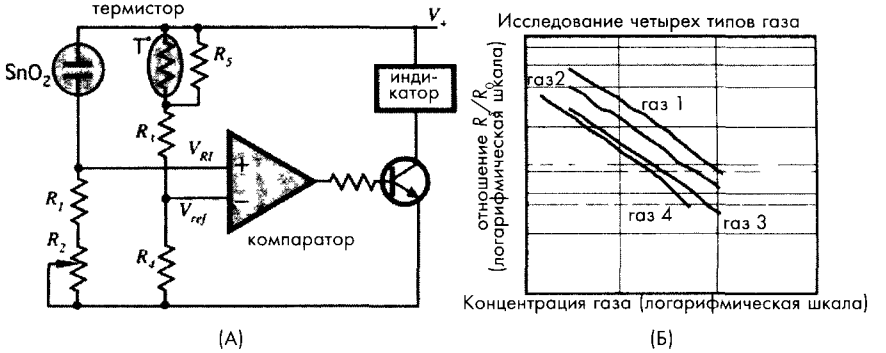


Рис. 17.4. Металл-оксидный химический детектор, включенный в схему моста Уитстона (А) и его передаточные характеристики, построенные для разных газов (Б)

Поскольку датчик ведет себя как сопротивление, величина которого меняется в зависимости от типа газа и его концентрации, падение напряжения на нем будет пропорционально этому сопротивлению, поэтому можно построить график зависимости падения напряжения от концентрации газов. Обычно при построении этого

графика в логарифмических координатах, он имеет вид прямой линии (рис. 17.4Б). Для каждого газа этот график будет иметь свой наклон и смещение, что позволяет проводить его идентификацию. Зная параметры этих прямых, можно оценивать концентрацию газов даже за пределами построенного графика [3]. По скорости изменения проводимости детектора можно идентифицировать газ и определить его концентрацию [4]. Для таких детекторов уровень проводимости может дрейфовать, но скорость ее изменения (наклон характеристики) всегда остается постоянной. Поэтому датчики, измеряющие не величину проводимости, а скорость ее изменения обладают лучшей стабильностью и воспроизводимостью.

17.4.2. Химические полевые транзисторы

Такие датчики реализуются на основе полевых транзисторов, на затворы которых наносятся один или несколько слоев специальных покрытий, способных реагировать на определенные химические вещества (рис. 17.5). Эти химические реагенты, воздействуя на затвор транзистора, меняют его проводимость между стоком и истоком. Величина этих изменений определяется типом химического вещества. В зависимости от типа исследуемых реагентов меняется и тип покрытий. Существующие химические полевые транзисторы позволяют детектировать водород в воздухе, кислород в крови, некоторые нервно-паралитические газы, NH_3, CO_2 и некоторые взрывоопасные вещества [5].

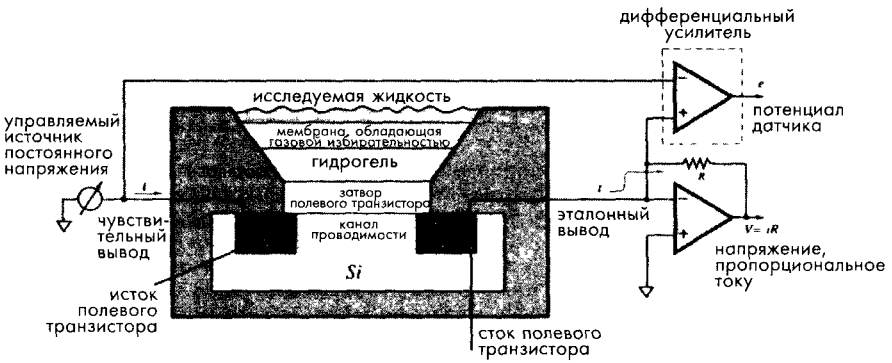


Рис. 17.5. Конструкция жидкостного химического полевого транзистора и электрическая схема его включения

Для изготовления химических полевых транзисторов (ХПТ), также как и обычных ПТ, применяются тонкопленочные технологии. ХПТ, как правило, реализуются на подложке из кремния *p*-типа, на которой методом диффузии сформированы две области *n*-типа (сток и исток). Полученная конструкция покрывается изоляционным слоем диоксида кремния, и над зоной между стоком и истоком формируется металлический электрод (затвор ПТ), на который наносится многослойное химическое покрытие. Во время работы на транзистор подается напряжение. Электроны, собирающиеся возле поверхности полупроводника за счет поляризации специальных покрытий, нанесенных на затвор, формируют канал проводимости между *n*-зонами стока и истока [6]. Фактически, ХПТ работает как химически

управляемый резистор. ХПТ подключен ко входам дифференциального усилителя, выходное напряжение которого пропорционально проводимости транзистора. Также проводимость ХПТ можно определить при помощи преобразователя ток-напряжение с эталонным резистором R.

Затвор ХПТ, детектирующего водород, выполняется в виде Pb/Ni пленки [7]. В усовершенствованных ХПТ, обладающих более высокой стабильностью, например, в ХПТ, используемых для детектирования жидкостных реагентов, между затвором из диоксида кремния и мембраной, отделяющей затвор от анализируемого состава, формируется слой гидрогеля Ag/AgCl (рис. 17.5). Селективная мембрана обычно изготавливается из поливинилхлорида, полиуретана, силиконовой резины или полиэфира.

В ХПТ, детектирующих ионы, затвор, покрывается слоем электролита, химически активного по отношению к ионам определенных веществ, или заменяется на другой полупроводниковый материал. Если ион-селективный материал пропускает ионы, то ХПТ называется MEMFET, а если его мембрана является непроницаемой для них, он называется SURFET. В присутствии определенных химических веществ на затворе таких транзисторов появляется потенциал, открывающий его канал проводимости, т.е. через него начинает течь ток, величина которого пропорциональна концентрации искомого компонента. Такие детекторы имеют небольшие размеры и низкое потребление энергии. Если в ХПТ используются энзимные мембраны, он называется ENFET, если ион-селективные – ISFET. Ион-селективные мембраны применяются для построения химических датчиков, а энзимные – биохимических. Энзимные мембраны, изготавливаются из полианилина (PANIE).

17.4.3. Электрохимические датчики

Электрохимические детекторы являются самыми универсальными среди всех химических датчиков. В зависимости от принципа действия они делятся на детекторы, измеряющие напряжение (*потенциометрические*) и измеряющие проводимость или сопротивление (*кондуктометрические*). В конструкции любого электрохимического датчика присутствуют, как минимум, два специальных электрода, между которыми протекает химическая реакция или происходит перемещение зарядов, образующихся в процессе этой реакции. При проведении измерений электрическая цепь детектора должна быть замкнута.

Электроды изготавливаются из каталитических металлов, таких как платина или палладий, или из металлов с угольным покрытием. Площадь электродов делается по возможности максимально большой, чтобы, как можно, большее количество анализируемого раствора вступило в реакцию, поскольку от этого зависит величина выходного сигнала. Для повышения срока службы и увеличения реакционной способности поверхность электродов иногда обрабатывается особым образом . На рис. 17.6 показана схема электрохимического датчика. Электрод WE, участвующий в химической реакции, называется *рабочим* электродом. Электрический сигнал измеряется относительно *вспомогательного* электрода AE, который не обязательно должен быть электролитическим. Третий электрод – *эталонный* (RE) используется для корректировки погрешности, вносимой поляризацией

рабочего электрода. В современных электрохимических датчиках толстопленочные электроды изготавливаются методом трафаретной печати, что повышает их надежность и упрощает процесс производства.

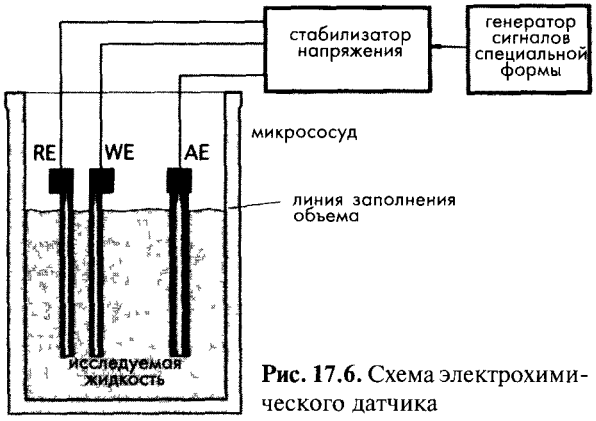


Рис. 17.6. Схема электрохимического датчика

Электролит – это среда, в которой носителями зарядов являются не электроны, а ионы. Это условие является первым критерием отбора анализируемых химических реакций. Детектор, состоящий из электродов и электролита, называется *электрохимической ячейкой*. В зависимости от того, за какими электрическими параметрами ведется наблюдение (за сопротивлением, напряжением, током, емкостью и т.д.), меняется и вид электрохимической ячейки. Далее в этой главе будут рассмотрены различные методы вольтамперометрии, основанные на применении электрохимических детекторов.

Самая простая электрохимическая ячейка состоит из двух электродов, помещенных в раствор электролита. Анализируемый газ, например, CO вступает в реакцию с рабочим электродом, в результате которой вырабатываются молекулы CO_2 и свободные электроны. Заряженные частицы притягиваются вторым электродом, и если в среде есть кислород, происходит образование воды. Таким образом, в электрохимической ячейке происходит преобразование CO в CO_2. Если электроды соединить последовательно с резистором, и измерять падение напряжения на нем, оно будет пропорционально протекающему току, а, значит, и концентрации исследуемого газа.

17.4.4. Потенциометрические датчики

Эти датчики основаны на влиянии концентрации реагентов на равновесие окислительно-восстановительных реакций, происходящих в электрохимической ячейке на границе электрод-электролит. Электрический потенциал на этой границе возникает благодаря химической реакции, которую можно описать в виде [8]:

$$\mathrm{Ox} + Ze = \mathrm{Red}, \tag{17.2}$$

где Ox – окислитель, а Red – восстановитель.

Эта реакция протекает на одном из электродов (в данном случае на катоде) и называется реакцией половины ячейки. В условиях термодинамического квазиравновесия можно применить уравнение Нернста:

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_0^*}{C_R^*}, \tag{17.3}$$

где C_0^* и C_R^* – концентрации восстановителя и окислителя, n – количество электронов, F – константа Фарадея, R – газовая постоянная, T – абсолютная температура, E_0 – начальный потенциал электрода. В потенциометрических датчиках одновременно протекают реакции на двух электродах. Однако анализируемые реагенты участвуют только в одной из них.

Измерение потенциала ячейки потенциометрического датчика выполняется при практически нулевом токе, т.е в квазиравновесном состоянии, для чего требуется применение измерительного устройства, обладающего очень высоким входным импедансом, называемого *электрометром*. С точки зрения переноса заряда переходная область электрод-электролит может быть либо неполяризованной либо поляризованной (емкостной). Некоторые металлы (например, Hg, Au, Pt) при контакте с растворами из инертных электролитов формируют переходную зону с идеальной поляризацией. Тем не менее, даже здесь существует конечное сопротивление переносу заряда, и процесс рассасывания избыточного заряда происходит с постоянной времени, определяемой произведением емкости двуслойной системы и сопротивления переносу заряда: $\tau = R_{ct}C_{dl}$.

Ион-селективные мембраны являются ключевыми компонентами всех потенциометрических ионных датчиков. Они определяют эффективность детектирования ионов определенных веществ в присутствии ионов других компонентов. Ион-селективные мембраны формируют с раствором неполяризованную переходную зону. Хорошие мембраны, обладающие селективностью, стабильностью, воспроизводимостью, устойчивостью к адсорбции и смешиванию, имеют также высокую плотность обменного тока.

17.4.5. Кондуктометрические датчики

Электрохимические датчики проводимости измеряют изменение проводимости электролита в электрохимической ячейке. Импеданс электрохимических датчиков может быть емкостным, что связано с поляризацией электродов и переносом зарядов.

В гомогенных электролитических растворах проводимость электролита G (Ом$^{-1}$) обратно пропорциональна расстоянию L между электродами вдоль электрического поля и прямо пропорциональна продольному сечению электрохимической ячейки A, перпендикулярному электрическому полю [9]:

$$G = \frac{\rho A}{L}, \tag{17.4}$$

где ρ (Ом$^{-1}$×см$^{-1}$) – удельная проводимость электролита, определяемая концентрацией и величиной зарядов ионов. Зависимость эквивалентной проводимости раствора от концентрации C, выраженной в моль/л или любых других единицах, имеет следующий вид:

$$\Lambda = \Lambda_0 - \beta C^{0.5}, \tag{17.5}$$

где β – характеристика электролита, а Λ_0 – эквивалентная проводимость электролита при бесконечном разбавлении.

Способы измерения проводимости электролитов при помощи кондуктометрических датчиков остаются практически неизменными в течение многих лет. Обычно электрохимическая ячейка включается в одно из резистивных плечей моста Уитстона (аналогично схеме на рис. 17.4). Однако в отличие от измерения проводимости твердых веществ, при определении проводимости электролитов возникают проблемы, связанные с поляризацией электродов. В дополнение к этому на поверхностях электродов происходят процессы переноса зарядов. Поэтому желательно, чтобы кондуктометрические датчики работали при напряжениях, при которых эти процессы не происходят. Следует отметить, что при подаче напряжения на ячейку, рядом с каждым электродом формируется двойной слой, что необходимо учитывать при измерении проводимости. Влияние всех этих эффектов снижается при использовании электрохимических ячеек с высоким значением отношения L/A, т.е. сопротивление ячеек должно лежать в интервале 1...50 кОм. Для выполнения этого условия электроды должны обладать небольшой площадью поверхности, а расстояние между ними следует делать, наоборот, большим. Однако это приводит к снижению чувствительности моста Уитстона. Для разрешения этого противоречия применяют многоэлектродную структуру ячейки. Влияние двойного слоя и поляризации также значительно снижается при использовании переменного тока высокой частоты и небольшой амплитуды. Существует еще один хороший способ балансировки емкости и сопротивления рабочей ячейки – подключение конденсатора переменной емкости параллельно резистору, стоящему в соседнем плече моста.

17.4.6. Амперометрические датчики

Датчик Кларка для детектирования кислорода, разработанный в 1956 году, является примером амперометрических химических датчиков [10, 11]. Принцип действия элемента Кларка основан на перемещении молекул кислорода, проходящих сквозь мембрану, к металлическому катоду через раствор электролита. В результате протекания двухступенчатой окислительно-восстановительной реакции происходит увеличение тока через катод. Эта реакция может быть записана в виде:

$$\begin{aligned} O_2 + 2H_2O + 2e^- &\rightarrow H_2O_2 + 2OH^- \\ H_2O_2 + 2e^- &\rightarrow 2OH^- \end{aligned} \qquad (17.6)$$

На рис. 17.7А показана схема элемента Кларка, в которой ни катод, ни анод, расположенные внутри детектора, не контактируют с внешней средой, а на рис. 17.7Б приведена его диффузионная модель первого порядка [11]. В этой модели система мембрана – электролит – электрод представлена в виде одномерной системы, в которой парциальное давление на поверхность мембраны равно равновесному давлению p_0, а давление на катоде равно нулю. В стационарном состоянии ток, протекающий через электроды датчика, определяется выражением:

$$I \approx \frac{4Fa_m D_m p_0}{x_m}, \qquad (17.7)$$

где A – площадь поверхности электрода, α_m – коэффициент растворимости кислорода в мембране, F- постоянная Фарадея, D_m – коэффициент диффузии, а x_m – толщина мембраны. Следует отметить, что величина тока не зависит от толщины слоя электролита и его диффузионных свойств. Мембраны, способные пропускать кислород, как правило, изготавливаются из тефлона. Чувствительность датчика определяется отношением тока к парциальному давлению кислорода:

$$S = \frac{I}{p_0} . \qquad (17.8)$$

Например, при толщине мембраны 25 мкм и площади катода $2 \cdot 10^{-6}$см^2 чувствительность элемента Кларка составляет 10^{12} А/мм.рт.ст.

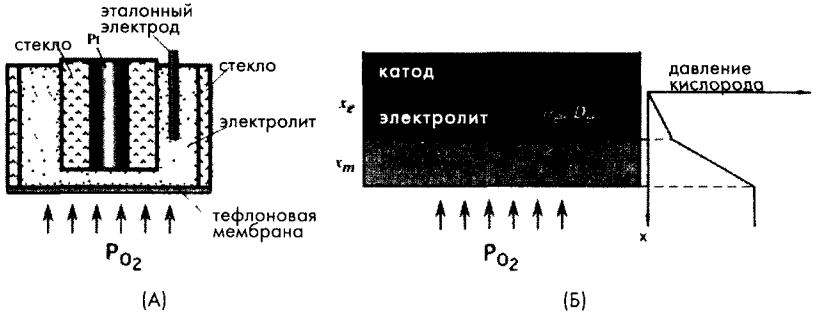


Рис. 17.7. Схема элемента Кларка (А) и одномерная модель первого порядка распределения давления кислорода внутри системы (Б) [11]

На основе двух элементов Кларка можно построить датчик, измеряющий относительный дефицит кислорода, вызванный протеканием энзиматической реакции. На рис. 17.8 показана схема, поясняющая принцип действия такого детектора, состоящего из двух идентичных электродов Кларка, один из которых (А) покрыт слоем активного окислителя, а второй (В) – пассивным ферментом. Датчики такого типа применяются для детектирования глюкозы. Запуск энзиматической реакции происходит за счет либо нагрева, либо облучения. Конструкция датчика из двух платиновых катодов и одного серебряного анода монтируется в пластиковом держателе, расположенном внутри стеклянной коаксиальной трубки. При отсутствии энзиматической реакции токи через оба электрода практически равны друг другу, вследствие того, что до них доходит приблизительно одинаковое количество моле-

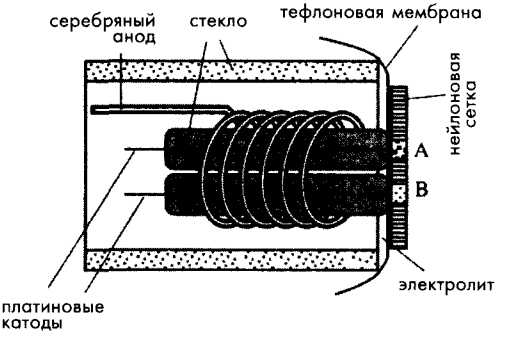


Рис. 17.8. Упрощенная схема амперометрического датчика Кларка, используемого для детектирования глюкозы

кул кислорода. Когда в исследуемом растворе присутствует глюкоза, запускается ферментная реакция, что вызывает снижение количества атомов кислорода, дошедших до поверхности активного электрода, а, значит, в выходной цепи наблюдается разбаланс токов.

17.4.7. Каталитические детекторы газов

Такие детекторы реализуются на основе простых электрохимических ячеек, встраиваемых в довольно сложные измерительные системы [12]. Электрохимические ячейки, изготовленные из металлокерамических пленок, позволяют проводить потенциометрические и амперометрические измерения по количественному определению концентраций широкого спектра газов. Каталитические датчики можно разделить на электрокаталитические и фотокаталитические детекторы.

На рис. 17.9 показан электрокаталитический датчик, реализованный на основе толстопленочной электрохимической ячейки электролитного типа. Такая ячейка изготавливается методами печатного монтажа и отжига и представляет собой многослойную структуру из металлокерамических материалов, нанесенных на подложку из оксида алюминия толщиной 625 мкм. Нижний электрод толщиной 15 мкм, состоящий из платины, нанесенной на слой оксида никеля, является эталонным. Верхний чувствительный электрод толщиной 5 мкм изготовлен из платины, спеченной с пористым материалом. Два электрода отделены друг от друга слоем толщиной 25...30 мкм из твердого электролита на основе циркония, стабилизированного иттрием (YSZ). Таким образом, конечная структура датчика состоит из последовательности слоев: Al_2O_3\Pt\Ni-NiO\YSZ\Pt. Электрический потенциал, формируемый в таком детекторе, пропорционален натуральному логарифму отношения парциальных давлений газов, действующих на противоположные поверхности датчика. Его можно описать уравнением Нернста (уравнение (17.3)). На основе таких детекторов строятся автомобильные кислородные датчики.

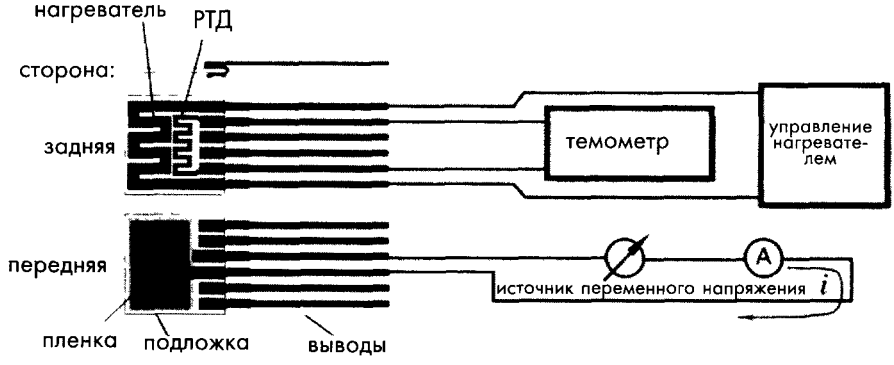


Рис. 17.9. Электрокаталитический газовый микродатчик, изготовленный на керамической подложке с нагревательным элементом и резистивным детектором температуры с одной стороны и толстой пленкой из твердого электролита с другой стороны

При подаче на электроды внешнего напряжения инициируются химические реакции. В результате изменения напряжения газы на поверхности электродов либо восстанавливаются, либо окисляются, отдавая или забирая при этом свободные электроны (см. уравнение (17.2)). Протекающие реакции влияют на величину тока i, проходящего через пленку. Этот ток, измеряемый при помощи амперметра, зависит от приложенного напряжения и типа исследуемых газов. На его величину также оказывает влияние скорость изменения напряжения и реактивная составляющая тока, возникающего вследствие электролитического процесса . [13]. Управляя формой сигнала напряжения, можно разделить эти две составляющие, что позволяет улучшить характеристики детектора. Поскольку химические реакции зависят от температуры, для поддержания заданного уровня температуры в детектор встраивается нагреватель и датчик температуры.

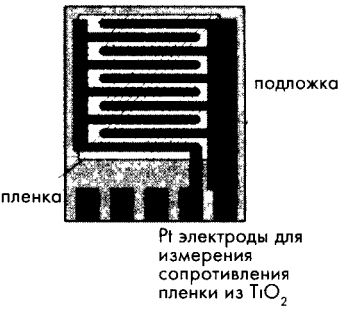


Рис. 17.10. Фотокаталитический газовый микродатчик

На рис. 17.10 показан фотокаталитический детектор, реализованный на основе пленки из оксида титана. Когда пленка из TiO_2 подвергается воздействию УФ излучения с длиной волны менее 320 нм, электрохимические процессы, протекающие в детекторе в присутствии определенных химических реагентов усиливаются, что вызывает изменение ее сопротивления [14]. Такие датчики могут работать как с одним источником излучений, так и с несколькими, настроенными на разную длину волны, что позволяет при соответствующем легировании пленок из TiO_2 расширять диапазон детектируемых газов.

Настройка детекторов на конкретный химический газ выполняется как регулированием приложенного напряжения, так и изменением длины волны излучения. В электрокаталитических датчиках газы на поверхностях электродов вступают в химические реакции только при определенных, только для них характерных напряжениях диссоциации, в результате чего на регистрирующей аппаратуре будут фиксироваться всплески или падения тока, протекающего через детектор. Поскольку такие датчики могут работать только будучи встроенными в измерительные системы, они занимают промежуточное положение между простыми детекторами и составными устройствами.

17.4.8. Эластомерные химические резисторы

Эластомерные химические резисторы или полимерные проводящие композиты (часто называемые *полимерными проводниками* (ПП)) являются полимерными пленками, увеличивающимися в своих размерах при поглощении определенных химических веществ. Это приводит к повышению их сопротивления, что и является признаком присутствия искомых газов. Хотя в таких датчиках и не протекают никакие химические реакции, их все же относят к классу химических датчиков. Селективность химических резисторов определяется способом обработки полимеров. ПП широко применяются в качестве чувствительных элементов в составе более сложных измерительных устройств [15]. Для обнаружения простых углеродсодержащих компонентов,

таких как изопропиловый спирт, датчикам на основе ПП требуется пара секунд, а при детектировании более сложных масел это время возрастает до 10...15 секунд. Химические резисторы могут работать в течение нескольких месяцев, при условии что не подвергаются действию коррозионных реагентов. Часто из ПП, по разному обработанных, формируют матрицы для детектирования группы химических веществ. Химические резисторы могут отличить, например, уксусную кислоту от ацетона, но их не применяют для количественного определения концентрации реагентов. Серийно выпускаемые эластомерные детекторы часто используются для обнаружения таких газов как O_2, Cl_2, H_2 и NO, т.е. газов, которые также могут детектироваться при помощи металл-оксидных датчиков. Но в отличие от металл-оксидных детекторов химические резисторы обладают меньшим потреблением энергии, и для работы им не требуются высокие температуры.

Для обнаружения жидкостных компонентов датчик должен реагировать на определенную концентрацию конкретного реагента. Это значит, что детектор должен обладать чувствительностью к физическим и/или химическим свойствам исследуемой жидкости. Примером такого датчика может служить резистивный детектор обнаружения утечек углеводородного топлива (первоначально такой детектор, разработанный в Bell Communication Research, применялся в системах защиты углубленных телефонных кабелей). Такой детектор изготавливается на основе кремния и композита на основе черного угля. Полимерная матрица выполняет роль чувствительного элемента, а проводящая прокладка используется для получения сравнительно низкого значения удельного сопротивления (порядка 10 Ом • см) в исходном состоянии. Такая структура является чувствительной к растворителям с высоким коэффициентом взаимодействия между растворителем и полимером [16]. Поскольку датчик не реагирует на полярные жидкости, такие как вода и спирт, его можно использовать в условиях работы под землей. Резистивный детектор изготавливается в виде тонкой пленки с высоким отношением площади поверхности к толщине. Когда искомый реагент вступает в контакт с пленочным чувствительным элементом, полимерный материал расширяется, что приводит к увеличению расстояния между проводящими частицами. Это означает, что композитная пленка из проводника превращается в диэлектрик с удельным сопротивлением 10^9 Ом • см и даже выше. Время реакции таких детекторов обычно меньше 1 с. Когда углеводородное топливо перестает воздействовать на пленку, она возвращается в свое исходное состояние.

17.5. Составные датчики

Составные датчики основаны на химических преобразованиях, изменяющих состояние индикатора. Индикатором может быть изменение температуры, прозрачности, частоты колебаний и т.д. Для получения из индикатора электрического выходного сигнала требуется дополнительный преобразователь.

17.5.1. Тепловые датчики

Изменение внутренней энергии системы всегда сопровождается выделением или поглощением тепла. Это утверждение называется первым законом термодинамики. Следовательно, все эндо и экзотермические химические реакции могут быть

обнаружены при помощи тепловых детекторов, например, описанных в главе 16. Датчики для детектирования реакций основаны на принципе *микрокалориметрии*. Принцип действия тепловых датчиков заключается в следующем: На температурный зонд наносится покрытие, реагирующее на определенное химическое вещество. При введении в образец зонд измеряет выделение тепла в процессе протекания реакции между образцом и покрытием.

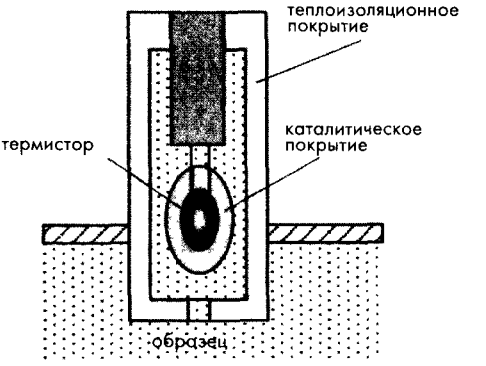


Рис. 17.11. Схема химического теплового датчика

На рис. 17.11 показана упрощенная схема такого датчика, помещенного в теплоизоляционный кожух для снижения тепловых потерь в окружающую среду. Чувствительным элементом здесь является термистор, покрытый каталитическим слоем, часто из иммобилизованного окислителя. Энзимы наносятся на наконечник термистора, который затем покрывается стеклянным чехлом для уменьшения тепловых потерь в окружающий раствор. В качестве эталонного детектора применяется аналогичный термистор с покрытием на основе сыворотки альбумина крупного рогатого скота. Оба термистора включаются в плечи моста Уитстона [17]. Увеличение температуры, вызванное протеканием химической реакции, пропорционально росту энтальпии dH:

$$dT = \frac{1}{C_p} dH \,, \tag{17.9}$$

где C_p – теплоемкость.

Химическая реакция в покрытии может быть записана как:

$$\beta - D - \text{глюкоза} + H_2O + O_2 \rightarrow \text{в присутствии окислителя} \rightarrow H_2O + D - \text{глюконовая кислота}, \Delta H_1 \tag{17.10}$$

и

$$H_2O_2 \rightarrow \text{в присутствии катализатора} \rightarrow \frac{1}{2} O_2 + H_2O, \Delta H_2 \,, \tag{17.11}$$

где ΔH_1 и ΔH_2 – парциальные энтальпии, сумма которых для вышеописанной реакции приблизительно составляет –80 кДж/моль. Этот датчик является линейным в динамическом диапазоне, определяемом концентрацией перикиси водорода.

17.5.2. Каталитические датчики Пелистера

Принцип действия таких датчиков аналогичен принципу действия тепловых датчиков энзимного типа. На поверхности таких датчиков в результате протекания каталитических реакций происходит высвобождение тепла, а происходящее при этом изменение температуры внутри устройства регистрируется при помощи соответствующих детекторов температуры. С точки зрения протекающих реакций эти детекторы похожи на высокотемпературные кондуктометрические оксидные датчики. Каталитические детекторы газов были разработаны специально

для обнаружения малых концентраций легковоспламеняющихся газов внутри шахт. Такие датчики часто называются пеллисторами [8]. Платиновая катушка встраивается в круглую пластину из ThO_2/Al_2O_3, покрытую пористым каталитическим металлом: палладием или платиной. Катушка выполняет роль и нагревателя, и резистивного детектора температуры (РДТ). Для этих целей могут использоваться и другие типы нагревательных элементов и детекторов температуры. Когда исследуемый газ вступает в реакцию на каталитической поверхности детектора, происходит выделение тепла, повышающее температуру пластины и встроенной в нее катушки. В результате этих процессов сопротивление катушки возрастает, что регистрируется электронной схемой. Такие детекторы могут работать в двух режимах: изотермическом, когда для обеспечения постоянной температуры электронный блок регулирует ток через катушку, и неизотермическом, когда детектор встраивается в мост Уитстона, выходное напряжение которого пропорционально концентрации исследуемых газов.

17.5.3. Оптические химические датчики

Оптические датчики основаны на взаимодействии электромагнитных волн с исследуемым образцом, в результате которого меняются некоторые свойства излучений, такие как интенсивность, поляризация, скорость света в среде и т.д. Модуляция длины волны излучения происходит из-за присутствия в образце определенных химических веществ. Оптические модуляции сигналов исследуются методами спектроскопии, позволяющими получать различную информацию о микроскопических структурах: от атомов до динамических процессов в полимерах. Принцип действия спектрометров заключается в воздействии на образец, который может быть в одной из трех фаз: твердой, жидкой или газообразной, монохроматического излучения. Проходящие через образец электромагнитные волны изменяют его свойства, что приводит к модуляции выходного сигнала. Либо внешнее излучение приводит к возникновению вторичного излучения (индуцированной люминесценции), интенсивность которого пропорциональна концентрации анализируемого вещества в составе образца.

Хемилюминесцентные детекторы при воздействии на них излучением в присутствии определенных химических веществ начинают испускать свет. Недисперсионное поглощение ИК излучения заданных длин волн может быть использовано для детектирования таких газов, как CO_2. Спектроскопические абсорбционные оптические датчики, работающие в диапазоне УФ и ИК длин волн, иногда применяются для обнаружения таких газов как O_3, при этом наблюдается не простое ослабление сигнала, а более сложные формы изменения оптической плотности. Какие бы методы измерения не использовались, у всех них есть общее правило, что для получения максимально возможного электрического выходного сигнала длина волны источника излучений должна соответствовать мощности выбранного оптического детектора. Детектирование исходящего и результирующего излучений проводится при помощи фотодетекторов или фотоумножителей.

Разработано большое количество разнообразных оптических химических детекторов. В данном разделе будет описан только один для иллюстрации работы таких датчиков. На рис. 17.12 показана упрощенная схема детектора CO_2 [18],

состоящего из двух камер, освещаемых одним светоизлучающим диодом (СИД). Для повышения отражающей способности поверхности камер покрыты слоем металла. В левой камере проделаны отверстия, сообщающиеся с газопроницаемой мембраной. Эти отверстия позволяют CO_2 проникать внутрь камеры. Нижние части камер выполнены из стекла. Подложки A и B формируют оптические волноводы. Рабочая камера заполняется реагентом, контрольная камера остается пустой. Измерительная часть детектора отслеживает изменения оптической плотности pH-индикатора, внесенного в раствор реагента. В данном случае справедлив закон Бера-Ламберта:

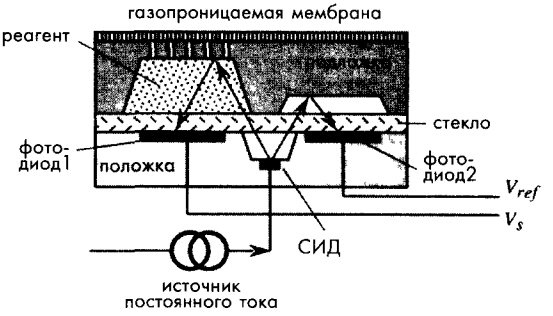


Рис. 17.12. Упрощенная схема оптического детектора CO_2

$$I = I_0 \exp\left[-\alpha(\lambda, pH)dC\right], \qquad (17.12)$$

где I – интенсивность отраженного излучения, I_0 – интенсивность источника излучений, α – молярная поглощающая способность, λ – длина волны, C – концентрация, а d – оптическая длина пути.

Между молекулами CO_2 окружающей среды и молекулами H_2CO_3 и HCO_3 реагента устанавливается равновесное состояние, что приводит к изменению pH раствора. Раствор реагента содержит pH-индикатор Хлорофенол красный, у которого поглощающая способность на длине волны 560 нм линейно зависит от уровня pH, изменяющегося в диапазоне значений 5...7. Состав реагента выбирается из расчета того, чтобы парциальное давление CO_2 в диапазоне 0...140 торр приводит к изменению pH в требуемом интервале значений. Поскольку pH раствора пропорционально логарифму парциального давления диоксида углерода (pCO_2), изменение его оптической плотности будет линейно связано с логарифмом от pCO_2.

Свет от общего СИД проходит через pH-чувствительный раствор, отражается от поверхности камеры и возвращается на фотодиод 1. Второй фотодиод является эталонным, его назначение заключается в сглаживании перепадов интенсивности излучения СИД. Для обеспечения температурной стабильности характеристик детектор должен работать при постоянной температуре окружающей среды.

На рис. 17.13 показан оптоволоконный химический датчик, принцип действия которого основан либо на изменении интенсивности излучения, дошедшего через волновод до принимающего фотодетектора, либо на изменении его длины волны (см. также рис. 4.17A главы 4). Такой датчик обычно состоит из трех частей: источника излучения, волновода со специальным адсорбционным покрытием на конце и фотодетектора, преобразующего переменный световой сигнал в электрический. Слой, нанесенный на конец волокна выполняет роль либо химически селективной мембраны, либо индикатора, оптические свойства которого зависят от состава анализируемого образца [19].

Рис. 17.13. Оптоволоконный химический датчик

Расположение реагента и его характеристики, влияющие на оптические свойства детектора, определяются типом датчика. Простой датчик обычно состоит из стеклянного оптоволоконного волновода с полимерным покрытием, отполированной линзы на его конце и реагента, поглощающего падающий свет. Иногда вместо отполированной линзы на конце волновода используется специальное покрытие, влияющее на отражение и преломление падающего излучения, в этом случае детектор измеряет затухающие колебания. Поскольку сам волновод является довольно прочным и устойчивым к воздействию многих химических реагентов, слабым местом таких датчиков является чувствительное покрытие, не обладающее такими свойствами [20].

Существуют разнообразные конструкции оптоволоконных детекторов, цель разработки которых заключается в повышении их избирательности. В одной из них свет от источника излучений разделяется на два луча, один из которых проходит через реагент, а другой остается неизменным. После чего два отраженных луча либо при помощи мультиплексора подключаются к одному фотодетектору, либо подаются на разные преобразователи для получения выходного дифференциального сигнала.

17.5.4. Гравиметрические детекторы

Химические датчики, в которых очень маленькие изменения массы, происходящие из-за адсорбции молекул, приводят к изменению механических свойств системы, называются *гравиметрическими детекторами* или *микровесами*. Такие датчики относятся к физическим устройствам, поскольку в них нет протекания никаких химических реакции. Измерение микроскопических масс не может быть выполнено при помощи обычных весов. Для этого могут применяться акустические гравиметрические детекторы, работающие на ультразвуковых частотах. Принцип действия таких детекторов заключается в изменении резонансной частоты пьезоэлектрических кристаллов при осаждении на их поверхностях дополнительных масс. Пьезоэлектрический кварцевый генератор вибрирует на частоте, которая в зависимости от вида схемы называется либо последовательной (f_r), либо параллельной (f_{ar}) резонансной частотой (см. рис. 7.39А главы 7). Любая резонансная частота определяется массой кристалла и его формой. В упрощенном виде гравиметрический датчик может быть представлен в виде пластины с собственной частотой, зависящей от ее массы. Добавление некоторого количества вещества к этой массе приводит к сдвигу частоты, который может быть измерен при помощи соответствующих электронных схем:

$$\frac{\Delta f}{f} = S_m \Delta m \quad , \qquad (17\ 13)$$

где f_0 – собственная частота ненагруженного детектора, а Δf – сдвиг частоты под нагрузкой ($\Delta f = f_{нагр} - f_0$), Δm – добавленная масса на единицу площади, а S_m – чувствительность детектора. Значение чувствительности определяется конструкцией, материалом и рабочей частотой (длиной волны) акустического детектора. Следовательно, гравиметрический датчик преобразует изменение массы в сдвиг по частоте. Поскольку значения частоты и времени несложно определить с высокой точностью, точностные характеристики микровесов определяются стабильностью параметра S_m во время проведения измерений. На рис. 17.18 показан пример гравиметрического датчика.

Молекулы или большие частицы химических веществ, осаждаясь на поверхности кристалла, увеличивают его массу, и, следовательно, снижают резонансную частоту. Сдвиг по частоте, измеряемый при помощи соответствующей электронной схемы, как правило, практически линейно зависит от концентрации искомого компонента в исследуемом образце газа. Абсолютная точность этого метода определяется такими факторами, как: механическая фиксация кристалла, температура и т.д. Поэтому для обеспечения требуемого уровня точности необходимо проводить калибровку датчиков во всем диапазоне рабочих значений.

Гравиметрические датчики обладают очень высокой чувствительностью. Например, типовая чувствительность таких детекторов составляет порядка 5МГц • см^2/кг; это значит, при увеличении веса на 17 нг/см^2 сдвиг по частоте равен 1 Гц. Динамический диапазон микровесов также довольно широк: до 20 мкг/см^2. Для обеспечения химической избирательности детекторов на кристалл наносится специальное покрытие, состав которого определяется типом исследуемого вещества.

Другой разновидностью гравиметрических датчиков являются детекторы, реализованные на основе поверхностных акустических волн (ПАВ). ПАВ – это механические волны, распространяющиеся по поверхности твердого тела на границе раздела со средой, обладающей меньшей плотностью, например, воздухом [21]. Эти волны иногда называются волнами Релея. Это название они получили в честь ученого, предсказавшего их открытие в 1885 году. ПАВ детектор состоит из трех основных компонентов: пьезоэлектрического передатчика, линии передач с химически селективным покрытием и пьезоэлектрическим приемником. Электрический генератор заставляет электроды передатчика изгибать подложку, что приводит к формированию механической волны, распространяющейся по поверхности линии передач в сторону приемника. Подложка часто изготавливается из $LiNbO_3$, обладающего очень высоким пьезоэлектрическим коэффициентом [22]. Однако линия передач не обязательно должна быть пьезоэлектрической. Это обстоятельство дает возможность изготавливать датчики из других материалов, например, кремния. В зависимости от типа покрытия на поверхности линии передач осаждаются те или иные химические вещества, в результате чего меняются параметры распространяющихся по ней механических волн. Механические волны, доходя до приемника, преобразуются на нем в выходной электрический сигнал. ПАВ датчики часто имеют дифференциальную структуру, в которой используется еще один эталонный детектор, сигнал которого вычитается из сигнала основного детектора.

Типовые схемы акустических датчиков, которые могут быть адаптированы для измерения масс, приведены в разделе 12.6 главы 12. В этом разделе будет рассмотрен только один гравиметрический ПАВ детектор, используемый для измерения концентраций газов (рис. 17.14). Этот датчик изготовлен на гибкой тонкой кремниевой пластине, на которую методом напыления нанесены две пары гребенчатых электродов. Под электродами формируется тонкий пьезоэлектрический слой из ZnO, необходимый для электрической генерации механических ПАВ на поверхности кремниевой пластины. Эта пленка придает кремниевой пластине пьезоэлектрические свойства. Верхняя поверхность чувствительной пластины покрывается тонким слоем химически селективного материала (или клея, если датчик предназначен для детектирования веществ, загрязняющих воздух). Вся эта конструкция размещается внутри трубки, сквозь которую продувается исследуемый газ. Обе пары электродов включены в схему колебательного контура, частота которого f_0 определяется собственной механической частотой подложки детектора.

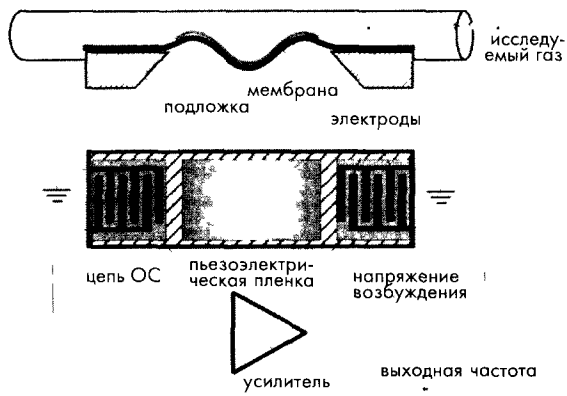


Рис. 17.14. ПАВ детектор газов, величина отклонений мембраны для ясности понимания сильно преувеличена

В состав схемы входит усилитель, выходное напряжение которого управляет электродами передатчика. Благодаря пьезоэлектрическому эффекту, подача напряжения на электроды приводит к изгибу мембраны и распространению механической волны справа налево. Скорость волны определяется состоянием мембраны и ее покрытия. Изменение механических свойств покрытия зависит от его взаимодействия с исследуемым газом. В зависимости от скорости распространения волны по мембране меняется время, через которое она достигнет приемника. Преобразованный электрический сигнал с выхода приемника подается на вход усилителя. Таким образом формируется петля ОС, заставляющая схему работать в колебательном режиме. Выходная частота является мерой измерения концентрации исследуемого газа. Перед подачей исследуемого газа обычно проводится определение контрольной частоты.

Такой метод может применяться для мониторинга состава гетерогенных образцов, таких как аэрозоли и суспензии. Увеличение массы за счет прилипания частиц аэрозолей и суспензии приводит к значительному частотному сдвигу. При этом по выходной частоте можно судить о величине частиц этих составов. Для улучшения эффекта прилипания кристаллы обрабатываются специальными химическими или электростатическими методами.

Теоретически чувствительность рассматриваемого датчика определяется как S_m=-1/2 ρd, где ρ – средняя плотность пластины, а d – ее толщина [23]. На рабочей

частоте 2.6 МГц чувствительность датчика составляет – 900 $см^2/г$. Поэтому при площади поверхности 0.2 $см^2$ увеличение массы на 10 нг (10^{-8} г) изменению астоты на $\Delta f = -(900)(2.6 \cdot 10^6)(10^{-8}/0.2) = -117$ Гц.

ПАВ детекторы очень универсальны и могут адаптироваться для измерения концентрации многих химических компонентов. В таблице 17.1 приведены описания некоторых ПАВ датчиков.

Таблица 17.1. Химические датчики на ПАВ

Компоненты	Химическое покрытие	ПАВ подложка
Пары органических веществ	Полимерная пленка	Кварц
SO_2	Триэтаноламин	Ниобат лития
H_2	Pd	Ниобат лития, кремний
NH_3	Pt	Кварц
H_2S	WO_3	Ниобат лития
Пары воды	Гигроскопическое	Ниобат лития
NO_2, NH_3, SO_2, CH_4	Фталоцианин	Ниобат лития
Пары взрывчатых веществ, наркотики	Полимер	Кварц
SO_2, метан	Покрытие не используется. Детектирование основано на изменении теплопроводности через газ	Ниобат лития

Источник [22]

17.5.5. Биохимические датчики

Биодетекторы – это специальный класс химических датчиков. Эволюция развития живых существ привела к созданию очень чувствительных органов, реагирующих на присутствие в воздухе даже нескольких молекул определенных веществ. Чувствительные элементы, созданные людьми на основе биологически активных материалов, хотя и не обладают такой высокой чувствительностью, но в комбинации с другими детекторами (например, амперометрическими или тепловыми) могут качественно и количественно определять ряд биологических компонентов, таких как: простейшие организмы, клетки, ткани, органеллы, мембраны, ферменты, рецепторы, антитела и нуклеиновые кислоты [17]. По существу, биохимические датчики являются биореакторами, сформированными на основе обычных химических детекторов, поэтому их принцип действия базируется на процессах диффузии исследуемых растворов, на анализе продуктов реакции и на кинетике изучаемых процессов.

При изготовлении биодетекторов ключевой проблемой является прикрепление биоматериала к физическому преобразователю. При этом:

- биоматериал должен удерживаться на поверхности чувствительного элемента в течение всего его срока службы;
- должен быть обеспечен контакт биоматериала и исследуемого раствора;

- продукты реакции должны беспрепятственно диффундировать с поверхности биоматериала;
- исследуемый раствор и продукты реакции не должны менять свойства биоматериала.

Большинство биологически активных материалов являются протеинами или содержат протеины в своих структурах. Для прикрепления протеинов на поверхности детектора применяются два метода: связывание или физическое удержание. Адсорбция и установление ковалентных связей являются двумя вариантами метода связывания. Способ физического удержания заключается в отделении биоматериала от анализируемого раствора при помощи специального покрытия, нанесенного на поверхность детектора. Такое покрытие должно быть проницаемым для исследуемого состава и продуктов реакции, но не для биоматериала.

17.5.6. Энзимные датчики

Рис. 17.15. Схема энзимного детектора

Датчики с энзимным слоем обладают высокой избирательной способностью. Энзимы (ферменты) являются катализаторами – протеинами с высоким молекулярным весом, найденными в живых организмах. Они обладают двумя замечательными свойствами:

- у них очень высокая селективность при соответствующем выборе подложки;
- они значительно повышают скорость химических реакций. Поэтому датчики, реализованные на их основе, имеют и хорошую избирательную способность, и высокий выходной сигнал. Максимальная скорость реакции пропорциональна концентрации ферментов. На рис. 17.15 показана схема энзимного детектора [17].

Роль чувствительного элемента может выполнять либо тепловой, либо электрохимический, либо оптический детектор. Энзимы действуют только в водной среде, поэтому они, как правило, размещаются в гидрогеле. Принцип действия таких детекторов заключается в том, что ферменты (катализаторы), удерживаемые в специальном слое, вступают в реакцию с элементами подложки, проникающими в этот слой за счет процессов диффузии. Продукты этой реакции диффундируют в исследуемый раствор. Все остальные участники реакции попадают в реакционный слой и выводятся из него также диффузионным способом. В результате протекающих реакций меняются свойства энзимного слоя, что и регистрируется чувствительным элементом.

17.6. Химические детекторы в составе аналитических приборов

Химические детекторы редко используются по отдельности, чаще они входят в состав аналитических микропроцессорных систем, состоящих из измерительной части на основе датчиков разного типа и программного обеспечения, управляющего

работой всей системы и обработкой результатов измерений. Для настройки систем и регулировки режимов их работы такие устройства строятся на принципе ОС. В состав таких систем часто входят компоненты, выполняющие ряд механических операций: насосы, фильтры, сепараторы и т.д.

Примерами сложных аналитических приборов являются хроматографы, масспектрометры, ИК спектрометры и др. В состав таких приборов входят датчики, откалиброванные для проведения определенных измерений или анализов, электронные схемы, управляющие работой системы, и блок обработки сигналов, который также должен компенсировать дрейф различных характеристик и минимизировать другие погрешности.

Жидкостная и газовая хроматография является эффективным методом аналитической химии. Принцип хроматографии заключается во введении жидкости или газа внутрь трубочки, заполненной материалом высокой пористости, в результате чего молекулам исследуемого вещества приходится передвигаться по очень извилистым траекториям [24]. Размер пор материала должен соответствовать диаметру молекул анализируемого состава, который определяется на основе предварительных измерений. Адсорбционные свойства пористого материала также выбираются исходя из характеристик исследуемого образца. На конце трубочки устанавливается электрический детектор (например, кондуктометрический) для обнаружения молекул, прошедших через нее. Отсчет времени начинается по таймеру с момента введения в трубку исследуемого образца. Молекулы, диаметр которых намного меньше диаметра пор, проходят через трубку гораздо быстрее, чем более крупные молекулы. Этот процесс напоминает просеивание гравия через решето. Он позволяет эффективно разделить молекулы анализируемого образца по размерам, в результате чего на выходе трубки появляются группы молекул. Моменты появления групп отделены друг от друга некоторыми интервалами времени. Электрический преобразователь регистрирует пики, соответствующие конкретным группам молекул, и по их площади определяет их концентрацию в анализируемом образце. Время появления каждого пика, являющееся функцией размера молекул и адсорбционных свойств материала, используется для идентификации молекул. На рис. 17.16А приведен пример последовательности пиков, называемой хроматограммой.

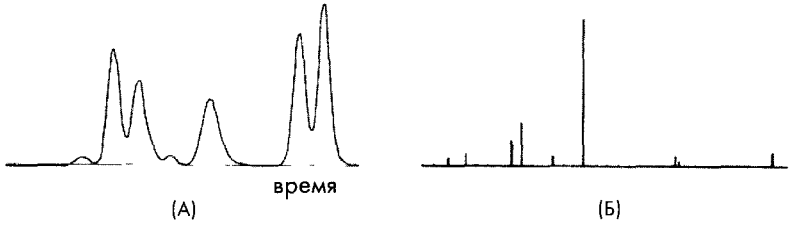


Рис. 17.16. А – пример хроматограммы, Б – пример выходного сигнала масс-спектрометра

В памяти современных хроматографических систем хранится множество хроматограмм, используемых для идентификации исследуемых образцов. Иногда применяются многомерные хроматограммы. В настоящее время хроматография

является очень популярным методом проведения химических анализов. Хроматографы выпускаются рядом крупных фирм. По методам хроматографии написано много замечательных учебников. Программное обеспечение современных хроматографов при проведении соответствующих калибровок и наличии специальных библиотек шаблонов позволяет производить автоматическую идентификацию состава широкого спектра образцов.

Масс-спектрометрия – метод аналитической химии, заключающийся в ионизации исследуемого образца, последующем ускорении полученных ионов при помощи высокого напряжения и фокусировки их в луч [25]. Этот луч состоит из нескольких составляющих, соответствующих ионам разных масс и разных зарядов, которые разделяются под действием магнитных или электростатических сил. На рис. 17.16Б показана спектрограмма масс-спектрометра. Расположение линий на спектрограмме соответствует отношению массы к заряду химических компонентов исследуемого образца. Высота линий пропорциональна концентрации молекул в образце с данным отношением масса/заряд. Масс-спектрометрия также является очень популярным лабораторным методом.

Масс-спектрометрия иногда применяется совместно с другими методами химического анализа для повышения избирательной способности при идентификации неионизирующихся компонентов. Также как и хроматограммы, масс-спектрограммы могут быть обработаны методами хемометрии, описанными в разделе 17.6.1.

ИК спектроскопия на основе преобразования Фурье заключается в облучении исследуемого образца электромагнитными волнами ИК диапазона, меняющимися в заданном интервале значений, и измерении амплитуд поглощенного ИК излучения, соответствующих разным длинам волн [26]. Регистрируемая спектрограмма поглощения от длины волны обычно очень зашумлена, поэтому для восстановления полезного сигнала применяется цифровой фильтр, реализованный на основе преобразований Фурье (рис. 17.17А). Этот метод широко применяется в лабораторных аналитических системах. Он претерпевает постоянные модификации с целью повышения его точности. Эти усовершенствования выполняются не только за счет изменения вычислительных методов, но и благодаря применению универсальных библиотек и калибровок широкого спектра образцов. Недостатком этого метода является сложность проводимых математических преобразований, из-за чего он до сих пор не миниатюризирован. Для обработки результатов ИК спектроскопии могут быть также применены методы хемометрии.

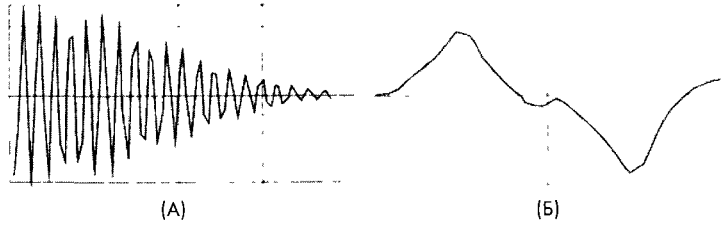


Рис. 17.17. А – результаты проведения ИК спектроскопии на основе преобразований Фурье, Б – пример вольтамперометрии

Вольтамперометрия – это электрохимический метод измерения, заключающийся в подаче переменного напряжения на два или три электрода, находящиеся в контакте с жидкостным или газовым анализируемым образцом [27]. Напряжение на электродах запускает окислительно-восстановительные реакции в электроактивных образцах, в результате чего в электрической цепи системы начинает течь ток. На рис. 17.17Б показан пример вольтамперограммы – зависимости тока от приложенного напряжения, по форме которой можно судить о качественном и количественном составе исследуемого образца [28]. В зависимости от формы приложенного напряжения можно получить простую или сложную вольтамперограмму [29]. Конечно, разные электрохимические реакции влияют друг на друга, но, как правило, различные химические соединения имеют свои собственные потенциалы диссоциации, поэтому расположение пиков на потенциальной кривой довольно точно характеризует химический состав образца, а их величина соответствует количеству данного вещества [30]. Вольтамперометрия начала развиваться в начале двадцатого века [31, 32]. Этот метод подходит для идентификации органических, неорганических, металлорганических соединений и металлов. Поскольку результаты вольтамперометрии очень сложно обрабатывать вручную, для этого применяются методы хемометрии.

Наиболее популярными формами потенциальной кривой являются: линейная, пилообразная, ступенчатая, прямоугольная и импульсная развертки. Для целей диагностирования образцов хорошо подходят линейная и пилообразная развертки, но они обладают не всегда удовлетворительным пределом детектирования, обычно ограниченным $10^{-3}...10^{-4}$ М уровнями. Предел детектирования других видов разверток составляет порядка $10^{-7}...10^{-8}$ М уровней.

17.6.1. Хемометрия

В выходных сигналах большинства измерительных систем для проведения химических анализов содержится очень много информации, поэтому здесь не удается обходиться единичными измерениями или сравнениями с эталонными значениями. Для обработки таких данных и учета характерных особенностей разнообразных химических датчиков были разработаны методы хемометрии. По существу, *хемометрия* является комплексом методов обработки данных, основанных на математическом и статистическом моделировании химических систем [34]. В общем виде, эти методы могут быть разделены на два раздела: *исследование данных* и *анализ данных*.

Обе группы методов основаны на *моделировании* выходных данных. Модели могут быть *параметрическими* и *непараметрическими* [35]. Все статистические модели строятся на предположении, что все переменные распределены по закону Гаусса (по нормальному закону). Поэтому любые эмпирические данные могут быть описаны предполагаемой математической зависимостью. Погрешность измерений при этом определяется по отклонению экспериментальных данных от этой зависимости. Статистические методы, дающие довольно точные предположения о распределении экспериментальных данных, относятся к *параметрическим* методам.

В непараметрических моделях речь идет об аппроксимациях и не делается никаких предположений о распределении полученных данных. Такие модели обычно проще параметрических и их легче применять. Они, как правило, основываются на простых предположениях, справедливых только для конкретных применений. *Статистические робастные модели* являются альтернативой строгим параметрическим и непараметрическим методам. Такие модели стараются описать исследуемую систему, используя критерий наилучшего соответствия всему объему экспериментальных данных, для этого определяются выбросы и значимые точки, оказывающие сильное влияние на регрессионные зависимости. Робастная статистика направлена на поиск корреляционных зависимостей серийных испытаний и на определение отклонений от этих зависимостей.

Методы исследования данных обычно начинаются с *систематизации полученных данных*. Систематизация – это хороший способ идентификации групп без предварительного описания их характеристик. *Иерархический кластерный анализ* (HCA) является одним из методов систематизации. Он заключается в вычислении межэлементных расстояний и их сортировке. После чего элементы связываются друг с другом, начиная с наименьшего расстояния между ними, формируя тем самым новые кластеры. Кластеры объединяются со своими ближайшими соседями на основе евклидова расстояния. Таким образом, цепочка связей будет расти до тех пор, пока не будут использованы все элементы.

Анализ данных также основывается на методах систематизации, но в данном случае эти методы используются для построения модели, помогающей классифицировать образцы на базе уже накопленных знаний. Существует довольно много методик систематизации наблюдений, но все они имеют характерную особенность: для того, чтобы приписать новый образец к той или иной группе или категории используется классификация, построенная на результатах прошлых исследований. Например, в алгоритме поиска ближайшего соседа (KNN) неизвестный образец приписывается к определенному классу, ближайшему к нему в многомерном евклидовом пространстве [34]. Другим методом систематизации является программное независимое моделирование, основанное на классификации аналогий (SIMCA) [36].

17.6.2. Измерения при помощи нескольких датчиков

Обработка результатов серии измерений, полученных при помощи одного датчика или нескольких независимых детекторов позволяет уменьшить статистическую ошибку и улучшить как избирательность, так и чувствительность химических датчиков [37] или химических аналитических систем. Поскольку ошибка измерений определяется суммой систематических и случайных погрешностей, ее можно уменьшить за счет статистической обработки серии измерений, снижающей или устраняющей случайную составляющую погрешности [36]. Проведение дополнительных измерений позволяет уменьшить величину стандартного отклонения в $1/\sqrt{n}$ раз, где n – количество замеров. Дополнительные измерения могут проводиться одним и тем же датчиком или несколькими датчиками одного типа [38]. Следует отметить, что этот метод позволяет снижать только случайные погрешности, не оказывая никакого влияния на систематические.

Проведение измерений одних и тех же параметров, но при использовании разных датчиков обеспечивает расширение зоны исследований и уменьшение областей, где аналитическую идентификацию проводить либо очень сложно, либо невозможно.

Очевидно, что использование дополнительных датчиков и увеличение числа измерений приводит к усложнению обработки сигналов. Поэтому всегда приходится выбирать компромисс между количеством проводимых измерений и качеством идентификации химического состава образца, полученной на основании этих измерений. Поскольку улучшение точности не пропорционально количеству измерений, при увеличении числа измерений наступает такой момент, после которого точность меняется незначительно. Это и есть критерий выбора оптимального количества измерений.

17.6.3. Датчики обоняния

Принципы измерений и обработки данных, описанные в этом разделе, являются примером бионического подхода к построению измерительных систем. Основная идея этого подхода заключается в использовании большого количества детекторов разного типа и обработке полученных данных методами, аналогичными тем, которые применяются мозгом живых существ при идентификации тех или иных свойств объектов. Хотя и сейчас принципы работы мозга еще до конца не раскрыты, уже появились некоторые идеи, которые могут быть применены для практической реализации «интеллектуальных» измерительных систем. Процесс обработки и анализа сигналов, поступающих от разных датчиков, всегда основан на процедуре распознавания образов. Принцип работы датчиков обоняния, часто называемых *электронными носами*, состоящих из множества современных детекторов, основан на «интеллектуальных» стратегиях распознавания образов и методах хемометрии.

При построении первых датчиков обоняния разработчики старались воспроизвести органы чувств человека. Такие датчики состояли из детекторов разного типа, каждый из которых представлял клетки тканей носовых пазух. Принцип определения запаха заключался в детектировании отдельных химических соединений и идентификации запаха по полученным результатам. Датчики обоняния применяются в криминалистике, в парфюмерной и косметической промышленностях, на пищевых производствах, в системах мониторинга окружающей среды и т.д. Все детекторы обоняния можно разделить на четыре группы: инструментальные анализаторы, полупроводниковые газовые датчики, потенциальные датчики мембранного типа [39] и микровесы на основе кварцевого кристалла. Последний тип детекторов (рис. 17.18), состоящий из кварцевого кристалла, на поверхность которого нанесена чувствительная мембрана, близок к гравиметрическим датчикам, описанным ранее в этой главе. Их принцип действия заключается в измерении сдвига частоты кристалла, вызванного проникновением через мембрану молекул определенных пахучих веществ. Измерение производится при помощи соответствующих электронных схем, выходной сигнал которых пропорционален концентрации исследуемого вещества. По своим характеристикам и чувствительности такие датчики близки к человеческому носу, поскольку параметры применяемой в детекторе мембраны и чувствительных тканей носовых пазух людей мало отличаются друг от друга.

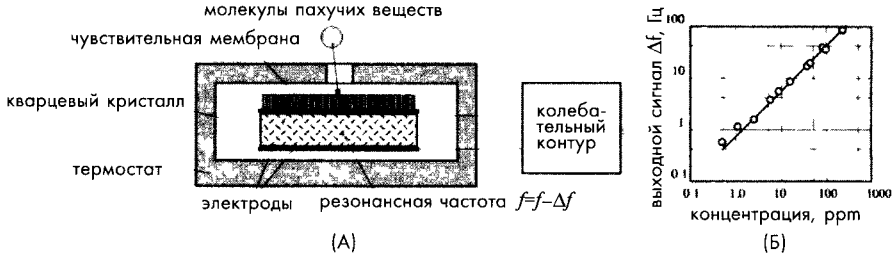


Рис. 17.18. Детектор обоняния на основе микровесов (А) и его передаточная функция (Б), полученная при детектировании амилацетата.

Обонятельные рецепторы человека покрыты фосфолипидной двухслойной мембраной. Считается, что при поглощении мембраной молекул пахучих веществ, в мозг человека через соответствующие нервные каналы поступают импульсы. Рассматриваемый детектор обоняния попытались реализовать по той же методологии. Кварцевый кристалл имеет диаметр 14 мм. Мембрана изготовлена на основе раствора органического растворителя (тетрагидрофурана), PVC, пластификатора (диоктилфенил фосфоната) и синтетических липидов (диоктил фосфата, децилового спирта и других липидов) [40], при этом молекулы синтетических липидов произвольно ориентированы внутри полимерной матрицы. Толщина мембраны составляет 200 мкм. Состав мембраны подбирается таким, чтобы добротность резонатора не опускалась ниже $5 \cdot 10^4$.

На рис. 17.18Б показана экспериментальная передаточная характеристика детектора, из которой видно, что минимальный уровень детектируемой концентрации для такого датчика составляет 1 ppm, что приблизительно равно порогу чувствительности человеческого носа, а его линейность сохраняется до 3000 ppm. Детектор обоняния на основе микровесов является довольно быстродействующим устройством, его время отклика составляет менее 1 с.

Основными характеристиками датчиков обоняния являются количество различаемых компонентов при номинальном нижнем уровне концентраций и их чувствительность к определенным веществам. Поскольку на работу большинства химических датчиков оказывает влияние влажность и температура, они часто используются не по одиночке, а в составе группы из нескольких детекторов [41]. На рис. 17.19 показано изменение проводимости датчика обоняния, состоящего из девяти серийно выпускаемых газовых детекторов на основе диоксида олова, каждый из которых легирован специальными примесями, для повышения чувствительности к определенному типу исследуемых газов.

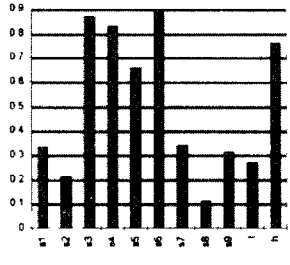


Рис. 17.19. Выходной сигнал датчика обоняния на основе 9-ти метал-оксидных детекторов

Например, разработаны датчики, состоящие из четырех отдельных детекторов, настроенных на идентификацию четырех химических соединений: клея, растворителя чернил, очистителя

стекол и спирта, для мониторинга воздуха в офисных помещениях. Было экспериментально показано, что точность идентификации этих соединений такими датчиками достигает 98%.

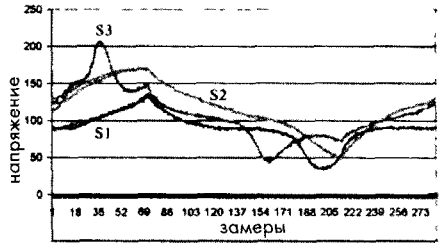


Рис. 17.20. Показания трех детекторов, входящих в состав датчика огня

Другим примером применения датчиков обоняния являются устройства для обнаружения пожаров, в которых применено меньшее количество, но более сложных электрохимических детекторов [37]. Три выходных сигнала отдельных детекторов (рис. 17.20) формируют комплексный сигнал, характеризующий состав воздуха в охраняемом помещении.

Датчики на основе электрохимических детекторов применяются для мониторинга воздуха помещений, в которых находятся легко воспламеняемые или горючие материалы, такие как дерево, картон, чистящие средства, пластмасса, продукты питания, сухая штукатурка и т.д. с целью обеспечения их пожаробезопасности или при проведении ряда работ, например, сварки и др. В этом случае проводится сравнение текущих показаний детекторов с эталонными замерами, полученными в стационарных условиях. При сильном несовпадении этих данных выдается сигнал тревоги. В настоящее время разработаны датчики огня, реализованные на этом принципе, способные идентифицировать 14 различных типов пожаров с точностью 70...100%.

Объединение химических детекторов разных типов (от двух до десяти) позволяет значительно расширить диапазон детектирования за счет перекрытия их индивидуальных диапазонов, что позволяет значительно повысить качество детектирования даже при использовании простых датчиков, обладающих не очень высокой избирательностью. На рис. 17.21 показана модель датчика обоняния, состоящего из простых и сложных химических детекторов, а также вспомогательных детекторов: температуры, влажности и атмосферного

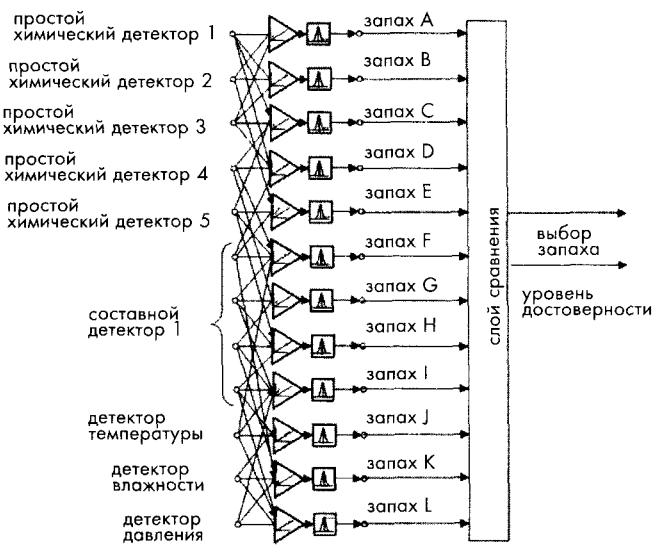


Рис. 17.21. Модель составного датчика обоняния (для упрощения на рисунке показана только часть внутренних связей; в полной модели все датчики должны быть соединены со всеми категориями)

давления, используемых для компенсации влияния этих параметров на работу химических анализаторов. Выходные сигналы всех датчиков объединены по определенным категориям, позволяющим детектировать соответствующие химические соединения. В эти категории также включена группа неопознанных веществ, которые детектируются, но не входят в существующие категории, определенные с заданным уровнем достоверности.

Такая модель детектирования позволяет идентифицировать сложные смеси и оценивать состав группы веществ, а не отдельных компонентов в виде одноэлементных газов. Благодаря такой стратегии, такие датчики применяются в пищевой промышленности и в системах управления технологическими процессами, где они используются для тестирования напитков, оценки качества продукции и даже для определения возраста и сроков использования выпускаемых продуктов. Оценка этих параметров профессиональными экспертами всегда носила субъективный характер, при использовании же датчиков обоняния этот процесс становится более достоверным и воспроизводимым.

17.6.4. Нейронные сети для обработки информации датчиков обоняния

Эффективный способ обработки сложных сигналов составных датчиков обоняния заключается в построении нейроной сети, связывающей отдельные пары детекторов, имитирующей работу биологических систем [37].

Алгоритмы построения нейронных сетей могут дублироваться хемометрическими методами распознавания образцов, такими как классификаторы Байеса, обеспечивающими статистическую достоверность получаемых результатов. Методы построения нейронных сетей основаны на параллельном выполнении простых математических операций, что позволяет применять недорогие микроконтроллеры.

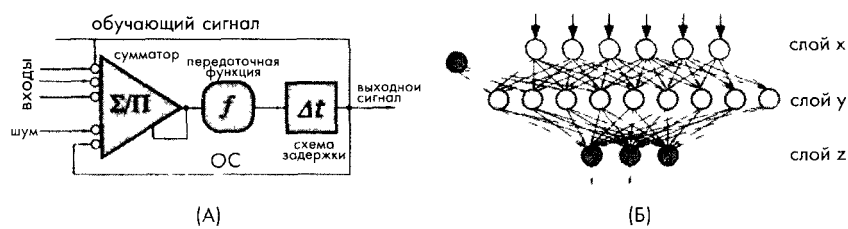


Рис. 17.22. Обобщенная модель нейрона (А) и слои, объединенные в сеть (Б)

Модель нейронных сетей основана на архитектуре человеческого мозга [42]. В искусственной нейронной сети каждый биологический нейрон заменяется на интегральную схему, состоящую из логических ключей и транзисторов, в то время как в компьютерной нейронной сети роль нейрона выполняет последовательность нескольких программных команд. Нейронные сети применяются для проведения систематизации данных [43], для получения аппроксимационных зависимостей [44] и для прогнозирования значений [45, 46]. Существует несколько вариантов нейронных моделей, каждая из которых имеет свою архитектуру. На рис. 17.22А показана обобщенная модель нейрона, состоящая из нескольких входных каскадов, куда

приходят взвешенные выходные сигналы других нейронов; блока суммирования/сравнения, объединяющего входные сигналы; блока, соответствующего передаточной функции, преобразующего информацию, проходящую через нейрон; выходного каскада, подключенного ко входам других нейронов и нескольких линий ОС, позволяющих регулировать вес входных сигналов для получения необходимой выходной реакции. В некоторых архитектурах нейронных сетей требуется подключение каскадов задержки для осуществления функций самоорганизации.

Обобщенная архитектура сети (рис. 17.22Б) состоит из входного слоя *x*, напрямую связанного с сигналами датчика; скрытого слоя *y*, в котором на основании преобразования информации делается предварительный выбор; и выходного слоя *z*, в котором на базе промежуточного выбора производится систематизация или анализ входной информации. В данной модели нейроны представлены в виде узлов, а межнейронные связи существуют только между соседними слоями.

Датчики обоняния обычно проводят только классификацию состава пахучего вещества, а анализ отдельных компонентов осуществляется при помощи нейронных сетей. Классификаторы вероятностных нейронных сетей (ВНС) являются самыми популярными компьютерными сетями, используемыми для обработки данных датчиков обоняния. Эти классификаторы функционально близки к статистическим классификаторам Байеса и методам поиска ближайшего соседа (KNN), и даже превосходят их по некоторым характеристикам [47]. ВНС используют радиальную базисную функцию и архитектуру со скрытым слоем. Для построения ВНС на основании накопленных знаний необходимо разработать обучающую модель, в которой каждому набору входных сигналов ставится в соответствие выходная категория, при этом для каждого образца строится свой собственный нейрон. Весовые соотношения между входными сигналами и нейронами сохраняются во входных сигналах. Выход каждого нейрона соединяется с соответствующей категорией выходного слоя. Повторяющиеся пары входных-выходных соотношений создают дополнительные копии нейронов, что повышает вероятность выбора именно этой категории; отсюда и появилось название вероятностной нейронной сети.

Во время работы ВНС вектор входных значений исследуемого образца сравнивается со входным набором каждого нейрона. При этом проводится вычисление декартового расстояния между этими векторами (с учетом весовых коэффициентов) (рис. 17.23А). Вычисленное значение преобразуется передаточной функцией каждого нейрона (радиальной базисной функцией Гаусса – кривой, симметричной относительно вертикальной оси, у которой выходной сигнал равен 1 при нулевом входном сигнале). В результате чего при небольшом рассогласовании входных векторов, на выходе этого блока формируется высокий выходной сигнал, а при большой разнице этих сигналов выходной сигнал будет низким (рис. 17.23Б). На основании сравнения этих сигналов выбирается тот нейрон, чьи весовые коэффициенты больше соответствуют входному вектору исследуемого образца. При этом образец причисляется к категории выбранного нейрона (рис. 17.23В). Выбор обучающей модели ВНС осуществляется на основании компромисса между универсальностью, быстродействием и требуемой памятью системы.

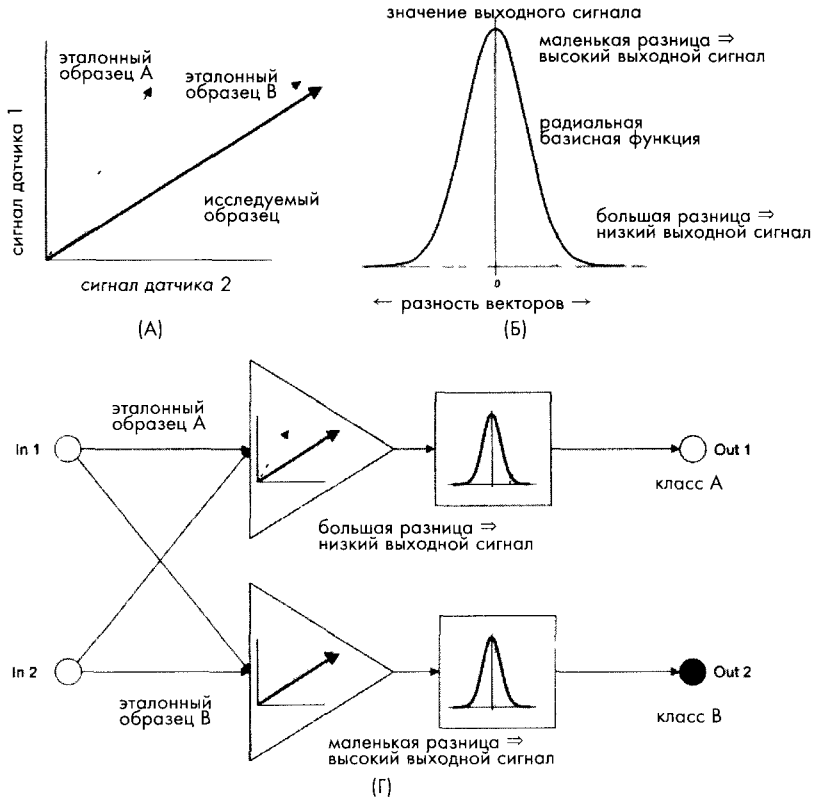


Рис.17.23. А – сравнение векторов Б – радиальная базисная функция, В – слой ВНС

17.6.5. Интеллектуальные химические датчики

Тенденция развития современных химических датчиков заключается в применении микроэлектроники и программируемых контроллеров. Все это ведет к созданию нового класса интеллектуальных химических детекторов. В состав таких датчиков, как правило, встроены схемы первичнои обработки данных, что позволяет их легко связывать, практически, с любыми системами анализа результатов измерений [48-50]. Интеллектуальные химические датчики также имеют в своем составе интерфейсные схемы для связи с другими устройствами и схемы, позволяющие проводить их калибровку и компенсацию локальных смещений; таким образом, системам сбора и обработки информации остается только принять измеренные данные. Интеллектуальные датчики часто выполняют рутинные операции преобразования единиц измерения из одной системы в другую (например, из % в ppm) и выдают выходные значения в любой системе. Поэтому такие датчики могут передавать данные в центральный процессор в тех единицах, которые он запросил, что исключает необходимость применения масштабирующих коэффициентов.

Литература

1 Edmonds, T E (ed) *Chemical Sensors* Blackie and Son, New York, 1988
2 *General Information/or TGS Sensors, Rev 6 98* Figaro USA Inc , Glenview, IL, 1998
3 Sberveglieri, G (ed) *Gas Sensors Principles, Operations, and Developments,* Kluwer Academic, Boston, MA, 1992, pp 8, 148, 282, 346-408
4 Blum, L J , *Bio- and Chemi-Lumine scent Sensors,* World Scientific, River Edge, NJ,1997,pp 6-32
5 Smith, J A, Polk B J , Kikas, T, and Levermore, D M ChemFETs Chemical sensors for the real world, www bizoki chemistry gatech edu/janata-chemical-sensors, 2000
6 Wroblewski, W, Dawgul, M , Torbicz, W, and Brzozka, Z Anion-selective CHEMFETs, Department of Analytical Chemistry, Warsaw University of Technology, Warsaw, 2000
7 Hydrogen sensor (white paper), Sandia National Laboratory, Sandia, NM, 2002, abailablefromwww sandia gov/mstc/technologies/microsensors/techinfo
8 Gentry, S J Catalytic devices In *Chemical Sensors* Edmonds, T E (ed) Chapman & Hall, New York, 1988
9 Cobbold, R S C *Transducers forBiomedical Measurements* JohnWiley & Sons, New York, 1974
10 Tan, T C and Liu, C C Principles and fabrication materials of electrochemical sensors In *Chemical Sensor Technology* Kodansha Ltd , 1991, Vol 3
11 dark, L C Monitor and control of blood and tissue oxygen tension *Trans Am Soc Artif Internal Org* 2, 41-46, 1956
12 Vogt, M C , Shoemaker, E L , MacShane, D A , and Turner, T An intelligent gas microsensor employing neural network technology */ *Appl Sensing Technol September,* 54-62, 1996
13 LaCourse, W R *Pulsed Electrochemical Detection in High-Performance Liquid Chromatography,* John Wiley & Sons, New York, 1997, pp 13-20, 49, 136,173, 258-259
14 Skubal, L R , Meshkov, N K , and Vogt, M C Detection and identification of gaseous organics using a Ti02 sensor, *J Photochem Photobiol A Chem ,* 148, 103-108, 2002
15 Severin E *Cyrano Sciences' Sensor Technology—The heart of the Cyranose 320 Electronic Nose* Cyrano Sciences Inc , 2000, www cyranosciences com/technology/sensor
16 Hydrocarbon fuel, HC1 sensor look for trouble *Sensors,* 11-12, 1991
17 Dewa, A S and Ko, W H Biosensors In *Semiconductor Sensors* Sze, S M, (ed) John Wiley & Sons, New York, 1994, pp 415-472
18 Morgan, C H and Cheung, P W An integrated optoelectronic C02 gas sensor In *Transducers' 91 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Digest of Technical Papers* IEEE, New York, 1991, pp 343-346
19 Dybko, A and Wroblewski, W Fiber optic chemical sensors, www ch pw edu pl/^dybko/csrg/fiber/ operating, 2000
20 Seiler, K and Simon, W Principles and mechanisms of ion-selective optodes *Sensors Actuators B* 6, 295-298, 1992
21 Ristic, V M , *Principles of Acoustic Devices* John Wiley & Sons, New York, 1983
22 Nieuwenhuizen, M S , et al Transduction mechanism in SAW gas sensors *Electron Lett* 22, 184-185, 1986
23 Wenzel, S W and White, R M Analytic comparison of the sensitivities of bulk-surface-, and flextural plate-mode ultrasonic gravimetric sensors *Appl Phys, Lett ,* 54, 1976-1978, 1989
24 Malmstadt, H V , Enke, C G , Crouch, S R , and Horlick, G *Electronic Measurements for Scientists* W A Benjamin, Memo Park, CA, 1974
25 Wade, L G *Organic Chemistry,* Prentice-Hall, Englewood Cliff, NJ, 1987
26 Smith, B C *Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy CRC Press, New York, 1995*
27 Smyth, M R and Vos, J G *Comprehensive Analytical Chemistry-Analytical Voltammetry* Elsevier Science, New York, 1992, Vol 27, pp 20, 34, 59
28 Bard, A J and Faulkner, L R *Electrochemical Methods,* John Wiley & Sons, New York, 1980, pp 232-236
29 Kumta, P N , Manthiram, A , Sundaram, S K and Chiang, Y M (eds) *Processing and Characterization of Electrochemical Materials and Devices* American Ceramic Society, Westerville, OH, 2000, p 379

30 Albery, W J and Haggett, B G D New electroanalytical techniques Electrochemical detectors—fundamental aspects and analytical applications Proceedings of a Symposium Sponsored by the Analytical and Faraday Division of the Royal Society of Chemistry, Ryan, T H (ed) 1984, p 15
31 Scholander, A *Introduction to Practical Polarography* Jul Gjellerups Forlag, Radiometer, Copenhagen, 1950
32 Heyrovsky, J and Zuman, P *Practical Polarography An Introduction/or Chemistry Students* Academic Press, New York, 1968
33 *Handbook of Electroanalytical Products,* Bioanalytical Systems Inc , West Lafayette, IN, 1997
34 Beebe, K R , Pell, R J and Seasholtz, M B *Chemometrics A Practical Guide* John Wiley & Sons, New York, 1998
35 Haswell, S J (ed) *Practical Guide to Chemometrics* Marcel Dekker, New York, 1992,pp 39-43,225-226, 310
36 Einax, J W , Zwanziger, H W and Geib, S *Chemometrics in Environmental Analysis* VCH, Weinheim, 1997, pp 2-75
37 Gottuk, D T , Hill, S A , Schemel, C F , Strehlen, B D , Rose-Pehrsson, S L , Shaffer, R E , Tatem, PA , and Williams, F W Identification of fire signatures for shipboard multi-criteria fire detection systems Report No NRL/MR/6180-99-8386, Naval Research Laboratory, Washington, DC, 1999, pp 48-87
38 Prasad, L , Iyengar, S S , Rao, R L , and Kashyap, R L Fault-tolerant sensor integration using multiresolution decomposition *Phys Rev E* 49(4B), 3452-3461,1994
39 Miyazaki, Y, et al Responses of monolayer membranes ofthiol-containing lipids to odor substances *Jpn J Appl Phys* 31, 1555-1560, 1992
40 Matsuno, G, et al A quartz crystal microbalance-type odor sensor using PVC-blended lipid membrane *IEEE Trans Instrum andMeas* 44(3), 739-742,1995
41 Keller, P E , Kangas, L J , Liden, L H , Hashem, S , and Kouzes, R T PNNL Document Number PNL-SA-26597, Pacific Northwest National Laboratory, Rich-land, WA, 1996
42 Masters T *Practical Neural Network Recipes in* C++ Academic Press, Boston, MA, 1993,pp 174-185
43 Rahimmdo, I M and Narayanaswamy, R Simultaneous determination of relative humidity and ammonia in air employing an optical fiber sensor and artificial neural network *Sensors Actuators B Chem* 74(1-3), 60-68, 2001
44 Joo, B S , Choi, N J , Lee, Y S , Lim, J W, Kang, B H , and Lee, D D Pattern recognition of gas sensor array using characteristics of impedance *Sensors Actuators B Chem ,* 77(1-2), 209-214, 2001
45 Freeman, J and Skapura, D *Neural Networks, Algorithms, Applications, and Programming Techniques* Addison-Wesley, Reading, MA, 1991, pp 89-111
46 Winquist, F, Homsten, E G , Sundgren, H , and Lundstrom, I Performance of an electronic nose for quality estimation of ground meat *Meas Sci Technol ,* 4(12), 1493-1500, 1993
47 Stetter, J R , Findlay, M W, Schroeder K M , Yue, C , and Penrose, W R Quality classification of grain using a sensor array and pattern-recognition *Anal Chem Act* 284(1), 1-11, 1993
48 Nwagboso, C O *(ed) Automotive Sensory Systems* Chapman & Hall, New York, 1993,pp 324-336
49 Harsanyi, G *Sensors in Biomedical Applications Fundamentals Technology and Applications* Technomic, Lancaster PA, 2000, pp 4-6, 65-67, 191, 295
50 Kavanagh, R C Probabilistic learning technique for improved accuracy of sinu-soidal encoders *IEEE Trans Ind Electron ,* 48(3), pp 673-681, 2001

ГЛАВА 18

МАТЕРИАЛЫ ДАТЧИКОВ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

В настоящее время разработано много технологических методов изготовления датчиков. Выбор тех или иных методов всегда диктуется конструкцией конкретного детектора. Для каждого типа материала: полупроводников, металлов, керамики и пластмасс разработаны свои собственные технологии обработки. В этой главе будут кратко рассмотрены характеристики некоторых материалов и описаны самые распространенные методы работы с ними.

18.1. Материалы

18.1.1. Применение кремния для изготовления датчиков

Кремний есть и на солнце, и практически на всех звездах. Он составляет основу целого класса метеоритов, называемых аэролитами. Кремний является вторым в количественном отношении материалом на Земле, уступая только кислороду; его весовая концентрация в составе земной коры оценивается равной 25,7%. В природе кремния в чистом виде не существует, он встречается в виде оксидов и силикатов. Наиболее известными кремниевыми оксидами являются песок, кварц, аметист, глина, слюда и т.д. Кремний получается при нагреве двуокиси кремния и углеродосодержащих материалов в печи при использовании угольных электродов. Кристаллический кремний имеет металлический блеск и сероватый оттенок (Кремний не следует путать с силиконами, получаемыми при гидролизе органических хлоридов кремния, таких как диметил хлорид кремния. Силиконы используются как диэлектрики, смазочные вещества и для производства силиконовой резины). Существуют и другие методы получения кремния. Монокристаллы кремния, применяемые для изготовления твердотельных полупроводниковых детекторов и микродатчиков, чаще всего выращиваются по методу Чохральского. Кремний является относительно инертным материалом, он вступает в реакцию только с галогенами и растворами щелочей. Большинство кислот, кроме фтористоводородной, не оказывают никакого влияния на кремний. Кремний пропускает ИК

излучение и поэтому используется для изготовления окошек в ИК датчиках.

Атомный вес кремния составляет 28.0855, а его атомный номер равен 14. Его температура плавления равна 1410°С. Удельный вес кремния при температуре 25°С составляет 2.33, а его валентность равна 4.

Свойства кремния хорошо изучены, поэтому он широко используется во всем мире при изготовлении датчиков. Кремний является недорогим материалом, и технология его производства позволяет контролировать как его чистоту, так и качество. В таблице 18.1 приведены физические эффекты, характерные для кремния, которые могут быть использованы для построения датчиков.

Таблица 18.1. Внешние воздействия для кремниевых датчиков

Внешние воздействия	Физические эффекты
Излучательные	Фотовольтаический и фотоэлектрические эффекты, фотопроводимость, фото-магнито-электрический эффект
Механические	Пьезорезистивность, продольный фотоэлектрический эффект, продольный фотовольтаический эффект
Тепловые	Эффекты Зеебека и Нернста, температурная зависимость проводимости и переходов
Магнитные	Эффект Холла, магниторезистивность
Химические	Ионная чувствительность

Источник [1]

К сожалению, кремний не обладает пьезоэлектрическим эффектом. Большинство физических эффектов, свойственных кремнию, таких как эффекты Холла и Зеебека, а также пьезорезистивность, носят ярко выраженный характер; однако, при этом практически всегда наблюдается существенная температурная зависимость параметров датчиков, реализованных на их основе. Если кремний не обладает соответствующими характеристиками, всегда можно нанести на его поверхность слой материала, который придаст кремниевой подложке необходимые свойства. Например, при изготовлении пьезоэлектрических преобразователей, используемых в датчиках на ПАВ и акселерометрах, на кремниевую подложку напыляются тонкие пленки из ZnO.

Кремнии обладает уникальными механическими свойствами, которые в настоящее время используются для изготовления таких устройств, как датчики давления, силы и температуры, а также детекторы прикосновений, требующих применения методов микротехнологий. Тонкопленочная и фотолитографическая технологии, традиционно используемые для производства интегральных электронных схем, позволяют формировать миниатюрные прецизионные механические структуры, что дает возможность налаживать серийный выпуск датчиков на их основе. В Приложении приведены механические характеристики кремния и других популярных кристаллических материалов.

Хотя монокристаллический кремний является довольно ломким материалом, не поддающимся пластической деформации как большинство металлов, он не такой хрупкий, как это может показаться. Модуль Юнга кремния ($1.9 \cdot 10^{12}$ дин/см)

сравним с модулем Юнга нержавеющей стали и выше чем коэффициент упругости кварца и большинства стекол. Ошибочное представление о хрупкости кремния появилось из-за того, что он часто формируется в виде пластин диаметром 5...13 см, толщина которых составляет 250...500 мкм. Даже листы из нержавеющей стали таких габаритов легко поддаются неупругой деформации.

Как упоминалось ранее, многие структурные и механические недостатки монокристаллического кремния смягчаются при нанесении на него специальных тонкопленочных покрытий. Например, тонкие пассивирующие пленки из кварца, осажденные на кристаллы ИС, защищают их от воздействия коррозионных и загрязняющих веществ, содержащихся в воздухе окружающей среды. Другим примером является нанесение слоев из нитрида кремния (см. соответствующую таблицу Приложения), прочность которого уступает только алмазу. Анизотропное травление является ключевой технологией, применяемой для формирования в кремнии миниатюрных трехмерных структур. Для травления чаще других используются следующие две композиции: Одна основана на этилендиамине и воде с некоторыми добавками, а другая состоит из чисто неорганических щелочных растворов, таких как KOH, NaOH или LiOH.

Поликремниевые материалы позволяют изготавливать датчики, обладающие уникальными характеристиками. Слои из поликремния толщиной порядка 0.5 мкм, как правило, формируются методом термовакуумного напыления на кремниевой подложке со слоем диоксида кремния на поверхности толщиной 0.1 мкм [2]. Поликремниевые структуры часто легируются бором. Для этого применяется метод химического осаждения из газовой фазы при низком давлении.

На рис. 18.1А показано, как меняется удельное сопротивление поликремния в зависимости от концентрации бора. Здесь же для сравнения приведена аналогичная кривая для монокремния. Из рисунка видно, что удельное сопротивление поликремния всегда намного выше, чем у монокристаллического материала, даже при высоких концентрациях бора. В диапазоне низких концентраций бора наблюдается значительное изменение удельного сопротивления поликремния, поэтому именно этот диапазон и используется для изготовления датчиков. Зависимость сопротивления поликремния от температуры не является линейной. В зависимости от степени легирования температурный коэффициент сопротивления поликремния в широком диапазоне значений может быть выбран либо положительным, либо отрицательным (рис.18.1Б). Обычно температурный коэффициент сопротивления уменьшается при снижении концентрации легирующих примесей. Сопротивление слоя поликремния при любой температуре может быть определено из выражения:

$$R(T) = R_{20} e^{\alpha_R (T - T_0)} \quad , \tag{18.1}$$

где $\alpha_R = \frac{1}{R_{20}} \frac{dR(T_0)}{dT}$ является температурным коэффициентом, а R_{20} – сопротивлением при калибровке при температуре 20°С. На рис. 18.2А показана температурная чувствительность поликремния и монокристаллического кремния при разных уровнях легирования. Видно, что температурная чувствительность поли-

кремния выше, чем у монокремния, и поддается управлению за счет изменения концентрации легирующих примесей. Интересно отметить, что при определенной концентрации бора (точка Z) сопротивление перестает зависеть от температуры.

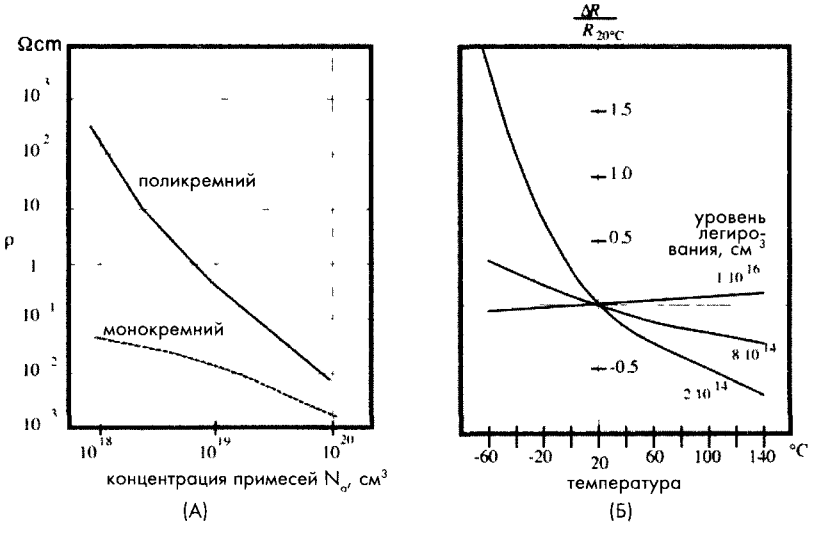
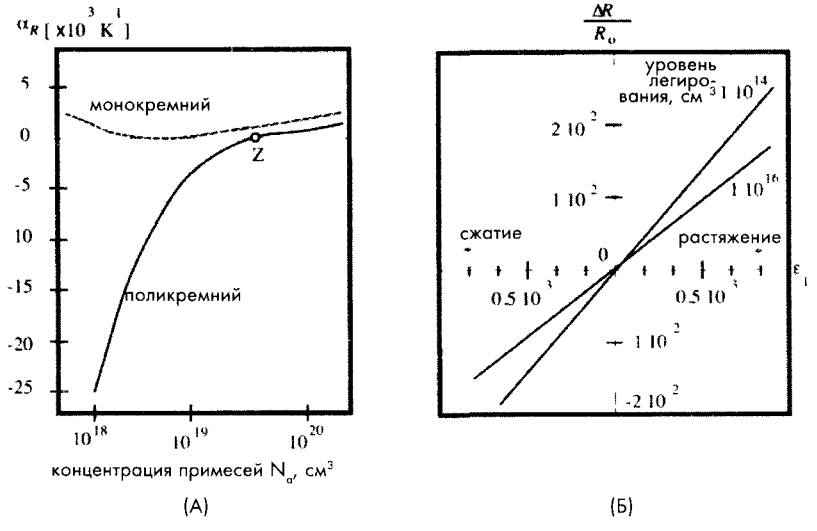


Рис. 18.1. Удельное сопротивление кремния, легированного бором (А), температурный коэффициент сопротивления кремния для разных концентраций легирующих примесей (Б).



Ртс.18.2. Зависимость температурного коэффициента от концентрации легирующих примесей (А) и пьезорезистивная чувствительность кремния (Б)

При разработке датчиков давления, силы или ускорения важно знать коэффициент тензочувствительности резисторов из поликремния. На рис. 18.2Б показаны зависимости относительного изменения сопротивления поликремниевых резисторов, легированных бором, от величины продольной деформации ε_l. Все значения ΔR приведены относительно величины сопротивления R_0, измеренного в ненагруженном состоянии. Из рисунка видно, что значения ΔR зависят от уровня легирования, а величина сопротивления уменьшается при сжатии и увеличивается при растяжении. Следует также отметить, что коэффициент тензочувствительности (наклон линии на рис. 18.2Б) зависит от температуры. Резисторы из поликремния обладают такой же высокой долговременной стабильностью, что и резисторы из монокристаллического кремния, поскольку поверхностные эффекты не оказывают серьезного влияния на характеристики устройства.

18.1.2. Пластмассы

Пластмассы – это синтетические материалы, сформированные из мономеров. Мономеры (например, этиленовые), вступая в реакции с другими мономерами, образуют длинные цепочки из повторяющихся этиленовых звеньев, являющиеся полимером полиэтиленом. Аналогичным способом из мономеров стирола формируется полимер полистирол. Полимеры состоят из атомов углерода, связанных с другими элементами. В составе полимеров, в основном, используются только восемь элементов: углерод, водород, кислород, азот, кремний, сера, хлор и фтор, но это позволяет создать тысячи вариантов различных пластмасс.

Рис. 18.3. Атомы, используемые для построения полимеров

Элемент	Атомный вес	Валентные связи	
Водород	1	–H	1
Углерод	12		4
Азот	14		3
Кислород	16	–O–	2
Фтор	19	–F	1
Кремний	28		4
Сера	32	–S–	2
Хлор	35	–Cl	1

Каждый атом обладает ограниченным числом энергетических (валентных) связей для объединения с другими атомами, а для того чтобы вещество было стабильным, каждый атом внутри молекулы должен использовать все свои связи. Например, водород может быть связан только с одним другим атомом, в то время как углерод и кремний могут присоединить к себе четыре других атома. Таким образом, молекулы H-H и H-F являются стабильными молекулами, а C-H и Si-Cl – нет. На рис. 18.3 показаны все восемь атомов со своими валентными связями.

Добавление большего количества атомов углерода в цепь полимера ведет к увеличению числа присоединенных атомов водорода, что делает молекулы более тяжелыми. Например, этан (C_2H_6) является тяжелее метана, поскольку содержит дополнительные атом углерода и два атома водорода. Его молекулярный вес равен 30. Очевидно, что молекулярный вес полимера будет каждый раз увеличиваться на 14 единиц (вес одного атома углерода и двух атомов водорода) до тех пор, пока он не превратится в пентан (C_5H_{12}). Поскольку пентан очень тяжелый, при комнатной температуре он уже является не газом, а жидкостью. Дальнейшее присоединение групп CH_2 ведет к формированию все более тяжелых полимерных жидкостей. По достижении состава $C_{18}H_{38}$ полимер превращается в твердое вещество ($C_{18}H_{38}$ – это парафиновый воск). По мере роста молекул полимера воск становится все более тяжелым. Полимер с формулой $C_{100}H_{202}$ с молекулярным весом 1402 называется *полиэтиленом*, который является самым простым термопластиком. При дальнейшем увеличении числа групп CH_2 происходит повышение жесткости полимерного материала. Полимеры с молекулярным весом в диапазоне 1000...5000 называются полиэтиленами со средним молекулярным весом, а выше – с высоким молекулярным весом. Полиэтилен, являющийся самым простым полимером (рис. 18.4), обладает рядом очень полезных свойств, используемых при построении датчиков. Например, полиэтилен прозрачен для излучений среднего и дальнего ИК спектрального диапазона, поэтому может использоваться для изготовления окон и линз.

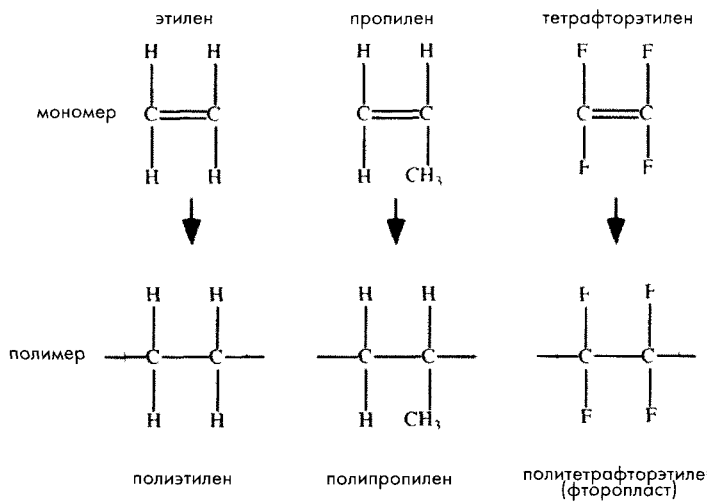


Рис. 18.4. Мономеры и полимеры, построенные на их основе

При нагреве, под давлением и при введении катализаторов мономеры могут образовывать очень длинные цепи. Этот процесс называется полимеризацией. Длина цепи (молекулярный вес) является очень важной характеристикой, поскольку от нее зависят многие свойства пластмасс. Увеличение веса ведет к повышению жесткости и прочности, уменьшению ползучести, росту температуры плавления и вязкости в расплавленном состоянии, а также усложнению процесса обработки. По окончании процесса полимеризации получившиеся полимерные цепи не связаны друг с другом и имеют сходство с длинным переплетающимся пучком спагетти. Такие полимеры называются термопластмассами; это означает, что они поддаются формованию при нагреве.

Чем ближе цепи расположены друг к другу, тем выше плотность полимера. При определенной плотности может начаться процесс формирования кристаллов. Кристаллизованные области обладают большей жесткостью и прочностью. Такие полимеры трудно поддаются обработке, поскольку обладают более высокой температурой плавления. При этом вместо того чтобы постепенно размягчаться, они резко переходят в жидкости с низкой вязкостью. С другой стороны, аморфные термопластмассы расплавляются медленно, но они не текут так хорошо, как кристаллизованные пластики. Примерами аморфных полимеров являются акрилонитрил-бутадиен-стирол (АБС), полистирол, поликарбонат, полисульфон и т.д. Кристаллические пластмассы – это полиэтилен, полипропилен, нейлон, поливинилиден фторид и т.д.

АБС – очень жесткий и прочный материал. Он обладает высокой химической устойчивостью, низким влагопоглощением и хорошей формоустойчивостью. На некоторые виды может быть нанесено гальваническое покрытие.

Акрил обладает высокой оптической прозрачностью и устойчивостью к воздействиям окружающей среды. Он является прочным и блестящим материалом с хорошими электрическими свойствами. Бывает разных цветов.

Фторопласты включают в себя целое семейство материалов (PTFE, FEP, PFA, CTFE, ECTFE, ETFE, PFDF), обладающих очень хорошими электрическими свойствами и химической устойчивостью, низким трением и высокой термоустойчивостью. Однако они имеют среднюю прочность и высокую стоимость.

Нейлон (полиимид) обладает высокой прочностью и износоустойчивостью, а также низким коэффициентом трения. Он имеет хорошие электрические и химические свойства, но его гигроскопичность и формоустойчивость ниже, чем у других пластмасс

Поликарбонат имеет очень высокую ударопрочность. Он является прозрачным и устойчивым к воздействиям окружающей среды, а также обладает низкой ползучестью под нагрузкой. Однако на него могут оказывать влияние некоторые химические реагенты.

Полиэстер обладает высокой формоустойчивостью, однако его нельзя использовать вне помещений или в горячей воде.

Полиэтилен – легкий и недорогой материал с отличной химической стабильностью и хорошими электрическими свойствами. Он имеет среднюю прозрачность в широком спектральном диапазоне: от видимого света до дальнего ИК излучения, но обладает плохой формоустойчивостью и термостабильностью.

Полипропилен устойчив к изгибам и разрывным нагрузкам, обладает отличными химическими и электрическими свойствами, а также высокой термостабильностью. Он легкий, недорогой и прозрачный для излучений дальнего ИК диапазона. Однако, его коэффициент поглощения и рассеяния фотонов в среднем ИК диапазоне выше, чем у полиэтилена.

Полиуретан – прочный, износоустойчивый и ударопрочный материал. Он может быть изготовлен в виде пленок и пенопластов. Он обладает хорошими электрическими и химическими свойствами. Однако, УФ облучение ухудшает его качества.

Другой тип пластиковых материалов называется *термореактивными пластмассами*. В этих материалах полимеризация идет в два этапа: при производстве материала и при формировании из них конечных изделий. Примерами таких пластмасс являются фенольные смолы, которые при формовании из них требуемых структур расплавляются под действием давления. При этом образуются прочные поперечные межмолекулярные связи, неразрушаемые при последующем нагреве. Процесс формования изделий из термореактивных пластмасс напоминает варку яиц: после того, как сварены, они остаются твердыми. Как правило, этот тип пластмасс обладает большей температурной и формоустойчивостью по сравнению с термопластиками. По этой причине термореактивные пластмассы используются для изготовления: корпусов судов и электрических выключателей (армированный полиэстер); печатных плат (эпоксидная смола) и посуды (меламин). С другой стороны, термопластики по сравнению с термореактивными пластмассами обладают более высокой ударопрочностью, простотой обработки и лучшей адаптируемостью при разработке сложных изделий.

При изготовлении датчиков наиболее часто используются следующие термопластмассы:

Алкидная смола обладает отличными электрическими свойствами и низкой влагопроницаемостью.

Аллил (диаллил фталат) обладает высокими: формоустойчивостью, термостабильностью и химической устойчивостью.

Эпоксидная смола имеет высокую термическую и электрическую прочность, а также адгезию к большинству материалов

Фенольная смола является недорогим материалом черного или коричневого цвета.

Полиэстер (термопластичная форма) может быть разных цветов и разной прозрачности. Обладает сильной усадкой.

Если в реакции полимеризации участвуют два мономера разных типов (А и В), получившийся полимер называется *сополимером*, свойства которого определяются соотношением компонентов А и В. Для изменения механических свойств полимера в него вводят дополнительные компоненты, например, волокна позволяют повысить прочность, пластификаторы – гибкость, смазочные вещества облегчают обработку, а УФ стабилизаторы улучшают характеристики датчиков, работающих в условиях солнечного света.

Другим хорошим способом управления свойствами пластмасс является изготовление полимерных сплавов или композиций, при этом сохраняются свойства каждого компонента.

Электропроводящие пластмассы. Сами по себе пластмассы являются прекрасными изоляторами. Для придания им электрических свойств их либо покрывают слоем металлической фольги или проводящего красителя, либо на них напыляют слой металла. Другим способом изготовления электропроводящих пластмасс является добавление проводящих примесей (например, графита или металлических нитей) или встраивание в пластмассу металлической сетки.

Пьезоэлектрические пластмассы. Они изготавливаются из поливинил фторидов и поливенилиден фторидов, а также сополимеров, которые являются кристаллическими материалами. Первоначально они не обладают пьезоэлектрическими свойствами. Для придания им этих свойств их поляризуют либо при помощи высокого напряжения, либо коронного разряда (см. раздел 3.6 главы 3). С двух сторон пленки наносятся металлические электроды: либо методом трафаретной печати, либо по технологии вакуумной металлизации. Такие пленки применяются в некоторых датчиках вместо керамических материалов. Их преимуществами являются гибкость и устойчивость к механическим нагрузкам. Другим достоинством пьезоэлектрических пластмасс является возможность изготовления из них изделий практически любой формы.

18.1.3. Металлы и сплавы

С точки зрения разработчика датчиков все металлы можно разделить на два класса: с содержанием железа или без него. Металлы с содержанием железа, например, сталь, часто используются для изготовления магнитных датчиков движения, расстояния, магнитного поля и т.д. Также они применяются для формирования магнитных экранов. Другие типы металлов проницаемы для магнитных полей, поэтому используются там, где эти поля не имеют никакого значения.

Металлы и сплавы без содержания железа обладают рядом замечательных механических и физических свойств. При выборе металла необходимо не только учитывать его свойства, но и рассматривать способы его обработки. Например, несмотря на то, что медь обладает отличными тепловыми и электрическими свойствами, из-за сложности работы с ней вместо нее часто используют алюминий.

Алюминий имеет высокую величину отношения прочность/вес и обладает антикоррозионными свойствами: при воздействии воздуха он не окисляется так быстро, как железо. Это объясняется тем, что на поверхности алюминия формируется микроскопический оксидный слой, защищающий его от воздействия окружающей среды.

Существует сотни алюминиевых сплавов. Для их обработки разработаны специальные методы, такие как раскатка, отливка и штамповка. Некоторые сплавы можно скреплять методом пайки и сварки. В дополнение к замечательным электрическим свойствам алюминий обладает вторичными отражающими свойствами для излучений практически всего спектра: от УФ до радиоволн. Покрытия из алюминия часто наносятся на зеркала и волноводы. В среднем и дальнем ИК диапазонах только золото обладает лучшей отражающей способностью.

Бериллий обладает несколькими замечательными свойствами. Он обладает низкой плотностью (две трети от плотности алюминия), большим коэффициентом жесткости (в пять раз больше, чем у стали), высокой удельной теплоемкостью,

отличной формоустойчивостью и прозрачностью для рентгеновских лучей. Основным его недостатком является высокая стоимость. Также как и у алюминия, на поверхности бериллия формируется микроскопический слой, защищающий поверхность от коррозии. Обрабатывать бериллий можно многими традиционными способами, включая холодное прессование из порошка. Из него изготавливаются окна для рентгеновских датчиков, оптические платформы, зеркальные подложки и структуры спутников.

Магний является очень легким материалом с высоким отношением жесткости к весу. Благодаря низкому коэффициенту упругости он может он обладает хорошими демпфирующими свойствами. Для его обработки подходят практически все методы обработки металлов.

Никель подходит для изготовления очень прочных структур, устойчивых к коррозии. По сравнению со сталью сплавы никеля обладают очень высокой прочностью и высоким коэффициентом упругости. Сплавы никеля – это двухкомпонентные системы с медью, кремнием и молибденом. Никель и его сплавы сохраняют свои свойства в температурном диапазоне от криогенных температур до 1200°C. Никель входит в состав сверхпрочных сплавов, таких как Inconell, Monel (Ni-Cu), Ni-Cr, Ni-Cr-Fe.

Медь соединяет в себе хорошие тепловые и электропроводные свойства (вторые после чистого серебра) с коррозионной устойчивостью и относительной простотой обработки. Однако она обладает сравнительно низким отношением прочности к весу. Медь трудно поддается обработке методами микротехнологий. Медь и ее сплавы – латунь и бронза – могут быть изготовлены в различном виде, в том числе и в виде пленок. Латунь – это сплав меди и цинка с некоторыми добавками. Бронзу можно разделить на несколько групп: фосфорная бронза (медь-олово-фосфор), свинцово-фосфорная бронза (медь-олово-свинец-фосфор) и кремниевая бронза (медь-кремний). При использовании вне помещений медь покрывается сине-зеленым налетом (патиной). Этого можно избежать, используя акриловое покрытие. Сплав меди с бериллием обладает замечательными механическими свойствами и используется для изготовления пружин.

Свинец является самым непроницаемым металлом для рентгеновских лучей и γ-радиации. Он обладает высокой коррозионной устойчивостью ко многим химическим реагентам. Изделия из него могут работать и в любой почве, и в морской воде, и в промышленных условиях. У свинца низкая температура плавления, поэтому его легко отливать и штамповать. Он хорошо поглощает звук и вибрации. Он обладает естественной смазочной способностью и износостойкостью. Свинец редко используется в чистом виде. Самыми известными сплавами являются «тяжелый свинец», содержащий 1...13% сурьмы; сплавы с кальцием и оловом, обладающие лучшей прочностью и жесткостью.

Платина – это серебристо-белый драгоценный металл, являющийся ковким, пластичным и коррозионно-устойчивым материалом. Она обладает очень стабильным и воспроизводимым положительным температурным коэффициентом сопротивления, поэтому ее часто используют в датчиках температуры.

Золото является очень мягким и химически инертным материалом. Оно вступает в реакцию только с царской водкой, а также натрием и калием в присутствии

кислорода. Одним граммом чистого золота можно покрыть поверхность 5000 см^2 толщиной менее 0.1 мкм. В основном золото используется в гальванических покрытиях и в составе сплавов с другими металлами: медью, никелем и серебром. В датчиках золото применяется в электрических контактах, в гальванически покрытых зеркалах и волноводах, работающих в среднем и дальнем ИК диапазонах.

Серебро является самым дешевым из драгоценных материалов. Оно является ковким и коррозионно-устойчивым. Серебро обладает наибольшей тепло и электропроводностью среди всех металлов.

Палладий, *иридий* и *родий* похожи друг на друга и ведут себя как платина. Они применяются в качестве электрических покрытий при изготовлении гибридных и печатных плат, а также разнообразных керамических подложек с электрическими проводниками. Эти металлы также используются для изготовления высококачественных отражателей, способных работать в широком спектральном диапазоне при высоких температурах и в агрессивной окружающей среде. Самой высокой коррозионной устойчивостью среди всех металлов обладает иридий, поэтому именно он применяется в системах, работающих в критических условиях.

Молибден сохраняет прочность и жесткость до 1600°С. Этот металл и его сплавы поддаются машинной обработке при помощи традиционных инструментов. Он подвержен воздействию большинства кислот. Молибден, в основном, применяется в устройствах, работающих при высоких температурах, таких как нагревательные элементы и отражатели в ИК печах. Молибден обладает низким коэффициентом теплового расширения и не поддается эрозии под действием расплавленных металлов.

Вольфрам во многих отношениях похож на молибден, но может работать даже при более высоких температурах. Он часто используется для изготовления термопар (вольфрам-рениевые термопары)

Цинк редко применяется в чистом виде (за исключением в качестве покрытий). Его используют в виде сплавов.

18.1.4. Керамические материалы

Керамические материалы, как правило, имеют кристаллическую структуру. Их основными свойствами являются прочность, температуроустойчивость, низкий вес, устойчивость ко многим химическим реагентам, способность соединяться с другими материалами и отличные электрические характеристики, благодаря которым они широко используются при изготовлении датчиков. Хотя большинство металлов образуют с кислородом хотя бы одно химическое соединение, только малая часть из них годится для изготовления керамики. Примерами являются оксиды алюминия и бериллия. Чаще всего оксид алюминия сплавляется с оксидом кремния, однако, вместо него могут использоваться и другие элементы, такие как хром, магний, кальций и т.д.

Некоторые карбиды металлов относят к группе керамических материалов. Самыми распространенными из них являются карбид бора, а также нитрат и нитрид алюминия (см. Приложение). В случаях где требуется осуществить быструю теплопередачу, следует применять нитрид алюминия; в то время как при изготовлении емкостных датчиков предпочтительнее использовать карбид кремния, поскольку

он обладает высокой диэлектрической константой. Благодаря своей жесткости, большинство керамических материалов для своей обработки требуют применения специальных методов, таких как скрайбирование, микрообработка и высверливание при помощи CO_2 лазера, управляемого микропроцессором. Эти методы позволяют вырезать керамические подложки разной формы толщиной 0.1...10 мм.

18.1.5. Стекла

Стекло – это аморфный твердый материал, изготовленный методом сплавления двуокиси кремния и основного оксида. Хотя его атомы никогда не организованы в кристаллическую структуру, межатомные расстояния в стекле довольно малы. Основными свойствами стекла являются прозрачность, способность окрашиваться в разные цвета, прочность и устойчивость к большинству химических реагентов, кроме фтористоводородной (плавиковой) кислоты (см. Приложение). Большинство стекол реализованы на силикатной системе и выполняются из трех основных компонентов: оксида кремния (SiO_2), извести ($CaCO_3$) и карбоната натрия ($NaCO_3$). Несиликатные стекла – это фосфатные стекла (устойчивые к плавиковой кислоте), теплопоглощающие стекла (сделанные из FeO) и системы, основанные на оксидах алюминия, ванадия, германия и других металлов. Примером таких специальных стекол является трисульфат мышьяка (As_2S_3), известный как AMTIR, прозрачный в среднем и дальнем ИК спектральном диапазоне и используемый в составе ИК оптических устройствах (AMTIR – это ИК стекла, выпускаемые Amorphous Materials, Inc. Garland, TX).

Боросиликатные стекла являются самым старым типом стекол, очень устойчивых к перепадам температур. Они выпускаются под маркой Pyrex®. В таких стеклах часть молекул SiO_2 замещается на оксид бора. Боросиликатные стекла обладают низким коэффициентом теплового расширения, что позволяет их использовать для изготовления оптических зеркал (например, для телескопов).

Свинцово-щелочные стекла (или просто свинцовые) состоят из моноксида свинца (PbO), который повышает их коэффициент преломления. Такие стекла являются хорошими электрическими изоляторами. При изготовлении датчиков из них делаются оптические окна и призмы, а также экраны для защиты от ядерных излучений. Другие стекла реализуются на основе алюмосиликатного стекла, в котором Al_2O_3 вытесняет некоторые молекулы оксида кремния, 96% оксида кремния и расплавленного оксида кремния.

Другой класс – это *светочувствительные стекла*, которые выпускаются трех видов. Фотохроматические стекла затемняются, когда подвергаются воздействию УФ излучения, и осветляются, когда облучение прекращается или стекло нагревается. Некоторые фотохроматические композиции остаются затемненными в течение недель и даже месяцев. Остальные просветляются через несколько минут после удаления источника облучения. Фоточувствительные стекла реагируют на УФ излучение по-разному. Если они подвергаются нагреванию после облучения, их цвет становится опаловым. Это позволяет создавать некоторые узоры внутри стеклянной структуры. Более того, облученные опаловые стекла лучше растворимы в плавиковой кислоте, что позволяет их обрабатывать по технологии травления.

18.2. Поверхностные технологии

18.2.1. Нанесение тонких и толстых пленок

Тонкие пленки часто используются для придания чувствительной поверхности некоторых дополнительных свойств. Например, для улучшения поглощающей способности тепловых излучений датчика, работающего в дальнем ИК спектральном диапазоне, его поверхность иногда покрывается материалом, обладающим высоким коэффициентом поглощения, например, нихромом. На кремниевую подложку может быть нанесен слой из пьезоэлектрика для придания ей пьезоэлектрических свойств. Толстые пленки часто используются в качестве мембран в составе датчиков давления или микрофонов. Разработано несколько методов нанесения пленок разной толщины на подложки из разных материалов. Среди них самыми популярными являются литье при вращении, термовакуумное напыление, ионное распыление, гальванический метод и трафаретная печать.

18.2.2. Литье при вращении

По этой технологии материал для создания пленок растворяется в летучем жидком растворителе. Получившимся раствором поливают быстро вращающийся образец. Центробежные силы разносят материал, и после испарения растворителя на поверхности образца остается тонкая пленка. Этот метод часто используется для нанесения тонких пленок из органических материалов, особенно при изготовлении датчиков влажности и химических детекторов. Толщина готовых пленок определяется растворимостью наносимого материала и скоростью вращения, и обычно она находится в диапазоне 0.1...50 мкм. Недостатком этого метода является неравномерность нанесения пленки, особенно если образец имеет явно выраженные неровности. В дополнение к этому нанесенный материал имеет тенденцию сжиматься при высыхании. Тем не менее, для многих практических применений этот метод вполне годится.

18.2.3. Термовакуумное напыление

В этом методе металл предварительно превращается в газ, который осаждается на поверхность образца, формируя на его поверхности тонкую пленку. Система напыления состоит из вакуумной камеры (рис. 18.5); диффузионного насоса, обеспечивающего давление в камере порядка $10^{-6}...10^{-7}$ торр; держателя образца, тигля и заслонки. Наносимый материал помещается в керамический тигель, нагреваемый вольфрамовой нитью накаливания до температуры плавления металла. Альтернативным методом нагревания является использование электронного луча.

По команде от блока управления заслонка открывается, позволяя оторвавшимся атомам металла осаждаться на образце. Части образца, защищаемые маской, остаются непокрытыми. Толщина пленки определяется временем напыления и давлением паров металла. Чем ниже температура плавления материала, тем легче его напылять (например, алюминий). Как правило, пленки, нанесенные методом вакуумного напыления, обладают большим остаточным напряжением, поэтому этот метод применяется только для нанесения тонких пленок.

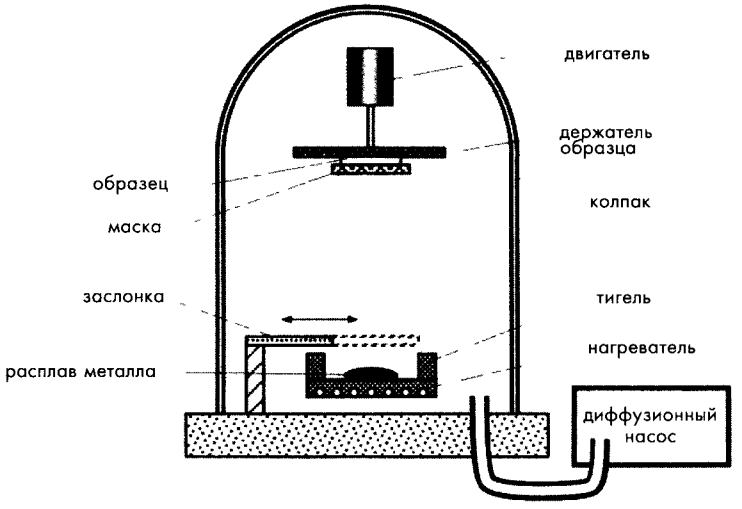


Рис. 18.5. Напыление тонкой металлической пленки в вакуумной камере

Поскольку расплавленный материал является практически точечным источником атомов, возникают две проблемы: неравномерность нанесения пленок и эффект затенения - нечеткость краев пленки по границе маски. Для снижения этих явлений применяются следующие методы: используются либо несколько тиглей (3 или 4), либо вращение образца.

При использовании метода вакуумного напыления необходимо следить за тем, чтобы в камеру не попадали посторонние вещества. Поскольку даже небольшое количество масла (например, от насоса) может привести к возгоранию органических материалов или к осаждению на образце таких нежелательных компонентов, как углеводы.

18.2.4. Ионное распыление

Также как и вакуумное напыление, ионное распыление проводится в вакуумной камере (рис. 18.6). Однако здесь после откачивания воздуха в камеру вводится инертный газ (аргон или гелий) под давлением $2 \cdot 10^{-6}...5 \cdot 10^{-6}$ торр. На катод (мишень), изготовленный из распыляемого материала, подается высокое постоянное или переменное напряжение. Образец крепится на анод, расположенный на некотором расстоянии от

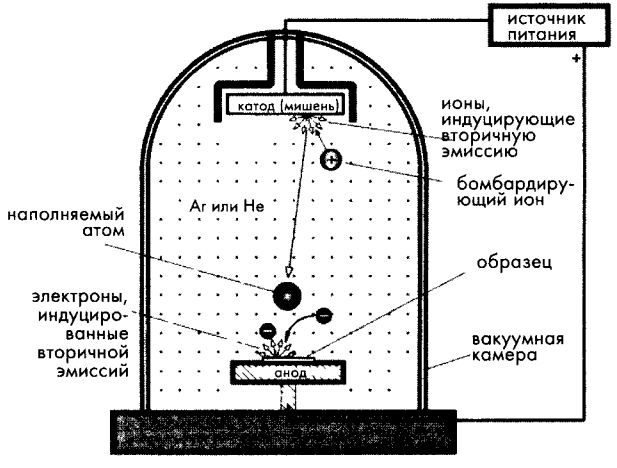


Рис. 18.6. Ионное распыление в вакуумной камере

катода. Высокое напряжение раскаляет плазму инертного газа, и быстрые газовые ионы начинают бомбардировать мишень. Кинетическая энергия бомбардирующих ионов достаточно высока, чтобы заставить отдельные атомы оторваться от поверхности катода. Некоторые из этих атомов, долетая до образца, формируют на его поверхности тонкую пленку.

Пленки, наносимые методом ионного распыления, обладают большей равномерностью, особенно при введении в камеру магнитного поля, направляющего ионы прямо на поверхность образца. Поскольку в этом методе нет необходимости в сильном нагреве мишени, распыляться могут практически любые материалы, включая органические. Более того, распыляться могут материалы одновременно с нескольких мишеней. Например, при формировании нихромовых электродов на поверхности пироэлектричесих датчиков распыляются ионы Ni и Cr от двух разных мишеней.

18.2.5. Химическое осаждение из газовой фазы

Эта технология используется при изготовлении оптических, оптоэлектронных и электронных устройств. При производстве датчиков часто бывает необходимо формировать оптические окна или наносить на поверхность полупроводниковых подложек тонкие или толстые кристаллические пленки.

Процесс химического осаждения проводится в реакторе, упрощенная схема которого показана на рис. 18.7. Подложки располагаются на стационарном или вращающемся столе (держателе пластин), температура которого повышается до требуемого уровня при помощи специального нагревателя. В верхней крышке реактора есть отверстие для ввода водорода со специальными примесями, которые перемещаясь над нагретыми поверхностями подложек, осаждаются на них, формируя тонкие пленки. Обычно газ вводится через центральную часть реактора, а выводят через боковые отверстия. Среднее давление газа в реакторе составляет порядка 1 атм, а иногда и ниже. Например, для выращивания пленки из $Ga_{0.47}In_{0.53}As$ толщиной 6000 Å на InP подложке со скоростью 1.4 Å/с необходимо обеспечить следующие условия: температуру 630°C и давление 1 атм [3].

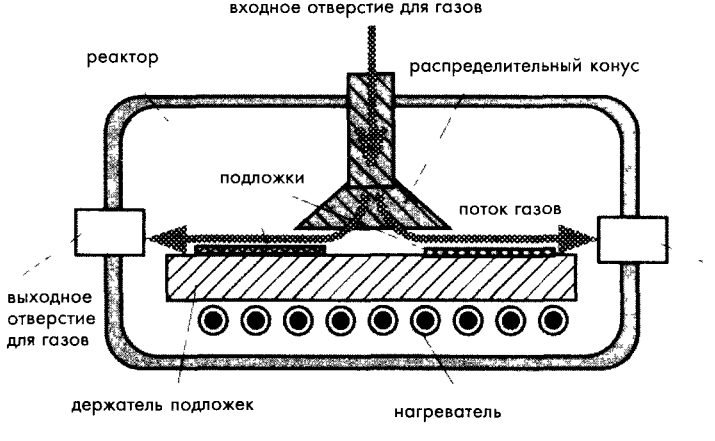


Рис. 18.7. Упрощенная структура реактора для проведения процесса химического осаждения из газовой фазы

18.3. Нано-технологии

Говоря о нано-технологиях, подразумевается, что речь идет об устройствах, размеры которых сравнимы с нанометром (10^{-9}м). На практике же большинство субминиатюрных элементов имеют размеры в 1000 раз большие – порядка микрон (10^{-6}м). Однако по мере развития технологий эти размеры имеют тенденцию уменьшаться.

В настоящее время быстро развиваются *микросистемные технологии*, позволяющие создавать *микроэлектромеханические системы* (МЭМС) и микроэлектрооптомеханические системы (МЭОМС). МЭМС устройства объединяют в своем составе электрические и механические компоненты. Это означает, что в их структуру входит хотя бы одна подвижная или деформируемая часть и обязательно электрическая схема. И названия МЭОМС следует, что одним из ее элементов должен быть оптический компонент. Большинство МЭМС и МЭОМС являются трехмерными устройствами, размеры которых составляют порядка микрон.

В настоящее время существуют два типа микротехнологий: *микроэлектроника* и *микромашинная технология*. Под микроэлектроникой понимается производство интегральных схем на кремниевых кристаллах. А микромашинная технология объединяет в себе методы изготовления структур и подвижных частей микроустройств. Цель построения МЭМС – это объединение интегральных электронных схем и микромашинных устройств. Очевидными преимуществами МЭМС являются: низкая стоимость, надежность и миниатюрные размеры.

Сейчас наибольшее развитие получили три направления микротехнологий: методы обработки кремния, обработка при помощи эксимерного лазера и LIGA-технология [4, 5]. Методы *микрообработки кремния* являются наиболее бурно развивающимися, поскольку кремниевые подложки широко используются в микроэлектронике, и именно они являются наиболее подходящими кандидатами для построения микросистем.

Эксимерный лазер является УФ устройством, которое может быть использовано для микромашинной обработки большого количества материалов без их нагревания, что является чертой, отличающей его от других типов лазеров, удаляющих материал выжиганием или выпариванием. Эксимерный лазер используется, в основном, для работы с органическими материалами (полимерами и т.п.)

LIGA (литографическая гальванопластика и литье) – технология изготовления форм, используемых для производства механических микрокомпонентов, которые могут быть реализованы из различных материалов. Однако, эта технология обладает серьезным недостатком – необходимостью применения рентгеновского излучения синхротрона.

18.3.1. Фотолитография

Фотолитография – метод получения трехмерных структур механических микросистем, взятый из микроэлектроники.

На рис. 18.8А показана пленка некоторого материала (например, диоксида кремния), нанесенная на подложку из другого материала (например из кремния).

Цель метода – селективное удаление части оксидного покрытия, чтобы освободить требуемый участок подложки (рис. 18.8F)

На поверхность оксидного слоя наносится пленка из полимера, чувствительного к УФ излучению (рис. 18.8B), называемого фоторезистом. Сверху полимера формируется маска, которая часто представляет собой шаблон из хрома, нанесенный на стеклянную пластину. УФ излучение попадает на фоторезист через маску (рис. 18.8C). После чего облученная часть фоторезиста удаляется, в результате чего формируется маска из фоторезиста (рис. 18 8D).

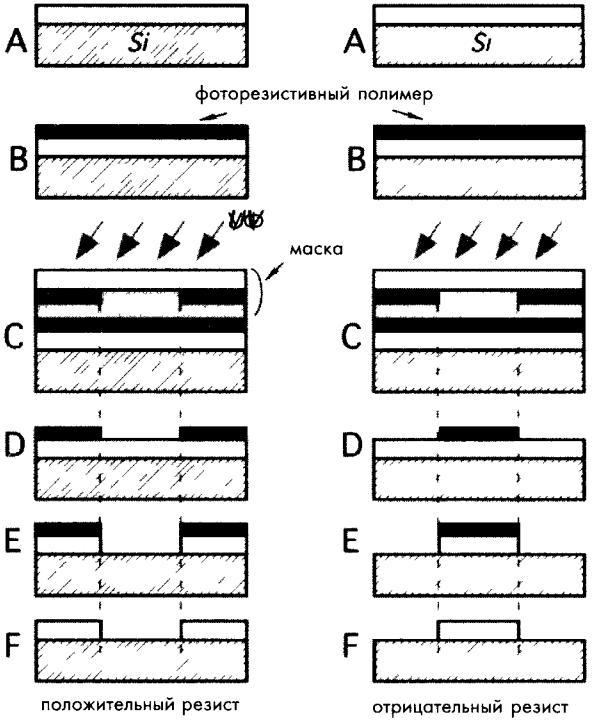


Рис. 18.8. Положительная и отрицательная фотолитография

Существуют два типа фоторезистов: положительный (левая сторона рис. 18.8) и отрицательный (правая сторона рис. 18.8). Когда УФ облучает положительный резист, он ослабляет полимер, в результате чего именно эта часть резиста удаляется после облучения, оставляя на резистивном слое положительную маску. При облучении УФ отрицательного резиста происходит усиление полимера, и удаляется часть полимера, не подвергшегося облучению При этом на резистивном слое остается инвертированный рисунок исходной маски. Для удаления оксида кремния в зонах, незащищенных резистом, используется химический или иной пригодный метод (рис.18.8E). В конце процесса удаляется резист, и остается готовая структура (рис. 18.8F)

18.3.2. Методы обработки кремния

Существуют методы формирования слоев, нанесенных на кремниевую подложку, и придания формы самой подложке для получения требуемых микроструктур (объемная обработка кремния). Разработаны также технологии нанесения и формирования тонких пленок, позволяющие изготавливать довольно сложные структуры на поверхности кремниевой подложки (поверхностная обработка кремния). Для совершенствования этих технологий в них внедряются методы электрохимического травления. А новые методы соединения подложек позволяют изготавливать многослойные структуры.

18.3.2.1. Основные методы

Существуют три основных способа обработки кремния: нанесение тонких пленок из разных материалов, удаление материалов при помощи жидких травильных реагентов и удаление материалов методами сухого травления. Существует еще один метод травления – травление с барьерным слоем, основанный на введении в кремний примесей, изменяющих его свойства.

18.3.2.1.1. *Нанесение тонких пленок*

Для нанесения тонких пленок (порядка нескольких микрон и даже меньше) из различных материалов на поверхности кремниевой подложки (или какой-либо другой) используются методы фотолитографии и травления. Наиболее распространенными материалами являются: диоксид кремния, нитрид кремния, поликремний и алюминий. В виде тонких пленок могут быть нанесены и другие материалы, включая благородные металлы, например, золото. Однако, благородные металлы, попадая на электронные схемы, могут вывести их из строя, поэтому нанесение таких покрытий на подложки должно происходить до формирования электронных узлов. Пленки из благородных металлов чаще всего наносятся по трафарету методом обратной литографии, а не по технологии сухого и жидкостного травления.

Часто фоторезист является недостаточно прочным для обработки методом травления. В таких случаях наносится тонкий слой из более твердого материала (например, оксида или нитрида), и дальнейшее формирование пленки ведется методом фотолитографии. В процессе вытравливания нижележащего материала оксид/нитрид играет роль маски. После полного вытравливания нижележащего материала, этот маскирующий слой удаляется.

18.3.2.1.2. *Жидкостное травление*

Под жидкостным травлением понимается удаление части материала при помещении подложки в кювету с химическим реагентом. Существует два способа жидкостного травления: изотропный и анизотропный. При изотропном травлении травильные реагенты равномерно удаляют материал одновременно во всех направлениях. Тогда как при анизотропном травлении скорость удаления материала в разных направлениях будет неодинаковой, поэтому этот метод используется для формирования структур сложной формы. Скорость травления часто определяется концентрацией примесей кремния.

Для травления оксидов и нитридов кремния, алюминия, поликремния, кремния и золота существуют свои собственные травильные реагенты. Поскольку изотропные травители действуют на материал одинаково во всех направлениях, они удаляют его не только в вертикальном направлении, но и в горизонтальном, подтравливая слой, находящийся под маской. Это проиллюстрировано на рис. 18.9.

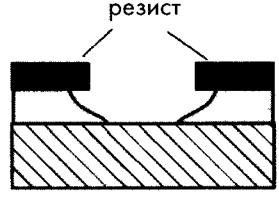


Рис. 18.9. Изотропное травление под слой маски

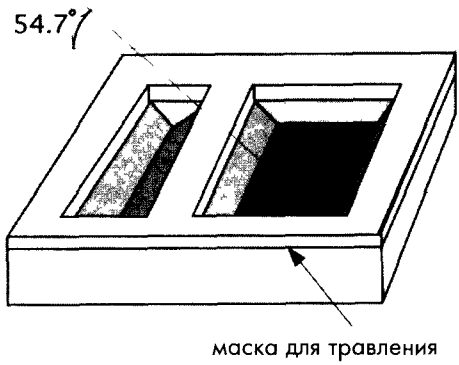


Рис. 18.10. Простейшие структуры, вытравливаемые при помощи KOH

Для травления кристалла кремния в разных плоскостях с различными скоростями также разработаны специфические реагенты. Наиболее популярным анизотропным травильным реагентом является KOH.

Кремниевые подложки обычно получаются методом разрезания большого кристалла кремния, выращенного из одной затравки. Все атомы кремния организованы в кристаллическую структуру, поэтому в данном случае речь идет о подложках из монокристаллического кремния. При приобретении кремниевых подложек необходимо уточнять их ориентацию.

На рис. 18.10 показаны простейшие структуры, полученные при травлении кремниевой подложки с ориентацией кристалла (100) раствором KOH. Это V-образная канавка и углубление с наклонными боковыми стенками. В зависимости от ориентации подложки меняются углы наклона вытравливаемых структур.

Скорость травления нитридов и оксидов кремния в KOH очень невысока. Оксиды могут использоваться в качестве маски для травления пологих структур в растворе KOH в течение относительно короткого интервала времени. Для более длительных периодов травления лучше подходят маски из нитридов, поскольку их скорость травления в KOH ниже, чем у оксидов.

На рис. 18.11 показаны варианты мезаструктур, полученных в растворе KOH. При вытравливании мезастуктур могут получиться не прямые углы, а с некоторым скосом, который необходимо компенсировать. Для этого на углах маски предусматриваются дополнительные элементы, позволяющие формировать практически прямые углы мезаструктур. Недостатком этого метода компенсации является ограничение на минимальное расстояние между структурами.

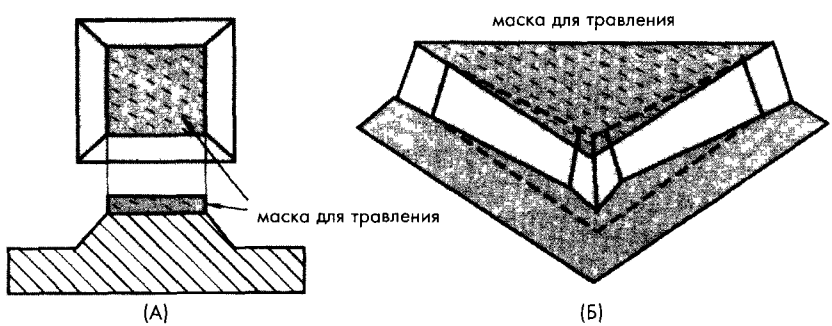


Рис. 18.11. Мезаструктуры

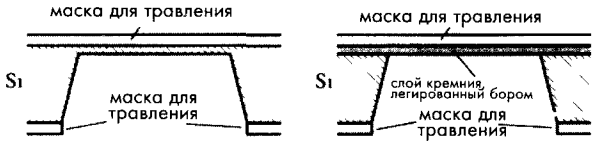


Рис. 18.12. Изготовление диафрагмы или мембраны

При изготовлении многих датчиков, таких как акселерометры, детекторы давления и температуры (термоэлементы и болометры) и т.д., требуется формировать диафрагмы. При помощи метода травления в растворе KOH можно делать кремниевые диафрагмы толщиной порядка 50 мкм (рис. 18.12А). Толщина диафрагмы определяется временем травления, что может приводить к существенным погрешностям.

18.3.2.1.3. *Травление с барьерным слоем*

Более тонкие диафрагмы толщиной около 20 мкм могут быть получены методом травления в растворе KOH при помощи барьерного слоя, представляющего собой слой кремния, легированный бором (рис. 18.12Б). Толщина диафрагмы при этом определяется глубиной легированного слоя, которую можно проконтролировать гораздо точнее, чем скорость травления. Высокая концентрация бора позволяет снизить скорость травления на несколько порядков, что означает, фактически, остановку процесса травления. Легирование кремния бором осуществляется методом диффузии.

Методом травления с барьерным слоем можно получать разнообразные структуры. Для этого сверху кремниевой подложки формируется толстый слой маски из оксида кремния, определяющий зоны легирования (рис. 18.13А). После чего подложка помещается в печь на определенный промежуток времени, где происходит диффузия бора в кремний. По окончании процесса легирования слой маски удаляется (рис. 18.13Б). Перед помещением в кювету с KOH на подложку по трафарету наносится еще одна маска (рис. 18.13В). KOH удаляет кремний из зон, незащищенных маской, вокруг области легирования (рис. 18.13Г). За 15...20 часов бор проникает в кремний на глубину 20 мкм, однако, желательно, время температурной обработки делать, как можно, более коротким. Метод травления с барьерным слоем также используется для изготовления узких мостов и консольных структур. На рис. 18.14А показана мостовая структура сформированная методом барьерного травления в растворе KOH. Для изготовления консольной структуры, представленной на рис. 18.14Б, также использовался метод травления.

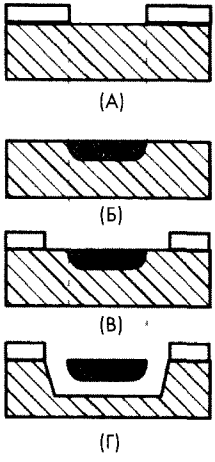


Рис. 18.13. Травление вокруг зоны легирования бором

Консольные и мостовые структуры широко применяются в резонансных датчиках, в которых изменение массы, длины и других параметров структур приводит к модуляции их собственной частоты.

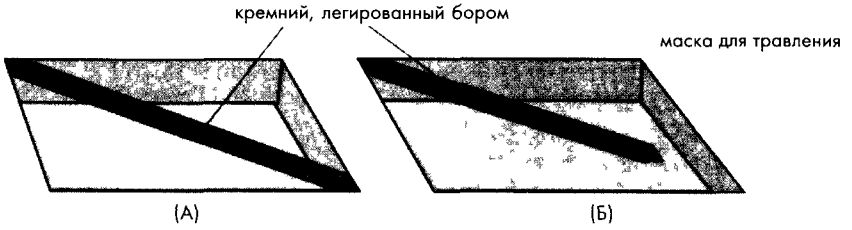


Рис. 18.14. Изготовление методом травления мостовых и консольных структур

18.3.2.1.4. *Сухое травление*

Наиболее распространенной технологией сухого травления является метод реактивного ионного травления (РИТ), заключающийся в том, что ускоренные ионы направляются в сторону вытравливаемого материала. При этом происходит ускорение реакции травления в направлении распространения ионов. РИТ – это метод анизотропного травления, при помощи которого в различных материалах, включая кремний и его оксид и нитрид, могут быть сформированы структуры произвольной формы глубиной до нескольких десятков микрон. В отличие от жидкостного анизотропного травления метод РИТ не зависит от ориентации кристаллов кремния. При объединении методов сухого травления и изотропного жидкостного травления возможно получение очень острых структур. Для этого сначала методом РИТ формируется структура с вертикальными сторонами (рис. 18.15А). После чего используется жидкостное травление для подтравливания слоя маски до получения остроконечной фигуры (рис. 18.15Б). По окончании процессов травления маска удаляется. Таким образом изготавливаются концевые части некоторых датчиков, например, тактильных детекторов.

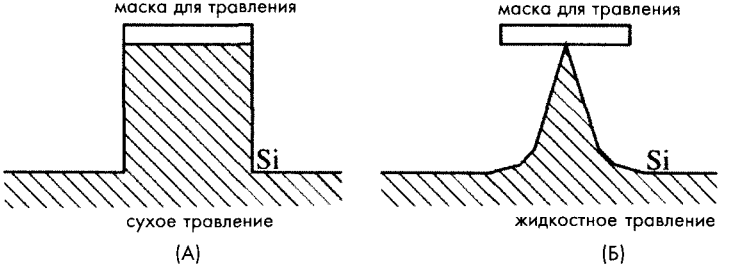


Рис. 18.15. Вытравливание остроконечных структур

18.3.2.1.5. *Метод обратной литографии*

Этот метод используется для трафаретного нанесения тонких пленок из благородных металлов. Сначала на подложку наносится тонкий слой из вспомогательного материала (например, оксида кремния). Сверху него по шаблону наносится слой резиста (рис. 18.16А), облучаемый УФ светом. После чего применяется жидкостное травление для подтравливания слоя под резистом (рис. 18.16Б). Далее на подложку через отверстие в резисте методом напыления наносится слой металла (рис.

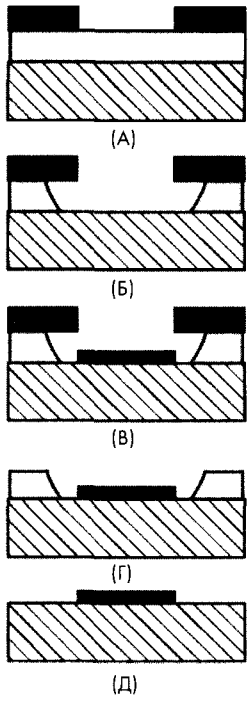


Рис. 18.16. Метод обратной литографии

18.16В). После чего удаляются слои резиста и вспомогательного материала, и остается только подложка с нанесенным слоем металла (рис. 18.16 Г и Д).

18.3.2.2. Соединение подложек

Существует много методов соединения подложек из различных материалов друг с другом для получения сложных устройств. Одним из самых распространенных методов соединения кремния со стеклом является метод анодного или электростатического сплавления. Для этого кремниевая и стеклянная подложки соединяются вместе и нагреваются до высокой температуры. После чего к этому соединению прикладывается высокое напряжение, в результате чего между подложками образуются очень прочные связи. На рис. 18.17 показана стеклянная пластина, соединенная с каналом, вытравленным в кремниевой подложке методом РИТ.

Для соединения двух кремниевых подложек подходит метод прямого соединения, заключающийся в скреплении двух кремниевых пластин под водой и приложении к ним небольшого давления. Также популярны методы соединения, использующие промежуточные адгезионные слои, такие как стекло и фоторезист. Хотя методы анодного сплавления и прямого скрепления подложек дают возможность получить прочные соединения, они имеют довольно серьезный недостаток: для них очень важна чистота и гладкость соединяемых поверхностей. Методы соединения подложек используются для скрепления микроструктур при изготовлении мембран, консолей, клапанов и т.д, являющихся составными частями различных датчиков.

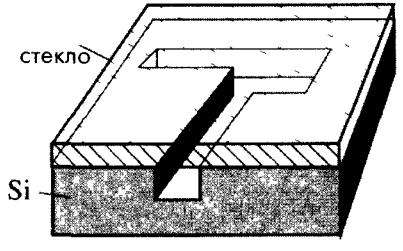


Рис. 18.17. Соединение стекла с кремнием

Литература

1. Middelhoek, S. and Hoogerwerf A.C. Smart sensors: when and where? *SensorsActuators* 8(1), 398, 1985.
2. Obermier, E., Kopystynski, P. and NeiBI, R. Characteristics of polysilicon layers and their application in sensors. IEEE Solid-State Sensors Workshop, 1986.
3. Frijiink, P.M., Nicolas, J.L., and Suchet, P. Layer uniformity in a muldwafer MOVPRE reactor for III-V compounds. *J. Crystal Growth* 107, 167-174, 1991.
4. Morgan, D.V. and Board, K. *An Introduction to Semiconductor Microtechnology,* John Wiley & Sons, New York, 1985.
5. Muller, R.S., Howe, R.T, Senturia, S.D., Smith, R.L., and White R.M. (eds.). *Microsensors,* IEEE Press, New York, 1991.

Приложение
Единицы физических величин. Справочные данные по физическим характеристикам материалов

Основные единицы измерения системы СИ

Величина	Название	Обозначение	Определение (Год установления)
Длина	метр	м	Метр – длина пути, пройденного светом в вакууме за время, равное 1/299792458 доли секунды. (1983)
Масса	килограмм	кг	Килограмм — масса эталона, сделанного из сплава платины и иридия. (1889).
Время	секунда	с	Секунда — длительность 9192631 периодов излучения, испускаемого атомом Цезия 133 при точно определенных условиях резонанса. (1967)
Электрический ток	ампер	А	Ампер — сила установившегося электрического тока, который, при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого поперечного сечения, расположенных в вакууме на расстоянии 1 метра друг от друга, вызвал бы появление силы между ними, равной $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины. (1946).
Термодинамическая температура	кельвин	К	Кельвин определяется температурой тройной точки воды (когда все три фазы воды: жидкая, парообразная и твердая – находятся в термодинамическом равновесии). Эта температура равна 273.16 К. (1967)
Количество вещества	моль	моль	Моль— количество элементарных частиц (атомов, молекул, ионов, электронов и др.), содержащихся в 0.012 кг изотопа углерода-12. (1971)
Интенсивность света	кандела (свеча)	кд	Свеча — сила света, излучаемого в перпендикулярном направлении черным телом, имеющим площадь поверхности 1/600000 $м^2$, при температуре замерзания Pt и давлении 101325 $Н/м^2$. (1967)
Плоский угол	радиан	рад	Радиан—угол между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу.
Телесный угол	стерадиан	срад	Стерадиан—телесный угол с вершиной в центре сферы, вырезающий на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Производные СИ единиц

Физическая величина	Наименование единицы	Выражение в терминах основных единиц
МЕХАНИКА		
Площадь	квадратный метр	$м^2$
Объем	кубический метр	$м^3$
Частота	герц (Гц)	1/с
Плотность	килограмм на кубический метр	$кг/м^3$
Скорость	метр в секунду	м/с
Угловая скорость	радиан в секунду	рад/с
Ускорение	метр на секунду в квадрате	$м/с^2$
Угловое ускорение	радиан на секунду в квадрате	$рад/с^2$
Объемная скорость потока	кубический метр в секунду	$м^3/с$
Сила	ньютон (Н)	$кг \cdot м/с^2$
Момент силы	Ньютон – метр	$кг \cdot м^2/с^2$
Импульс	Килограмм–метр в секунду	$кг \cdot м/с$
Момент импульса	килограмм–квадратный метр в секунду	$кг \cdot м^2/с$
Момент инерции	килограмм–квадратный метр	$кг \cdot м^2$
Давление	ньютон на квадратный метр или паскаль (Па)	$кг/(м \cdot с^2)$
Работа, энергия, количество теплоты	джоуль (Дж), ньютон–метр (Н · м) или ватт–секунда (Вт · с)	$кг \cdot м^2/с^2$
Мощность	ватт (Вт) или джоуль в секунду (Дж/с)	$кг \cdot м^2/с^3$
Динамическая вязкость	пуаз (П) или паскаль–секунда (Па · с)	$кг/(м \cdot с)$
Кинематическая вязкость	стокс (Ст)	$м^2/с$
Давление звука	паскаль (Па)	$кг/(м \cdot с^2)$
Сила звука	ватт на квадратный метр ($Вт/м^2$)	$кг/с^3$
Массовая скорость потока	килограмм в секунду	кг/с
Массовая плотность потока	килограмм на квадратный метр на секунду	$кг/(м^2 \cdot с)$
ТЕРМОДИНАМИКА		
Молярная масса	килограмм на моль	кг/моль
Молярный объем	кубический метр на моль	$м^3$/моль
Количество теплоты	джоуль (Дж)	$кг \cdot м^2/с^2$
Удельная теплоемкость	джоуль на килограмм на кельвин (Дж/(кг · К))	$м^2/(с \cdot К)$
Молярная теплоемкость	джоуль на моль на кельвин (Дж/(моль · К)	$кг \cdot м^2/(с^2 \cdot моль \cdot К)$
Теплопроводность	ватт на метр на кельвин (Вт/(м · К))	$Кг \cdot м/(с^2 \cdot К)$
Теплота сгорания	джоуль на килограмм (Дж/кг)	$м^2/с^2$

Физическая величина	Наименование единицы	Выражение в терминах основных единиц

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Заряд	кулон (Кл)	$А \cdot с$
Напряженность электрического поля	вольт на метр (В/м)	$кг \cdot м/(А \cdot с^3)$
Электрическое напряжение	вольт (В) или ватт на ампер (Вт/А)	$кг \cdot м^2/(А \cdot с^3)$
Электрическое сопротивление	ом или вольт на ампер (В/А)	$кг \cdot м^2/(А^2 \cdot с^3)$
Электрическая проводимость	сименс (См), ампер на вольт на метр (А/(В · м))	$А \cdot с^3/(кг \cdot м^3)$
Электрическая емкость	фарада (Ф) или (А · с/В)	$А^3 \cdot с^4/(кг \cdot м^2)$
Плотность тока	ампер на квадратный метр	$А/м^2$
Магнитная индукция	тесла (Тл), вольт–секунда на квадратный метр	$кг/(А \cdot с^2)$
Поток магнитной индукции	вебер (Вб)	$Кг \cdot м^2/(А \cdot с^2)$
Индуктивность	генри (Гн)	$Кг \cdot м^2/(А^2 \cdot с^2)$
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	А/м
Магнитная проницаемость	генри на метр (Гн/м)	$Кг \cdot м/(А^2 \cdot с^2)$
Плотность магнитного потока	тесла (Тл) или вебер на квадратный метр ($Вб/м^2$)	$кг/(А \cdot с^2)$

ОПТИКА И ФОТОМЕТРИЯ

Поток излучения	ватт (Вт)	$кг \cdot м^2/с^3$
Энергетическая освещенность	ватт на квадратный метр	$кг/с^3$
Энергетическая яркость	ватт на стерадиан на квадратный метр	$кг/(с^3 \cdot ср)$
Световой поток	люмен (лм)	кд · ср
Яркость	кандела на квадратный метр	$кд/м^2$
Освещенность	люкс (лк) или люмен на квадратный метр	$кд \cdot ср/м^2$

РАДИОАКТИВНОСТЬ

Поглощенная доза	грей (Гр), джоуль на килограмм	$м^2/с^2$
Экспозиционная доза	кулон на килограмм	$А \cdot с/кг$
Активность	беккерель (Бк)	1/с

Соотношения между внесистемными единицами измерения и единицами СИ

МЕХАНИКА

Длина [метр (м)]

Сантиметр	10^{2}
Микрон	10^{6}
Ангстрем	10^{10}
Ферми	10^{15}
Дюйм	$2.54 \cdot 10^{2}$
Ярд	$9.144 \cdot 10^{1}$
Фут	$3.048 \cdot 10^{1}$
Миля(сухопутная)	$1.609 \cdot 10^{3}$
Миля (морская)	$1.852 \cdot 10^{3}$
Астрономическая единица	$1.496 \cdot 10^{11}$
Световой год	$9.461 \cdot 10^{15}$

Площадь [кубический метр ($м^2$)]

$Сантиметр^2$	10^{-4}
Гектар	10^{4}
$Фут^2$	$9.29 \cdot 10^{2}$
$Ярд^2$	$8.361 \cdot 10^{1}$
Акр	$4.047 \cdot 10^{3}$
Ар	10^{2}

Объем [кубический метр ($м^3$)]

$Сантиметр^3$	10^{6}
Литр	10^{3}
$Дюйм^3$	$1.639 \cdot 10^{5}$
$Ярд^3$	$7.46 \cdot 10^{1}$
$Фут^3$	$2.832 \cdot 10^{2}$
Столовая ложка	$1.478 \cdot 10^{5}$
Унция (США для жидкости)	$2.957 \cdot 10^{5}$
Пинта (США для сыпучих веществ)	$5.506 \cdot 10^{4}$
Пинта (США для жидкости)	$4.732 \cdot 10^{4}$
Баррель (нефтяной)	$1.59 \cdot 10^{1}$
Галлон (Канада, Англия, для жидкости)	$4.546 \cdot 10^{3}$
Галлон (США, для жидкости)	$3.785 \cdot 10^{3}$
Галлон (США, для сыпучих веществ)	$4.405 \cdot 10^{3}$

Плоский угол [радиан (рад)]

Градус	$9.089 \cdot 10^{1}$
Минута	$2\,909 \cdot 10^{-4}$
Секунда	$4.848 \cdot 10^{6}$
Град	$1.57 \cdot 10^{2}$

Время [секунда (с)]

Минута	$6 \cdot 10^{1}$
Час	$3.6 \cdot 10^{3}$
Сутки	$8.64 \cdot 10^{4}$
Год	$3.156 \cdot 10^{7}$

Скорость [метр в секунду (м/с)]

Километр/час	$2.78 \cdot 10^{1}$
Сантиметр/секунда	10^{2}
Миля/час	$4.7 \cdot 10^{1}$
Узел	$5.44 \cdot 10^{1}$
Фут/секунда	$3.48 \cdot 10^{1}$
Дюйм/секунда	$2.54 \cdot 10^{2}$

Угловая скорость [радиан в секунду (рад/с)]

Оборот/минута	$1.047 \cdot 10^{1}$

Ускорение [метр в секунду в квадрате ($м/с^2$)]

$Сантиметр/секунда^2$	10^{2}
$Дюйм/секунда^2$	$2.54 \cdot 10^{2}$
$Фут/секунда^2$	$3.048 \cdot 10^{1}$

Масса [килограмм (кг)]

Грамм	10^{3}
Центнер	10^{2}
Тонна (метрическая)	10^{3}
Фунт	$4\,536 \cdot 10^{1}$
Унция (тройская или аптекарская)	$3.11 \cdot 10^{2}$
Унция (торговая)	$2\,835 \cdot 10^{2}$
Сотня весовая (длинна	$5.08 \cdot 10^{1}$
Сотня весовая (короткая)	$4.536 \cdot 10^{1}$
Гран	$6.48 \cdot 10^{5}$
Карат (метрический)	$2 \cdot 10^{4}$

Плотность

[килограмм на кубический метр (кг/м^3)]

Грамм /сантиметр^3	10^3
Унция /дюйм^3	1 73 10^3
Тонна (длинная)/ярд^3	1 329 10^3

Сила [ньютон (Н)]

Дина	10^5
Килограмм–сила	9 807
Килопонд (кп)	9 807
Тонна–сила	9 807 10^3
Фунт–сила	4 448
Понд	9 807 10^3
Паундаль	1 32 10^1
Кип (1000 фунт - сила)	4 448 10^3

Момент силы [ньютон-метр (Н · м)]

Дина–сантиметр	10^7
Килограмм–сила–метр	9 807
Унция–сила–дюйм	7 062 10^3
Фунт–сила–дюйм	1 23 10^1
Фунт–сила–фут	1 356

Давление [паскаль (Па)]

Дина/сантиметр^2	10^1
Атмосфера (физическая)	1 013 10^5
Атмосфера (техническая)	9 807 10^4
Торр (мм рт ст при 0°С)	1 333 10^2
Бар	10^5
Пси (фунт–сила/дюйм^2)	6 895 10^3
Паундаль/фут^2	1 488

Энергия (работа) [джоуль (Дж)]

Эрг	10^7
Киловатт–час	3 6 10^6
Калория	4 18
Электронвольт	1 6022 10^{19}
Британская термическая единица (БТЕ)	1 55 10^3
Терм	1 055 10^8

Мощность [ватт (Вт)]

Эрг/секунда	10^7
Кал/секунда	4 184
Лошадиная сила (метрическая)	7 355 10^2
Лошадиная сила (Великобритания)	7 457 10^2

ТЕРМОДИНАМИКА

Температура [кельвин (К)]

Градус Цельсия	T (C)=K–273 15
Градус Фаренгейта	n (F)=(5/9 (n-32)– – 273 15) K
Градус Ренкина	N (Ra) = 5/9 n (K)

Теплота [джоуль (Дж)]

Калория	4 187
БТЕ	1 055 10^3

Производные единицы термодинамики

Кал/(см с К)	4 18 10 Вт/(м К)
Кал/см^2	4 8 10^4 Дж/м^2
Кал/(см^2 мин)	6 973 10^2 Вт/м^2
Кал/с	4 184 Вт
Фут^2/час (термодиффузия)	2 58 10^5 м^2/с
БТЕ–фут/(час–фут^2–°F) (теплопроводность)	1 73 Вт/(м К)
БТЕ /фунт	2 324 10^3 Дж/кг
БТЕ /(фунт–°F) (теплоемкость)	4 186 10^3Дж/(кг К)
БТЕ/фут^3	3 725 10^4Дж/м^3
°F–час–фут^2/БТЕ (тепловое сопротивление)	1 6 10^1 м^2 К/Вт

Соотношения между внесистемными единицами измерения и единицами СИ

ОПТИКА

Производные единицы оптики

Кд/дюйм^2	1 55 10^3 кд/м^2
Ламберт	3 183 10^3 кд/м^2
Лм/фут^2	1 076 10^1 лм/м^2
Фут–кандела	1 076 10^1 лк
Фут–ламберт	3 426 кд/м^2

РАДИОАКТИВНОСТЬ

Единицы радиоактивности

Бэр	10^{-2} Дж/кг
Кюри	3 7 10^6 Бк
Рад	10^{-2} Гр
Рентген	2 58 10^{-4} Кл/кг

Соотношение электрических и магнитных величин в СИ и в гауссовой системе

Величины и их обозначения	Единицы и их обозначения		Соотношения между единицами
	СИ	Гауссова система	
Сила F	ньютон (Н)	дина (дин)	1 Н = 10^5 дин
Работа A и энергия W	джоуль (Дж)	эрг (эрг)	1 Дж = 10^7 эрг
Заряд q	кулон (Кл)	СГСЭ–ед	1 Кл = 3 10^9 СГСЭ–ед
Напряженность электрического поля E	вольт на метр (В/м)	СГСЭ–ед	1 СГСЭ–ед = 3 10^4 В/м
Потенциал φ, напряжение U и э д с	вольт (В)	СГСЭ–ед	1 СГСЭ–ед =300 В
Электрический дипольный момент p	Кл м	СГСЭ–ед	1 Кл м = 3 10^{11} СГСЭ–ед
Поляризованность P	Кл/м^2	СГСЭ–ед	1 Кл/м^2= 3 10^5 СГСЭ–ед
Диэлектрическая восприимчивость x	СИ–ед	СГСЭ–ед	1 СГСЭ–ед = 4π СИ–ед
Электрическое смещение (электрическая индукция) D	Кл/м^2	СГСЭ–ед	1 Кл/м^2 =4π 3 10^5 СГСЭ–ед
Поток электрического смещения (поток электрической индукции) Ф	кулон (Кл)	СГСЭ–ед	1 Кл = 4π 3 10^9 СГСЭ–ед
Электрическая емкость C	фарад (Ф)	сантиметр (см)	1 Ф = 9 10^{11}см
Сила тока I	ампер (А)	СГСЭ–ед	1 А= 3 10^9 СГСЭ–ед
Плотность тока j	(А/м^2)	СГСЭ–ед	1 А/м^2 = 3 10^5 СГСЭ–ед
Электрическое сопротивление R	ом (Ом)	СГСЭ–ед	1 СГСЭ–ед= 9 10^{11} Ом
Удельное сопротивление ρ	ом–метр (Ом м)	СГСЭ–ед	1 СГСЭ–ед =9 10^9 Ом м
Удельная проводимость σ	сименс на метр (См/м)	СГСЭ–ед	1 См/м = 9 10^9 СГСЭ-ед
Магнитная индукция B	тесла (Тл)	гаусс (Гс)	1Тл = 10^4 Гс
Поток магнитной индукции Ф и потокосцепление Ψ	вебер (Вб)	максвелл (Мкс)	1 Вб = 10^8 Мкс
Магнитный момент p_m	Ампер–квадратный метр (А м)	СГСМ–ед	1 А м^2 = 10^3 СГСМ–ед

Величины и их обозначения	Единицы и их обозначения		Соотношения между единицами
	СИ	Гауссова система	
Намагниченность J	ампер на метр (А/м)	СГСМ–ед	1 СГСМ–ед= 10^3 А/м
Напряженность магнитного поля H	ампер на метр (А/м)	эрстед (Э)	1 А/м = $4\pi \cdot 10^{-3}$ Э 1Э = 79.6 А/м
Магнитная восприимчивость χ	СИ–ед	СГСМ–ед	СГСМ–ед=$4\pi \cdot$ СИ–ед
Индуктивность L и взаимная индуктивность L_{12}	генри (Гн)	сантиметр (см)	1 Гн = 10^9 см

Основные формулы электромагнетизма в СИ и гауссовой системе

Наименование	СИ	Гауссова система
Закон Кулона	$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}$	$F = \frac{q_1 q_2}{r^2}$
Напряженность электрического поля (определение)	$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q}$	
Напряженность поля точечного заряда	$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{\varepsilon r^2}$	$E = \frac{q}{\varepsilon r^2}$
Напряженность поля между заряженными плоскостями и вблизи поверхности заряженного проводника	$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon}$	$E = \frac{4\pi\sigma}{\varepsilon}$
Потенциал (определение)	$\varphi = \frac{W_p}{q}$	
Потенциал поля точечного заряда	$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{\varepsilon r}$	$\varphi = \frac{q}{\varepsilon r}$
Работа сил поля над зарядом	$A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$	
Связь между **E** и ϕ	$\mathbf{E} = -\nabla\varphi$	
Связь между ϕ и **E**	$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \mathbf{E}d\mathbf{l}$	
Ротор вектора **E** для электростатического поля	$[\nabla\mathbf{E}] = 0$	
Циркуляция вектора **E** для электростатического поля	$\oint \mathbf{E}d\mathbf{l} = 0$	
Электрический момент диполя	$p = ql$	
Механический момент, действующий на диполь в электрическом поле	$\mathbf{N} = [\mathbf{pE}]$	
Энергия диполя в электрическом поле	$W = -\mathbf{pE}$	
Дипольный момент «упругой» молекулы	$\mathbf{p} = \beta\varepsilon_0\mathbf{E}$	$\mathbf{p} = \beta\mathbf{E}$
Поляризованность (определение)	$\mathbf{P} = \frac{\sum \mathbf{p}}{\Delta V}$	
Связь между **P** и **E**	$\mathbf{P} = x\varepsilon_0\mathbf{E}$	$\mathbf{P} = x\mathbf{E}$
Связь между **P** и объемной плотностью связанных зарядов	$\rho' = -\nabla\mathbf{P}$	
Связь между **P** и поверхностной плотностью связанных зарядов	$\sigma' = P_n$	

Наименование	СИ	Гауссова система
Электрическое смещение (электрическая индукция) (определение)	$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$	$\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P}$
Дивергенция вектора **D**	$\nabla \mathbf{D} = \rho$	$\nabla \mathbf{D} = 4\pi\rho$
Теорема Гаусса для **D**	$\oint \mathbf{D} d\mathbf{S} = \sum q$	$\oint \mathbf{D} d\mathbf{S} = 4\pi \sum q$
Связь между диэлектрической проницаемостью ε и диэлектрической восприимчивостью x	$\varepsilon = 1 + x$	$\varepsilon = 1 + 4\pi x$
Связь между диэлектрической восприимчивостью в СИ и в Гауссовой системе	$x_{СИ} = 4\pi x_{ГС}$	
Связь между **D** и **E**	$\mathbf{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \mathbf{E}$	$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$
Связь между **D** и **E** в вакууме	$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E}$	$\mathbf{D} = \mathbf{E}$
D поля точечного заряда	$D = \frac{1}{4\pi} \frac{q}{r^2}$	$D = \frac{q}{r^2}$
Емкость конденсатора (определение)	$C = \frac{q}{U}$	
Емкость плоского конденсатора	$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$	$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi d}$
Энергия системы зарядов	$W = \frac{1}{2} \sum q\varphi$	
Энергия заряженного конденсатора	$W = \frac{CU^2}{2}$	
Плотность энергии электрического поля	$\omega = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}$	$\omega = \frac{\varepsilon E^2}{8\pi}$
Сила тока (определение)	$I = \frac{dq}{dt}$	
Плотность тока (определение)	$j = \frac{dI}{dS_\perp}$	
Уравнение непрерывности	$\nabla \mathbf{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$	
Напряжение (определение)	$U = \varphi_1 - \varphi_2 + э.д.с_{12}$	
Закон Ома	$I = \frac{1}{R} U$	
Закон Ома в дифференциальной форме	$\mathbf{j} = \frac{1}{\rho} \mathbf{E} = \sigma \mathbf{E}$	
Закон Джоуля-Ленца	$Q = \int_0^t RI^2 dt$	
Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме	$\omega = \rho j^2$	
Сила взаимодействия двух параллельных токов в вакууме (в расчете на единицу длины)	$F = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{b}$	$F = \frac{2I_1 I_2}{b}$
Поле свободно движущегося заряда	$\mathbf{B} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{q[\mathbf{vr}]}{r^3}$	$\mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{q[\mathbf{vr}]}{r^3}$
Закон Био-Савара	$d\mathbf{B} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{I[d\mathbf{l},\mathbf{r}]}{r^3}$	$d\mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{I[d\mathbf{l},\mathbf{r}]}{r^3}$
Сила Лоренца	$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q[\mathbf{vB}]$	$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + \frac{q}{c}[\mathbf{vB}]$

Наименование	СИ	Гауссова система
Закон Ампера	$d\mathbf{F} = I[d\mathbf{l},\mathbf{B}]$	$d\mathbf{F} = \frac{1}{c} I[d\mathbf{l},\mathbf{B}]$
Магнитный момент контура с током	$p_m = IS$	$p_m = \frac{1}{c} IS$
Механический момент, действующий на магнитный момент в магнитном поле	$\mathbf{N} = [\mathbf{p}_m \mathbf{B}]$	
Механическая энергия магнитного момента в магнитном поле	$W = -\mathbf{p}_m \mathbf{B}$	
Дивергенция вектора **B**	$\nabla \mathbf{B} = \mathbf{0}$	
Теорема Гаусса для **B**	$\oint \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0$	
Намагниченность (определение)	$\mathbf{J} = \frac{\sum \mathbf{p}_m}{\Delta V}$	
Напряженность магнитного поля (определение)	$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0}\mathbf{B} - \mathbf{J}$	$\mathbf{H} = \mathbf{B} - 4\pi\mathbf{J}$
Связь между **J** и **H**	$\mathbf{J} = \chi \mathbf{H}$	
Связь между магнитной проницаемостью μ и магнитной и магнитной восприимчивостью χ	$\mu = 1 + \chi$	$\mu = 1 + 4\pi\chi$
Связь между значениями χ в СИ и в гауссовой системе	$\chi_{СИ} = 4\pi\chi_{ГС}$	
Связь между **B** и **H**	$\mathbf{B} = \mu\mu_0 \mathbf{H}$	$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$
Связь между **B** и **H** в вакууме	$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$	$\mathbf{B} = \mathbf{H}$
Ротор вектора **H** в случае стационарного поля	$[\nabla \mathbf{H}] = \mathbf{j}$	$[\nabla \mathbf{H}] = \frac{4\pi}{c}\mathbf{j}$
Циркуляция вектора **H** в случае стационарного поля	$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum I$	$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \frac{4\pi}{c} \sum I$
Напряженность магнитного поля прямого тока	$H = \frac{1}{4\pi}\frac{2I}{b}$	$H = \frac{1}{c}\frac{2I}{b}$
Напряженность магнитного поля в центре кругового тока	$H = \frac{I}{2R}$	$H = \frac{1}{c}\frac{2\pi I}{R}$
Напряженность поля соленоида	$H = nI$	$H = \frac{4\pi}{c} nI$
Поток магнитной индукции (определение)	$\Phi = \int_S \mathbf{B} d\mathbf{S}$	
Работа, совершаемая над контуром с током при перемещении его в магнитном поле	$A = I\Delta\Phi$	$A = \frac{1}{c} I\Delta\Phi$
Потокосцепление или полный магнитный поток (определение)	$\psi = \sum \Phi$	
Э.д.с. индукции	$э.д.с._i = -\frac{d\psi}{dt}$	$э.д.с._i = -\frac{1}{c}\frac{d\psi}{dt}$
Индуктивность (определение)	$L = \frac{\psi}{I}$	$L = c\frac{\psi}{I}$
Индуктивность соленоида	$L = \mu_0 \mu n^2 lS$	$L = 4\pi\mu n^2 lS$
Э.д.с. самоиндукции (в отсутствие ферромагнетиков)	$э.д.с._s = -L\frac{dI}{dt}$	$э.д.с._s = -\frac{1}{c^2} L\frac{dI}{dt}$
Энергия магнитного поля тока	$W = \frac{LI^2}{2}$	$W = \frac{1}{c^2}\frac{LI^2}{2}$

Наименование	СИ	Гауссова система
Плотность энергии магнитного поля	$\omega = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}$	$\omega = \frac{\mu H^2}{8\pi}$
Энергия связанных контуров с током	$W = \frac{1}{2}\sum L_{ik} I_i I_k$	$W = \frac{1}{2c^2}\sum L_{ik} I_i I_k$
Плотность тока смещения	$\mathbf{j}_{см} = \dot{\mathbf{D}}$	$\mathbf{j}_{см} = \frac{1}{4\pi}\dot{\mathbf{D}}$
Уравнения Максвелла в дифференциальной форме	$[\nabla \mathbf{E}] = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ $\nabla \mathbf{B} = 0$ $[\nabla \mathbf{H}] = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ $\nabla \mathbf{D} = \rho$	$[\nabla \mathbf{E}] = -\frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ $\nabla \mathbf{B} = 0$ $[\nabla \mathbf{H}] = \frac{4\pi}{c}\mathbf{j} + \frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ $\nabla \mathbf{D} = 4\pi\rho$
Уравнения Максвелла в интегральной форме	$\oint_\Gamma \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S}$ $\oint_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0$ $\oint_\Gamma \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{j} d\mathbf{S} + \int_S \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} d\mathbf{S}$ $\oint_S \mathbf{D} d\mathbf{S} = \int_V \rho dV$	$\oint_\Gamma \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{1}{c}\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S}$ $\oint_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0$ $\oint_\Gamma \mathbf{H} d\mathbf{l} = \frac{4\pi}{c}\int_S \mathbf{j} d\mathbf{S} + \frac{1}{c}\int_S \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} d\mathbf{S}$ $\oint_S \mathbf{D} d\mathbf{S} = 4\pi \int_V \rho dV$
Скорость электромагнитных волн	$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$	
Соотношение между амплитудами векторов **E** и **H** в электромагнитной волне	$E_m\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0} = H_m\sqrt{\mu\mu_0}$	$E_m\sqrt{\varepsilon} = H_m\sqrt{\mu}$
Вектор Пойнтинга	$\mathbf{S} = [\mathbf{E}\,\mathbf{H}]$	$\mathbf{S} = \frac{c}{4\pi}[\mathbf{E}\,\mathbf{H}]$
Плотность импульса электромагнитного поля	$\mathbf{K} = \frac{1}{c^2}[\mathbf{E}\,\mathbf{H}]$	$\mathbf{K} = \frac{1}{4\pi c^2}[\mathbf{E}\,\mathbf{H}]$

Соответствие между приставками и множителями

Множитель	Приставка	Символ
10^{18}	экса	Э
10^{15}	пета	П
10^{12}	тера	Т
10^{9}	гига	Г
10^{6}	мега	М
10^{3}	кило	к
10^{2}	гекто	г
10^{1}	дека	да

Множитель	Приставка	Символ
10^{-1}	деци	д
10^{-2}	санти	с
10^{-3}	милли	м
10^{-6}	микро	мк
10^{-9}	нано	н
10^{-12}	пико	п
10^{-15}	фемто	ф
10^{-18}	атто	а

Важнейшие физические постоянные

ОСНОВНЫЕ КОНСТАНТЫ

Заряд электрона e = 1 60219 10^{-19} Кл
Масса покоя нейтрона m_n = 1 67495 10^{-27} кг=1 009 а е м
Масса покоя протона m_p = 1 67265 10^{-27} кг= 1 00728 а е м
Масса покоя электрона m_e = 9 10953 10^{-31} кг = 5 4858 10^{-4} а е м
Скорость света в вакууме c = 2 997929 10^{8} м/с
Гравитационная постоянная γ = 6 672 10^{-11} Н $м^2/кг^2$
Ускорение свободного падения g = 9 80665 $м/с^2$
Постоянная электрическая ε_0 = 8 85419 10^{-12} Ф/м
Постоянная магнитная μ_0 = 1 25663 10^{-6} Гн/м
Число Авогадро N_A = 6 02204 10^{23} моль$^{-1}$
Постоянная Больцмана k = 1 38066 10^{-23} Дж/К
Постоянная Планка h = 6 62618 10^{-34} Дж с
Абсолютный нуль по шкале Цельсия 0 K = -273 15 °C

ПРОИЗВОДНЫЕ ОТ ОСНОВНЫХ КОНСТАНТ

Атомная единица массы а е м = 1 6606 10^{-27} кг
Коэффициент взаимосвязи массы и энергии $c^2 = E/m$ = 8 9874 10^{16} Дж/кг = 931 5 Мэв/а е м
Энергия покоя электрона E_{0e} = 8 187 10^{-14} Дж = 0 51098 Мэв
Энергия покоя протона E_{0p} = 1 503 10^{-10} Дж = 938 26 Мэв
Энергия покоя нейтрона E_{0n} = 1 505 10^{-10} Дж = 939 55 Мэв
Отношение заряда к массе для электрона e/m_e = 1 759 10^{11} Кл/кг
Постоянная Фарадея F = 9 64846 10^{4} Кл/моль
Универсальная газовая постоянная R = 8 31441 Дж/(моль K)
Постоянная в законе смещения Вина b = 2 8979 10^{-3} м K
Постоянная закона Стефана—Больцмана (постоянная излучения) σ = 5 67032 10^{-8} Вт/($м^2$ K^4)

Символы химических элементов

Ac	Актиний
Ag	Серебро
Al	Алюминий
Am	Америций
Ar	Аргон
As	Мышьяк
At	Астатин
Au	Золото
B	Бор
Ba	Барий
Be	Берилий
Bi	Висмут
Bk	Берклий
Br	Бром
C	Углерод
Ca	Кальций
Cd	Кадмий
Ce	Церий
Cf	Калифорний
Cl	Хлор
Cm	Кюрий
Co	Кобальт

Cr	Хром
Cs	Цезий
Cu	Медь
Dy	Диспрозий
Er	Эрбий
Es	Эйнштейний
Eu	Европий
F	Фтор
Fe	Железо
Fm	Фермий
Fr	Франций
Ga	Галлий
Gd	Гадолиний
Ge	Германий
H	Водород
He	Гелий
Hf	Гафний
Hg	Ртуть
Ho	Гольмий
I	Иод
In	Индий
Ir	Иридий

K	Калий
Kr	Криптон
La	Лантан
Li	Литий
Lr	Лоуренсий
Lu	Лютеций
Md	Менделевий
Mg	Магний
Mn	Марганец
Mo	Молибден
N	Азот
Na	Натрий
Nb	Ниобий
Nd	Неодим
Ne	Неон
Ni	Никель
No	Нобелий
Np	Нептуний
O	Кислород
Os	Осмий
P	Фосфор
Pa	Протактиний

Pb	Свинец
Pd	Палладий
Pm	Прометий
Po	Полоний
Pr	Празеодим
Pt	Платина
Pu	Плутоний
Ra	Радий
Rb	Рубидий
Re	Рений
Rh	Родий
Rn	Радон
Ru	Рутений
S	Сера
Sb	Сурьма
Sc	Скандий
Se	Селен
Si	Кремний
Sm	Самарий
Sn	Олово
Sr	Стронций
Ta	Тантал

Tb	Тербий
Tc	Технеций
Te	Теллур
Th	Торий
Ti	Титан
Tl	Таллий
Tm	Тулий
U	Уран

V	Ванадий
W	Вольфрам
Xe	Ксенон
Y	Иттрий
Yb	Иттербий
Zn	Цинк
Zr	Цирконий

Диэлектрическая проницаемость некоторых материалов (при 25°С)

Материал	Диэлектрическая проницаемость ε	Частота f, кГц	Материал	Диэлектрическая Проницаемость ε	Частота f, кГц
Воздух	1 00054	0	Парафин	2-2 5	10^3
Алюмокерамика	8-10	10	Плексигласс	3 12	1
Акрилаты	2 5-2 9	10	Полиэфир сульфонат	3 5	10
АБС/полисульфон	3 1	10	Полиэфиры	3 22-4 3	1
Асфальт	2 68	10^3	Полиэтилен	2 26	10
Пчелиный воск	2 9	10^3	Полипропилен	2-3 2	10
Бензол	2 28	0	Поливинилхлорид	4 55	1
Тетрахлорид углерода	2 23	0	Фарфор	6 5	0
Нитроцеллюлоза	8 4	1	Стекло пирекс (7070)	4 0	10^3
Керамика (диоксид титана)	14-110	10^3	Стекло пирекс (7760)	4 5	0
Кордиерит	4-6 23	10	Резина (неопрен)	6 6	1
Компаунд для конденсаторов	300-5000	1-5	Резина(силиконовая)	3 2	1
Алмаз	5 5	10^5	Рутил с перпендикулярными оптическими осями	86	10^5
Эпоксидная смола	2 8-5 2	10	Рутил с параллельными оптическими осями	170	10^5
Оксид железа	14 2	10^5	Силиконовая смола	3 4-4 3	
Плоть (кожа,мускулы)	97	$4\ 10^3$	Хлорид таллия	46 9	
Плоть (жир, кости)	15	$4\ 10^3$	Тефлон	2 04	$10\text{-}10^5$
Нитрат свинца	37 7	$6\ 10^4$	Трансформаторное масло	4 5	0
Метанол	32 63	0	Бумага	3 5	0
Нейлон	3 5-5 4	1	Вода деионизированная	78 5	0

Источник Sprague, CN-207 Hall Effect IC Application, 1986

Удельная магнитная восприимчивость некоторых парамагнетиков и диамагнетиков (при 25 °С)

Парамагнетики	$\chi, 10^{-9} м^3/кг$
Молибден	0 82
Титан	3,35
Кислород	107,8
Магний	0,46
Алюминий	0,61
Вольфрам	0,29
Платина	0,97
Калий	0,53

Диамагнетики	$\chi, 10^{-9} м^3/кг$
Водород	-1,98
Азот	-0,43
Вода	-0,719
Медь	-0,086
Алмаз	-0,491
Каменная соль	-0,518
Фосфор (красный)	-0,67
Серебро	-0,181

Магнитные свойства магнито-мягких материалов

Марка материала	Примерный состав (остальное - железо)	Индукция насыщения $B_s, 10^2$ Тл	Коэрцитивная Сила H_c, А/м	Начальная магнитная проницаемость $м_r, 10^3$	Температура Кюри, °С
80 НМ-супермаллой	Ni 80, Mo 5	8	0 4	100	400
79 НМ-пермаллой	Ni 79, Mo 4	8	1 6	40	450
40 НКМП-пермивар	Ni 40, Mo 4, Co 25	14	—	2	600
49 КФ-ВИ-пермендюр	Co 49, V 2	23,5	40	1	980
10 СЮ-альсифер	Al 5, Si 9 6, Ge 0 08	—	3	20	500
Fe-армко	Fe 100	21 5	64	0 5	768
Ni-Zn феррит	(Ni,Zn)O Fe_2O_3	2-3	40-120	50-500	150-500

Магнитные свойства магнито-твердых материалов

Марка материала	Примерный состав (остальное - железо)	Остаточная индукция B_r Тл	Коэрцитивная сила H_c кА/м	Макс. Плотность магнитной энергии $B \cdot H_{мах}$, Дж/м^3
Алнико	Al 10, Ni 18, Co 12, Cu 6	0 75	55	17
Гинико	Al 10, Ni 20, Co 13 5, Cu 6	0 65	65	17
Хромовая сталь	Cr 2 5 , C 1 0	0 95	6	2 6
Вольфрамовая сталь	W 6, C 0 7	1 05	7	3 2
Куниф	Ni 20, Cu 60	0 6	50	16
Викаллой	Co 52, V 13	1 0	45	30
Силманал	Ag 87, Mn9, Al 4	2 0	5 4	9
Магнадур	Ba 0 6, Fe_2O_3	3 6	170	24

Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления некоторых материалов (при 25 °С)

Материал	Удельное сопротивление, ρ, 10^{-8} ом · м	ТКС α, $10^{-3}K^{-1}$	Материал	Удельное сопротивление, ρ, 10^{-8} ом · м	ТКС α, $10^{-3}K^{-1}$
Глинозем	$>10^{20}$		Палладий	10 54	3 7
Алюминий	2 65	3 9	Платина	10 42	3 7
Бериллий	4 0	0 025	Платина + 10% родия	18 2	—
Висмут	10^{6}	—	Стекло поликристаллич	6 3 10^{14}	—
Латунь (70 Cu, 30 Zn)	7 2	2 0	Редкоземельные металлы	28—300	—
Углерод	3500	-0 5	Кремний нелегированный	(3 4—15) 10^{6}	—
Хром металлизированный	14—66	—	Кремниевая бронза (96Cu, 3Si, 1Zn)	21 0	—
Константан (60 Cu, 40 Ni)	52 5	0 01	Нитрид кремния	10^{19}	—
Медь	1 678	3 9	Серебро	1 6	6 1
Evanohm (75 Ni, 20 Cr, 2 5 Al, 2 5 Cu)	134	—	Натрий	4 75	—
Германий (поликристаллич)	4 6 10^{7}	—	Нержавеющая сталь (литье)	70 - 122	—
Золото	2 12	3 4	Тантал	12 45	3 8
Иридий	5 3	—	Карбид тантала	20	—
Железо (99 99%)	9 71	6 5	Олово	11 0	4 7
Свинец	22	3 36	Титан	42	—
Магний	185	—	Титан и его сплавы	48-199	—
Манганин	44	0 01	Карбид титана	105	—
Манганин (84 Cu, 12 Mn, 4 Ni)	48	—	Вольфрам	5 6	4 5
Ртуть	96	0 89	Цинк	5 9	4 2
Муллит	10^{21}	—	Циркон	$>10^{20}$	—
Нихром	100	0 4	Цирконий и его сплавы	40-70	—
Никель	6 8	6 9	Янтарь	10^{25}	—

Свойства некоторых пьезоэлектрических материалов (при 25 °С)

	PVDF	$BaTiO_3$	PZT	Кварц	TGS
Плотность 10^3 кг/м^3	1 78	5 7	7 5	2 65	1 69
Диэлектрическая проницаемость ε	12	1700	1200	4 5	45
Модуль упругости 10^{10} Н/м	0 3	11	8 3	7 7	3
Пьезоэлектрическая константа пКл/Н	d_{13}=20 d_{32}=2 d_{33}=-30	78	110	2 3	25
Пироэлектрическая постоянная 10^4 Кл/(м^2 · К)	4	20	27	—	30
Электромеханический коэффициент связи %	11	21	30	10	—
Акустический импеданс 10^6 кг/(м^2 с)	2 3	25	25	14 3	—

Свойства некоторых пироэлектрических материалов (при 25 °С)

Материал	Температура Кюри, °С	Теплопроводность Вт/(м · К)	Диэлектр проницаемость ε	Коэффициент пироэлектрич заряда Кл/(м^2 · К)	Коэффициент пироэлектрич потенциала В/(м · К)	К-т связи k_p^2 %
Монокристаллы $TGSLiTaO_3$	49 618	0 4 4 2	30 4 5	3 5 10^{-4} 2 10^{-4}	1 3 10^6 0 5 10^6	7 5 1 0
Керамики $BaTiO_3$, PZT	120 340	3 0 1 2	1000 1600	4 10^{-4} 4 2 10^{-4}	0 05 10^6 0 03 10^6	0 2 0 14
Полимеры PVDF	205	0 13	12	4 10^{-5}	0 40 10^6	0 2
Поли кристаллич Слои $PbTiO_3$	470	2	200	2 3 10^{-4}	0 13 10^6	0,39

Примечание Приведенные цифры могут меняться в зависимости от технологии изготовления

Источник Meixner H, Mader G, Kleinschmidt P, Infrared sensors based on pyroelectric polymer PVDF, *Siemens Forsch Entwicl Ber Bd* 15(3) 105 114, 1986

Коэффициент термо-эдс некоторых термопар (при 25 °С)

Термопара	Коэффициент термо-ЭДС S, мкВ/К	Область применения	Температурный интервал применения Т, °С	Обозначение
Медь/ константан	40 9	Окислительная, восстановительная, инертная среда или вакуум Предпочтительно ниже 0°С	от -270 до 600	Т
Железо/ константан	51 7	Восстановительная и инертная среда Избегать окислительной и влажной среды	от -270 до1000	J
Хромель/ алюмель	40 6	Окислительная и инертная среда	от -270 до 1300	K
Хромель/константан	60 9		от -200 до 1000	E
Pt(10%)Rh/Pt	6 0	Окислительная и инертная среда Избегать восстановительной атмосферы и паров металлов	от 0 до 1550	S
Pt(13%)/ Rh-Pt	6 0	Окислительная и инертная среда Избегать восстановительной атмосферы и паров металлов	от 0 до 1600	R
Константан-вольфрам	42 1	Используется в термоэлементах и микромашинных сенсорах	от 0 до 800	—
Серебро-палладий	10	Используется в термоэлементах и микромашинных сенсорах	от 200 до 600	—

Коэффициент термо-эдс некоторых элементов по отношению к меди (при 25 °С)

Элемент	Коэффициент термо-ЭДС S, мкВ/К	Удельное сопротивление, ρ 10^{-8} ом·м
p-Si	10^2-10^3	10^3-5 10^4
p-поли-Si	10^2-5 10^2	10^3-10^5
Сурьма (Sb)	32	1 85 10^3
Железо (Fe)	13 4	8 6
Золото (Au)	0 1	2 3
Медь (Cu)	0	1 72
Серебро (Ag)	-0 2	1 6
Алюминий (Al)	-3 2	2 8
Платина (Pt)	-5 9	9 8
Кобальт (Co)	-20 1	5 57
Никель (Ni)	-20 4	6 14
Висмут (Bi)	-72 8	1 1 10^2
n-Si	-10^2-10^3	10^3-5 10^4
n-поли-Si	-10^2 -5 10^2	10^3-10^5

Источник Schieferdecker J Infrared thermopile sensors with high sensitivity and very low temperature coefficient *Sensors Actuators* A 46 47, 422 427 1995

Плотности кг/м^3 некоторых материалов при 1 атм. и 0 °С

Материал	Плотность, кг/м^3
Лучший лабораторный вакуум	10^{-17}
Водород	0 0899
Гелий	0 1785
Метан	0 7168
Оксид углерода	1 250
Воздух	1 2928
Кислород	1 4290
Диоксид углерода	1 9768
Пластиковые пены	10-600
Бензол	680-740
Спирт	789 5
Терпентин	860
Минеральное масло	900-930
Натуральная резина	913
Полиэтилен низкой плотности	913
Лед	920
Полиэтилен высокой плотности	950
Углерод и графит волокнистый	996-2000
Вода	1000
Найлон 6	1100
Соляная кислота (20%)	1100
Акрилаты	1163-1190
Эпоксидные смолы	1135-2187
Гудрон	1200
Фенолы	1126-2989
Глицерин	1260
VC	1350
Пленка из ПВХ	1700
Серная кислота	1700
Полиэфир	1800
Бериллий и его сплавы	1855-2076

Материал	Плотность, кг/м^3
Кремнезем	1938- 2657
Графит рекристаллизованный	1938
Стекло боросиликатное (TEMPAX)	2200
Асбестовое волокно	2400-3300
Кремний	2333
Стекло поликристаллическое	2518—2600
Алюминий	2700
Муллит	2989-3293
Нитрид кремния	3183
Алюмокерамика	3322-3875
Сплавы цинка	5200-7170
Ванадий	6117
Хром	7169
Олово и его сплавы	7252-8000
Нержавеющая сталь	8138
Бронзы	8885
Медь	8941
Кобальт и его сплавы	9217
Никель и его сплавы	9125
Висмут	9799
Серебро	10491
Свинец и его сплавы	11349
Палладий	12013
Ртуть	13596
Молибден	13729
Тантал и его сплавы	16968
Золото	19320
Вольфрам и его сплавы	19653
Платина	21452
Иридий	22504
Осмий	22697

*TEMPAX – зарегистрированная торговая марка Schott Glasswerke, Mainz, Germany

Механические свойства некоторых металлов

Материал	Модуль упругости E, ГПа	Коэффициент Пуассона, U
Алюминий	71	0 334
Бериллий медь	112	0 285
Бронза	106	0 312
Медь	119	0 326
Стекло	46 2	0 125
Свинец	36 5	0 425
Молибден	331	0 307
Фосфористая бронза	11	0 349
Сталь (углеродистая)	207	0 292
Сталь (нержавеющая)	190	0 305

Механические свойства некоторых кристаллических материалов

Материал	Предел текучести 10^{-9} Н/м^2	Твердость по Кнупу 10^{-3}кг/м^2	Модуль Юнга 10^{11} Н/м^2	Плотность кг/м^3	ТКС, 10^{-6}К$^{-1}$
Алмаз*	53	7	10 35	3500	1 0
SiC*	21	1 28	7 0	3200	3 3
TiC*	20	1 27	4 97	4900	6 4
Al_2O_3*	15 4	2 1	5 3	4000	5 4
Si_3N_4*	14	3 48	3 85	3100	0 8
Железо*	12 6	0 4	1 96	7800	12
SiO_2(волокно)	8 4	0 82	0 73	2500	0 55
Si*	7 0	0 85	1 9	2300	2 33
Сталь (макс твердая)	4 2	1 5	2 1	7900	12 0
W	4 0	0 48	4 1	19300	4 5
Нержавеющая сталь	2 1	0 66	2 0	7900	17 3
Mo	2 1	0 27	3 43	10300	5 0
Al	0 17	0 13	0 70	2700	25 0

* Монокристаллы

Источник Peterson K E Silicon as a mechanical material *proc IEEE* 70(5) 420 457, 1982

Скорость звука в разных средах

Среда	Скорость, м/с
Воздух (сухой при 20°C)	331
Пар (134°C)	494
Водород (20°C)	1330
Вода (чистая)	1486
Вода (морская)	1519
Свинец	1190

Среда	Скорость, м/с
Медь	3810
Алюминий	6320
Стекло (пирекс)	5170
Сталь	5200
Бериллии	12900

Примечание Газы при 1 атм, твердые тела (продотьныи звук) в виде длинных тонких стержней

Коэффициенты температурного расширения некоторых материалов (при 25°C)

Материал	α, 10^{-6} K^{-1}
Алнико (постоянный магнит)	12 6
Глинозем (поликристаллический)	8 0
Алюминий	25 0
Бронза	20 0
Кадмий	30 0
Хром	6 0
Комол (постоянный магнит)	9 3
Медь	16 6
Плавленный кварц	0 27
Стекло (пирекс)	3 2
Стекло нормальное	9 0
Золото	14 2
Индий	18 0
Инвар	0 7
Железо	12 0
Свинец	29 0

Материал	α, 10^{-6} K^{-1}
Найлон	90
Фосфористая бронза	9 3
Платина	9 0
Плексигласс (люцит)	72
Поликарбонат (АБС)	70
Полиэтилен (высокой плотности)	216
Кремний	2 6
Серебро	19 0
Припой (50-50)	23 6
Сталь (SAE 1020)	12 0
Сталь (нержавеющая, тип 304)	17 2
Тефлон	99
Олово	13 0
Титан	6 5
Вольфрам	4 5
Цинк	35 0

Теплоемкость и теплопроводность некоторых материалов (при 25°C)

Материал	Теплоемкость Дж/(кг · К)	Теплопроводность Вт/(м · К)	Плотность кг/м³
Воздух (1 атм)	995 8	0 012	1 2
Глинозем	795	6	4000
Алюминий	481	88-160	2700
Бакелит	1598	0 23	1300
Бронза	381	26-234	8500
Хром	460	91	—
Константан	397	22	8800
Медь	385	401	8900
Алмаз	—	99—232	—
Стеклянное волокно	795	0 002—0 4	60
Германий	—	60	—
Стекло (пирекс)	780	0 1	2200
Стекло нормальное	—	1 9—3 4	—
Золото	130	296	19300
Графит	—	112—160	—
Железо	452	79	7800

Материал	Теплоемкость Дж/(кг · К)	Теплопроводность Вт/(м · К)	Плотность кг/м³
Свинец	130	35	11400
Манганин	410	21	8500
Ртуть	138	8 4	13500
Никель и его сплавы	443	6—50	8900
Нейлон	1700	0 12	1100
Платина	134	73	21400
Полиэфир	1172	0 57—0 73	1300
Полиуретановая пена	—	0 012	40
Кремний	668	83 7	2333
Силиконовое масло	1674	0 1	900
Серебро	238	419	10500
Нержавеющая сталь	460	14—36	8020
Пенопласт	1300	0 003—0 03	50
Тефлон (TFE)	998	0 4	2100
Олово	226	64	7300
Вольфрам	139	96 6	19000
Вода	4 184	0 6	1000
Цинк	389	115—125	7100

Коэффициенты теплового излучения некоторых материалов

Материал	$\varepsilon_т$
Абсолютно черное тело	1 00
Полость радиатора	0 99 1 00
Алюминий (анодированный)	0 70
Алюминий (оксидированный)	0 11
Алюминий (полированный)	0 05
Алюминий (с неровной поверхностью)	0 06-0 07
Асбест	0 96
Латунь (потускневшая)	0 61
Латунь (полированная)	0 05
Кирпич	0 90
Бронза (полированная)	0 10
Углеродонаполненный латекс	0 96
Ламповая сажа	0 96
Хром (полированный)	0 10

Материал	$\varepsilon_т$
Медь (оксидированная)	0 6-0 7
Медь (полированная)	0 02
Хлопковая ткань	0 80
Эпоксидная смола	0 95
Стекло	0 95
Золото	0 02
Золото черное	0 98-0 99
Графит	0 7-0 8
Зеленые листья	0 88
Лед	0 96
Железо или сталь (ржавые)	0 70
Никель (оксидированный)	0 40
Никель (не оксидированный)	0 04
Нихром (80 Ni-20Cr) (оксидированный)	0 97

Материал	ε_T
Нихром (80Ni-20Cr) (полированный)	0.87
Масло	0.80
Кремний	0.64
Силиконовый каучук	0.94
Серебро (полированное)	0.02
Кожа (человеческая)	0.93-0.96
Снег	0.85
Почва	0.90

Материал	ε_T
Нержавеющая сталь	0.20
Сталь (гладко обработанная поверхность)	0.95-098
Сталь (шлифованная)	0.56
Оловянная пластина	0.10
Вода	0.96
Белая бумага	0.92
Шерсть	0.93
Цинк (полированный)	0.04

Коэффициенты преломления некоторых материалов для видимого света и ИК

Материал	n	Длина волны, мкм	Примечания
Вакуум	1		—
Воздух	1.00029		—
Акрилат	1.5	0.41	—
AMTIR–($Ge_{33}As_{12}Se_{55}$)	2.6 2.5	1 10	Аморфное стекло*
AMTIR–3 ($Ge_{28}Sb_{12}Se_{60}$)	2.6	10	Аморфное стекло*
As_2S_3	2.4	8.0	Аморфное стекло*
CdTe	2.67	10.6	—
Выращенное стекло	1.52		—
Алмаз	2.42	0.54	Отличная теплопроводность
Расплавленный диоксид кремния (SiO_2)	1.46	35	—
Боросиликатное стекло	1.47	0.7	TEMPAX® Прозрачный: 0.3-2.7 мкм
GaAs	3.13	10.6	Лазерные окна
Германий	4.00	12.0	—
Самое тяжелое кремниевое стекло	1.89	—	—
Тяжелое кремниевое стекло	1.65	—	—
Irtran 2 (ZnS)	2.25	4.3	Окна в IR сенсорах
KBr	1.46	25.1	Гигроскопичен
KCl	1.36	23.0	Гигроскопичен
KRS-5	2.21	40.0	Токсичен
KRS-6	2.1	12	Токсичен
NaCl	1.6	10.6	Гигроскопичен, коррозийный
Полиэтилен	1.54	8.0	Дешевые IR окна / линзы

Материал	n	Длина волны, мкм	Примечания
Полистирол	1.55	—	—
Пирекс 7740	1.47	0.589	Хорошие термические и оптические свойства
Кварц	1.54	—	—
Сапфир (Al_2O_3)	1.76	0.576	Химически стойкий
Кремний	3.42	5.0	Окна в IR сенсорах
Бромид серебра (AgBr)	2.0	10.6	Коррозивен
Хлорид серебра (AgCl)	1.9	20.5	Коррозивен
Вода (20 °C)	1.33	—	—
ZnSe	2.4	10.6	IR окна, хрупкий

[a] Amorphous Materials, Inc., Garland, TX

[b] TEMPAX – зарегистрированная торговая марка Schott Glasswerke, Mainz, Germany

Параметры некоторых керамических материалов (в интервале температур 25–100 °C)

	Нитрид бериллия	Нитрид бора (BN)	Нитрид алюминия (Al N)	Карбид Кремния (SiC)	Кремний (Si)
Твердость по Кнупу, 10^3 кг/м^2	1000	280	1200	2800	—
Прочность на изгиб, 10^5 Н/м^2	1.7...2.4	0.8	4.9	4.4	—
Теплопроводность, Вт/(м·К)	250	60	170-200	70	150
Тепловое расширение, 10^{-6} K^{-1}	8.8	0.0	4.1	3.8	3.8
Электрическая прочность диэлектрика, кВ/мм	19.7	37.4	14.0	15.4	—
Диэлектрические потери 10^{-4} tg дельта при 1 МГц	4-7	4	5-10	500	—
Диэлектрическая постоянная, k при 10 МГц	7.0	4.0	8.8	40	—

Свойства стекол (британская система мер)

	Натриевое	Боросиликатное	Свинцовое	Алюмосиликатное	Расплавленный кремнезем
Модуль упругости 10^6 фунт/дюйм^2	10.2	9.0	8.5-9.0	12.5-12.7	10.5
Температура размягчения °F	1285	1510	932-1160	1666-1679	2876
Коэффициент термического расширения 10^{-6} дюйм/дюйм · °C	8.5-9.4	3.2-3.4	9-12.6	4.1-4.7	0.56
Теплопроводность БТЕ · дюйм/(час · фут^2 · °F)	7.0	7.8	5.2	9.0	9.3
Плотность фунт/дюйм^3	0.089	0.081	0.103-0.126	0.091-0.095	0.079
Удельное сопротивление log10 ом · см	12.4	14	17	17	17
Коэффициент преломления	1.525	1.473	1.540-1.560	1.530-1.547	1.459

-196972-

Заявки на книги присылайте по адресу:
125319 Москва, а/я 594
Издательство «Техносфера»
e-mail: knigi@technosphera.ru
sales@technosphera.ru
факс: (095) 956 33 46

В заявке обязательно указывайте
свой почтовый адрес!

Подробная информация о книгах на сайте
http://www.technosphera.ru

Дж. Фрайден
Современные датчики. Справочник

Компьютерная верстка – Г. В. Зайцева
Дизайн книжных серий – С. Ю. Биричев
Ответственный за выпуск – Л. Ф. Соловейчик

Формат 70×100/16. Печать офсетная.
Гарнитура «Ньютон».
Печ. л. 37. Тираж 3000 экз. Заказ № 1001.
Бумага офсет. № 1, плотность 65г/м^2

Издательство «Техносфера»
Москва, Лубянский проезд, дом 27/1

Диапозитивы изготовлены ООО «Европолиграфик»
Отпечатано в ФГУП «Издательство «Самарский Дом печати»,
443080 г. Самара, пр. К. Маркса, 201