



---

# О г л а в л е н и е

От авторов .....12

## Часть первая. КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

1.1. Основные понятия о строении вещества .....	14
1.2. Структура атома .....	14
1.3. Электроны и электрический ток .....	15
1.4. Движение электрона в электрическом поле .....	16
1.5. Движение электрона в магнитном поле .....	17
1.6. Структура вещества .....	18
1.7. Примесные полупроводники .....	19
1.8. <i>p-n</i> -переход .....	21
1.9. Резисторы .....	22
1.10. Переменные резисторы .....	24
1.11. Цветовое кодирование резисторов и конденсаторов .....	24
1.12. Цветовое и буквенное кодирование резисторов и конденсаторов (стандарт BS 1852) .....	26
1.13. Конденсаторы .....	27
1.14. Катушки индуктивности .....	29
1.15. Трансформаторы .....	30
1.16. Полупроводниковые приборы .....	33
1.17. Полупроводниковые диоды .....	33
1.18. Стабилитрон .....	34
1.19. Варикап .....	35
1.20. Туннельный диод .....	36
1.21. Биполярный транзистор .....	36
1.21.1. Усилитель с общей базой .....	37
1.21.2. Усилитель с общим эмиттером .....	38
1.22. Полевые транзисторы .....	39
1.23. Транзистор с одним <i>p-n</i> -переходом .....	43
1.24. Кремниевый управляемый вентиль и семейство тиристоров ..	43
1.25. Обозначения параметров биполярных транзисторов .....	45
1.26. Обозначения параметров однопереходных транзисторов ..	48
1.27. Обозначения параметров полевых транзисторов .....	48
1.28. Обобщенные сведения о транзисторах и диодах .....	50
1.28.1. Биполярные транзисторы .....	51
1.28.2. Полевые транзисторы .....	59
1.28.3. Мощные МОП-транзисторы (ДМОП и ВМОП) .....	61
1.28.4. Однопереходные транзисторы .....	61
1.28.5. Двухнаправленные тиристоры (симисторы) .....	61
1.28.6. Корпуса и цоколевка транзисторов и тиристоров ..	62
1.28.7. Выпрямительные мосты .....	64
1.28.8. Стабилитроны .....	65
1.28.9. Стабилизаторы напряжения .....	65
Параметры стабилизаторов напряжения .....	65
Корпуса и цоколевка стабилизаторов напряжения .....	66
1.28.10. Диоды .....	67
Выпрямительные диоды .....	67

Диоды общего назначения .....	68
1.29. Логические элементы — терминология .....	69
1.30. Символьные обозначения и таблицы истинности основных логических элементов .....	70
1.31. Терминология и символьные обозначения логических микросхем средней степени интеграции .....	72
1.32. Интегральные схемы (серия 74) .....	75
1.32.1. Классификация по номерам приборов .....	75
1.32.2. Классификация по функциональному назначению ...	81
1.33. Цоколевка микросхем серии 74 .....	88
1.34. КМОП интегральные схемы (серия 4000) .....	105
1.34.1. Классификация по номерам приборов .....	105
1.34.2. Классификация по функциональному назначению .....	109
1.35. Цоколевка микросхем серии 4000 .....	112
1.36. Символы параметров логических схем .....	122
1.37. Параметры операционных усилителей .....	124
1.37.1. Операционные усилители на биполярных транзисторах .....	124
1.37.2. Операционные усилители на полевых транзисторах и на комбинациях биполярных и полевых транзисторах .....	127
1.38. Тороидальные ферритовые и порошковые сердечники .....	129
1.38.1. Материалы для сердечников .....	129
Порошковое железо .....	129
Ферритовые материалы .....	130
1.38.2. Формулы и таблицы для расчетов .....	130
1.39. Система обозначений полупроводниковых приборов и материалов «Pro Electron» .....	137

## Часть вторая. СХЕМЫ И СИСТЕМЫ

2.1. Мостовая схема Уитстона .....	140
2.2. Высокочастотные мосты .....	140
2.2.1. Мост Максвелла .....	141
2.2.2. Мост Хэя .....	142
2.2.3. Мост Шеринга .....	143
2.3. Усилители электрических сигналов .....	143
2.4. Основные принципы построения усилителей .....	144
2.4.1. Период и частота .....	144
2.4.2. Коэффициент гармоник .....	144
2.4.3. Ряд Фурье .....	145
2.4.4. Коэффициент усиления .....	147
2.4.5. Ширина полосы пропускания .....	148
2.5. Основные схемы транзисторных усилителей .....	149
2.6. Усилитель с общим эмиттером .....	149
2.7. Усилитель с общим коллектором (эмиттерный повторитель) .....	153
2.8. Усилитель с общей базой .....	154
2.9. Многокаскадные усилители .....	156
2.10. Отрицательная обратная связь .....	158

2.11. Усилители звуковой частоты .....	159
2.12. Усилители мощности .....	161
2.12.1. Усилители класса А .....	161
2.12.2. Усилители класса В .....	162
2.12.3. Усилители класса АВ .....	163
2.12.4. Усилители класса С .....	163
2.12.5. Усилители классов D и E .....	164
2.13. Классификация усилителей по параметрам .....	164
2.13.1. Малосигнальный усилитель .....	165
2.13.2. Высокочастотный усилитель мощности .....	165
2.13.3. Основные параметры ВЧ-усилителей .....	166
2.14. Видеоусилители .....	170
2.15. Частотно-избирательные усилители .....	171
2.16. Измерение интермодуляционных искажений .....	175
2.17. Усилители на интегральных схемах .....	177
2.18. Усилители постоянного тока .....	178
2.18.1. Основные принципы .....	178
2.18.2. Дифференциальный усилитель .....	179
2.18.3. Усилитель постоянного тока с прерывателем .....	181
2.19. Интегральные операционные усилители и схемы на их основе .....	182
2.19.1. Инвертирующий усилитель (инвертор) .....	184
2.19.2. Сумматор .....	185
2.19.3. Повторитель напряжения .....	186
2.19.4. Неинвертирующий усилитель .....	186
2.19.5. Дифференциальный усилитель .....	188
2.19.6. Интегратор .....	189
2.19.7. Дифференциатор .....	190
2.19.8. Фильтры .....	192
2.19.9. Триггер Шмитта .....	194
2.19.10. Повторитель напряжения/инвертор .....	195
2.19.11. Преобразование ток/напряжение .....	196
2.19.12. Схема с линейно изменяющимся выходным сигналом .....	197
2.19.13. Схема выделения максимальных значений .....	198
2.20. Монолитные СВЧ интегральные микросхемы .....	199
2.21. Шумовые параметры усилителей .....	200
2.21.1. Отношение сигнал/шум .....	200
2.21.2. Шум-фактор, коэффициент шума и шумовая температура .....	200
2.21.3. Шум в каскадных усилителях .....	201
2.22. Генераторы .....	202
2.23. Индуктивно-емкостные контуры .....	202
2.24. Генератор Колпитца .....	204
2.25. Генератор Хартли .....	205
2.26. Генераторы с фазовым сдвигом .....	206
2.27. Генератор с трехкаскадным RC-фильтром .....	206
2.28. Генератор на основе моста Вина .....	207
2.29. Кварцевые генераторы .....	209
2.30. Кварцевый генератор, работающий на обертонах .....	210
2.31. Генераторы прямоугольных импульсов .....	211

2.32. Мультивибратор .....	212
2.33. Ждущий мультивибратор (одновибратор) .....	214
2.33.1. Устойчивое состояние .....	217
2.33.2. Переходное состояние .....	218
2.33.3. Квазиустойчивое состояние .....	218
2.33.4. Период релаксации .....	219
2.34. Генератор прямоугольных импульсов на операционном усилителе .....	220
2.35. Блокинг-генератор .....	221
2.36. Генераторы прямоугольных импульсов на цифровых интегральных схемах .....	221
2.37. Цифровые схемы .....	223
2.38. Основные логические элементы .....	223
2.38.1. Логический элемент И .....	223
2.38.2. Логический элемент ИЛИ .....	224
2.38.3. Логический элемент НЕ (инвертор) .....	225
2.38.4. Логические элементы И-НЕ и ИЛИ-НЕ .....	225
2.38.5. Логический элемент Исключающее ИЛИ .....	226
2.39. Положительная и отрицательная логика .....	226
2.40. Комбинационная логика .....	227
2.41. Булева алгебра .....	229
2.42. Карты Карно .....	232
2.43. Триггеры .....	234
2.43.1. RS-триггер .....	234
2.43.2. D-триггер .....	235
2.43.3. JK-триггер .....	236
2.44. Таймеры и схемы с одним устойчивым состоянием .....	236
2.45. Логика, управляемая предшествующими событиями .....	238
2.46. Арифметические и вычислительные схемы .....	241
2.47. Шифраторы и дешифраторы .....	244
2.48. Счетчики .....	244
2.49. Синхронные счетчики .....	246
2.50. Счетчики для двоичных сигналов .....	246
2.51. Арифметические устройства .....	247
2.52. Сдвиговый регистр .....	249
2.53. Практические рекомендации .....	250
2.54. Транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ) .....	252
2.55. Логические схемы на КМОП-транзисторах .....	254
2.56. Эмиттерно-связанная логика (ЭСЛ) .....	256
2.57. Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) .....	257
2.58. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) .....	258
2.59. Оптоэлектроника .....	259
2.60. Датчики (сенсоры) .....	260
2.60.1. Фоторезистивный элемент (фоторезистор) .....	260
2.60.2. Фотогальванический элемент .....	260
2.60.3. Фотодиод .....	261
2.60.4. Фототранзистор .....	262
2.60.5. Другие приборы .....	262
2.60.6. Сравнительные характеристики светочувствительных приборов .....	263
2.61. Светоизлучающие диоды (светодиоды) .....	263

2.62. Инжекционный лазер	265
2.63. Лампы накаливания	266
2.64. Неоновые лампы	267
2.65. Жидкокристаллические дисплеи	267
2.66. Лазеры	269
2.67. Классификация лазеров	272
2.68. Применение фотоэлементов	273
2.69. Оптическая изоляция	275
2.70. Цифровые индикаторы	276
2.71. Пульты дистанционного управления	278
2.72. Оптоволоконная связь	279
2.73. Представление величин в децибелах	282
2.73.1. Сравнение одноименных параметров	282
2.73.2. Специальные системы представления в децибелах	283
2.74. Фильтры	283
2.74.1. Узкополосный режекторный фильтр (фильтр-пробка)	283
2.74.2. Двойные Т-образные схемы узкополосных режекторных фильтров (фильтров-пробок)	285
2.74.3. Активный двойной Т-образный фильтр-пробка	287
2.74.4. Схемы регулируемых мостовых Т-образных фильтров	289
2.74.5. Гираторы	290
2.74.6. Предостережение	291
2.75. Индуктивно-емкостные высокочастотные фильтры	292
2.75.1. Принципы построения фильтров	293
2.75.2. Фильтры нижних частот	293
2.75.3. Фильтры верхних частот	295

## Часть третья. СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

3.1. Аббревиатуры и символы	298
3.2. Единицы измерения физических величин и их обозначения	305
3.3. Физические величины, используемые в электронике	312
3.4. Фундаментальные постоянные (основные константы)	313
3.5. Соотношения между единицами электрических величин	313
3.6. Размерности физических величин	314
3.7. Основные величины системы СИ	315
3.8. Единицы физических величин	315
3.9. Греческий алфавит	317
3.10. Преобразование кратных и дольных единиц	318
3.11. Коэффициенты преобразования единиц измерения физических величин	319
3.12. Доли дюйма и их метрические эквиваленты	325
3.13. Таблица соответствия кодов (часть первая)	327
3.14. Таблица соответствия кодов (часть вторая)	330
3.15. Управляющие символы ASCII	334
3.16. Полезные формулы	336
3.16.1. Законы Булевой алгебры	336
3.16.2. Емкость	336
3.16.3. Волновое сопротивление	337

3.16.4. Эквивалентное сопротивление	337
3.16.5. Частота — длина волны — скорость	337
3.16.6. Дальность радиогоризонта	338
3.16.7. Импеданс (полное сопротивление)	338
3.16.8. Индуктивность	338
3.16.9. Расширение пределов шкалы измерения	339
Увеличение пределов шкалы измерения амперметра или миллиамперметра	339
Увеличение пределов шкалы измерения вольтметра	339
3.16.10. Отрицательная обратная связь	339
3.16.11. Закон Ома	340
3.16.12. Мощность	340
3.16.13. Отношение мощностей сигналов	340
3.16.14. Добротность	340
3.16.15. Реактивное сопротивление	340
3.16.16. Сопротивление	341
3.16.17. Резонанс	341
3.16.18. Постоянная времени	341
3.16.19. Коэффициент трансформации трансформатора	342
3.16.20. Номинальная мощность	342
3.16.21. Длина волны резонансного контура	342
3.17. Десятичные множители и приставки	343
3.18. Реактивное сопротивление емкости	343
3.19. Реактивное сопротивление индуктивности	344
3.20. Постоянные времени $RC$	345
3.21. Постоянные времени $R/L$	347
3.22. Символьные обозначения компонентов в соответствии со стандартом BS 3939	349
3.22.1. Базовые символы	349
3.22.2. Обозначения переключателей и контактов	350
3.22.3. Обозначения полупроводниковых приборов	355
3.22.4. Обозначения звуковых электронных приборов	356
3.23. Символы, используемые в радиосвязи	357
3.24. Символы логических элементов	359
3.25. Символы, используемые в принципиальных схемах (блок-схемах, структурных схемах)	361
3.26. Символы, используемые для частотных спектров	363
3.27. Символы, используемые для маркировки оборудования (стандарт BS 6217)	364
3.28. Таблица децибел	372
3.29. Таблица пересчета степеней числа 2 в децибелы	373
3.30. Разъемы и соединения	374
3.30.1. Обмен данными при помощи модемов	374
3.30.2. Номера выводов разъема модема	376
3.30.3. Автоматический вызов	377
3.31. EIA 232	378
3.32. EIA 449	379
3.33. Сравнение стандартов EIA 232, EIA 449 и V 24	381
3.34. Интерфейс «Центроникс»	383
3.35. Разъемы для звуковой аппаратуры	384

3.36. Коаксиальные разъемы .....	385
3.37. Разъемы для видеомагнитофонов, телеаппаратуры, теле/видеокамер .....	386
3.38. Разъем SCART (стандарт BS 6552) .....	388
3.39. Номинальные напряжения низковольтных сетей .....	389
3.39.1. Европа .....	389
3.39.2. Азия .....	389
3.39.3. Северная Америка .....	390
3.39.4. Острова Вест-Индии .....	390
3.39.5. Южная Америка .....	391
3.39.6. Африка .....	391
3.39.7. Океания .....	392
3.40. Высокочастотные кабели серии RG (США) .....	393
3.41. Высокочастотные кабели серии UR (Великобритания) .....	395
3.42. Батареи и аккумуляторы .....	396

#### Часть четвертая. СЛОВАРИ

4.1. Толковый словарь терминов .....	400
4.2. Краткий англо-русский словарь терминов .....	455

<b>ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ .....</b>	<b>475</b>
-----------------------------------	------------



---

## О т а в т о р о в

У этой книги существует, если можно так сказать о книге, родословная. Представленное издание всего лишь второе, однако оно является компиляцией (сборное издание) двух справочников («Карманного справочника для радиоинженеров и инженеров электронной техники» и «Карманного справочника по электронике» издательства Newnes), которые выдержали более двадцати изданий. Самое первое издание «Карманного справочника для радиоинженеров и инженеров электронной техники» вышло в свет в 1940 году, и с тех пор перерабатывалось и видоизменялось вплоть до 18-го издания, опубликованного в 1989 году, прежде чем было принято в качестве основы для данной книги. У «Карманного справочника по электронике» похожая история, опубликованный впервые в 1963 году, до 1986 года он выдержал 5 изданий. Редакторы книги, которую вы держите сейчас в руках, выражают огромную благодарность всем редакторам и корректорам, которые работали над этими двумя книгами все эти годы.

Справочники по электронике, в основной массе, весьма своеобразны по своей сути; зачастую многие аспекты в них рассматриваются столь узко и подробно, что эти книги интересны лишь небольшому кругу специалистов. При работе над справочником у нас не было стремления заострить внимание на конкретных деталях, тем более что цена книги сравнительно невелика. Создавая ее, мы хотели удовлетворить запросы большинства людей, интересующихся электроникой и связанными с ней областями. При выборе того, что включить в книгу, а от чего отказаться, мы задавали себе вопрос: «Что мы обычно ищем в справочниках?» и старались включить в книгу всю важную информацию, относящуюся к электронике, — таблицы, коэффициенты преобразования, символы и т.п. Все то, что может быть вычислено с помощью компьютера или калькулятора, в книгу не вошло.

Мы надеемся, что сумели разместить требуемую информацию таким образом, чтобы доступ к ней был наиболее легким и при этом цена осталась доступной большинству желающих приобрести эту книгу.

*Кейт Бриндли, Джо Карр*

---

Часть первая

# Компоненты электронной техники

## 1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О СТРОЕНИИ ВЕЩЕСТВА

Весь окружающий нас мир состоит из молекул — наименьших частиц вещества, способных существовать независимо и обладающих всеми свойствами этого вещества. Исследования, проведенные Дальгоном (английский физик, создатель химического атомизма) и другими учеными в начале девятнадцатого века, показали, что молекулы состоят из групп атомов различных типов. Эти атомы относятся к основным элементам, из которых строится вещество. В природе существует более 100 элементов, от водорода (самого легкого из них) до урана (одного из самых тяжелых).

Например молекула поваренной соли состоит из одного атома натрия и одного атома хлора. Молекула сернистой меди состоит из одного атома меди, одного атома серы и четырех атомов кислорода.

Атомы слишком малы, чтобы их можно было наблюдать непосредственно под микроскопом, но их существование доказано с помощью экспериментов.

## 1.2. СТРУКТУРА АТОМА

Эффекты, возникающие при газовом разряде, навели на мысль, что атом не является неделимым, а состоит из еще меньших частиц. Эти частицы были названы элементарными, а атом представлен в виде небольшой солнечной системы с тяжелым ядром в центре, состоящим из положительно заряженных и нейтральных частиц. Они получили названия протонов и нейтронов. Вокруг этого ядра вращается скопление отрицательно заряженных частиц, именуемых электронами.

Поскольку атом электрически нейтрален, отрицательный заряд, соответствующий заряду электронов, должен быть равен по величине (но противоположен по знаку) положительному заряду, соответствующему заряду протонов. Эксперименты, проводимые с электростатическими зарядами, показали, что разноименные заряды притягиваются, исходя из чего можно утверждать, что частицы, входящие в атом, удерживаются электростатическими силами.

Следовательно, отличия между разными атомами обусловлены их составом (структурой). Атом водорода состоит из одного положительно заряженного протона и одного отрицательно заряженного электрона; атом гелия содержит два протона, два нейтральных нейтрона и два электрона (**Рис. 1.1**).

Работы Бора и других физиков, проведенные в начале двадцатого столетия, показали, что орбиты электронов располагаются в оболочках, и каждой из них соответствует определенное максимальное число электронов. Первая оболочка может содержать два электрона, вторая — восемь электронов. В общем

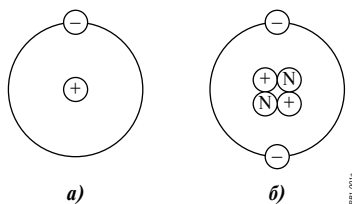


Рис. 1.1. Структура атома: а — атом водорода; б — атом гелия

случае количество электронов в каждой оболочке определяется выражением:

$$2n^2, \text{ где } n = 1, 2, 3 \text{ и т.д.}$$

Все химические реакции и электрические эффекты связаны с поведением электронов во внешней оболочке каждого отдельного атома. Например, если оболочка заполнена полностью, атом не способен вступать в реакцию с любым другим атомом и вместе с такими же атомами образует инертный газ (гелий, аргон).

### 1.3. ЭЛЕКТРОНЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Если последняя оболочка заполнена не полностью, силы, связывающие электроны с ядром, слабы. При тепловом воздействии эти электроны легко отрываются, в результате чего образуется положительно заряженный атом — ион. Свободные электроны перемещаются внутри вещества до тех пор, пока не встретятся с другим ионом, которым и будут захвачены. Процесс генерации свободных электронов и их повторного захвата является непрерывным, и поэтому можно представить, что такое вещество как бы пропитано отрицательно заряженным газом.

Если теперь к противоположным концам тела, состоящего из этого вещества, приложить разнополярные электрические потенциалы, свободные электроны начнут ускоренно двигаться к контакту, потенциал которого является положительным. Во время движения они будут сталкиваться с атомами, из которых состоит вещество, выделяя энергию, воспринимаемую нами как тепло. В результате электроны дрейфуют к положительному контакту с приблизительно постоянной скоростью. Такое движение электронов создает электрический ток.

В то время как электроны поглощаются положительным контактом источника напряжения, отрицательный контакт электроны испускает. Разность потенциалов может рассматриваться в виде некоего электронного «насоса».

С помощью такой модели можно объяснить многие наблюдаемые эффекты. При увеличении разности потенциалов сред-

няя скорость движения электронов возрастает, следовательно, электрический ток пропорционально увеличивается. При столкновении электронов с атомами последним передается энергия, которая выделяется в виде тепла. Этот эффект известен как нагрев электрическим током или тепловое действие тока.

Материалы, в которых происходят такие эффекты, носят название омических проводников (по имени Ома — автора одноименного закона). Закон утверждает, что для омических проводников:

$$\frac{V}{I} = \text{const.}$$

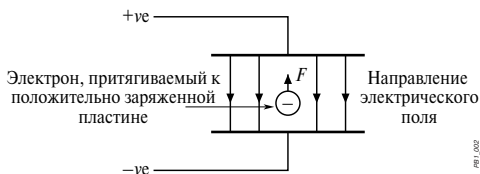
Константа в этом выражении — электрическое сопротивление материала, обозначаемое символом  $R$ . Если напряжение  $V$  выражено в вольтах, а ток  $I$  — в амперах, то сопротивление  $R$  выражается в омах.

Электрическое сопротивление бывает не только омическим; из-за нагрева и некоторых других эффектов отношение  $V/I$  у ряда материалов принимает комплексную форму. (Различают активное (омическое) сопротивление, реактивное (емкостное и индуктивное) сопротивление и комплексное (векторная сумма активной и реактивной составляющих) — *прим. редактора*).

Если связи между электронами на внешней орбите достаточно сильны, образуется лишь небольшое количество свободных электронов. При появлении разности потенциалов только эти электроны приходят в движение, и, следовательно, ток будет невелик. Вещества с такими характеристиками называют диэлектриками.

#### 1.4. ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

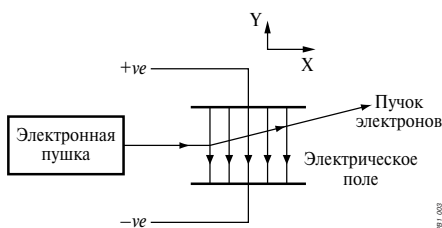
Если между двумя пластинами в вакууме существует разность потенциалов, то на электрон, оказавшийся между ними, будет действовать сила притяжения, направленная к пластине, потенциал которой положителен (**Рис. 1.2**).



**Рис. 1.2.** Электрическое поле между параллельными пластинами

Эта сила заставит электрон двигаться по прямой с ускорением, совпадающим с направлением силы притяжения. При этом электрон не будет испытывать столкновений, так как пластины находятся в вакууме. Этот эффект используют в вакуумных электронных лампах.

Интересный эффект возникает в случае, когда движущийся электрон попадает в электрическое поле, вектор которого перпендикулярен направлению движения электрона. В системе, показанной на **Рис. 1.3**, пучок электронов испускается прибором, называемым электронной пушкой. Электроны движутся вдоль оси  $X$  и проходят между двумя пластинами, находящимися под разноименными потенциалами, в свою очередь, создающими электрическое поле, вектор которого направлен по оси  $Y$ .



**Рис. 1.3.** Отклонение пучка электронов в электрическом поле

Попадая в электрическое поле, электроны получают ускорение в направлении  $Y$ , о чем говорилось ранее, но их скорость в направлении  $X$  остается неизменной. В результате, как показано на рисунке, электронный пучок отклоняется от первоначального направления движения. Изменяя разность потенциалов на пластинах, можно управлять углом отклонения. Используя этот эффект, была создана электронно-лучевая трубка.

## 1.5. ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Эксперименты показали, что магнитное поле приводит к появлению силы, действующей на провода, по которым течет ток. Подобный эффект можно ожидать и в случае движущегося электрона, который также представляет собой электрический ток.

Направление действия этой силы определяется при помощи правила левой руки. Сила воздействует на электрон при его движении перпендикулярно направлению вектора магнитного поля. Эта сила направлена под прямым углом и к вектору магнитного поля, и к направлению движения электрона. Следовательно, при движении параллельно направлению магнитного поля электрон не испытывает воздействия этой силы.

Существует одно важное отличие между движением электрона в магнитном поле и в электрическом поле. В электрическом поле направление действия силы неизменно, тогда как в магнитном поле сила всегда направлена под прямым углом к направлению движения электрона (Рис. 1.4).

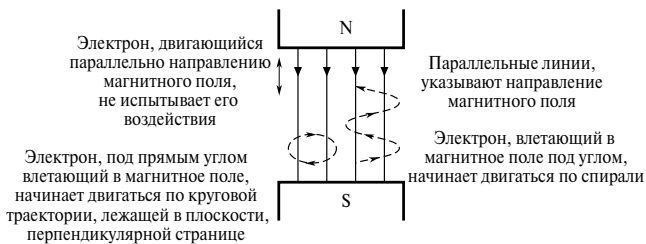


Рис. 1.4. Движение электронов в магнитном поле

Следовательно, электрон, попавший в магнитное поле соответствующего направления, будет двигаться по спирали вдоль направления вектора магнитного поля. Этот эффект используется в катушках магнитной фокусировки в телевизионной трубке.

## 1.6. СТРУКТУРА ВЕЩЕСТВА

Вещество может существовать в трех фазах: твердой, жидкой и газообразной. В жидкой и газообразной фазах молекулы вещества могут свободно двигаться, в твердой же фазе положение молекул фиксированно, и они могут лишь совершать колебания около своего среднего положения. Колебания молекул воспринимаются нами как выделение тепла.

У некоторых соединений и элементов наблюдается кристаллическая структура (в качестве простых примеров можно привести поваренную соль и сульфат меди). Кристаллы образуются в результате объединения атомов в определенную геометрическую структуру, которая сохраняется во всем объеме кристалла.

На Рис. 1.5 изображена кристаллическая структура германия, симметричное строение которой очевидно.

Огромное количество электронных приборов появилось благодаря проводимости электрического тока твердым телом. Способность вещества проводить электрический ток зависит от его способности генерировать свободные электроны, о чем уже говорилось ранее.

Такие элементы, как кремний и германий, имеют на своей внешней орбите четыре электрона. Благодаря этому кристаллическая решетка этих элементов представляет собой плотную упакованную структуру типа кристаллической решетки ал-

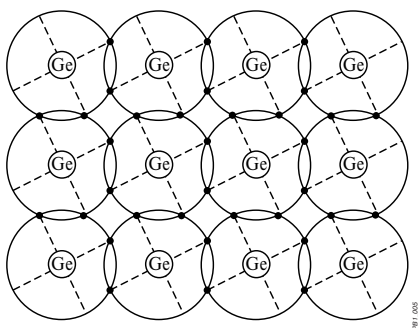


Рис. 1.5. Модель кристалла германия

маза. Из-за сильной связи электронов кристаллический кремний и германий в чистом виде обладают хорошо выраженными диэлектрическими свойствами.

## 1.7. ПРИМЕСНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

В чистом виде кремний и германий обладают свойствами диэлектриков, однако их проводимость коренным образом меняется при добавлении небольшого количества примесей.

Показанная на Рис. 1.6 структура представляет собой модель кристаллической решетки германия, в которой один из атомов германия замещен атомом мышьяка. Его называют атомом примеси. На внешней орбите мышьяка пять электронов, поэтому, хотя атом мышьяка и «встанет» в кристалл, один электрон останется свободным.

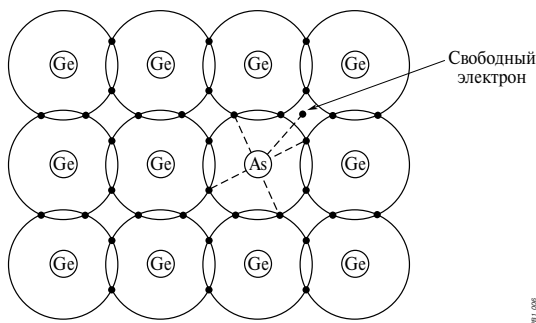


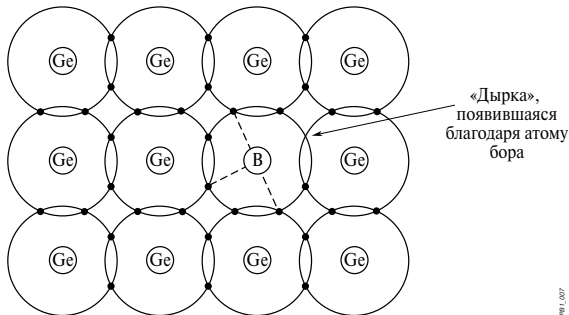
Рис. 1.6. Модель полупроводника n-типа



Этот избыточный электрон очень подвижен и легко может стать носителем тока при появлении разности потенциалов. Контролировать количество свободных электронов можно, изменяя количество вносимой в полупроводник примеси. Примеси, при добавлении которых к полупроводнику образуются свободные электроны, называются донорами, а сами полупроводники, в которые добавлена примесь, — примесными полупроводниками.

Проводимость в полупроводнике с донорной примесью создается свободными электронами, и такой полупроводник называют полупроводником *n*-типа (*n* происходит от английского *negative* — «отрицательный»).

При введении в кристаллическую решетку полупроводника атома примеси, на внешней оболочке которого находятся три электрона (например, бор, индий), наблюдается сходный эффект. На **Рис. 1.7** показана такая структура. Отсутствие электрона приводит к образованию «дырки» в кристалле, что равносильно появлению положительного заряда. Если к такому полупроводнику приложить напряжение, электроны начнут двигаться к положительному контакту, а дырки, очевидно, — в обратном направлении. Двигающиеся дырки принято рассматривать как положительно заряженные носители тока. Такие полупроводники называют полупроводниками *p*-типа (*p* означает «положительный»), а примеси — акцепторами.

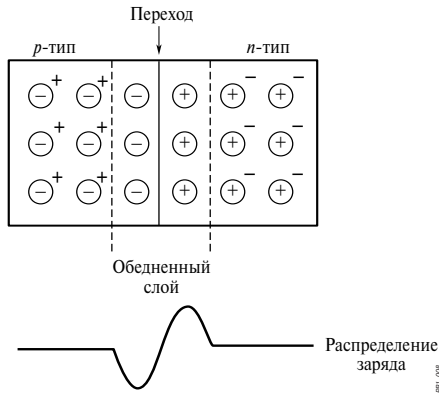


**Рис. 1.7.** Модель полупроводника *p*-типа

Наряду с носителями заряда, образованными при добавлении примесей в полупроводник, существуют также носители заряда, образующиеся в результате обычного теплового воздействия, приводящего к появлению свободных электронов. Очевидно, что такие носители заряда существуют как комплементарные (взаимно уравновешивающие) электроны/дырки, которые называют неосновными носителями. Носители же, появившиеся в результате добавления примесей, называют основными носителями.

1.8. *p-n-ПЕРЕХОД*

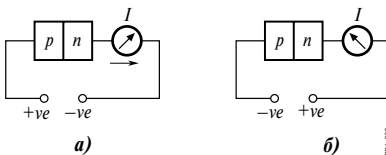
Одна половина структуры, показанной на **Рис. 1.8**, легирована примесью *n*-типа, другая — примесью *p*-типа. На границе перехода дырки устремляются в слой *n*-типа, а электроны — в слой *p*-типа до тех пор, пока не установится равновесие и не образуется область без свободных носителей. Эта область называется обедненным слоем и, при отсутствии носителей заряда, обладает свойствами диэлектриков.



**Рис. 1.8.** *p-n-переход*

Нарастание заряда в обедненном слое — это внутренний эффект, т.е. изменение разности потенциалов на концах *p-n*-перехода не наблюдается. Однако если к *p*-слою приложить положительный потенциал, а к *n*-слою — отрицательный, как показано на **Рис. 1.9а**, то дырки устремятся через переход из *p*-слоя в *n*-слой, а электроны — из *n*-слоя в *p*-слой. Возникнет ток, и прибор заработает.

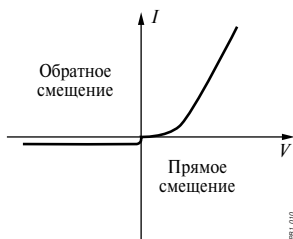
Если к *p*-слою приложить отрицательный потенциал, а к *n*-слою — положительный, как показано на **Рис. 1.9б**, некоторые электроны и дырки переместятся, и основным эффектом будет увеличение обедненного слоя. После кратковременного



**Рис. 1.9.** *p-n-переход* в качестве выпрямителя: а — прямое смещение; б — обратное смещение.

протекания тока (эквивалентного зарядке конденсатора небольшой емкости), прибор перестанет проводить ток. На самом деле небольшой ток, вызванный неосновными носителями, все-таки будет протекать. Обычно его в расчет не принимают.

Таким образом, вольт-амперная характеристика  $p$ - $n$ -перехода имеет ярко выраженную нелинейную форму, что можно увидеть на **Рис. 1.10**. Из рисунка следует, что, для того чтобы переход открылся (через него стал протекать ток), требуется небольшое напряжение, приложенное к переходу в прямом направлении. Оно необходимо для того, чтобы носители смогли преодолеть потенциальный барьер в обедненном слое, составляющий около 0.2 В для германия и 0.7 В для кремния.



**Рис. 1.10.** Типичная вольт-амперная характеристика  $p$ - $n$ -перехода

Сам по себе  $p$ - $n$ -переход — это прекрасный выпрямитель, но, помимо этого, он является основным элементом более сложных полупроводниковых приборов, которые будут рассмотрены позже.

## 1.9. РЕЗИСТОРЫ

Наверное, резисторы — это самые широко используемые компоненты электронных схем. В соответствии с законом Ома их сопротивление можно записать как:

$$\text{Сопротивление [Ом]} = \frac{\text{напряжение [В]}}{\text{ток [А]}} .$$

Номиналы резисторов, выпускаемых в настоящее время, лежат в диапазоне от долей ома до десятков мегаом. При протекании тока через резистор мощность выделяется в форме тепла и равна  $I^2 R$  ватт. Температура резистора возрастает до тех пор, пока излученное тепло не станет равным теплу, поглощенному окружающей средой. Возрастание температуры определяется максимальной мощностью, которая может быть рассеяна резистором.

Самый простой и самый дешевый резистор — угольный. Он состоит из небольшого угольного стержня с заданным сопротив-

лением. Обычно угольный стержень помещается в защитный корпус с контактами в виде осевых выводов. Сопротивление угольных резисторов лежит в пределах от нескольких Ом до 1 МОм, а мощность — от 0.125 до 2 Вт.

Сопротивление резистора изменяется с изменением температуры и может быть определено по формуле:

$$R_t = R_{20} (1 + \alpha t),$$

где  $R_{20}$  — сопротивление резистора при температуре 20°C,  $\alpha$  — температурный коэффициент (обычно 0.01% на градус Цельсия).

Угольные резисторы имеют большой отрицательный температурный коэффициент, вследствие чего они не пригодны для применения в устройствах, где требуется высокая точность.

Более высокая температурная устойчивость достигается при альтернативной конструкции угольных резисторов. На диэлектрическую подложку, чаще всего стеклянную, наносится тонкая угольная пленка. Величина сопротивления задается при помощи спиральных вырезов, формируемых вдоль тела резистора (такие резисторы называют тонкопленочными). Надежный контроль над производством позволяет использовать их в устройствах, требующих большой точности. Похожие методы создания резисторов применяются и для других резистивных материалов, таких как тугоплавкие металлы и оксиды металлов.

Для устройств, где требуется высокий показатель рассеиваемой мощности, используют проволочные резисторы. Они состоят из тонкой проволоки необходимой длины, намотанной на основание, а затем покрытой защитной стекловидной эмалью. При такой конструкции резистору неизбежно будет свойственна высокая индуктивность. Она может быть уменьшена при использовании неиндуктивных бифилярных (т.е. скрученных в виде двойной спирали) намоток, но полностью устранить ее не удастся. При установке на печатные платы резисторов большой мощности необходимо принимать меры предосторожности: обдувать потоком воздуха для охлаждения и предохранять соседние компоненты схемы от воздействия достаточно высоких температур.

Резисторам присуще свойство генерировать достаточно большой шум; неупорядоченное движение электронов в резисторах приводит к небольшим изменениям напряжения, которые проявляются как высокочастотное «шипение» в звуковых системах или как дрожание (размывание контура) видеосигнала. Амплитуда шумового сигнала зависит от температуры, напряжения и тока, а также от конструкции резистора. Для применения в устройствах с низким уровнем шума лучше всего подходят металлопленочные резисторы. Для резистора такого типа с сопротивлением 10 кОм типичное значение шума составляет 0.5 мкВ/В.

Для маркировки резисторов используют либо цветовой код, отображающий величину сопротивления и допустимое отклонение, либо кодировку в соответствии со стандартом BS 1852. В таблице раздела 1.11 приведена расшифровка цветового кодирования резисторов и конденсаторов, а маркировка по стандарту BS 1852 приведена в таблице раздела 1.12.

## 1.10. ПЕРЕМЕННЫЕ РЕЗИСТОРЫ

Производство переменных резисторов сходно с производством резисторов с постоянным сопротивлением. В резисторах небольшой мощности используется угольная дорожка, по которой передвигается ползунок.

Резисторы, рассчитанные на высокую мощность, обычно делают проволочными. Резисторам обоих типов присущи свои недостатки: у угольных — это разрушение дорожек вследствие их загрязнения, у проволочных — для обеспечения достаточной точности необходимо большое количество витков.

Дорожки формируют на подложке из так называемой металлокерамики, промышленное использование которой непрерывно растет, поскольку ее превосходные характеристики подходят для производства и угольных, и проволочных резисторов.

Существуют линейные, логарифмические и антилогарифмические переменные резисторы. Связь между положением ползунка и значением сопротивления у линейных резисторов линейна. Соответственно у логарифмических и антилогарифмических переменных резисторов эта связь логарифмическая, что позволяет использовать их, например, в аудиоаппаратуре в качестве регуляторов громкости и баланса (это помогает компенсировать специфическую характеристику восприятия звуков человеческим ухом).

## 1.11. ЦВЕТОВОЕ КОДИРОВАНИЕ РЕЗИСТОРОВ И КОНДЕНСАТОРОВ

Цвет	Полоса А	Полоса В	Полоса С (множитель)		Полоса D (допустимое отклонение)			Полоса E	
			Резисторы	Конденсаторы	Резисторы	Конденсаторы (до 10 пФ) [пФ]	Конденсаторы (свыше 10 пФ) [пФ]	Тип резистора	Рабочее напряжение конденсатора (×100) [В]
Черный	—	0	1	1	—	2	±20%	—	—
Коричневый	1	1	10	10	±1%	0.1	±1%	—	100

(окончание)

Цвет	Полоса А	Полоса В	Полоса С (множитель)		Полоса D (допустимое отклонение)			Полоса E	
			Резисторы	Конденсаторы	Резисторы	Конденсаторы (до 10 пФ) [пФ]	Конденсаторы (свыше 10 пФ) [пФ]	Тип резистора	Рабочее напряжение конденсатора (×100) [В]
Красный	2	2	100	100	±2%	—	±2%	—	200
Оранжевый	3	3	1000	1000	—	—	±2.5%	—	300
Желтый	4	4	10000	10000	—	—	—	—	400
Зеленый	5	5	100000	—	—	0.5	±5%	—	500
Голубой	6	6	1000000	—	—	—	—	—	—
Фиолетовый	7	7	10000000	—	—	—	—	—	—
Серый	8	8	108	0.01 мкФ	—	0.25	—	—	—
Белый	9	9	109	0.1 мкФ	—	1	±10%	—	—
Серебристый	—	—	0.01	—	±10%	—	—	—	—
Золотистый	—	—	0.1	—	±5%	—	—	—	—
Розовый	—	—	—	—	—	—	—	Высоко-стабильные	—
Отсутствует	—	—	—	—	±20%	—	—	—	—

Следует иметь в виду, что соседние полосы одинакового цвета могут быть не разделены между собой.

### Рекомендуемые номиналы

#### Последовательность E12\*

1.0	1.2	1.5	1.8	2.2	2.7
3.3	3.9	4.7	5.6	6.8	8.2

#### Последовательность E24\*

1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6
1.8	2.0	2.2	2.4	2.7	3.0
3.3	3.6	3.9	4.3	4.7	5.1
5.6	6.2	6.8	7.5	8.2	9.1

\*Декады не показаны.

## 1.12. ЦВЕТОВОЕ И БУКВЕННОЕ КОДИРОВАНИЕ РЕЗИСТОРОВ И КОНДЕНСАТОРОВ (СТАНДАРТ BS 1852)

Номиналы резисторов обозначают следующим образом:

Номинал	Обозначение на корпусе
0.47 Ом	R47
1 Ом	1R0
4.7 Ом	4R7
47 Ом	47R
100 Ом	100R
1 кОм	1K0
10 кОм	10K
10 МОм	10M

Буквы, следующие за обозначением номинала, указывают допустимое отклонение:

F =  $\pm 1\%$ ; G =  $\pm 2\%$ ; J =  $\pm 5\%$ ; K =  $\pm 10\%$ ; M =  $\pm 20\%$ ;

Например, R33J = 0.33 Ом  $\pm 5\%$ ; 6K8K = 6.8 кОм  $\pm 10\%$ .

Номиналы конденсаторов обозначают следующим образом:

Номинал	Обозначение на корпусе
0.68 пФ	p68
6.8 пФ	6p8
1000 пФ	1n0
6.8 нФ	6n8
1000 нФ	1μ0
6.8 мкФ	6μ8

Допустимое отклонение обозначается буквами, как у резисторов. Величины до 999 пФ обозначаются в пикофарадах, от 1000 пФ (1 нФ) до 999000 пФ (999 нФ) — в нанофарадах, а от 1000 нФ (1 мкФ) и выше — в микрофарадах.

Некоторые конденсаторы маркируются с помощью кода, обозначающего номинал конденсатора в пФ (два первых знака), за которыми следует показатель степени десяти ( $3 = 10^3$ ). Буквы, обозначающие допустимое отклонение, такие же, как и для резисторов, за исключением C =  $\pm 0.25$  пФ. Например, 123J = 12 пФ  $\times 10^3 \pm 5\% = 12000$  пФ (или 0.012 мкФ).