



МИР электроники

М. ДЖОНС

Электроника – практический курс

Перевод с английского
Е. В. Воронова и А.Л. Ларина

Издание третье,
исправленное

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2021

УДК 621.38

ББК 32.85

Д40

Д40 Джонс М.Х.

Электроника – практический курс

Издание третье, исправленное

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 512 с. ISBN 978-5-94836-341-7

В книге – переводе последнего, третьего, английского издания – рассмотрены принципы построения базовых схем современной электроники, широкого спектра как аналоговых, так и цифровых устройств. Это учебное пособие для студентов средних и высших учебных заведений радиотехнических и электронных специальностей наверняка будет полезно широкому кругу радиолюбителей.

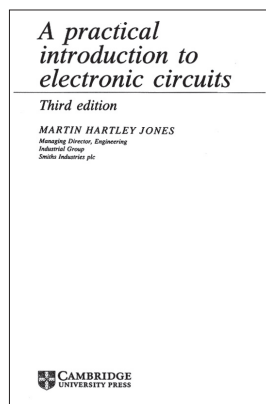
При переводе сохранены обозначения и терминология, отличные от принятых в отечественной литературе, что может быть полезно читателям при дальнейшем изучении технической литературы стран Запада.

Для элементов, используемых в рассматриваемых примерах, указаны отечественные аналоги.

Перевод выполнен доцентами кафедры радиотехники МФТИ.

УДК 621.38

ББК 32.85



© 1995, Cambridge University Press

© 1998, ЗАО «Предприятие Постмаркет», перевод на русский язык

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2021

ISBN 978-5-94836-341-7

ISBN 0 521 47879 0 (англ.)

Содержание

Предисловие издательства Cambridge University Press	17
Предисловие к третьему изданию	18
Глава 1. УСИЛЕНИЕ И ТРАНЗИСТОРЫ	19
1.1. Усиление	19
1.2. Транзистор как усиливающее устройство	20
1.3. Введение в твердотельную электронику	23
1.3.1. Вступление	23
1.3.2. Полупроводники	23
1.3.3. Электроны и дырки	24
1.3.4. Проводимость полупроводника с примесями	26
1.3.5. Основные и неосновные носители	27
1.3.6. Компенсация	28
1.3.7. p - n -переход	28
1.3.8. Смещенный p - n -переход	29
1.3.9. Лавинный пробой	31
1.3.10. Емкость перехода и варикапы	32
1.4. Транзистор	32
1.4.1. Введение	32
1.4.2. Принцип действия транзистора	32
1.4.3. Эффекты второго порядка	34
1.4.4. Ток утечки между коллектором и базой	36
1.4.5. n - p - n - и p - n - p -транзисторы	36
1.4.6. Оптоэлектронные приборы	37
1.5. Тестирование транзисторов	38
1.6. Усилитель напряжения	39
1.6.1. Введение	39
1.6.2. Резистор нагрузки	39
1.6.3. Рабочая точка и смещение	39
1.6.4. Разделительные конденсаторы	41
1.6.5. Стабилизация рабочей точки	41
1.6.6. Стабилизированный усилитель напряжения	43
1.6.7. Измерение коэффициента усиления напряжения	45
1.7. Режим насыщения	45
Глава 2. ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР	48
2.1. Введение	48
2.2. Полевой транзистор с p - n -переходом	48
2.2.1. Конструкция	48
2.2.2. Принцип действия	49
2.3. МОП-транзистор	50
2.4. Проходные характеристики полевых транзисторов	53
2.5. Крутизна	54

2.6. Усилитель напряжения на полевом транзисторе	54
2.7. Практические применения МОП-транзисторов	56
2.7.1. Усилитель с большим входным сопротивлением	56
2.7.2. Схемы большой мощности	56
2.7.3. Меры предосторожности в отношении статического электричества	56
2.7.4. Интегральные микросхемы	57
Глава 3. ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАМПЫ	
И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА	58
3.1. Введение	58
3.2. Термоэлектронная эмиссия	58
3.3. Ламповый диод	58
3.4. Ламповый триод	60
3.5. Усовершенствование катода	62
3.6. Усилитель напряжения на триоде	63
3.7. Тетрод и пентод	64
3.8. Усилитель напряжения на пентоде	66
3.9. Переключающие схемы на лампах	66
3.10. Электронно-лучевая трубка	67
3.10.1. Конструкция и принцип действия	67
3.10.2. Люминофоры	69
Глава 4. ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ	71
4.1. Принципы обратной связи	71
4.2. Отрицательная обратная связь в электронике	72
4.3. Усилитель с обратной связью	73
4.4. Отрицательная обратная связь и частотная характеристика	75
4.5. Нелинейные искажения	76
4.5.1. Введение	76
4.5.2. Измерение искажений гармонического сигнала	77
4.5.3. Измерение искажений вследствие взаимной модуляции	78
4.5.4. Расчет эффективного значения сигналов, возникающих в результате искажений	78
4.5.5. Искажения и отрицательная обратная связь	79
4.6. Неустойчивость и отрицательная обратная связь	81
4.7. Обратная связь по току	82
4.8. Эксперименты с отрицательной обратной связью	83
Глава 5. СОГЛАСОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ	87
5.1. Введение	87
5.2. Входное сопротивление	87
5.3. Измерение входного сопротивления	88
5.4. Выходное сопротивление	89
5.5. Измерение выходного сопротивления	90
5.6. Согласование сопротивлений для оптимальной передачи напряжения	92
5.7. Согласование сопротивлений для оптимальной передачи мощности	93

5.8. Согласование сопротивлений для оптимальной передачи тока	95
5.9. Согласование сопротивлений для минимизации шума усилителя	95
5.9.1. Отношение сигнал/шум	95
5.9.2. Тепловой шум	96
5.9.3. Шумы в транзисторах	96
5.9.4. Коэффициент шума	97
5.9.5. Коэффициент шума и биполярный транзистор	100
5.9.6. Практический малошумящий усилитель	101
5.9.7. Шумы в полевых транзисторах	102
5.10. Принцип изменения сопротивления	104
5.11. Изменение сопротивления с помощью трансформатора	104
5.12. Эмиттерный повторитель	107
5.12.1. Расчет схемы эмиттерного повторителя	107
5.12.2. Переменные сигналы в эмиттерном повторителе	109
5.12.3. Входное сопротивление эмиттерного повторителя	110
5.12.4. Выходное сопротивление эмиттерного повторителя	111
5.12.5. Схема Дарлингтона	112
5.12.6. Улучшенная стабильность по постоянному току	113
5.12.7. Подача сигнала в длинные линии	115
5.13. Истоковый повторитель	115
5.13.1. Расчет схемы	115
5.13.2. Входное и выходное сопротивления истокового повторителя	117
5.13.3. Улучшенная рабочая точка для истокового повторителя	118
5.14. Усиление напряжения и мощности	119
5.15. Отрицательная обратная связь и выходное сопротивление	120
5.16. Отрицательная обратная связь и входное сопротивление	121
5.17. Мощный выходной каскад на эмиттерных повторителях	122
5.17.1. Ток нагрузки и ток покоя	122
5.17.2. Двухтактный усилитель: режим <i>B</i> и режим <i>AB</i>	123
5.17.3. Типичный усилитель мощности звукового диапазона	128
5.17.4. Мощные полевые транзисторы	130
5.17.5. Мощные усилители в интегральном исполнении	130
Глава 6. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ	131
6.1. Введение	131
6.2. Характеристики <i>p-n</i> -перехода	131
6.3. Входное сопротивление и крутизна биполярного транзистора	133
6.4. Выходные характеристики	136
6.5. Коллекторные характеристики	137
6.5.1. Способ измерения и результаты	137
6.5.2. Линия нагрузки и насыщения	140
6.5.3. Предельные значения	141
6.6. Стоковые характеристики полевого транзистора	143
6.7. Полевой транзистор как управляемый напряжением резистор	145
6.8. Эквивалентная схема и коэффициент усиления для схемы с общим эмиттером	146
6.9. Эквивалентная схема и коэффициент усиления усилителя на полевом транзисторе с общим истоком	149
6.10. Изменение крутизны полевого транзистора	150

Глава 7. УСИЛЕНИЕ НА ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ	152
7.1. Представление о высоких частотах	152
7.2. Высокие частоты и биполярный транзистор	153
7.2.1. Емкость база—эмиттер	153
7.2.2. Частота единичного усиления	154
7.2.3. Зависимость частоты единичного усиления от коллекторного тока	155
7.3. Свойства транзисторной схемы на высоких частотах	156
7.3.1. Усилители напряжения и эффект Миллера	156
7.3.2. Схема с общим эмиттером на высоких частотах	158
7.3.3. Высокие частоты и эмиттерный повторитель	161
7.4. Полевые транзисторы на высоких частотах	161
7.5. Специальные схемы для высоких частот	163
7.5.1. Вступление	163
7.5.2. Схема с общей базой	164
7.5.3. Схема с общим затвором	166
7.5.4. Каскодная схема	167
7.5.5. МОП-транзистор с двумя затворами	169
7.6. Широкополосные высокочастотные усилители	170
7.7. Амплитудная и фазовая частотные характеристики фильтра нижних частот	172
Глава 8. НИЗКОЧАСТОТНЫЕ СИГНАЛЫ, ПОСТОЯННЫЙ ТОК И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ	178
8.1. Введение	178
8.2. Ослабление на низких частотах	179
8.3. Особенности усилителей постоянного тока	181
8.3.1. Схема усилителя	181
8.3.2. Входной ток смещения	184
8.3.3. Дрейф	184
8.4. Дифференциальный усилитель	185
8.4.1. Основная схема	185
8.4.2. Коэффициент усиления напряжения	186
8.4.3. Подавление синфазного сигнала и уменьшение дрейфа	190
8.4.4. Симметричный выход	193
8.4.5. Усилитель, управляемый напряжением	194
8.5. Усилители в интегральном исполнении	195
8.6. Электронный термометр	196
8.7. Подавление помех с помощью дифференциального усилителя	197
8.8. Простой физиологический усилитель	199
8.9. Усилители постоянного тока с преобразованием	200
Глава 9. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ МОЩНОСТЬЮ	203
9.1. Источники питания	203
9.2. Выпрямление переменного напряжения	204
9.3. Сглаживание пульсаций	207
9.3.1. Вступление	207
9.3.2. Пульсации	208
9.4. Нагрузочная способность	209

9.5. Параметры диода и конденсатора	210
9.6. Схемы умножения напряжения	211
9.7. Схемы фильтров	213
9.8. Развязка	214
9.9. Регулируемые источники питания	215
9.9.1. Потенциометр	215
9.9.2. Эмиттерный повторитель в схемах источников питания	216
9.10. Стабилизаторы напряжения	218
9.10.1. Вступление	218
9.10.2. Базовая схема стабилизатора со стабилитроном	218
9.10.3. Коэффициент стабилизации	219
9.10.4. Недостатки простой схемы со стабилитроном	220
9.10.5. Случай больших токов нагрузки	224
9.10.6. Улучшение стабилизации с помощью усилителя рассогласования	226
9.10.7. Стабилизаторы и уменьшение пульсаций	227
9.10.8. Стабилитрон как прецизионный источник опорного напряжения	228
9.10.9. Использование напряжения запрещенной зоны в качестве эталона	229
9.10.10. Защита от короткого замыкания	230
9.10.11. Стабилизаторы в интегральном исполнении	231
9.11. Охлаждение транзистора	235
9.11.1. Теплоотводы	235
9.11.2. Электрическая изоляция	235
9.11.3. Тепловое сопротивление	236
9.12. Импульсные источники питания	237
9.12.1. Преобразование постоянного напряжения в постоянное	237
9.12.2. Импульсные источники с непосредственным питанием от сети	239
9.13. Управление мощностью с помощью тиристорov, транзисторов и симисторов	240
9.13.1. Общие сведения о тиристоре	240
9.13.2. Конструкция и принцип действия тиристора	240
9.13.3. Управление мощностью с помощью транзистора	243
9.13.4. Симистор и его применения	244
Глава 10. ИМПУЛЬСНЫЕ СИГНАЛЫ И ПОСТОЯННЫЕ ВРЕМЕНИ	249
10.1. Введение	249
10.2. Формирование сигналов прямоугольной формы	249
10.3. Фурье-анализ	251
10.4. Заряд, разряд и постоянные времени	251
10.5. Звон	256
10.6. Постоянные времени и транзисторы	257
10.7. Развязывающие конденсаторы в импульсных схемах	258
10.8. Фиксирующий диод	260
10.9. Постоянная времени цепи с развязывающим конденсатором	261
10.10. Дифференцирование и интегрирование	262
10.11. Электронные вычисления	267
10.12. Измеритель частоты следования импульсов с накачкой заряда	268
10.13. Ограничение импульсов	269

Глава 11. «СТРОИТЕЛЬНЫЕ БЛОКИ» АНАЛОГОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ НА ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ	271
11.1. Введение	271
11.2. Операционный усилитель	272
11.2.1. Упрощающие предположения	272
11.2.2. Начальный входной ток и напряжение смещения	274
11.2.3. Схема балансировки	276
11.3. Практические детали	277
11.4. Неинвертирующий усилитель	278
11.4.1. Простейший усилитель постоянного тока	278
11.4.2. Использование разделительных конденсаторов	279
11.4.3. Усилитель переменного напряжения с питанием от одного источника	280
11.5. Инвертирующий усилитель	282
11.5.1. Введение	282
11.5.2. Мнимая земля	283
11.5.3. Усиление переменного сигнала инвертирующим усилителем	284
11.6. Дифференциальный усилитель с обратной связью	284
11.7. Сумматор на основе ОУ	285
11.8. Интегратор на основе ОУ	287
11.8.1. Основная схема	287
11.8.2. Смещение в интеграторе	289
11.8.3. Точность и время интегрирования	290
11.8.4. Генератор линейно изменяющегося напряжения	291
11.8.5. Электрометрический усилитель	293
11.9. Дифференциатор на основе ОУ	295
11.10. Преобразователь тока в напряжение	296
11.11. Частотные характеристики схем на основе ОУ	297
11.12. Время установления и максимальная скорость нарастания	299
11.13. Источники питания	301
11.13.1. Напряжение питания и нагрузочная способность	301
11.13.2. Стабильность питания и требования к пульсациям	302
11.14. Активные фильтры	302
11.14.1. Вступление	302
11.14.2. Фильтры нижних частот	303
11.14.3. Фильтры верхних частот	311
11.14.4. Полосовые фильтры	312
11.14.5. Регулировка тембра	315
11.15. Логарифмические усилители	317
11.16. Прецизионные выпрямители	321
11.17. Дифференциальный компаратор	322
11.17.1. Введение	322
11.17.2. Гистерезис при положительной обратной связи	324
11.18. Справочные данные об ОУ	326
11.19. Аналоговый умножитель	326
11.20. Аналоговый делитель	329
11.21. Аналоговое моделирование	331
11.21.1. Введение	331
11.21.2. Резонансная система с затуханием	331

11.22. Фильтр с варьируемой характеристикой	333
11.23. Фильтр с переключаемыми конденсаторами	334
Глава 12. СХЕМЫ С ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ И ГЕНЕРАТОРЫ	336
12.1. Положительная обратная связь	336
12.2. Генераторы синусоидальных колебаний	336
12.2.1. Генератор с фазовращателем	336
12.2.2. Генератор с мостом Вина	339
12.2.3. Генератор квадратурного сигнала	342
12.2.4. Генератор с LC -контуром	344
12.3. Кварцевые генераторы	345
12.4. Триггер (бистабильный мультивибратор)	346
12.5. Самовозбуждающийся мультивибратор	347
12.6. Ждущий мультивибратор	351
12.7. Двоичный счетчик	352
12.8. Триггер Шмитта	353
12.9. Генератор, управляемый напряжением	354
12.10. Фазовая автоподстройка частоты	355
12.10.1. Основной принцип	355
12.10.2. Фазовый компаратор	356
12.10.3. Практическая схема фазовой автоподстройки частоты	357
Глава 13. ЦИФРОВЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ	359
13.1. Цифровой мир	359
13.2. Логические функции и логические схемы	359
13.3. Электронные логические элементы	361
13.4. Свойства логических схем со стороны входа и выхода	364
13.5. Классификация схем	365
13.6. Таблицы истинности	365
13.7. Простые комбинации логических элементов	366
13.8. Сложение двоичных чисел	367
13.9. Интегральные логические схемы	369
13.9.1. Введение	369
13.9.2. Схемы ТТЛ	370
13.9.3. КМОП-схемы	372
13.10. Последовательностные логические схемы: триггеры и память	374
13.10.1. Простейшие триггеры	375
13.10.2. Синхронный RS -триггер	378
13.10.3. D -триггер	379
13.10.4. JK -триггер	379
13.10.5. Двухконтактный триггер и триггер с динамическим входом	380
13.11. Регистры	383
13.11.1. Регистры для хранения данных	383
13.11.2. Регистр сдвига	383
13.12. Двоичный счет	386
13.12.1. Введение	386
13.12.2. Входы сброса и модуль счета	388

13.12.3. Двоично-десятичный счетчик	389
13.12.4. Последовательное соединение двоично-десятичных счетчиков	391
13.12.5. Синхронные счетчики	392
13.13. Дешифраторы и индикаторы	393
13.13.1. Прямое дешифрование — десятичное и шестнадцатиричное	393
13.13.2. Семисегментные индикаторы и дешифраторы	396
13.13.3. Микросхема 74LS75 — триггер-защелка	398
13.13.4. Мультиплексированные индикаторы	399
13.14. Интегральный триггер Шмитта 7413	400
13.15. Ждущие мультивибраторы и таймеры	402
13.15.1. Вступление	402
13.15.2. Интегральная схема ждущего мультивибратора 74121	402
13.15.3. Интегральный таймер 555	405
13.16. Мультиплексоры данных	409
13.17. Соединение логических схем	411
13.17.1. Общие предостережения	411
13.17.2. Подключение логических схем и их эксплуатация	412
13.17.3. Источники питания	413
13.18. Эмиттерно-связанная логика	414
13.19. Логические матрицы	415
13.20. Программируемые логические устройства	416
13.21. Переключение аналоговых сигналов с помощью КМОП-схем	416
Глава 14. МИКРОЭВМ И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ	419
14.1. Что делает компьютер?	419
14.2. Электронная арифметика	419
14.2.1. Сложение	419
14.2.2. Вычитание	421
14.2.3. Двоичное умножение и деление	424
14.3. Биты, байты и полубайты	426
14.4. Шина данных	426
14.5. Запоминающие устройства	431
14.5.1. Магнитные и оптические устройства для хранения данных	431
14.5.2. Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ)	431
14.5.3. ROM, EPROM и E ² PROM	434
14.6. МикроЭВМ	435
14.7. Программные средства	438
14.7.1. Последовательность команд	438
14.7.2. Машинный код	438
14.7.3. Запуск программы	440
14.7.4. Непосредственный ввод в машинном коде и запуск	441
14.7.5. Язык ассемблера	442
14.7.6. Языки высокого уровня	445
14.8. Ввод в микроЭВМ и вывод из нее	446
14.8.1. Дешифрование адреса	446
14.8.2. Порт вывода	449
14.8.3. Порт ввода	451
14.8.4. Практические схемы портов для персональных компьютеров	451
14.9. Эксперименты с вводом/выводом на микроЭВМ Acorn	452

14.10. Изучение процессора	454
14.11. Как отвлечь процессор от выполняемой программы?	457
14.11.1. Прерывания	457
14.11.2. Прямой доступ в память	462
14.12. Цифровая обработка сигналов	462
14.13. Цифровые фильтры	464
14.14. Цифроаналоговое преобразование	465
14.15. Аналого-цифровое преобразование	467
14.15.1. Основные схемы аналого-цифрового преобразования	467
14.15.2. Схема выборки и хранения	468
14.15.3. Шум квантования и дрожание	469
14.15.4. Частота выборок	470
14.15.5. Дельта-сигма преобразование данных (избыточная дискретизация)	472
Приложение 1. МАРКИРОВКА КОМПОНЕНТОВ	478
Приложение 2. ВЫБОР ТРАНЗИСТОРА	482
Приложение 3. ПАРАМЕТРЫ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ	484
Приложение 4. ЦОКОЛЕВКА ЦИФРОВЫХ ИС	486
Приложение 5. СОПРЯЖЕНИЕ С ПЕРСОНАЛЬНЫМ КОМПЬЮТЕРОМ СЕМЕЙСТВА IBM	492
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	498
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	500

Предисловие издательства Cambridge University Press

Эта книга содержит рассказ об электронике, опирающийся на практику, и доступна любому читателю, который хотя бы немного знаком с электрическими цепями. Мартин Хартли Джонс рассматривает предмет во всей полноте: начиная с таких основных понятий, как усиление, он переходит затем к приложениям аналоговых и цифровых интегральных микросхем и заканчивает ясным описанием микроЭВМ. Каждая тема сопровождается эффектными иллюстрациями в виде живых экспериментов, а изложение построено так, чтобы математика не заслоняла принципы электроники, так что книга повсюду читается легко.

У автора богатый опыт обучения студентов и работы в промышленности, что нашло свое отражение в манере подачи материала. Автор убежден, что эффективное изучение электроники должно опираться на практический опыт собирания схем и экспериментирования с ними. С этой точки зрения приводимые в книге схемы содержат всю необходимую информацию, включая значения параметров, чтобы читатель имел возможность учиться, приобретая практический опыт. Компьютерные эксперименты рассчитаны, в частности, на использование персональных компьютеров семейства IBM.

Книга представляет собой идеальный учебник для начального изучения электроники студентами, специализирующимися в этой области. Но она будет полезна также и тем из учащихся, для кого электроника является вспомогательной дисциплиной: будущим физикам, инженерам, химикам, биологам и врачам. И конечно, это — настольная книга для радиолюбителей.

Сегодня выходит третье издание этой весьма удачной книги, в котором сохранены стиль и логика изложения предыдущих изданий. В тех местах, где речь шла о компонентах, вышедших в настоящее время из употребления, произведено необходимое обновление. С развитием электроники меняется относительная важность отдельных вопросов. Среди многого, что было добавлено, можно привести в качестве примера новые разделы, посвященные источникам питания, работающим в ключевом режиме, схеме фазовой автоподстройки частоты и аналого-цифровому преобразованию. Повсеместно распространенные ныне персональные компьютеры представлены в ряде экспериментов по их практическому сопряжению с внешними устройствами. Книга в целом проникнута духом электроники 90-х годов.

Предисловие к третьему изданию

Сегодня с большим удовлетворением можно констатировать популярность первого и второго изданий этой книги. В нынешнем, третьем издании тот же, что и ранее, практический подход применен для того, чтобы обновить содержание книги и привести его в соответствие с тем волнующим зрелищем, какое представляет собой современная электроника, сохранив, однако, прежний стиль изложения в целом.

В 1977 году, когда вышло в свет первое издание, еще не было и в помине CD-плееров, сотовых телефонов и факсов, ставших символами достижений современной электроники, и это служит свидетельством стремительного развития в данной области. Во втором издании, в 1985 году, уже было отдано должное расцвету микрокомпьютерной индустрии, хотя некоторые из домашних компьютеров, популярных в то время, теперь исчезли без следа.

Сегодня, 10 лет спустя, мы являемся свидетелями замечательного прогресса в сфере компьютерных технологий, в частности в отношении быстродействия компьютеров, объемов памяти и степени интеграции. Стало нормой применение компонентов с планарными выводами, и во все большем числе случаев запись и обработка сигналов выполняются теперь цифровыми методами. К счастью для студентов и экспериментаторов, основные компоненты и узлы электронных схем, о которых идет речь в этой книге, продолжают и ныне играть ключевую роль точно так же, как это было всегда. Все еще продолжается широкий выпуск промышленностью компонентов с проволочными выводами, которые более всего пригодны для экспериментов; излюбленный транзистор BC107 (аналог KT3102. — *Примеч. перев.*), по-прежнему остается самым распространенным. Там, где применялись компоненты, вышедшие в настоящее время из употребления, произведено необходимое обновление.

В ряде случаев развитие техники изменило относительную важность отдельных вопросов и тем. Например, импульсные источники питания заслуживают теперь более подробного рассмотрения, и то же самое относится ко всей теме аналого-цифрового преобразования. Некоторые другие вопросы, переставшие играть сколько-нибудь существенную роль, спокойно могут быть опущены. На передний план выведены вездесущие персональные компьютеры, в частности при обсуждении типичных примеров практического их сопряжения с внешними устройствами, а также в примерах программирования, ориентированных на популярные в сфере образования компьютеры Аcom.

Спасибо моим коллегам по Kelvin Hughes за их советы и помощь, Майрин Браун за выполненный ею набор текста и моей жене Сильвии за постоянную помощь в качестве секретаря и моральную поддержку. Я также признателен моим сыновьям Крису и Тиму за полезные предложения по обновлению материала.

Мартин Хартли Джонс
Июль, 1994

ГЛАВА 1

УСИЛЕНИЕ И ТРАНЗИСТОРЫ

1.1. Усиление

Одну из наиболее важных операций в электронике можно выразить одним словом: *усиление*. Усиление является процессом, при котором мощность сигнала увеличивается. Простым механическим примером усиления является система управления автомобилем: благодаря гидравлике малые усилия, прикладываемые водителем к рулевому колесу, преобразуются в значительно большие усилия, прикладываемые к передним колесам автомобиля. Здесь присутствует основной признак усиления: малый входной сигнал используется для управления более мощным выходным сигналом. Дополнительная мощность берется от некоторого внешнего источника энергии. В нашем примере таким источником является двигатель автомобиля.

Первым примером усиления электрических сигналов является использование Сэмюэлом Морзе электромагнитного реле, изобретенного Джозефом Генри в 1835 году, для усиления слабых телеграфных сигналов. Именно реле сделало возможным открытие первой междугородной телеграфной

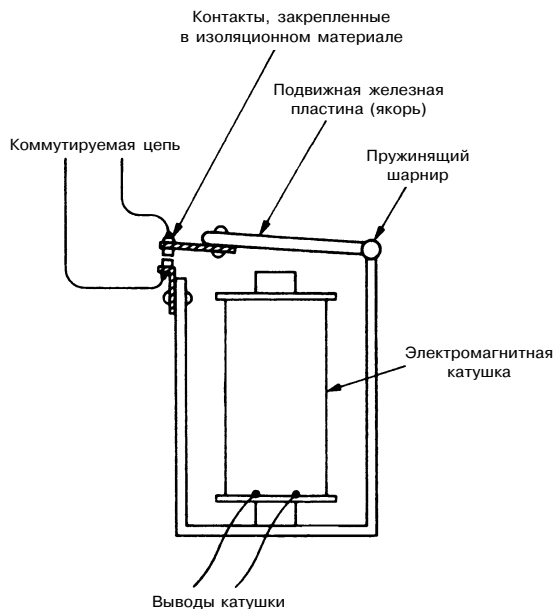


Рис. 1.1. Электромагнитное реле — пример электрического усилителя.

линии от Балтимора до Вашингтона в 1844 году. Как видно из рис. 1.1, слабый входной сигнал используется для управления электромагнитом, который притягивает якорь и замыкает электрические контакты; эти контакты включают мощный выходной сигнал, который передается на следующий участок линии. Точки и тире мощного выходного сигнала, таким образом, точно повторяют слабый входной сигнал. Реле до сих пор широко используются в силовых (мощных) переключающих системах, но, как правило, вытесняются электронными устройствами.

Электронные усиливающие устройства обычно называются *активными* компонентами в отличие от неусиливающих элементов цепи, таких как резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности, которые объединяются общим названием *пассивные* компоненты.

Самым распространенным примером усиления с применением электроники является обычный радиоприемник, где сигнал, принимаемый антенной, очень слаб (обычно менее 1 мкВт), но к громкоговорителю подводится мощность в несколько ватт. Дополнительная мощность берется от батареи или выпрямителя переменного напряжения.

1.2. Транзистор как усиливающее устройство

Биполярный плоскостной транзистор, больше известный как просто транзистор, является наиболее распространенным активным устройством в электронике. До обсуждения того, как работает транзистор, полезно посмотреть, что он может делать. Для этой цели мы будем считать транзистор «черным ящиком», условное обозначение которого показано на рис. 1.2.

Транзистор является усиливающим устройством, управляемым током: если небольшой ток втекает в базу, то это приводит к появлению гораздо большего тока коллектора. Название *транзистор* происходит от слов *transfer* (перенос) и *resistor* (сопротивление): малый базовый ток преобразуется в значительно больший коллекторный ток.

Несколько простых примеров продемонстрируют большое усиление тока в транзисторе. Очевидно, что в простой цепи, приведенной на рис. 1.3, а, лампа будет светить, когда два свободных провода (пронумерованные 1 и 2) соединены вместе. С другой стороны, очевидно, что если вы попытаетесь замкнуть цепь через свое тело, держа по одному проводу в каждой руке, то протекающий ток будет недостаточным, чтобы лампа светилась. Реально сопротивление тела ограничивает ток величиной менее 1 мА, в то время как для полного свечения лампы необходимо 40 мА.

Теперь посмотрим на схему, представленную на рис. 1.3, б, где лампа включена в коллекторную цепь транзистора. Возьмите снова свободные провода в руки; на этот раз небольшой ток течет через сопротивление вашего тела от батареи в базу транзистора. Транзистор действует как усилитель тока, и лампа будет светиться, хотя и тускло. Увлажнение кожи уменьшает ее сопротивле-

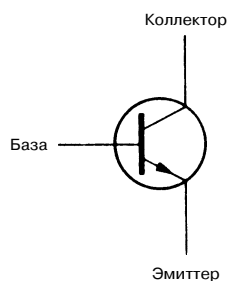


Рис. 1.2. Условное обозначение биполярного транзистора *p-n*-типа.

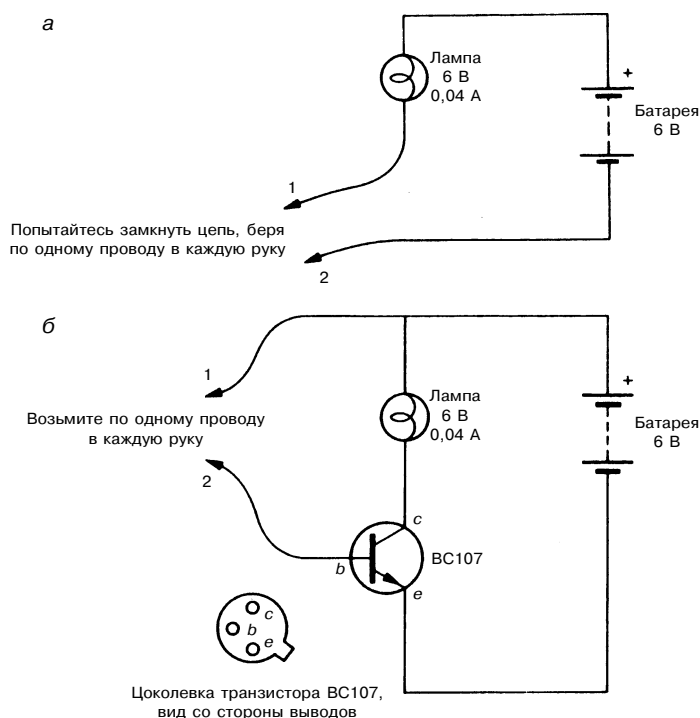


Рис. 1.3. Экспериментальная цепь с лампой, иллюстрирующая усиление тока транзистором:

а — слабый ток через тело не вызывает свечения лампы; *б* — транзистор усиливает ток, текущий через тело, так, что лампа светится.

ние и дает лучший результат. Слабый ток, протекающий через ваше тело, вызывает в несколько сот раз больший ток через лампу.

Цепь, приведенная на рис. 1.4, *а*, дает еще один пример использования транзистора для создания простого светового выключателя. В базовую цепь транзистора включен кадмиево-сульфидный фотоэлемент ORP12, который ведет себя как резистор, сопротивление которого зависит от освещенности. Когда фотоэлемент находится в темноте, его сопротивление составляет несколько мегаом, и через транзистор течет пренебрежимо малый ток. При достаточно ярком освещении сопротивление фотоэлемента падает до нескольких килоом, и базовый ток порядка миллиампера вызывает свечение лампы благодаря усилению транзистора.

Повернув фотоэлемент к лампе, можно получить «электронную свечу»: если лампа выключена, а на фотоэлемент на короткое время попадает свет, то она включится и будет светить, поскольку ток освещенного фотоэлемента будет поддерживать это свечение. Чтобы погасить «свечу», необходимо просто преградить путь свету между лампой и фотоэлементом.

На рис. 1.4, *б* коллекторный ток используется для управления катушкой реле: контакты реле можно использовать для включения или выключения любого устройства, такого, например, как мотор для открывания дверей гаража, когда свет передних фар автомобиля освещает фотоэлемент ORP12. Диод 1N4148 (аналог КД521А. — *Примеч. перев.*), подключенный парал-

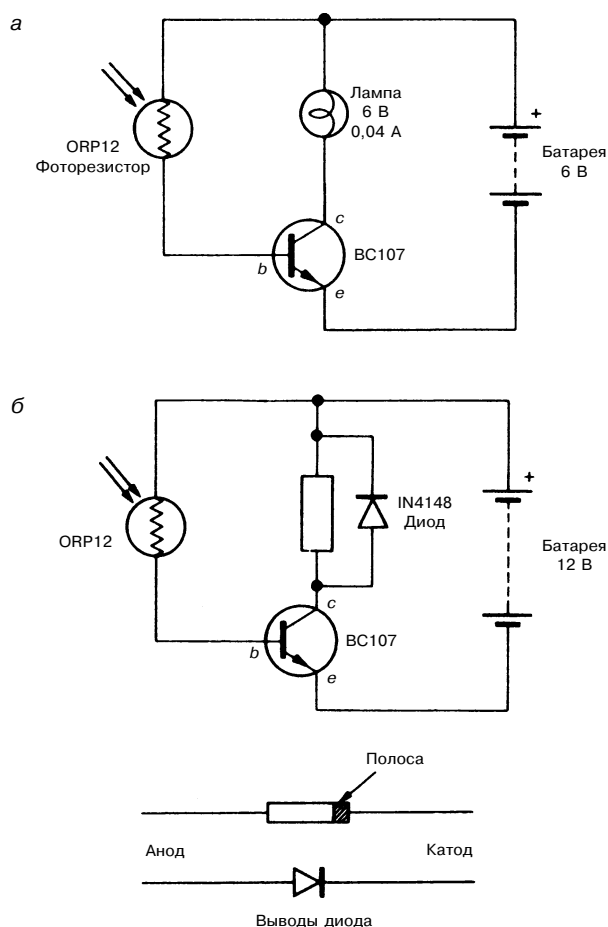


Рис. 1.4. *а* — лампа, управляемая светом; *б* — реле, управляемое светом.

лельно катушке реле, служит для ограничения выброса напряжения, возникающего в катушке индуктивности при выключении тока. Параллельно соленоиду, которым управляет транзистор, всегда должен быть подключен диод, иначе бросок напряжения может вызвать пробой транзистора.

На рис. 1.5 показан способ еще большего увеличения коэффициента усиления тока.

У схемы из двух транзисторов, известной как *схема Дарлингтона*, коэффициент усиления тока равен произведению коэффициентов усиления тока этих транзисторов. Это связано с тем, что ток базы транзистора T_2 равен эмиттерному току транзистора T_1 . Если взяться руками за контакты 1 и 2, то лампа будет светить ярко: эта схема намного чувствительнее, чем приведенная на рис. 1.4, *а*. Большое усиление тока означает, что в качестве датчиков света можно использовать фотодиод и фототранзистор, если подключить их так, как показано на рис. 1.5, *б*.

Коэффициент усиления тока транзистора обычно обозначают символом h_{FE} , и его величина может принимать значения от 10 до 1000 в зависимости от типа транзистора. Коэффициент усиления тока транзистора BC107

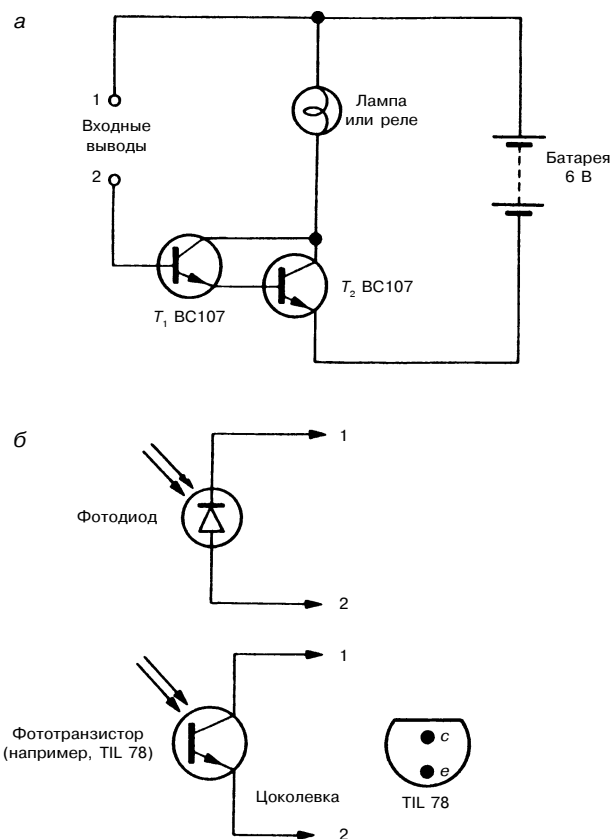


Рис. 1.5. а — схема Дарлингтона увеличивает коэффициент усиления тока; б — подключение фотодиода и фототранзистора к схеме Дарлингтона.

обычно лежит в диапазоне от 100 до 400, причем этот параметр не задается точно производителем. Для схемы Дарлингтона

$$h_{FE\text{total}} = h_{FE1} \times h_{FE2}.$$

1.3. Введение в твердотельную электронику

1.3.1. Вступление

Транзистор изготавливается из полупроводникового материала двух различных типов. Для понимания работы транзистора необходимо рассмотреть некоторые свойства этого необычного класса материалов, называемых полупроводниками.

1.3.2. Полупроводники

По своим электрическим свойствам твердые вещества можно разделить на три класса: проводники, изоляторы и полупроводники. Класс, в который попадает тот или иной материал, зависит от поведения электронов на внеш-

ней орбите атома. В случае изолятора, такого как полиэтилен, эти *валентные* электроны прочно связаны с ядром, и лишь немногие из них способны порвать связь со своими атомами и участвовать в движении, образующем электрический ток. В проводнике, таком как медь, очень много свободных электронов при любой температуре выше абсолютного нуля, поскольку валентные электроны совсем слабо связаны со своими атомами и свободно дрейфуют.

Полупроводники являются необычными материалами. Полупроводником, чаще все применяемым в транзисторах, является кремний, хотя используется и германий. Оба эти элемента — четырехвалентные, то есть на внешней орбите их атомов находятся по четыре электрона. Кристаллы кремния и германия имеют очень ясную и стройную структуру, благодаря которой атомы удерживаются вместе в устойчивом образовании; говорят, что устойчивость обеспечивается ковалентной связью. Известно, что при наличии у атома восьми валентных электронов вещество оказывается очень стабильным (инертные газы находятся в таком состоянии). Соседние атомы в кристалле кремния или германия принимают совместное участие в таком образовании, в результате чего каждое ядро имеет «половинную долю» в восьми валентных электронах вместо индивидуального владения четырьмя валентными электронами, которыми обладал бы изолированный атом. Такая структура из атомов кремния схематически показана на рис. 1.6, *а*; каждая из указанных на рисунке связей между атомами представляет собой совместно используемый валентный электрон. Здесь интересно отметить, что чрезвычайная твердость алмаза связана с тем, что четырехвалентные атомы углерода имеют такую же организацию ковалентных связей в кристалле. Алмаз действительно считается полупроводником, но прочность ковалентных связей, которая и обеспечивает его физическую твердость, приводит фактически к очень слабой электропроводности. Какое счастье, что для транзисторов мы имеем намного лучшие и значительно более дешевые альтернативные материалы!

1.3.3. Электроны и дырки

Идеальная решетка из атомов кремния, показанная на рис. 1.6, *а*, существует только при температурах вблизи абсолютного нуля. При комнатной температуре вследствие тепловых колебаний атомов происходит разрыв некоторых связей; электроны отрываются от атомов и свободно блуждают по кристаллу. Там, где электрон становится свободным, он оставляет после себя дырку или отсутствие отрицательного заряда, которое также может казаться перемещающимся, если разорванная связь заполняется электроном из соседнего атома. На рис. 1.6, *б* представлен участок кристаллической решетки кремния при комнатной температуре со свободным электроном и получившейся дыркой.

Наличие свободных электронов делает кремний проводником электричества, хотя и очень плохим. Если, например, подключить образец из кремния к батарее, то приложенное поле будет увлекать свободные электроны по направлению к положительному выводу. При этом дополнительные свободные электроны появляются на отрицательном выводе и могут передви-

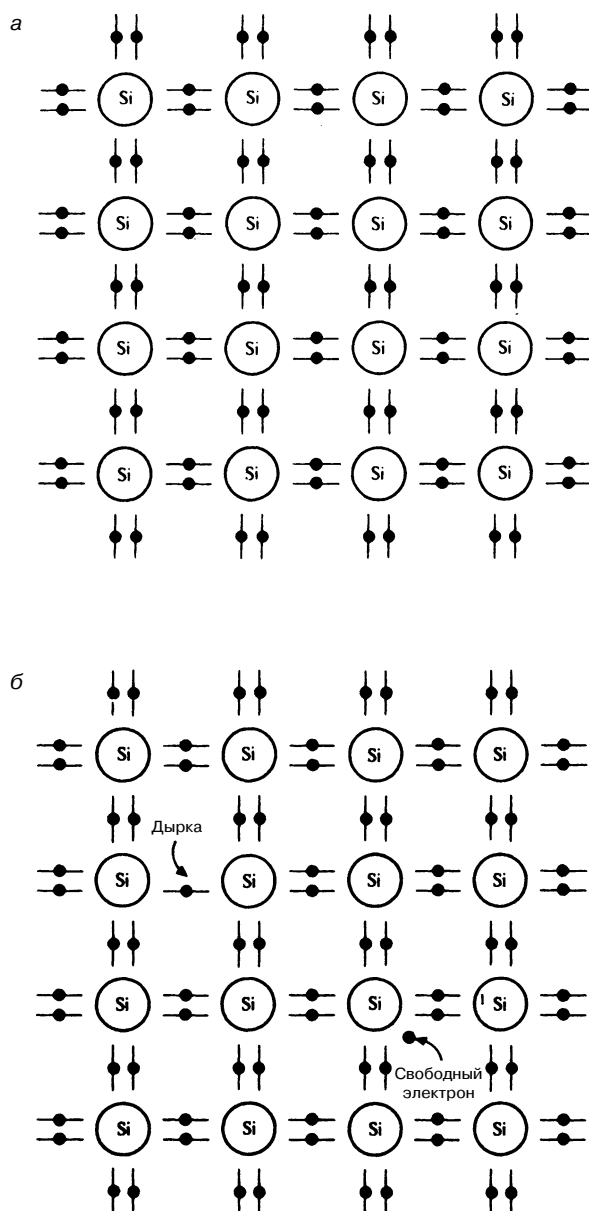


Рис. 1.6. *a* — изображение ковалентных связей электрона в атомах кристалла кремния; *б* — та же решетка кристалла, что и на рис. *a*, но со свободным электроном и дыркой, образованными тепловым возмущением.

гаться по полупроводнику, перескакивая от дырки к дырке. Так устанавливается электрический ток. Если температура полупроводника увеличивается, то разрывается большее число связей, появляется больше электронов и дырок, и проводимость растет. Интересно отметить, что этот температурный эффект прямо противоположен эффекту, наблюдаемому в металлах: даже при низких температурах в проводнике имеется такое облако свобод-

ных электронов, что фактором, ограничивающим проводимость, является уже не отсутствие свободных электронов, а их способность двигаться между атомами металла. При увеличении температуры проводника амплитуда колебаний атомов увеличивается, и они в большей степени препятствуют движению свободных электронов. Таким образом, с ростом температуры сопротивление проводника увеличивается, тогда как у полупроводника оно падает. Очень слабая проводимость, которой обладает чистый полупроводник, называется *собственной* проводимостью.

1.3.4. Проводимость полупроводника с примесями

Добавление примесей в полупроводник приводит к интересным результатам. Атомы некоторых примесей способны внедряться в кристаллическую решетку, не внося в нее чрезмерной деформации, и в случае, когда валентность этих атомов отличается от собственной валентности полупроводника, проводимость кристалла значительно возрастает. На рис. 1.7 показан результат введения пятивалентных атомов фосфора в кристалл кремния. Четыре из пяти валентных электронов связаны с соседними атомами кремния, а оставшийся электрон настолько слабо связан, что становится свободным и может передвигаться по кристаллу, увеличивая его проводимость. Введение примесей в полупроводник называют *легированием*, а появляющаяся при этом проводимость называется *примесной* проводимостью. Пятивалентные примеси, такие как фосфор, называются *донорными*, так как они добавляют свободные электроны в кристалл. Поскольку примесная проводимость в данном случае обусловлена свободными *отрицательными* зарядами (электронами), этот тип легированных полупроводников называют полупроводниками *n*-типа.

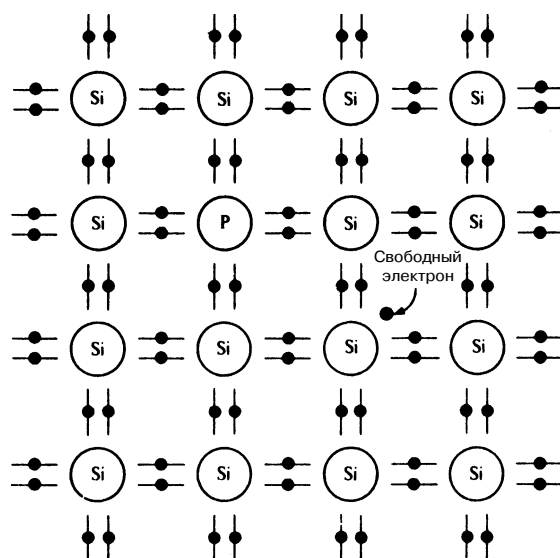


Рис. 1.7. Кристаллическая решетка кремния с примесным атомом фосфора. Здесь имеется свободный электрон, способствующий проводимости (полупроводник *n*-типа).

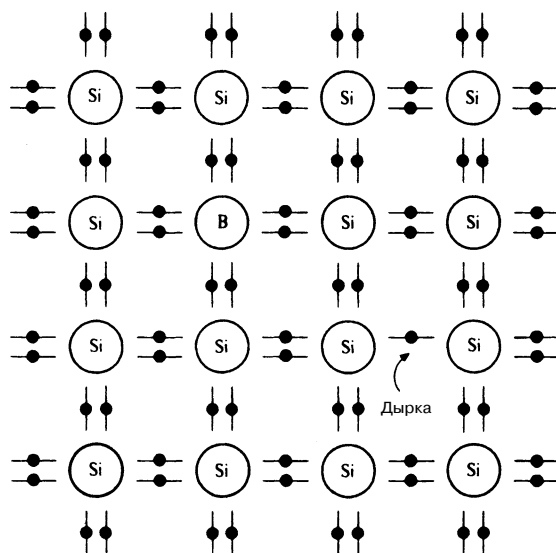


Рис. 1.8. Кристаллическая решетка кремния с примесным атомом бора. Здесь имеется свободная дырка, способствующая проводимости (полупроводник *p*-типа).

На рис. 1.8 показан эффект от введения в кремний трехвалентных атомов бора. Несмотря на то что атом бора имеет только три валентных электрона, он принимает дополнительный электрон от одного из соседних атомов кремния для заполнения его ковалентных связей. Это приводит к образованию в решетке *дырки* или отсутствию электрона, и такая дырка может перемещаться, участвуя, таким образом, в обеспечении проводимости. На самом деле, конечно, при этом происходят перескоки валентных электронов, но результат заключается в том, что дырка переходит от атома к атому. Трехвалентные примеси, подобные бору, называют *акцепторными*, поскольку они, будучи введены в кристалл, способны принимать электроны. Так как теперь проводимость обусловлена *положительными* дырками, этот легированный полупроводник носит название полупроводника *p*-типа.

Важно понимать, что образец полупроводника как *p*-типа, так и *n*-типа сам по себе не обладает *в целом* электрическим зарядом. В любом случае общее число электронов уравнивается таким же числом протонов в ядрах атомов. Обозначения *p*- и *n*- относятся только к типу зарядов, ответственных за проводимость внутри кристалла.

1.3.5. Основные и неосновные носители

Несмотря на то что наличие примеси в легированных полупроводниках является основной причиной проводимости, все же остается и собственная проводимость чистого полупроводника, вызванная нарушением ковалентных связей из-за тепловых колебаний. Таким образом, в материале *n*-типа кроме свободных электронов, обусловленных донорной примесью, имеется небольшое количество дырок, образовавшихся в результате тепловой генерации пар электрон—дырка. Аналогично в материале *p*-типа имеется немало электронов теплового происхождения. Носители зарядов, намеренно

введенные путем легирования, называют основными носителями, тогда как носители зарядов (противоположного знака. — *Примеч. перев.*), возникающие в результате тепловых колебаний, называются неосновными.

1.3.6. Компенсация

Существует возможность преобразовать материал n -типа в материал p -типа и наоборот просто путем добавления соответствующей примеси в количестве, превышающем количество первоначальной примеси. Свободные электроны, присутствующие в материале n -типа, заполняют дырки в материале p -типа и исчезают. Этот способ, называемый компенсацией, широко используется при изготовлении транзисторов, где различные примеси диффундируют в кристалл на различных этапах производства.

1.3.7. p - n -переход

Работа полупроводникового прибора, такого как транзистор, определяется эффектами, имеющими место на границе между материалами p - и n -типа. На этой стадии важно понять, что полупроводниковый переход представляет собой изменение материала с p -типа на n -тип в пределах одной и той же непрерывной кристаллической решетки. При простом соединении образцов материала p -типа и материала n -типа не возникает p - n -переход.

На рис. 1.9 показан *диод*, представляющий собой p - n -переход с металлическими контактами с каждой стороны. Под изображением перехода приведен график изменения потенциала на p - n -переходе. Как только переход образован, часть свободных электронов из области n -типа вблизи границы переходит в область p -типа и заполняет часть дырок в p -области. На месте электронов остается область с некомпенсированным положительным зарядом. То же самое происходит в области p -типа, где возникает отрицательный заряд. Эти заряды образуют потенциальный барьер, препятствующий

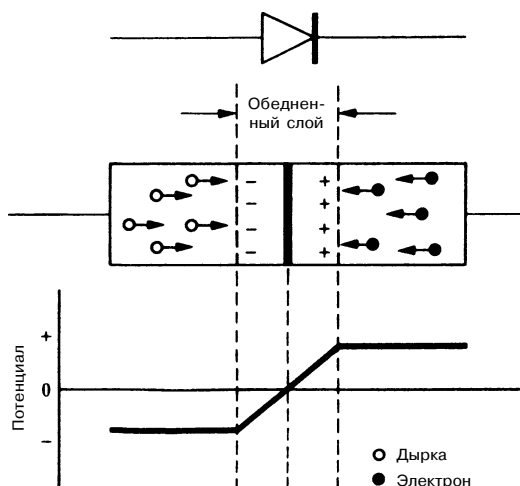


Рис. 1.9. Условное обозначение полупроводникового диода, p - n -переход с обедненным слоем и изменение потенциала.

дальнейшему перемещению электронов через переход, благодаря чему наступает равновесие. В результате такого начального перемещения дырок и свободных электронов вблизи p - n -перехода практически не остается свободных носителей. Эта область, шириной менее 1 мк, называется *обедненным слоем*.

1.3.8. Смещенный p - n -переход

Если к p - n -переходу подключен внешний источник постоянного напряжения, то потенциальный барьер обедненного слоя увеличивается или уменьшается в зависимости от полярности поданного напряжения или смеше-

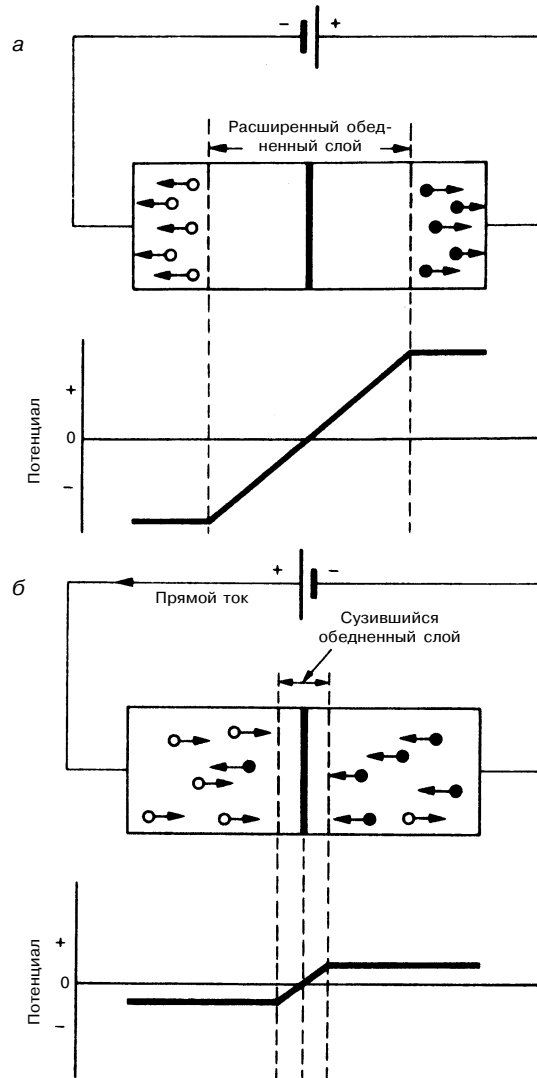


Рис. 1.10. Поведение обедненного слоя:

а — при обратном смещении, б — при прямом смещении.

ния. На рис. 1.10 показаны оба случая: *a* — обратное смещение, когда потенциальный барьер увеличивается, а обедненный слой расширяется, и *b* — прямое смещение, когда барьер уменьшается, а обедненный слой сужается. В случае обратного смещения через переход течет очень маленький ток, связанный с тепловым разрушением ковалентных связей в обеих областях. Неосновные носители имеют такую полярность, которая способствует их прохождению через переход. Однако при комнатной температуре этот обратный ток у кремниевого перехода настолько мал (порядка 1 нА), что на практике им часто пренебрегают. Когда же переход смещен в прямом направлении, потенциальный барьер понижается, нарушается равновесие, и часть электронов из *n*-области и дырок из *p*-области теперь способны пересечь переход. Чем больше напряжение прямого смещения, тем ниже потенциальный барьер, тем большее число электронов и дырок проходит сквозь обедненный слой, и, следовательно, возникает ток, текущий через переход.

Следует отметить, что при увеличении э.д.с. прямого смещения эффективное сопротивление перехода уменьшается из-за понижения потенциального барьера. В результате небольшое увеличение напряжения, приложенного в прямом направлении, вызывает значительное увеличение тока. Обычно у маломощных кремниевых диодов напряжение прямого смещения 0,6 В вызывает ток около 1 мА, а при напряжении 0,8 В ток возрастает до 100 мА. Прямая и обратная характеристики типичного маломощного кремниевого диода показаны на графике зависимости тока от приложенной э.д.с. на рис. 1.11. Из графика видно, что кремниевый переход практически не проводит ток, пока э.д.с. прямого смещения не превышает 0,5 В. У германиевых переходов эта величина меньше и составляет 0,2 В. Более подробные характеристики диода рассматриваются в гл. 6.

Из сказанного следует, что ток может свободно протекать через диод в одном направлении, а в другом направлении диод представляет собой почти бесконечное сопротивление. Такая односторонняя характеристика указывает на важное применение диодов: выпрямление, преобразование переменного напряжения в постоянное. Эти вопросы обсуждаются в гл. 9.

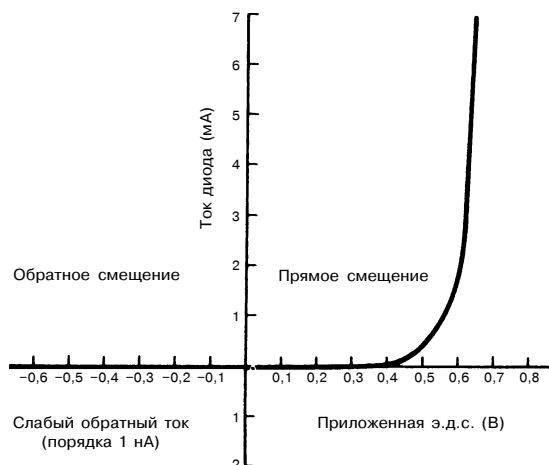


Рис. 1.11. Прямая и обратная характеристики полупроводникового кремниевого диода.

1.3.9. Лавинный пробой

Хотя при обратном смещении диод ведет себя как изолятор, дальнейшее увеличение приложенного напряжения приводит к ситуации, когда переход вдруг начинает проводить (рис. 1.12). Происходит это из-за электронов теплового происхождения, приобретающих за счет электрического поля в обедненном слое энергию, достаточную для образования новых пар электрон—дырка при соударении с атомами кремния. Эти вновь образовавшиеся носители затем сами создают свободные носители, и лавина нарастает. Процесс не приводит к разрушению перехода, если ограничить ток и тем самым не допустить его перегрева. Лавинный пробой может происходить при напряжениях от 5 до 1000 В и выше. Напряжение пробоя зависит от конструкции диода и степени легирования кремния. Значением напряжения пробоя ограничивается обратное пиковое напряжение в выпрямителях.

Выпускаются специальные диоды с низким напряжением пробоя, которые называются зенеровскими, по имени Карла Зенера, который в 1934 году открыл механизм электрического пробоя. Зенеровские диоды (стабилитроны. — *Примеч. перев.*) обычно имеют очень высокую степень легирования, создающую большую концентрацию основных носителей и позволяющую обедненному слою оставаться тонким даже при обратном смещении перехода. В результате градиент потенциала становится настолько большим, что пробой может произойти при обратном напряжении менее 3 В. Очень крутая характеристика пробоя, показанная на рис. 1.12, говорит о том, что падение напряжения на диоде в режиме пробоя остается почти постоянным при изменении обратного тока в широком диапазоне. Поэтому стабилитроны используются для стабилизации выходного напряжения в источниках питания (см. гл. 9). Строго говоря, понятие зенеровского пробоя включает в себя туннельный эффект при преодолении потенциального барьера и применимо только к диодам с напряжением пробоя менее 5 В, а при напряжении пробоя более 5 В диоды правильнее называть лавинными.

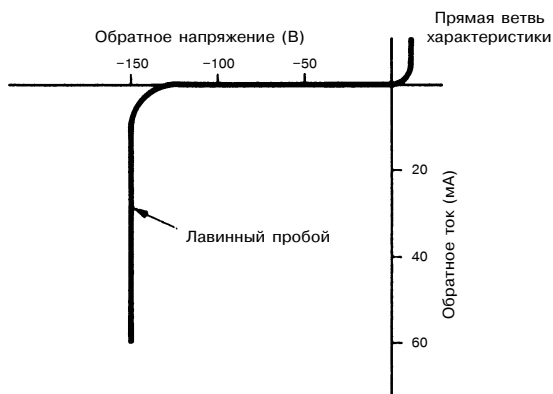


Рис. 1.12. Характеристика диода, смещенного в обратном направлении, с типичным лавинным пробоем.

1.3.10. Емкость перехода и варикапы

Диод, смещенный в обратном направлении, ведет себя как небольшой конденсатор с типичным значением емкости 2 пФ для маломощного кремниевых диода. Обедненный слой ведет себя как диэлектрический изолятор между проводящими «пластинами» n - и p -типа. Кроме того, с ростом смещающего напряжения емкость немного падает, поскольку обедненный слой расширяется. Путем соответствующего легирования создаются специальные диоды — варикапы, для которых типичным является изменение емкости от 10 до 2 пФ при увеличении обратного напряжения от 2 до 30 В. Такие диоды широко используются при настройке радиоприемников и телевизоров в диапазоне метровых и дециметровых волн. Устройство для электронного управления емкостью конденсатора настройки часто представляет собой специальную схему (схема автоматической подстройки частоты), которая фиксирует настройку на желаемую станцию автоматически.

1.4. Транзистор

1.4.1. Введение

Биполярный транзистор состоит из двух p - n -переходов, образованных слоями полупроводников с примесями. На рис. 1.13 показана самая простая конструкция n - p - n -транзистора. Тонкий слой слабо легированного полупроводника p -типа (база) расположен между двумя более толстыми слоями p -типа (эмиттер и коллектор). Толщина базы может быть меньше 1 мк.

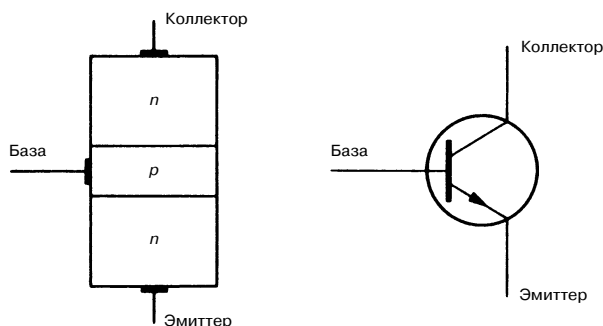


Рис. 1.13. Устройство n - p - n -транзистора и его условное обозначение.

1.4.2. Принцип действия транзистора

На рис. 1.14 показан транзистор, включенный по схеме с *общим эмиттером*. В схеме, приведенной на рис. 1.14, *а*, ток базы не течет, а в схеме на рис. 1.14, *б* переключатель S замкнут, позволяя току из батареи V_1 течь в базу транзистора. Сначала рассмотрим схему на рис. 1.14, *а*. Важно отметить, что переход коллектор—база смещен в обратном направлении, и имеющийся потенциальный барьер препятствует потоку основных носителей.

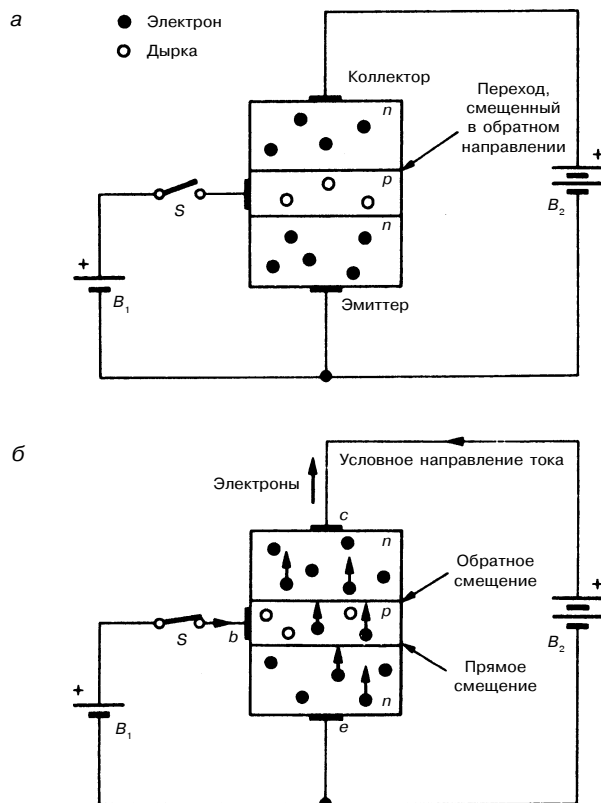


Рис. 1.14. Иллюстрация работы транзистора:
а — тока базы нет; б — ток базы течет.

Таким образом, пренебрегая утечкой, можно считать, что при разомкнутом ключе S коллекторный ток равен нулю. Теперь рассмотрим, что произойдет, когда ключ S замкнут (рис. 1.14, б). Переход база—эмиттер становится смещенным в прямом направлении, а переход коллектор—база остается смещенным в обратном направлении. Благодаря смещению перехода база—эмиттер в прямом направлении электроны из эмиттера n -типа посредством диффузии проходят по базе p -типа по направлению к обедненному слою на переходе база—коллектор. Эти электроны, являющиеся неосновными носителями в области базы, достигнув обедненного слоя, по потенциальному барьеру «как с горки» быстро скатываются в коллектор, создавая тем самым в транзисторе коллекторный ток. Действие смещенного в прямом направлении перехода база—эмиттер напоминает открывание ворот и позволяет току протекать по цепи эмиттер—коллектор. Таков принцип действия транзистора.

Следующий момент требует объяснения. Почему электроны не рекомбинируют с дырками в базе p -типа в процессе диффузии в сторону коллектора? Ответ состоит в том, что базу делают совсем слабо легированной, то есть с низкой концентрацией дырок, и очень тонкой; следовательно, имеется лишь малая вероятность того, что электрон будет перехвачен дыркой и рекомбинирует. Когда электрон рекомбинирует в области базы,

происходит кратковременное нарушение равновесия, поскольку база приобретает отрицательный заряд. Равновесие восстанавливается с приходом дырки из базовой батареи B_1 . Батарея B_1 является источником дырок для компенсации рекомбинирующих в базе, и эти дырки образуют базовый ток транзистора. Благодаря базовому току в базе не происходит накопления отрицательного заряда, и переход база—эмиттер поддерживается смещенным в прямом направлении, а это, в свою очередь, обеспечивает протекание коллекторного тока. Таким образом, транзистор является прибором, управляемым током. Отношение тока коллектора к току базы называется коэффициентом усиления тока (h_{FE}). Он должен равняться числу электронов в секунду, успешно проследовавших от эмиттера к коллектору, деленному на число рекомбинировавших. В типичном маломощном кремниевом транзисторе приблизительно 1 из 100 электронов рекомбинирует в базе, так что усиление тока имеет значение порядка 100.

Фактически в работе транзистора принимают участие как электроны, так и дырки, что отличает его от униполярного или полевого транзистора, который будет рассмотрен в следующей главе.

Ранее упоминалось, что при смещении p - n -перехода в прямом направлении текущий по нему ток образуют как электроны, так и дырки. Но при рассмотрении смещенного в прямом направлении перехода база—эмиттер мы пока учитывали только электроны, пересекающие этот переход. Такой подход оправдан практически, поскольку область эмиттера n -типа специально легируется очень сильно, чтобы обеспечить большое число свободных электронов, в то время как область базы легируется совсем слабо, и это дает настолько мало дырок, что ими можно пренебречь при рассмотрении тока через переход база—эмиттер. Эмиттер так сильно легирован, что напряжение лавинного пробоя перехода база—эмиттер обычно всего лишь 6 В. Этот факт нужно иметь в виду при работе с некоторыми переключающими схемами, где необходимо позаботиться о том, чтобы обратные смещения не были слишком большими. Но это обстоятельство может быть и полезным, поскольку переход база—эмиттер маломощного транзистора ведет себя как 6-вольтовый стабилитрон и иногда используется в этом качестве.

1.4.3. Эффекты второго порядка

На рис. 1.15 показан график зависимости коллекторного тока от тока базы для маломощного кремниевого транзистора: наблюдается линейная зависимость I_C от I_B в широком диапазоне значений коллекторного тока. Однако при малом токе базы коэффициент усиления тока несколько уменьшается. Этот эффект можно объяснить, рассматривая поведение электронов в базе: при очень малом базовом токе ничто не способствует электронам, попавшим из эмиттера в базу, достичь коллектора; только приблизившись к обедненному слою коллектор—база, они затягиваются полем. До этого электроны, совершая случайные блуждания, просто диффундируют сквозь базу, и любой из них может стать жертвой рекомбинации с какой-нибудь встретившейся дыркой. При больших значениях базового тока условия для электронов благоприятнее. Дырки, инжектируемые в виде базового тока,

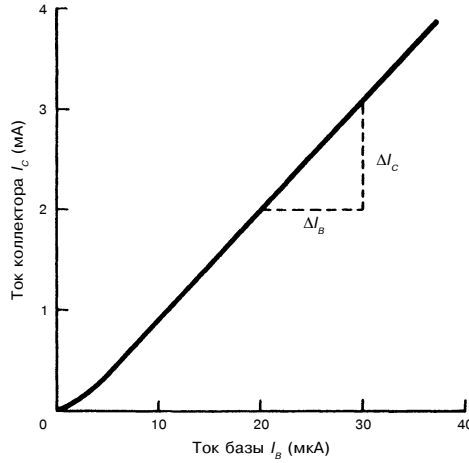


Рис. 1.15. Типичная зависимость коллекторного тока от тока базы в маломощном кремниевом транзисторе.

создают небольшое электрическое поле в базе, которое помогает электронам в их движении к обедненному слою. Таким образом, при умеренных токах коллектора (порядка 1 мА) коэффициент усиления тока будет больше, чем при малых токах коллектора (порядка 10 мкА).

При очень больших токах коллектора, когда заселенность базы дырками становится слишком большой, усиление начинает падать. База ведет себя так, как будто она легирована сильнее, чем это есть в действительности, так что значительная часть тока, текущего через эмиттерный переход, состоит из дырок, движущихся из базы в эмиттер так же, как полезные электроны,двигающиеся в другом направлении, к коллектору. Таким образом, все большая и большая часть базового тока является «пустой породой», и поэтому коэффициент усиления тока падает. Этот эффект важен в мощных усилителях, где он может приводить к искажению формы сигнала при больших токах коллектора.

В связи с тем, что зависимость коллекторного тока от тока базы является нелинейной, существуют два определения для коэффициента усиления тока транзистора в схеме с общим эмиттером. Коэффициент усиления постоянного тока получается просто делением тока коллектора на ток базы; его обозначают h_{FE} или β' , и он важен для переключающих схем. Однако в большинстве случаев, когда речь идет об усилении, мы имеем дело только с небольшими приращениями коллекторного тока, и более подходящим способом определения коэффициента усиления тока является отношение *приращения* коллекторного тока к *приращению* тока базы, которое называется коэффициентом усиления тока h_{fe} или β в режиме малого сигнала. Из рис. 1.15 следует, что

$$h_{fe} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}.$$

Для большинства практических целей можно считать, что h_{FE} и h_{fe} равны.

1.4.4. Ток утечки между коллектором и базой

Хотя переход коллектор—база смещен в обратном направлении, все же существует очень небольшой ток утечки из коллектора в базу, обозначаемый I_{CB0} , поскольку он измеряется с разомкнутой цепью эмиттера. В кремниевом транзисторе при комнатной температуре I_{CB0} очень мал, обычно менее 0,01 мкА. Однако в случае, когда транзистор включен в схему с общим эмиттером и цепь базы разорвана, как показано на рис. 1.14, а, ток I_{CB0} , протекающий по переходу коллектор—база, должен течь в эмиттер, для которого он неотличим от внешнего тока базы. Таким образом, I_{CB0} усиливается транзистором, и ток утечки между коллектором и эмиттером возрастает до значения $I_{CE0} = h_{FE} I_{CB0}$, которое может достигать до 1 мкА. Поскольку ток I_{CB0} в значительной степени является результатом теплового нарушения связей, он увеличивается приблизительно вдвое с ростом температуры на каждые 18 °С. Когда I_{CB0} становится сравнимым с нормальным током коллекторной цепи, транзистор обычно считается слишком горячим. Кремниевые p - n -переходы могут работать до 200 °С, а германиевые, имеющие много больший ток утечки, только до 85 °С.

Когда кремниевый транзистор работает при комнатной температуре, токами I_{CB0} и I_{CE0} можно практически полностью пренебречь. В германиевом транзисторе при комнатной температуре (20 °С) ток I_{CB0} имеет значение порядка 2 мкА, так что при $h_{FE} = 100$ ток I_{CE0} будет равен 200 мкА. Этот относительно большой ток утечки является той причиной, по которой германиевые транзисторы вышли из употребления, за исключением специальных целей, когда требуется малая разность потенциалов на германиевом p - n -переходе, смещенном в прямом направлении.

1.4.5. n - p - n - и p - n - p -транзисторы

Описание работы транзистора, данное выше, относится к наиболее распространенным n - p - n -транзисторам; также легко доступны p - n - p -транзисторы, очень полезные для целого ряда *комплементарных* схем, так как они обладают характеристиками, идентичными с n - p - n -транзисторами, но требуют напряжения питания противоположной полярности. Тогда как в n - p - n -

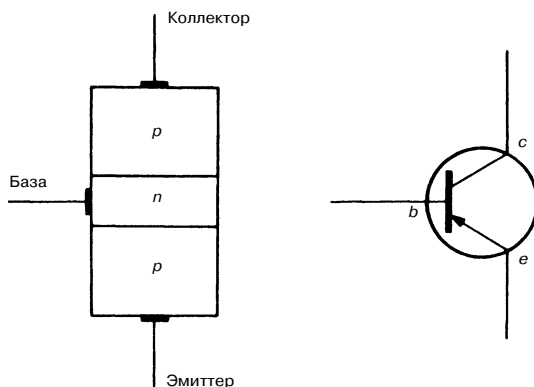


Рис. 1.16. Устройство p - n - p -транзистора и его условное обозначение.

транзисторе ток коллектора состоит из электронов, в p - n - p -транзисторе он состоит из дырок. Аналогично ток базы является электронным током, а не дырочным. На рис. 1.16 показана структура p - n - p -транзистора и его условное обозначение.

1.4.6. Оптоэлектронные приборы

Обратный ток утечки в p - n -переходе обусловлен, как мы видели, неосновными носителями.

Обычно пары электрон—дырка возникают только за счет тепловой энергии. Но если на p - n -переход падает свет, то это приводит к значительному увеличению плотности неосновных носителей. Электроны и дырки, освобожденные энергией падающих фотонов, вызывают значительное увеличение обратного тока утечки.

Фотодиод — это простой p - n -переход, помещенный в корпус с прозрачным окном. Обычно такой диод работает со смещением в обратном направлении, и типичное значение его тока в темноте равно 1 нА; при освещении с интенсивностью 1 мВт/см² ток увеличивается до 1 мкА. Такую интенсивность дает лампа мощностью 60 Вт на расстоянии около 30 см (200 люкс).

Фототранзистор — это просто обычный транзистор с прозрачным окном в корпусе. Некоторые фототранзисторы, такие как TIL78, залиты в прозрачный пластик; верх его обычно выпуклый и действует как линза, фокусирующая свет на транзистор, это увеличивает эффективную чувствительность прибора и делает его направленным.

Когда свет падает на транзистор, в обоих p - n -переходах освобождаются неосновные носители, но увеличение фототока дают те из них, которые образуются у смещенного в обратном направлении перехода коллектор—база. Точно так же, как тепловой ток утечки I_{CB0} перехода коллектор—база усиливается транзистором и дает больший ток утечки коллектор—эмиттер I_{CE0} подобным образом усиливается и фототок, возникающий в переходе коллектор—база. Чувствительность фототранзисторов обычно в сто раз выше, чем у фотодиода. Базовый вывод, как правило, не используется; и в самом деле, дешевые фототранзисторы, такие как TIL78, имеют выводы только коллектора и эмиттера.

Раздел, посвященный оптоэлектронике, будет неполным без упоминания о *светодиодах* (Light-Emitting Diode, LED). p - n -переходы некоторых составных полупроводников, особенно фосфида галлия и арсенида галлия, излучают свет, когда смещены в прямом направлении. Обычно прямой ток составляет от 5 до 80 мА, и для ограничения этого тока последовательно с диодом включают резистор. Имеются светодиоды с красным, зеленым, желтым и довольно слабым синим свечением, достаточно яркие, чтобы их использовать в качестве световых индикаторов с практически неограниченным сроком службы. В схемах на рис. 1.3—1.5 лампу с напряжением 6 В и током 0,04 А можно заменить светодиодом с последовательно включенным резистором 100 Ом, ограничивающим ток. Помните, что катод светодиода надо подключать к точке с более низким потенциалом, чтобы получить *прямое* смещение перехода.

Объединение светодиода и фототранзистора дает полезный прибор, называемый *оптопарой* (*оптроном*). Направив светодиод на фототранзистор, мы получаем возможность передавать сигналы из одной цепи в другую с полной электрической изоляцией.

Развитием принципа оптической связи стала передача сигналов по *оптоволоконным* линиям.

1.5. Тестирование транзисторов

В экспериментальной электронике полезно иметь простой метод тестирования транзисторов. Двумя параметрами, которые лучше всего указывают на исправность транзистора, являются ток утечки коллектор—эмиттер I_{CE0} и коэффициент усиления постоянного тока h_{FE} . Оба они измеряются в схеме, приведенной на рис. 1.17. Когда ключ S разомкнут, ток базы не течет, и миллиамперметр в коллекторной цепи показывает ток утечки I_{CE0} . Когда ключ замкнут, базовый ток около 10 мкА течет через резистор R (около 0,6 В падает на переходе база—эмиттер, так что $I_B = (9 - 0,6)/820\,000 = 10\text{ мкА}$). Таким образом, усиленный ток в коллекторной цепи равен $h_{FE}/100\text{ мА}$.

Чтобы упростить измерения, можно взять микроамперметр со шкалой 0—100 мкА и шунтом R_s , включаемым с помощью S' при замыкании ключа S .

Таким образом, маленький ток утечки измеряется в диапазоне 100 мкА, затем прибор шунтируется так, чтобы его полная шкала соответствовала 10 мА для измерения h_{FE} . Для тестирования p - n - p -транзисторов полярность батареи и измерительного прибора изменяют на противоположные.

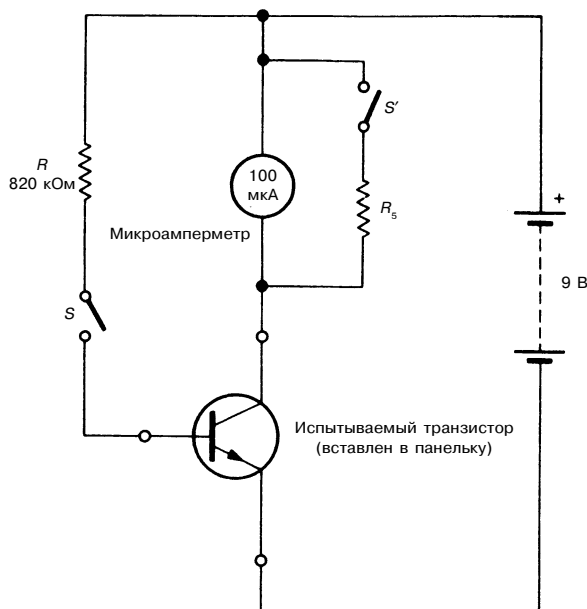


Рис. 1.17. Схема тестирования транзистора.

1.6. Усилитель напряжения

1.6.1. Введение

Точно так же, как в телеграфе Морзе роль сигналов играет последовательность импульсов напряжения, сигналами в электронных схемах обычно являются постоянные или переменные напряжения. Такие устройства, как головка звукоснимателя или микрофон, создают переменное напряжение, которое должно быть усилено прежде, чем им можно будет воспользоваться. Некоторые источники сигналов, такие как фототранзистор и некоторые детекторы ядерного излучения, могут быть источниками тока, который, как правило, еще до усиления преобразуется в напряжение. Поэтому наиболее важны усилители напряжения и, несмотря на то что биполярный транзистор работает как устройство, усиливающее ток, основное применение он находит в усилителях напряжения.

1.6.2. Резистор нагрузки

На рис. 1.18, *a* показан очень простой усилитель напряжения; выходное напряжение $V_{\text{вых}}$ возникает на выходе в результате протекания коллекторного тока по резистору нагрузки R_L . Этот пример иллюстрирует одно из наиболее важных применений резисторов в электронных цепях: преобразование тока в напряжение. Входное напряжение $V_{\text{вх}}$, приложенное к переходу база—эмиттер, приводит к увеличению тока базы, зависящего от сопротивления перехода база—эмиттер. Ток базы вызывает намного больший ток коллектора i_c , создающий падение напряжения $i_c R_L$ на резисторе R_L . Эта разность потенциалов пропорциональна $V_{\text{вх}}$, но намного больше по величине.

Важной деталью таких схем является земляная шина, называемая также землей, «нулем вольт» (0 В) или общей шиной и обозначаемая символом, показанным на рисунке. Земляная шина является общей для входного сигнала, выходного сигнала и источника постоянного напряжения и обычно является точкой, относительно которой отсчитываются все напряжения в схеме.

1.6.3. Рабочая точка и смещение

Схема, приведенная на рис. 1.18, *a*, как можно догадаться, является сильно упрощенной схемой усилителя напряжения. Она будет давать отклик только на положительное входное напряжение и, кроме того, только на напряжение, большее чем 0,5 В; последнее значение является той э.д.с., которая необходима для смещения перехода база—эмиттер в прямом направлении. Ясно, что, если схема предназначена для усиления малых сигналов без искажения, переход база—эмиттер должен быть смещен в прямом направлении даже в отсутствие сигнала. Обычно напряжение переменного сигнала принимает как положительное, так и отрицательное значение, так что выходное напряжение на коллекторе должно иметь возможность двигаться вверх к напряжению источника питания (при отрицательном входном напряжении) и вниз к потенциалу земляной шины (при положительном входном напряжении). Из этого следует, что при равном нулю входном сигнале (это состояние обычно

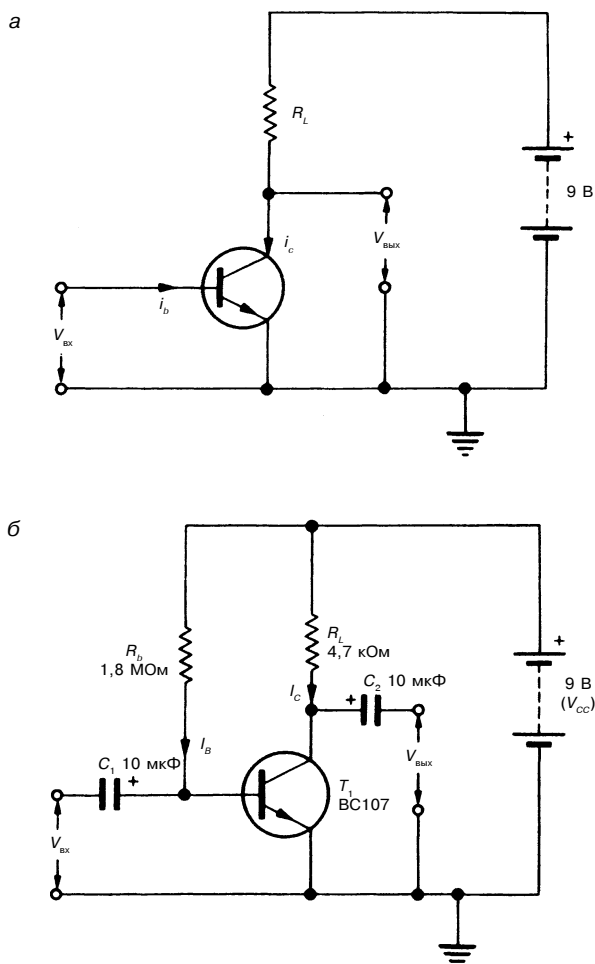


Рис. 1.18. Использование транзистора в усилителе напряжения:
a — простейшая схема; *б* — схема со смещением.

называется режимом *покоя*) в транзисторе должен протекать такой ток коллектора, чтобы напряжение на коллекторе находилось посередине между землей и напряжением источника питания, готовое изменяться в любом направлении в соответствии с полярностью входного сигнала.

На рис. 1.18, *б* показана схема, в которой достигается требуемый результат. Маломощный кремниевый транзистор, такой как BC107, будет очень хорошо работать с коллекторным током в режиме покоя 1 мА. В этом случае при правильном выборе рабочей (начальной) точки требуется, чтобы напряжение на коллекторе находилось посередине между 0 и +9 В, то есть на резисторе R_L должно падать 4,5 В. Таким образом, согласно закону Ома, $R_L = 4,5 \text{ В} / 1 \text{ мА} = 4500 \text{ Ом}$. Ближайшее номинальное значение R_L равно 4,7 кОм (см. приложение 1). Для рассматриваемой схемы имеем:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_L = V_{CC} - h_{FE} I_B R_L,$$

где V_{CC} — напряжение питания.

Если мы примем для транзистора BC107 коэффициент усиления постоянного тока h_{FE} равным 200, то для тока коллектора 1 мА требуется ток базы $I_B = 1/200$ мА = 5 мкА. Сопротивление базового резистора R_B , задающего ток базы, снова находится согласно закону Ома:

$$R_B = \frac{V_{CC}}{I_B} = \frac{9}{5 \times 10^{-6}} = 1,8 \text{ МОм.}$$

Напряжением база—эмиттер V_{BE} (приблизительно равным 0,6 В) здесь пренебрегаем по сравнению с намного большим напряжением питания V_{CC} .

1.6.4. Разделительные конденсаторы

Разделительные конденсаторы C_1 и C_2 используются для изоляции внешних цепей от постоянных напряжений, имеющих на базе и коллекторе в режиме покоя. Свойство конденсатора не пропускать постоянное напряжение и в то же время пропускать переменное очень ценно в электронике; оно является результатом стремления конденсатора сохранять свой заряд, и поэтому разность потенциалов на его обкладках остается постоянной. Следовательно, увеличение потенциала на одной обкладке вызывает соответствующее увеличение потенциала на другой. Поданный на одну из обкладок, переменный сигнал изменяет ее потенциал много раз в секунду и, таким образом, передается с одной обкладки на другую. В то же время постоянное напряжение дает возможность конденсатору накопить заряд, соответствующий новой разности потенциалов на его обкладках, и поэтому оно не передается. Время, необходимое для установления новой разности потенциалов, зависит от *постоянной времени* цепи, которая должна быть больше периода передаваемого переменного напряжения самой низкой частоты. Более подробно этот вопрос обсуждается в гл. 8. В рассматриваемом простом усилителе напряжения постоянные времени цепей с разделительными конденсаторами емкостью 10 мкФ обеспечивают передачу переменного напряжения без ослабления вплоть до 10 Гц.

Знак «плюс» на рисунке у одной из обкладок конденсатора является указанием, как подключать электролитические конденсаторы, у которых изолирующий диэлектрический слой представляет собой чрезвычайно тонкую пленку окиси алюминия, полученную электролитическим осаждением. Такие конденсаторы имеют большие емкости при малых размерах и низкой цене, но должны включаться в схему с учетом полярности, за исключением конденсаторов специального типа — неполярных конденсаторов.

1.6.5. Стабилизация рабочей точки

Серьезный недостаток схемы на рис. 1.18, б состоит в том, что напряжение коллектора в режиме покоя целиком зависит от величины h_{FE} транзистора, в то время как численные значения этого параметра имеют большой разброс у различных экземпляров транзисторов одного типа. Например, при типичном значении h_{FE} для транзистора BC107, равном 200, изготовители указывают, что оно может изменяться в пределах от 90 до 450. Изменение h_{FE} сдвигает рабочую точку по постоянному току. Например, если коэффи-

циент h_{FE} равен 100 вместо 200, то при этом потечет ток коллектора, равный 0,5 мА, а не 1 мА, и падение напряжения на R_L составит только 2,35 В вместо 4,7 В. Увеличение напряжения на коллекторе в режиме покоя означает, что выходное напряжение в схеме может изменяться в сторону увеличения только на 2 В, а не на 4 В (возможно изменение выходного напряжения в сторону уменьшения до 6 В, но от этого мало пользы, когда положительные приращения ограничены).

Последствия использования транзистора с $h_{FE} = 400$ еще более серьезны. В этом случае ток коллектора удвоится до 2 мА. Простое вычисление показывает, что все 9 В питания будут падать на резисторе R_L . Говорят, что транзистор находится в насыщении. Практически между коллектором и эмиттером остается небольшое напряжение порядка 0,2 В. Любое дальнейшее увеличение тока базы почти ни к чему не приводит; действительно, падение напряжения на R_L не может превышать V_{CC} . Поскольку при насыщении транзистора потенциал коллектора фактически равен потенциалу земли, схема теперь не пригодна для линейного усиления: невозможны изменения выходного напряжения в сторону уменьшения. Состояние насыщения будет рассмотрено в подразд. 1.7.

Возвращаясь к линейному усилителю на рис. 1.18, б, можно сказать, что необходимо некоторое усовершенствование схемы, чтобы повысить ее устойчивость к изменениям h_{FE} . Даже если бы у нас была возможность отбирать транзисторы с $h_{FE} = 200$, а это очень дорого при массовом выпуске схем, h_{FE} увеличивается с ростом температуры, так что схема все равно не была бы надежной. На рис. 1.19 показано очень простое, но эффективное улучшение. Вместо того чтобы подключать резистор R_B непосредственно к V_{CC} , мы, уменьшив сопротивление вдвое, подключим его к коллектору ($V_{CE} \approx V_{CC}/2$). Теперь благодаря этому ток базы в режиме покоя зависит от коллекторного напряжения в режиме покоя. Даже при увеличении h_{FE} транзистор не может попасть в насыщение: если коллекторное напряжение падает, то также падает ток базы, «придерживая» коллекторный ток. И наоборот, если h_{FE} уменьшается, коллекторное напряжение в режиме покоя возрастает, увеличивая ток I_B .

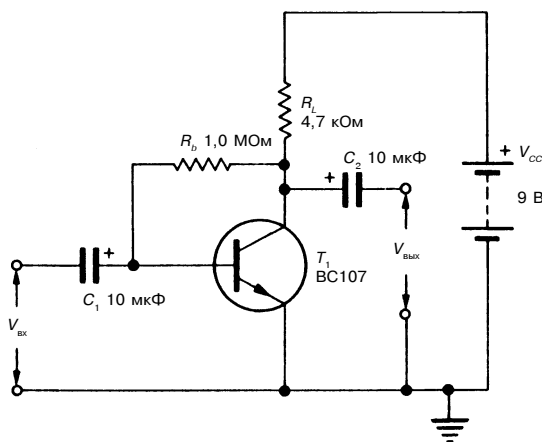


Рис. 1.19. Усилитель напряжения со стабилизацией рабочей точки.

Ток базы определяется теперь соотношением

$$I_B = V_{CE} / R_B,$$

и, как и прежде,

$$V_{CE} = V_{CC} - h_{FE} I_B R_L.$$

Объединяя эти равенства, получим

$$V_{CE} = \frac{V_{CC}}{1 + h_{FE} R_L / R_B}.$$

Если R_L и R_B имеют значения, указанные на рис. 1.19, и $h_{FE} = 100$, то $V_{CE} \approx 6$ В; если $h_{FE} = 400$, то $V_{CE} \approx 3$ В. Хотя здесь все еще положение рабочей точки меняется, это не существенно, пока для получения больших сигналов не требуется иметь возможно большие пределы изменения выходного напряжения. Схема, приведенная на рис. 1.19, будет работать при изменении параметров транзисторов в очень широком диапазоне и является полезным усилителем напряжения общего назначения. Принцип построения схемы с автокомпенсацией изменений h_{FE} является просто примером *отрицательной обратной связи*, которая представляет собой одно из самых важных понятий в электронике, и будет рассмотрена в гл. 4.

1.6.6. Стабилизированный усилитель напряжения

Для некоторых применений даже относительно небольшие изменения положения рабочей точки, имеющиеся в схеме на рис. 1.19, недопустимы. Если режим по постоянному току должен практически не зависеть от h_{FE} , можно использовать схему стабилизированного усилителя, показанную на рис. 1.20. Первым характерным признаком этой схемы является наличие резистора R_3 в цепи эмиттера, а это означает, что потенциал эмиттера боль-

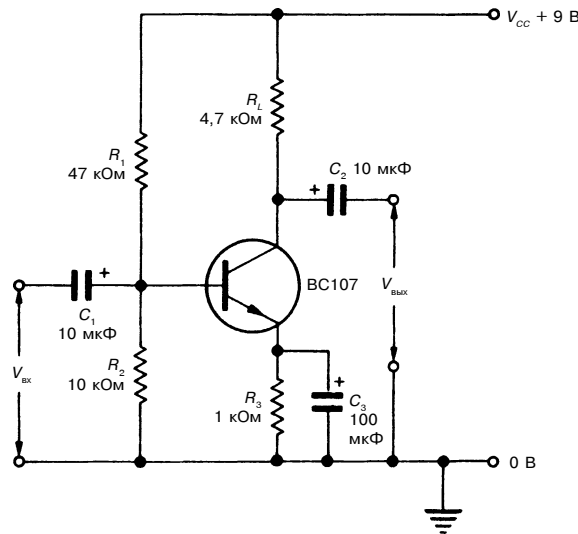


Рис. 1.20. Стабилизированный усилитель с эмиттерным резистором.

ше не равняется потенциалу земли, а немного выше его и равен $I_E R_3$, где I_E — ток эмиттера. Второе отличие состоит в том, что вместо единственного резистора для задания базового тока определенной величины применен делитель напряжения R_3, R_2 , фиксирующий потенциал базы относительно земли. Ток делителя напряжения на порядок выше тока базы, так что последний слабо влияет на потенциал базы. Так как переход база—эмиттер смещен в прямом направлении, на нем падает небольшое напряжение (у кремниевого транзистора приблизительно 0,6 В), так что потенциал эмиттера ниже потенциала базы на 0,6 В.

Итак, если V_B — потенциал базы относительно земли, а V_E — потенциал эмиттера относительно земли, то

$$V_E = V_B - 0,6.$$

Но

$$V_E = I_E R_3,$$

поэтому

$$I_E = \frac{V_B - 0,6}{R_3}.$$

Следовательно, ток эмиттера I_E определяется выбором величин V_B и R_3 . При сопротивлениях резисторов R_1 и R_2 , указанных на рис. 1.20, потенциал базы зафиксирован на уровне 1,6 В; поэтому потенциал эмиттера равен приблизительно 1,0 В, обеспечивая требуемый ток эмиттера 1 мА при сопротивлении эмиттерного резистора 1 кОм.

Поскольку

$$I_E = I_C + I_B$$

и

$$I_B \ll I_C,$$

имеем:

$$I_E \approx I_C$$

Следовательно, ток коллектора также примерно равен 1 мА.

Интересно отметить, что в приведенном расчете схемы отсутствует коэффициент h_{FE} транзистора. Фактически единственным параметром транзистора, имеющим какое-либо значение в этой схеме, является напряжение V_{BE} , которое принято равным 0,6 В и изменяется очень мало (<0,1 В) от одного транзистора к другому. При расчете стабилизированной схемы падение напряжения на эмиттерном резисторе должно быть больше возможных изменений напряжения V_{BE} , но не настолько большим, чтобы заметно уменьшить амплитуду выходного сигнала (напряжение на коллекторе теперь может изменяться только между V_{CC} и V_E , а не между V_{CC} и потенциалом земли). Обычно подходящим является напряжение 1 В. Конденсатор большой емкости C_3 шунтирует эмиттерный резистор для того, чтобы на эмиттере не появлялось переменное напряжение. Без C_3 усиление напряжения очень сильно упадет из-за отрицательной обратной связи, поскольку переменное напряжение на резисторе R_3 вычитается из входного сигнала.

1.6.7. Измерение коэффициента усиления напряжения

Удобный способ измерения коэффициента усиления состоит в том, что на вход усилителя подается сигнал от генератора синусоидальных сигналов, а затем с помощью осциллографа измеряется выходной сигнал $V_{\text{ВЫХ}}$ и сравнивается с входным сигналом $V_{\text{ВХ}}$.

Коэффициент усиления напряжения равен

$$A_V = \frac{V_{\text{ВЫХ}}}{V_{\text{ВХ}}}.$$

Для схем, рассмотренных в этой главе, коэффициент усиления напряжения имеет величину порядка 150—200. Теоретический расчет коэффициента усиления проводится в гл. 6.

1.7. Режим насыщения

Между простой переключающей схемой, рассмотренной в начале главы (в подразд. 1.2), и обсуждавшимся только что линейным усилителем имеется очевидное различие. В нормально работающем линейном усилителе коллекторный ток всегда прямо пропорционален базовому току. В переключающей схеме, такой как на рис. 1.21, коллекторный ток определяется главным образом напряжением питания V_{CC} и сопротивлением нагрузки R_L . Мы кратко упоминали о насыщении как о нежелательном режиме в усилителе напряжения, но это состояние является достаточно важным и заслуживает дальнейшего обсуждения.

Рассмотрим, что происходит с коллекторным током в схеме на рис. 1.21, если базовый ток постепенно увеличивается, начиная от нуля. Когда ключ S_1 разомкнут, базовый ток не течет и ток коллектора ничтожно мал. Замыкание S_1 приводит к появлению тока базы $I_B = V_{\text{CC}}/R_B$, где мы пренебрегли разностью потенциалов на переходе база—эмиттер. Ток коллектора, про-

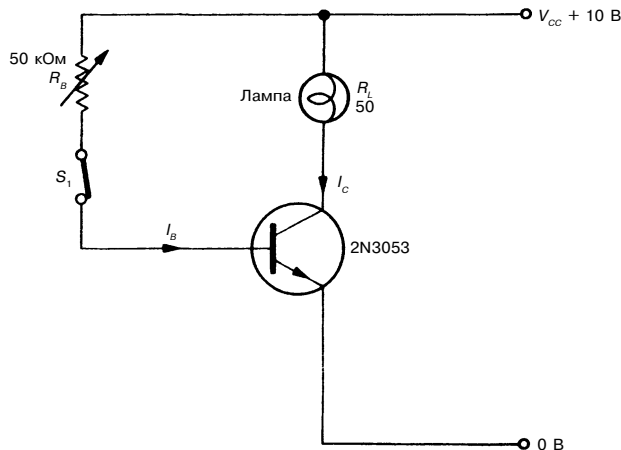


Рис. 1.21. Иллюстрация режима насыщения. Транзистор действует как ключ для включения лампы.

текающий по нагрузке R_L , равен $I_C = h_{FE} V_{CC}/R_B$. Для конкретной схемы, приведенной на рисунке, при $h_{FE} = 100$ и при максимальном значении R_B (50 кОм) получим:

$$I_C = \frac{100 \times 10}{50\,000} \text{ А} = 20 \text{ мА}.$$

Падение напряжения на R_L определяется произведением $R_L I_C$, и в нашем случае равно $50 \times 0,02 = 1 \text{ В}$. Транзистор при этом находится в линейном режиме; уменьшение R_B приводит к увеличению тока базы, увеличению тока коллектора и, следовательно, к увеличению падения напряжения на R_L . В этих условиях схема могла бы быть использована как усилитель напряжения.

Теперь рассмотрим случай, когда

$$R_B = h_{FE} R_L$$

и ток базы равен

$$I_B = \frac{V_{CC}}{R_B} = \frac{V_{CC}}{h_{FE} R_L}.$$

Следовательно, коллекторный ток равен

$$I_C = \frac{h_{FE} V_{CC}}{h_{FE} R_L} = \frac{V_{CC}}{R_L}.$$

С точки зрения нагрузки транзистор ведет себя как пара контактов ключа. Из закона Ома следует, что ток нагрузки в этой ситуации не может превышать величины V_{CC}/R_L . Поэтому дальнейшее увеличение тока базы не может увеличить ток коллектора, который определяется теперь только сопротивлением нагрузки и напряжением питания. Транзистор находится в *насыщении*.

На практике при насыщении транзистора между коллектором и эмиттером всегда остается небольшое напряжение, обычно обозначаемое $V_{CE(sat)}$. Как правило, оно меньше 1 В и может доходить до 0,1 В у транзисторов, специально предназначенных для работы в качестве ключей. Обычно $V_{CE(sat)}$ уменьшается по мере того, как через переход база—эмиттер течет все больший ток, то есть в случае, когда отношение тока коллектора I_C к току базы I_B становится значительно меньше, чем коэффициент усиления тока транзистора h_{FE} .

Грубо говоря, глубокое насыщение (малое значение $V_{CE(sat)}$) имеет место, когда

$$\frac{I_C}{I_B} < \frac{h_{FE}}{5}.$$

Для схемы типа той, какая показана на рис. 1.21, когда ток базы задается просто подключением резистора к источнику питания, мы выбираем

$$\frac{R_B}{R_L} < \frac{h_{FE}}{5}.$$

Следовательно, для схемы на рис 1.21, принимая типичное для транзистора 2N3053 (аналог КТ630Б. — *Примеч. перев.*) значение коэффициента усиления тока $h_{FE} = 150$, имеем

$$\frac{R_B}{R_L} < \frac{150}{5} = 30.$$

Следовательно, при $R_L = 50$ Ом мы выбираем

$$R_B < 30 \times 50 \text{ Ом} = 1,5 \text{ кОм}.$$

Итак, если в качестве нагрузки используется лампа с сопротивлением 50 Ом, то для ее эффективного включения нам следует выбрать сопротивление базового резистора меньше 1,5 кОм. Если это невозможно, когда, например, в качестве R_B используется фоторезистор с минимальным сопротивлением 10 кОм, то следует воспользоваться схемой Дарлингтона, чтобы увеличить коэффициент усиления тока.

Если транзистор работает с током коллектора, близким к максимально-му, и нужно поддержать напряжение $V_{CE(sat)}$ на уровне долей вольта, то из-за уменьшения h_{FE} может понадобиться базовый ток больше, чем $I_C/10$.

Возможно, покажется неожиданным, что $V_{CE(sat)}$ может быть много меньше, чем напряжение V_{BE} , которое у кремниевого транзистора равно примерно 0,6 В. Происходит это потому, что в режиме насыщения переход коллектор—база смещен в прямом направлении. Следовательно, мы имеем два p - n -перехода, смещенных в прямом направлении, включенных навстречу друг другу так, что падения напряжения на них взаимно компенсируются. Эта способность биполярного транзистора иметь в режиме насыщения очень маленькое падение напряжения между коллектором и эмиттером делает его весьма полезным переключающим прибором. Многие из наиболее важных применений электроники, включая обширную область цифровой электроники, используют переключающие схемы.

В режиме переключений транзистор работает либо с фактически нулевым током коллектора (транзистор выключен), либо с фактически нулевым напряжением на коллекторе (транзистор включен). В обоих случаях мощность, рассеиваемая на транзисторе, очень мала. Значительная мощность рассеивается только в то время, когда происходит переключение: в это время и напряжение коллектор—эмиттер, и ток коллектора имеют конечные значения.

Маломощный транзистор, такой как 2N3053, с максимально допустимой рассеиваемой мощностью менее 1 Вт, может переключать мощность в нагрузке в несколько ватт. Следует обратить внимание на то, что максимальные значения коллекторного напряжения и тока не должны выходить за допустимые пределы; кроме того, желательно осуществлять переключения возможно быстрее, чтобы избежать рассеяния чрезмерно большой мощности.

ГЛАВА 2

ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР

2.1. Введение

В предыдущей главе подчеркивалось, что одно из главных свойств биполярного транзистора состоит в том, что он является усиливающим устройством, управляемым током. В случае полевого транзистора (Field-Effect Transistor, FET) выходным током управляет входное *напряжение*, тогда как входной ток обычно пренебрежимо мал (он может быть меньше 1 пА). Это большое достоинство, важное в тех случаях, когда сигнал приходит от таких устройств, как конденсаторный микрофон или пьезоэлектрический датчик, которые не в состоянии давать сколько-нибудь значительный ток.

Полевые транзисторы бывают, по существу, двух типов: полевые транзисторы с управляющим p - n -переходом (Junction FET, JFET) и полевые транзисторы с изолированным затвором (Insulated Gate FET, IGFET). Транзисторы последнего типа больше известны как МОП-транзисторы, при этом название указывает на их конструкцию: металл—окисел—полупроводник (Metal—Oxide—Semiconductor FET, MOSFET).

2.2. Полевой транзистор с p - n -переходом

2.2.1. Конструкция

На рис. 2.1 схематически изображен n -канальный полевой транзистор с p - n -переходом и приведено его условное обозначение. К обоим концам крошечного бруска из кремния n -типа прикреплены выводы, образующие омические (невыпрямляющие) контакты. Область кремния p -типа, поме-

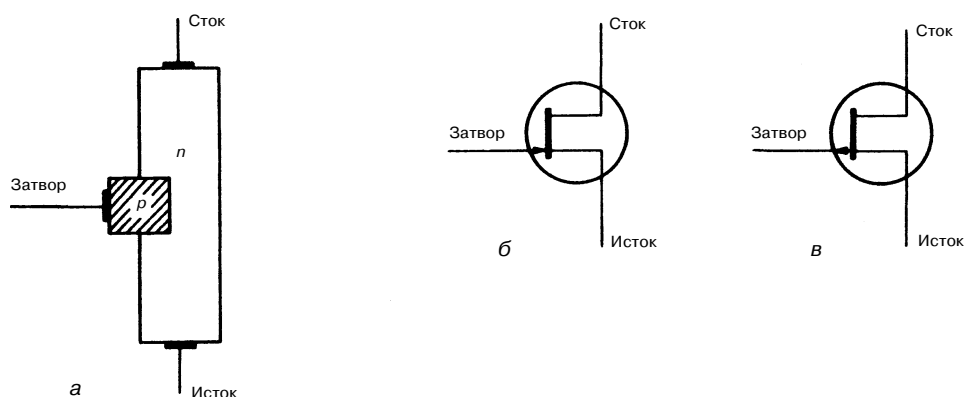


Рис. 2.1. Полевой транзистор с p - n -переходом:

a — схематическое изображение конструкции транзистора с каналом n -типа; $б, в$ — обозначение транзисторов с каналом n -типа и с каналом p -типа соответственно.

щаемая на боковой поверхности бруска, образует p - n -переход. Контакт на нижнем конце бруска называется истоком, а контакт на верхнем конце бруска — стоком. Как это следует из названий, электроны движутся от истока к стоку, и управляет этим током напряжение, которое подается на p -область, называемую затвором.

В альтернативной конструкции с каналом p -типа затвор выполнен из материала n -типа. На рис. 2.1, в указано обозначение такого транзистора на схемах.

2.2.2. Принцип действия

Ток, текущий через транзистор с p - n -переходом, зависит от размера обедненного слоя на смещенном в обратном направлении переходе затвор—канал. На рис. 2.2 показана схема для тестирования n -канального полевого транзистора с p - n -переходом, на которой изображен также обедненный слой. Затвор легирован в значительно большей степени, чем брусок n -типа, так что обедненный слой почти полностью располагается в бруске. На затвор подается отрицательное напряжение смещения относительно истока (V_{GS}), заставляющее обедненный слой принять ту особую форму, которая показана на рисунке: слой шире вверху и уже внизу, так как сток поддерживается более положительным, чем исток. Чем шире обедненный слой, тем уже канал, по которому могут проходить электроны от истока к стоку, поскольку сам обедненный слой, лишенный свободных носителей, ведет себя как изолятор. Следовательно, при фиксированном напряжении сток—исток ток стока зависит от входного напряжения V_{GS} . На практике

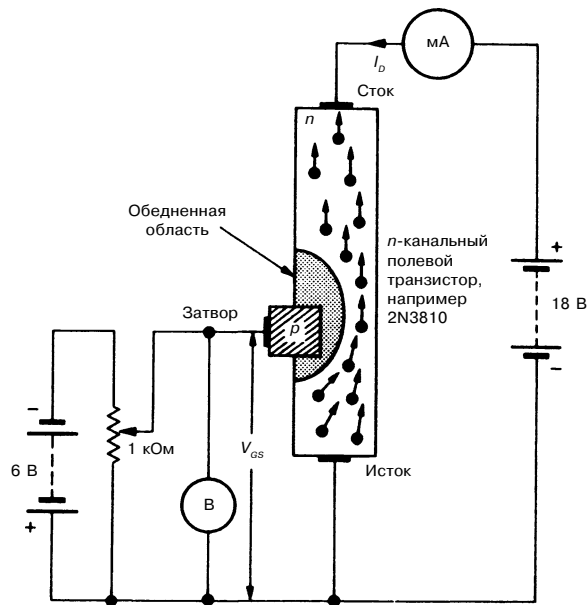


Рис. 2.2. Схема для тестирования n -канального полевого транзистора с p - n -переходом. В схематически изображенном транзисторе показан поток электронов, движущихся по каналу.