

Предисловие.....	17
Практические схемы и системы.....	18
<hr/>	
<b>I</b> Электрические схемы и цепи.....	20
Введение.....	21
<b>Глава 1. Диоды</b> .....	24
Ток и напряжение .....	24
Обратное смещение.....	25
Вопросы по схемам .....	30
Вопросы по диодам .....	30
Тесты .....	31
<b>Глава 2. Транзисторные ключи</b> .....	32
Включение ламп.....	32
Датчики.....	33
Схема включения лампы с помощью фотодиода .....	33
Варианты схемы фотореле .....	35
Конструирование систем .....	35
Сирена, включаемая датчиком освещенности.....	35
Ключи на биполярных транзисторах .....	37
Схема для управления нагревателем.....	38
Термисторы.....	39
Защитный диод .....	40
ЭДС .....	41
Индикация работы системы .....	41
Предупреждение о перегреве.....	42
Инверсная работа .....	42
p-n-p или p-p-n? .....	42
Типы МОП-транзисторов .....	43
Триггер Шмитта .....	43
Защелкивание .....	44
Гистерезис .....	44
Управление логическими сигналами.....	45
Практикум по транзисторным ключам.....	50
Вопросы по транзисторным ключам .....	50
Дополнительные вопросы .....	52
Тесты .....	52
<b>Глава 3. Делители напряжения</b> .....	54
Ток и разность потенциалов .....	54
Влияние нагрузки делителя напряжения.....	55
Увеличение точности .....	56
Датчики.....	57
Погрешности измерений.....	57
Регулируемые делители напряжения .....	58
Внутреннее сопротивление.....	58

Практикум по делителям напряжения .....	60
Вопросы по делителям напряжения .....	60
<b>Глава 4. Конденсаторы .....</b>	<b>62</b>
Емкость конденсатора .....	62
Параллельное и последовательное соединения конденсаторов .....	63
Выбор конденсаторов.....	63
Применение конденсаторов для связи между каскадами .....	68
Применение конденсаторов для исключения паразитной связи между каскадами (блокировки).....	69
Заряд конденсаторов.....	70
Разряд конденсаторов.....	72
Время .....	72
Практикум по конденсаторам .....	73
Вопросы по конденсаторам.....	74
Дополнительные вопросы .....	75
Тесты .....	76
Вспомогательный веб-сайт .....	77
<b>Глава 5. Применение конденсаторов.....</b>	<b>78</b>
Задержка времени .....	78
Одновибратор .....	78
Таймер на микросхеме семейства 555 .....	79
Мультивибратор .....	81
Переменное напряжение.....	83
Фильтр нижних частот .....	84
Сопротивление и реактанс .....	85
Импеданс .....	85
Импеданс и частота.....	86
Амплитудно-частотная характеристика.....	86
Частота среза.....	88
АЧХ фильтра низкой частоты .....	88
Фазовые соотношения.....	89
Период и фазовый сдвиг .....	90
Ток конденсатора .....	91
Фазочастотная характеристика фильтра высокой частоты.....	92
Практикум по фильтрам .....	92
Вопросы по применению конденсаторов .....	93
<b>Глава 6. Поля.....</b>	<b>95</b>
Электрическое поле.....	95
Магнитное поле.....	95
Поля и движение .....	96
Единицы измерения электрических полей .....	97
Единицы измерения магнитных полей.....	97
Ферромагнетики.....	99
<b>Глава 7. Катушки индуктивности.....</b>	<b>102</b>
Самоиндукция .....	102
Реактанс .....	103
Типы компонентов электронных цепей с индуктивностью .....	104
Передача энергии.....	105

LC-цепи .....	105
Фильтры с индуктивными элементами .....	107
Вопросы по полям .....	110
Вопросы по катушкам индуктивности .....	110
Тесты .....	111
<b>Глава 8. Усилители на МОП-транзисторах .....</b>	<b>112</b>
Усилитель с общим истоком .....	112
Крутизна передаточной характеристики .....	113
Смещение .....	114
Разделительные конденсаторы .....	114
Выходное напряжение .....	115
Выходное сопротивление .....	115
Испытания усилителя .....	116
Амплитудно-частотная характеристика .....	116
Фазочастотная характеристика .....	117
Практикум по усилителю на МОП-транзисторе в схеме с общим истоком .....	117
Практикум по крутизне МОП-транзисторов .....	118
Усилитель с общим стоком .....	118
Коэффициент усиления по напряжению .....	119
Согласование выхода с входом .....	119
Усиление по току и по мощности .....	120
Практикум по повторителям напряжения на МОП-транзисторах .....	120
Применение МОП-транзисторов .....	121
Вопросы по МОП-транзисторам .....	122
Тесты .....	123
Дополнительные вопросы .....	124
<b>Глава 9. Усилители на биполярных транзисторах .....</b>	<b>125</b>
Усилитель с общим эмиттером .....	125
Коэффициент усиления по току .....	125
Выходное напряжение .....	126
Выходное сопротивление .....	127
Смещение .....	127
Сопротивление эмиттера .....	127
Амплитудно-частотная характеристика .....	128
Коэффициент усиления по напряжению .....	128
Улучшение стабильности .....	129
Входное сопротивление .....	130
Коэффициент усиления по напряжению .....	130
Амплитудно-частотная характеристика .....	131
Шунтирующий конденсатор .....	131
Потребляемая мощность .....	132
Практикум по усилителям на биполярных транзисторах .....	132
Усилитель с общим коллектором .....	132
Коэффициент усиления по напряжению .....	133
Коэффициент усиления по току и мощности .....	134
Амплитудно-частотная характеристика эмиттерного повторителя .....	134
Составной транзистор (схема Дарлингтона) .....	134
Практикум по составным транзисторам .....	135
Дифференциальный усилитель .....	135
Практикум по дифференциальным усилителям .....	138

Резонансные усилители .....	138
Добротность .....	140
Достоинства резонансных усилителей .....	141
Практикум по резонансным усилителям .....	141
Вопросы по биполярным транзисторам .....	143
Тесты .....	144
<b>Глава 10. Усилители на полевых транзисторах с <i>p-n</i>-переходом</b> .....	<b>146</b>
Крутизна передаточной характеристики .....	147
Выходное сопротивление .....	147
Амплитудно-частотная характеристика .....	148
Практикум по усилителям на полевых транзисторах с <i>p-n</i> -переходом .....	148
Практикум по крутизне полевых транзисторов с <i>p-n</i> -переходом .....	148
Вопросы по полевым транзисторам с <i>p-n</i> -переходом .....	150
Тесты .....	150
<b>Глава 11. Операционные усилители</b> .....	<b>151</b>
Терминология .....	151
Корпуса .....	152
Идеальный операционный усилитель .....	152
ОУ на практике .....	152
Напряжение смещения нуля .....	153
Скорость нарастания выходного напряжения .....	153
Влияние частоты на коэффициент усиления .....	154
Компаратор напряжения .....	155
Практикум по компараторам напряжения .....	156
Равенство напряжений на входах ОУ .....	156
Инвертирующий усилитель .....	157
Виртуальная земля .....	158
Входное сопротивление .....	158
Расчет номинала резистора $R_B$ для минимизации смещения нуля ОУ .....	159
Практикум по смещению нуля .....	160
Практикум по амплитудно-частотным характеристикам .....	161
Неинвертирующий усилитель .....	161
Повторитель напряжения .....	162
Вопросы по операционным усилителям .....	163
Параметры операционных усилителей .....	164
Выбор ОУ .....	165
Тесты .....	165
<b>Глава 12. Применение операционных усилителей</b> .....	<b>166</b>
Сумматор .....	166
Дифференциальный усилитель .....	167
Входное сопротивление дифференциального усилителя .....	168
Применение дифференциальных усилителей в медицинских исследованиях .....	168
Измерения с помощью мостовой схемы .....	169
Интегратор .....	171
Генераторы треугольных импульсов .....	172
Инвертирующий триггер Шмитта .....	173
Работа триггера Шмитта .....	173
Расчет пороговых напряжений .....	175
Проектирование инвертирующего триггера Шмитта .....	176

Неинвертирующий триггер Шмитта .....	177
Пороговые напряжения .....	179
Проектирование неинвертирующего триггера Шмитта .....	179
Генераторы пилообразного напряжения и импульсов прямоугольной формы .....	181
Генератор пилообразного напряжения .....	182
Период следования импульсов, постоянная времени RC-цепи и гистерезис .....	183
Вопросы по применению операционных усилителей .....	183
Тесты .....	185
<b>Глава 13. Активные фильтры .....</b>	<b>187</b>
Амплитудно-частотная характеристика .....	188
Активный фильтр верхних частот первого порядка .....	189
Проектирование фильтров первого порядка .....	190
Активные фильтры второго порядка .....	191
Полосовые фильтры .....	192
Заградительные фильтры .....	194
Практикум по активным фильтрам .....	195
Вопросы по активным фильтрам .....	196
Тесты .....	196
<b>Глава 14. Генераторы .....</b>	<b>198</b>
Генератор с фазосдвигающей цепью .....	198
Генератор Колпитца .....	199
Генератор с мостом Вина .....	200
Практикум по генераторам .....	201
<b>Глава 15. Мощные усилители .....</b>	<b>202</b>
Усилители тока .....	202
Усилители класса А .....	203
Усилители класса В .....	203
Устранение переходных искажений .....	205
Мощные усилители на МОП-транзисторах .....	206
Проблемы отвода тепла .....	206
Радиаторы .....	207
Тепловое сопротивление .....	208
Интегральные схемы усилителей звуковой частоты .....	210
Практикум по мощным усилителям .....	212
Вопросы по мощным усилителям .....	212
Тесты .....	212
<b>Глава 16. Тиристоры и триаки .....</b>	<b>214</b>
Работа тиристора .....	214
Применение тиристоров при работе на постоянном токе .....	215
Применение тиристоров при работе на переменном токе .....	216
Рабочее напряжение .....	217
Двухполупериодный управляемый выпрямитель .....	218
Триаки .....	219
Диаки .....	220
Импульсы управления .....	220
Ложные включения .....	223
Электромагнитные помехи .....	223
Включение при нулевом напряжении .....	224

Практикум по работе тиристоров.....	226
Практикум по управляемым выпрямителям.....	227
Вопросы по тиристорам и триакам.....	227
Тесты.....	228
<b>Глава 17. Источники питания.....</b>	<b>229</b>
Выпрямление.....	230
Сглаживание.....	230
Выходное напряжение.....	231
Двухполупериодный выпрямитель и стабилизатор напряжения на стабилитроне.....	231
Мостовой выпрямитель.....	231
Сглаживание.....	232
Расчет амплитуды пульсаций.....	233
Стабилизация напряжения.....	234
Мощность стабилитрона.....	235
Мощность балластного резистора.....	235
Выходное сопротивление источника питания.....	235
Работа с большими токами нагрузки.....	235
Стабилизированный источник питания с двухполупериодным выпрямлением и стабилизатором на микросхеме.....	236
Диодный мост в монолитном исполнении.....	237
Применение микросхем для стабилизации напряжения.....	237
Выходное сопротивление и коэффициент стабилизации.....	238
Цепи защиты интегральных стабилизаторов напряжения.....	238
Регулируемые интегральные стабилизаторы напряжения.....	238
Практикум по источникам питания.....	239
Вопросы по источникам питания.....	239
<b>Глава 18. Логические микросхемы.....</b>	<b>241</b>
Работа элемента И.....	241
Элемент ИЛИ.....	242
Элемент НЕ.....	243
Элементы И-НЕ и ИЛИ-НЕ.....	243
Элемент ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ.....	244
Семейства логических микросхем.....	245
Транзисторно-транзисторная логика.....	245
КМОП-логика.....	246
Сравнение ТТЛ и КМОП ИС.....	247
Эмиттерно-связанная логика (ЭСЛ).....	250
Практикум по логическим уровням напряжения.....	250
Практикум по таблицам истинности.....	251
Вопросы по логическим микросхемам.....	252
Тесты.....	253
<b>Глава 19. Логические операции.....</b>	<b>254</b>
Булевы символы.....	255
Определение состояния выходов.....	255
Схемы с четырьмя входами.....	258
Карты Карно.....	259
Разработка схем.....	260
Макетирование и моделирование.....	263
Работа с элементами И-НЕ и ИЛИ-НЕ.....	264

Практикум по логическим операциям.....	267
Практикум по использованию моделирования.....	268
Вопросы по логическим операциям.....	269
Тесты.....	270
<b>Глава 20. Комбинационные устройства.....</b>	<b>271</b>
Мажоритарная логика.....	271
Полусумматор.....	272
Полный сумматор.....	273
Древовидная схема контроля по четности.....	274
Схема сравнения по абсолютной величине.....	275
Преобразователь десятичных чисел в двоичные.....	276
Преобразователь двоичных чисел в десятичные.....	276
Шифратор приоритетов.....	277
Селектор данных.....	278
Распределитель данных.....	279
Произвольные таблицы истинности.....	280
Использование ПЗУ.....	284
Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС).....	285
Выполнение логических операций программным путем.....	285
Практикум по ИС средней степени интеграции.....	286
Вопросы по комбинационным устройствам.....	286
Тесты.....	287
<b>Глава 21. Последовательностные логические схемы.....</b>	<b>289</b>
Триггеры.....	289
Временные задержки.....	291
Одновибраторы.....	293
Мультивибраторы на КМОП ИС.....	295
Защелки.....	296
Тактируемая логика.....	297
D-триггеры.....	297
T-триггер.....	298
J-K-триггеры.....	299
Практикум по триггерам.....	300
Практикум по тактируемой логике.....	301
Вопросы по схемам с последовательностной логикой.....	301
Тесты.....	302
<b>Глава 22. Счетчики и регистры.....</b>	<b>303</b>
Деление и счет.....	303
JK-счетчики.....	305
Суммирующие и вычитающие счетчики.....	305
Счетчики со сквозным переносом.....	306
Синхронные счетчики.....	308
Двоично-десятичные счетчики.....	308
Счетчики до n.....	310
Декодирование состояний выходов.....	310
Регистры данных.....	311
Регистры сдвига.....	312
Счетчики Джонсона.....	313
Статические оперативные запоминающие устройства (ОЗУ).....	317

Динамические оперативные запоминающие устройства (ОЗУ) .....	317
Флеш-память .....	318
Управление памятью .....	319
Практикум по счетчикам и регистрам .....	320
Вопросы по счетчикам и регистрам .....	321
Тесты .....	322
<b>Глава 23. Дисплеи</b> .....	<b>323</b>
Светодиоды .....	323
7-сегментные светодиодные дисплеи .....	324
14-сегментные дисплеи .....	326
Матричные дисплеи .....	326
Жидкокристаллические дисплеи .....	327
Практикум по светодиодным дисплеям .....	328
Вопросы по светодиодам и дисплеям .....	330
Тесты .....	330
<b>Глава 24. Преобразователи сигналов</b> .....	<b>332</b>
Аналого-цифровые преобразователи .....	332
Параллельный АЦП .....	332
АЦП с последовательным приближением .....	335
АЦП интегрирующего типа .....	338
Сигма-дельта АЦП .....	339
Цифроаналоговые преобразователи .....	340
Сумматор на операционном усилителе .....	340
ЦАПы на матрице R-2R .....	342
Практикум по АЦП .....	344
Практикум по ЦАПам .....	344
Вопросы по преобразователям сигналов .....	344
Тесты .....	345
<b>Глава 25. Интегральные схемы</b> .....	<b>346</b>
ИС с низким уровнем интеграции .....	346
ИС для импульсных преобразователей напряжения .....	348
Фильтры на переключаемых конденсаторах .....	349
Схемы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) .....	350
Практикум по ИС .....	351
<hr/>	
<b>II Системы</b> .....	<b>352</b>
<b>Глава 26. Аудио- и видеосистемы</b> .....	<b>353</b>
Системы .....	353
Входная часть .....	353
Радиотюнер .....	354
CD/DVD-плеер .....	354
Жесткий диск .....	356
Флеш-память .....	357
Микрофоны .....	357
Компьютер как источник аудио- и видеосигналов .....	358
Аналоговые аудиосистемы .....	359
Обработка сигналов .....	359



Звуковой смеситель.....	360
Эквалайзер.....	360
Выходной усилитель.....	362
Громкоговорители.....	362
Звуковые колонки.....	364
Вопросы по аудио- и видеосистемам.....	364
Другие вопросы.....	365
Тесты.....	365
<b>Глава 27. Шумы.....</b>	<b>367</b>
Источники шумов.....	367
Электромагнитные помехи.....	367
Механические источники помех.....	368
Шумы в электрических цепях.....	368
Обработка сигналов.....	370
Отношение сигнал–шум.....	370
Уменьшение шумов.....	371
Шумы в телекоммуникациях.....	372
Вопросы по шумам.....	373
Тесты.....	373
<b>Глава 28. Телекоммуникационные системы.....</b>	<b>375</b>
Несущая частота и модуляция.....	377
Импульсная модуляция.....	379
Частотная манипуляция.....	381
Передача цифровых данных.....	382
Частотное уплотнение.....	383
Временное уплотнение.....	384
Скорость передачи данных.....	384
Дрожание (джиттер).....	385
Форма импульсов.....	386
Сравнение аналоговых и цифровых систем передачи данных.....	387
Сети телекоммуникации.....	388
RS-232.....	388
Код ASCII.....	390
Соединение и переключение цепей.....	391
Коммутация сообщений.....	392
TCP/IP.....	393
Вопросы по телекоммуникациям.....	395
Тесты.....	396
<b>Глава 29. Линии передачи.....</b>	<b>397</b>
Типы линий связи.....	397
Линии передачи.....	398
Характеристический импеданс.....	400
Передачики и приемники.....	400
Перекрестные помехи.....	403
Практикум по линиям передач.....	403
Практикум по трансформаторному включению линии передачи.....	404
Практикум по передатчикам и приемникам.....	404
Вопросы по линиям передач.....	405
Тесты.....	405

<b>Глава 30. Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС)</b> .....	407
Оптическое волокно.....	407
Источники света.....	409
Приемники света.....	409
Преимущества ВОЛС.....	410
Вопросы по ВОЛС.....	411
Тесты.....	411
<b>Глава 31. Радиотехнические системы связи</b> .....	413
Спектр электромагнитных волн.....	413
Радиовещание.....	414
Околоземная волна.....	414
Ионосферные радиоволны.....	416
Антенны.....	418
Антенны направленного действия.....	420
Радиопередающие устройства.....	421
Радиоприемные устройства.....	423
Супергетеродинные радиоприемники.....	425
Мобильные телефоны.....	427
Практикум по радиоприемникам.....	429
Практикум по биениям.....	430
Вопросы по радиотехническим системам связи.....	430
Тесты.....	430
<b>Глава 32. Измерительные системы</b> .....	432
Телеметрия.....	432
Измерение напряжения.....	433
Датчики.....	434
Датчики, генерирующие ЭДС.....	435
Резистивные датчики.....	436
Датчики газового состава.....	437
Емкостные датчики.....	438
Индуктивные датчики.....	439
Обработка сигналов и их использование.....	440
Дисплеи измерительных приборов.....	441
Практикум по измерительным системам.....	443
Вопросы по измерительным системам.....	443
<b>Глава 33. Электронные системы управления</b> .....	444
Регуляторные системы и сервосистемы.....	445
Управление температурой.....	445
Обратная связь в термостате.....	446
Управление скоростью вращения вала электромотора.....	446
Управление перемещением.....	449
Практикум по системам управления.....	451
Вопросы по системам управления.....	451
<b>Глава 34. Системы управления производственными процессами</b> .....	452
Пропорциональное управление.....	452
Пропорционально-интегральное управление.....	456
Пропорционально-интегрально-дифференциальное управление.....	458
Практикум по системам пропорционально-интегрально-дифференциального управления.....	460

<b>Глава 35. Отказы систем</b> .....	461
Причины отказов.....	461
Проявление отказа.....	462
Внешний осмотр.....	463
Предварительный анализ.....	463
Наиболее часто встречающиеся причины отказов.....	464
Аналоговые схемы.....	465
Цифровые схемы.....	466
Программные неисправности.....	468
Испытания программ.....	468
Вопросы по отказам систем.....	469
<hr/>	
<b>III Микроэлектронные цифровые системы</b> .....	471
<b>Глава 36. Входы и выходы</b> .....	472
Одноразрядный вход.....	472
Многоразрядные входы.....	474
Изолированные входы.....	475
Одноразрядный выход.....	476
Многоразрядные выходы.....	477
Вопросы по входам и выходам.....	477
Тесты.....	478
<b>Глава 37. Обработка информации</b> .....	479
От битов до терабайтов.....	479
Шины.....	480
Элементы компьютерной системы.....	481
Процессор.....	482
Микроконтроллеры.....	485
Программируемые логические контроллеры.....	488
Адресация.....	489
Обработка данных.....	491
Практикум по контроллерам.....	493
Вопросы по обработке данных.....	494
Тесты.....	494
<b>Глава 38. Программирование</b> .....	496
Блок-схема.....	497
Инициализация.....	497
Арифметические и логические операции.....	499
Временные подпрограммы.....	501
Обращение с данными.....	502
Подпрограммы ввода.....	503
Подпрограммы вывода.....	508
Прерывания.....	515
Прямая и косвенная адресация.....	517
Стек.....	518
Заключение.....	519
Практикум по программированию.....	519
<b>Глава 39. Языки программирования</b> .....	521
Программирование в машинных кодах.....	521

Программирование на ассемблере .....	522
Некоторые программы в ассемблере .....	525
Сокращения, используемые в ассемблере .....	525
Входы и выходы .....	527
Конфигурация выводов как выходов .....	527
Программирование с входами и выходами .....	528
Виртуальный микроконтроллер для оптического распознавания образов .....	530
Программирование на языке BASIC .....	530
Программирование в многоступенчатой логике .....	533
Тесты по ассемблеру .....	536
Тесты по BASIC'у .....	537
Тесты по многоступенчатой логике .....	538
<b>Глава 40. Роботизированные системы .....</b>	<b>540</b>
Роботы в промышленности .....	540
Источники питания .....	541
Робот как система .....	542
Достоинства программного обеспечения .....	542
Датчики роботов .....	542
Датчики света .....	542
Датчики касания .....	543
Микрофон .....	545
Датчики магнитного поля .....	546
Исполнительные механизмы роботов .....	546
<b>Глава 41. Нейронные сети .....</b>	<b>549</b>
Математические модели .....	550
Распознавание образов .....	553
Аналоговые входы и выходы .....	554
Вопросы по нейронным сетям .....	555
Тесты .....	555
<b>Приложение А. Полезная информация .....</b>	<b>557</b>
Электрические величины и единицы их измерения .....	557
Законы электрических цепей .....	559
Электрические цепи .....	560
Цепи с конденсаторами .....	560
Компоненты .....	561
Логические тождества .....	565
Системы счисления .....	565
Представление отрицательных чисел в двоичном коде .....	566
Благодарности .....	567
<b>Приложение Б. Ответы к вопросам для самопроверки .....</b>	<b>568</b>
<b>Предметный указатель .....</b>	<b>570</b>

# Предисловие

Эта книга была написана как пособие для начальных курсов по электронике. Ее содержание тщательно согласовано с основными программами образования в Великобритании, соответствующими уровню 3 (А-уровню), но затрагиваемые темы и глубина их рассмотрения были выбраны так, чтобы получившийся текст был доступен для большинства студентов младших курсов во всем мире. Единственным требуемым изначальным знанием являются основы математики и наличие аттестата об окончании средней школы с изучением естествознания.

В книге рассмотрены темы, входящие в национальную программу инженерного образования в Великобритании (ВТЕС, 2007 г.), а именно: основы электротехники и электроники (раздел 5), основы применения электронных приборов и схем (раздел 35), микропроцессорные системы и их применение (раздел 62), вводные части к разделам 51 (системы управления производственными процессами), 60 (основы применения аналоговых схем), 68 (основы применения микроконтроллеров) и 90 (основы телекоммуникации).

Особенностью книги является ее практическая направленность, имеющая целью побудить студентов к конструированию и испытанию реальных электрических схем в лабораториях. В соответствии с требованиями некоторых программ в книге показано, как поведение электронных схем может быть изучено с помощью моделирования на компьютере.

Книга подходит и для использования в качестве пособия в учебных заведениях, и для самообразования. В основной текст включены врезки с дополнительными материалами, которые студенты могут по своему желанию изучать или пропускать. В тексте часто вставлены вопросы для самопроверки, ответы на которые даны в приложении Б. Ответы к нумерованным вопросам и тестам, приведенным в конце большинства глав, приведены на вспомогательном веб-сайте.

При подготовке к изданию четвертой редакции текст был подвергнут значительной переработке. Было добавлено пять новых глав, в которых рассматриваются электрические и магнитные поля, диоды, генераторы, интегральные микросхемы и системы промышленного контроля и управления. С целью отображения растущей важности цифровой электроники и микроконтроллерных систем были расширены несколько других глав. Во всех главах были внесены изменения, связанные с последними достижениями электроники.

Панель «В Интернете» во многих главах является новой чертой этого издания. Она предназначена для приучения студентов к пользованию этим изобильным источником информации. Выпуск в свет третьего издания данной книги по времени приурочен к запуску вспомогательного веб-сайта.

Вспомогательный веб-сайт содержит ряд анимированных картинок, иллюстрирующих работу некоторых электронных схем, описанных в книге, калькулятор для расчетов электронных схем и серию интерактивных рабочих листов с ответами на вопросы.

*Оуэн Бишоп*

# Практические схемы и системы

## Идеи

Эта книга содержит не только текст с различными объяснениями, но и может служить источником идей как для постановки лабораторных работ, так и при выполнении реальных проектов в области электроники.

Все схемы в данной книге были испытаны или на рабочем столе, или с помощью компьютерного моделирования. Почти все чертежи схем выполнены с указанием номиналов входящих в них компонентов, так что студенты не будут испытывать затруднений при сборке схем, которые будут работать, как надо.

## Испытания схем

Постарайтесь собрать столько из схем, приведенных в этой книге, сколько только сможете. Проверьте, ведут ли они себя так, как это описано в книге. Попробуйте немного изменить номиналы некоторых из элементов, отдавая себе отчет в том, что должно измениться в поведении схемы, и проверьте, так ли это.

Существуют два пути испытаний схем:

- с использованием макетной платы, на которой собирается временная схема из реальных элементов и модулей;
- с использованием компьютерного моделирования. При этом сначала (виртуально) «собирается» схема-модель, потом этот файл сохраняется, а затем включается режим испытаний.

Моделирование обычно проходит быстрее и дешевле, чем макетирование. При моделировании легче внести изменения и быстрее получить результаты испытаний. Кроме того, нет опасности случайно сжечь элементы схемы.

## Обозначения, используемые в этой книге

Единицы измерения набраны прямым шрифтом: V, A, s, S,  $\mu\text{F}$ .

Значения набраны курсивом:

- фиксированные –  $V_{CC}$ ,  $R_1$ ;
- изменяющиеся –  $v_{GS}$ ,  $g_m$ ,  $i_D$ ;
- маленькие изменения значений –  $v_{gs}$ ,  $i_d$ .

Резисторы в схемах пронумерованы  $R_1$ ,  $R_2$  и т. д. А сопротивление резистора показывается символом  $R_1$ . То же самое касается конденсаторов ( $C_1$ ,  $C_2$ ) и индуктивностей ( $L_1$ ,  $L_2$ ).

## Значимые цифры

При выполнении числовых расчетов в этой книге ответы следует давать в форме трех значащих цифр, если не указано иное.

## Единицы измерений при вычислениях

Обычно единицы измерений, используемые при вычислениях, очевидны. В противном случае они помещены в квадратные скобки. Иногда они показаны как деленные или умноженные одна на другую.

**Пример:**

На стр. 73 указано

$$R_1 = 14,3/2,63 \text{ [V/}\mu\text{A]} = 5,44 \text{ мОм.}$$

Здесь измеренное в вольтах напряжение делится на измеренный в микроамперах ток. Математически это уравнение можно записать в следующей форме:

$$R_1 = 14,3/(2,63 \cdot 10^{-6}) = 5,44 \cdot 10^6.$$

Так как в этой форме уравнение трудно воспринять, мы и используем производные единицы взамен множителя 10 в той или иной степени. Когда вычисления осуществляются с применением калькулятора, легче всего вводить числа 14,3 и 2,63, а затем команду 'EXP-6' или другую степень, если это требуется. В этом случае результат и в инженерном, и в научном форматах высвечивается на дисплее в форме 5,437262357<sup>06</sup>. Округляя его до трех значащих цифр, мы получаем 5,44, а показатель степени 06 указывает на то, что это мегомы.

**Вспомогательный сайт**

URL вспомогательного сайта:

<http://www.elsevierdirect.com/companions/9780080966342>

# Электрические схемы и цепи

II	Системы	352
III	Микроэлектронные цифровые системы	471

24	Глава 1. Диоды
32	Глава 2. Транзисторные ключи
54	Глава 3. Делители напряжения
62	Глава 4. Конденсаторы
78	Глава 5. Применение конденсаторов
95	Глава 6. Поля
102	Глава 7. Катушки индуктивности
112	Глава 8. Усилители на МОП-транзисторах
125	Глава 9. Усилители на биполярных транзисторах
146	Глава 10. Усилители на полевых транзисторах с р-п-переходом
151	Глава 11. Операционные усилители
166	Глава 12. Применение операционных усилителей
187	Глава 13. Активные фильтры
198	Глава 14. Генераторы
202	Глава 15. Мощные усилители
214	Глава 16. Тиристоры и триаки
229	Глава 17. Источники питания
241	Глава 18. Логические микросхемы
254	Глава 19. Логические операции
271	Глава 20. Комбинационные устройства
289	Глава 21. Последовательностные логические схемы
303	Глава 22. Счетчики и регистры
323	Глава 23. Дисплеи
332	Глава 24. Преобразователи сигналов
346	Глава 25. Интегральные схемы



## Введение

Электрические цепи являются путями протекания электрического тока.

В цепях постоянного тока он протекает в одном направлении, от точки с более высоким потенциалом к точке с более низким потенциалом. Электрическая схема может состоять из одной простой цепи (как показано на рис. 0.1) или содержать две или больше цепей (ветвей). На рис. 0.2 показано, какую функцию выполняют элементы этой схемы.

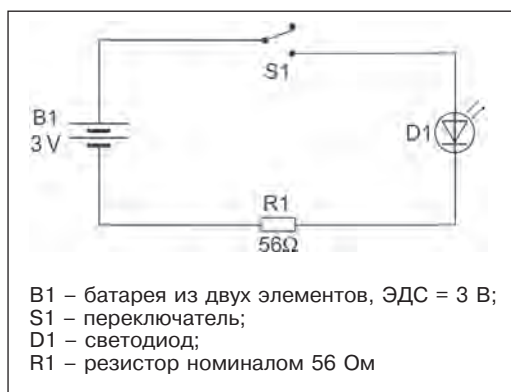
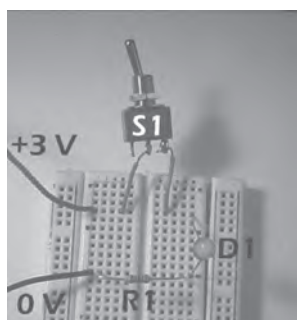


Рис. 0.1

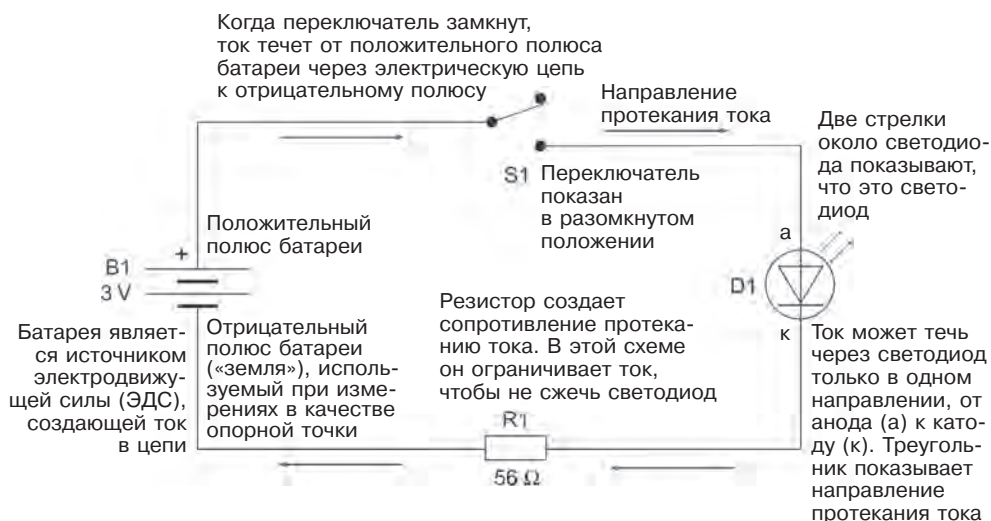


Рис. 0.2

Проводник – это материал, через который может течь электрический ток. Все металлы являются проводниками. Изолятор (не проводник) – это материал, через который ток течь не может.

**Вопрос для самопроверки**

Перечислите изоляторы в схеме, приведенной на рис. 0.2. (Ответы на некоторые вопросы для самопроверки приведены в приложении Б.)

Сердцевина диода D1 изготовлена из специального материала, называемого полупроводником. Электрический ток является потоком электрически заряженных частиц.

Ток протекает в участке цепи под воздействием разности электрических потенциалов между концами этого участка. Разность потенциалов может быть создана разными способами:

- с помощью химической реакции, как это происходит в батарее;
- с помощью электрического генератора, в котором энергия получается за счет сжигания органического топлива (угля, нефти, газа);
- с помощью тепла, выделяемого при ядерной реакции на атомных электростанциях;
- с помощью солнечного света, за счет использования солнечных элементов;
- с помощью электрогенераторов, приводимых в движение силой ветра.

Все эти способы основаны на преобразовании энергии из одной формы в другую – электрическую энергию.

Каждый участок цепи на рис. 0.3 имеет:

- ток, протекающий через него и измеряемый в амперах (А);
- разность потенциалов между его концами, измеряемую в вольтах (В);
- сопротивление протекающему току, измеряемое в омах (Ом).

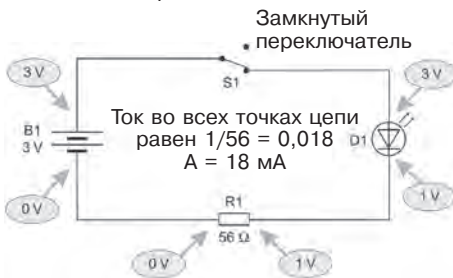
Эти три величины связаны между собой следующим выражением:

Ток = Разность потенциалов/Сопротивление.

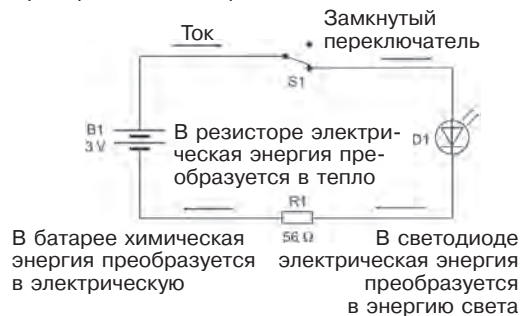
Это уравнение выражает закон Ома.

В схеме, приведенной на рис. 0.1, источником электрической энергии является батарея. Между ее выводами имеется разность электрических потенциалов (см.

Потенциалы в разных точках схемы



Преобразования энергии в схеме



Переключатель и провода, соединяющие элементы схемы, имеют очень маленькое сопротивление. По этой причине они преобразуют очень маленькую часть электрической энергии в тепло

Рис. 0.3

рис. 0.3), создающая ток в цепи. Электрическая энергия из батареи преобразуется в светодиоде и резисторе в другие формы энергии (свет и тепло). Скорость, с которой происходит преобразование энергии, определяется мощностью и рассчитывается по формуле

Мощность = (Разность потенциалов)  $\times$  (Ток).

Измеряется мощность в ваттах, обозначается символом  $W$ .

Принимая потенциал отрицательного вывода батареи за опорную точку с потенциалом 0 В, мы получаем потенциал на другом ее выводе 3 В. Провода и переключатель являются хорошими проводниками и имеют очень низкое сопротивление, так что потенциал на аноде светодиода тоже равен 3 В. Падение напряжения на светодиоде при протекании в нем тока равно примерно 2 В, так что потенциал его катода равен 1 В. Падение напряжения на резисторе, таким образом, равно 1 В.

Если рассматривать потенциалы в разных точках схемы, начиная с отрицательного вывода батареи, и двигаться против часовой стрелки, то мы придем к разности потенциалов между выводами батареи. Потенциал в нашем случае падает на светодиоде  $D1$  и резисторе  $R1$ .

Сумма разностей потенциалов на всех элементах, входящих в цепь (суммарное падение напряжения), равна разности потенциалов на выводах источника питания.

На вспомогательном веб-сайте приведено несколько вопросов, касающихся вольтов, амперов, омов и ваттов.

# Глава 1. Диоды

Для изготовления диодов используются полупроводящие вещества. Диоды имеют два вывода, катод и анод. Ток может легко протекать через диод только от анода к катоду. На рис. 1.1 представлены фотографии типичных маломощных диодов. Слева изображен обычный диод, а справа – диод Зенера (стабилитрон). У обоих диодов черная полоска на корпусе указывает на вывод катода.

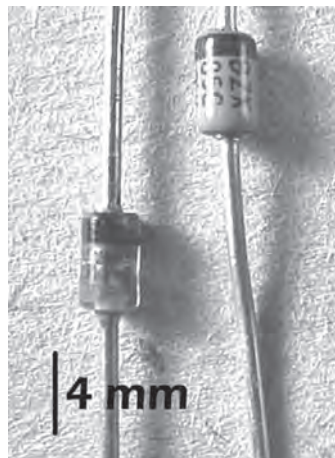


Рис. 1.1

## Ток и напряжение

Когда напряжение (разность потенциалов) приложено к резистору, ток через него подчиняется закону Ома: Ток = Разность потенциалов/Сопротивление.

Для диодов это не так. На рис. 1.2 изображена схема, которую мы используем для измерения тока через диод (с помощью миллиамперметра) и напряжения на нем (с помощью вольтметра). В качестве источника питания используется регулируемый источник постоянного тока с выходным напряжением от 0 до, например, 10 В.

При различных значениях напряжения измеряется ток через диод. Для резистора график зависимости тока от напряжения представляет собой прямую линию, а для диода он не линейный. О диоде говорят, что он включен в прямом направлении (смещен прямо), когда на аноде потенциал положительнее, чем на катоде. Здесь используется источник питания постоянного тока с регулируемым выходным напряжением в пределах от 0 до 10 В.

---

**Обычно напряжение обозначается символом  $V$ , а ток –  $I$ .**

График зависимости тока от напряжения (вольт-амперная характеристика) для диода показан на рис. 1.3.

---



Рис. 1.2

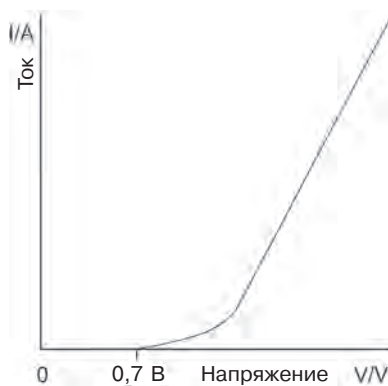


Рис. 1.3

Характерной особенностью вольт-амперной характеристики диода при прямом смещении является то, что ток через него не течет, пока напряжение не достигнет примерно 0,7 В. А после превышения  $\approx 0,7$  В ток начинает увеличиваться, сначала медленно, а потом все быстрее и быстрее.

## Обратное смещение

Если диод включен так, что потенциал его катода положительнее потенциала анода, то говорят, что он включен при обратном смещении.

Обычно ток через диод при обратном смещении составляет несколько наноампер ( $1 \text{ нА} = 10^{-9} \text{ А} = 0,0000000001 \text{ А}$ ). Приложенное к диоду напряжение его обратного смещения может достигать (для выпрямительных диодов) нескольких сотен вольт, но если он превысит предельно допустимое значение (а у разных диодов оно разное), произойдет пробой диода и он выйдет из строя.

Светодиоды имеют маленькое пробивное напряжение, и даже 5 В, поданные при обратном смещении, могут вывести их из строя. Следует всегда проверять правильность полярности подключения светодиодов перед первым включением собранной вновь схемы.

Светодиоды могут также быть повреждены, и чересчур большим прямым током. Способы предотвращения таких повреждений описаны на стр. 6.

У специальных диодов Зенера (стабилитронов) диод при обратном смещении пробивается при точно определенном напряжении, которое, в зависимости от типа диода, может составлять от единиц до сотен вольт. На рис. 1.4 приведена вольт-амперная характеристика стабилитрона (диода Зенера) при обратном смещении.  $V_z$  – напряжение пробоя стабилитрона.

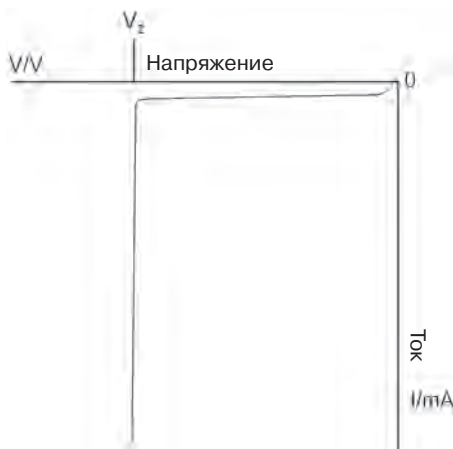


Рис. 1.4

Если ток через стабилитрон при обратном смещении не превышает предельно допустимого значения, то повреждения этого диода из-за пробоя не происходит. Важной особенностью вольт-амперной характеристики стабилитронов при

обратном смещении является то, что падение напряжения на нем при пробое остается почти постоянным при изменении тока в широких пределах. Эта особенность используется в схемах стабилизаторов напряжения.

Фотодиоды почти всегда включают при обратном смещении. Ток через них при этом пропорционален силе света, попадающего на светочувствительную площадку фотодиода.

### Дополнительные материалы 1. Проводимость в полупроводниках

В металлах электрический ток является потоком электронов (частиц с отрицательным зарядом), движущимся от отрицательного потенциала к положительному. Это происходит потому, что в металлах электроны могут свободно двигаться под воздействием электрического поля.

Электроны могут двигаться также и в полупроводниковых материалах, известных под названием полупроводники ***n*-типа**. К таким полупроводникам относится, например, кремний, в который добавлено небольшое количество сурьмы. В отличие от кремния или германия, на внешних орбитах атомов которых находятся 4 электрона, у сурьмы таких электронов 5, что и облегчает возможность отрыва «лишних» электронов в свободное состояние и увеличивает электропроводность этого полупроводникового материала (рис. 1.5). В рассматриваемом случае полупроводник называют ***n*-типа**, потому что основные носители зарядов в нем – электроны – имеют отрицательный заряд (negative). Говорят, что в таких полупроводниках имеет место электронная проводимость.

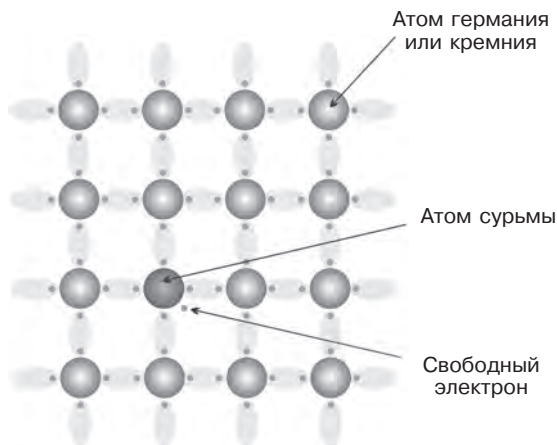


Рис. 1.5

### Дополнительные материалы 2. Дырочная проводимость

Другой тип полупроводниковых материалов называется полупроводники ***p*-типа**. Для их получения применяются такие элементы, как индий. На внешних орбитах атомов индия находятся 3 электрона, что формирует «свободное место» для присоединения еще одного электрона. Это «свободное место» принято называть дыркой (рис. 1.6).

продолжение ⇒

⇒ продолжение

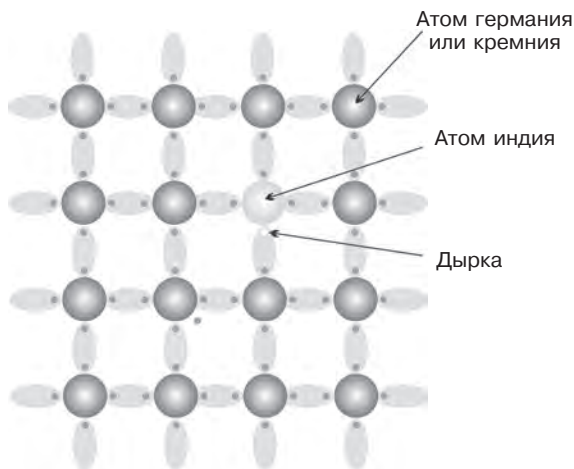


Рис. 1.6

Что произойдет, если к полупроводнику  $p$ -типа приложить электрическое поле, показано на рис. 1.7. Здесь дырки движутся от положительного электрода к отрицательному и ведут себя подобно носителям положительного заряда.

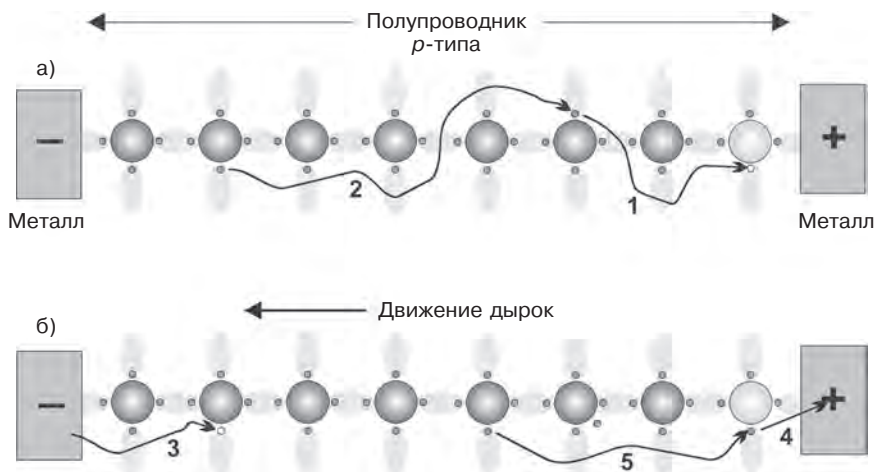


Рис. 1.7

На рис. 1.7а показаны следующие процессы образования проводимости в кремнии  $p$ -типа. Под воздействием внешнего электрического поля электрон отрывается от атома кремния и «прилипает» к атому индия (шаг 1). На шаге 2 эта дырка заполняется электроном, оторвавшимся от другого атома кремния, а дырка перемещается в сторону отрицательного электрода. Затем (рис. 1.7б) электрон из отрицательного электрода заполняет эту дырку (шаг 3). На шаге 4

окончание ⇒

⇒ окончание

электрон из полупроводника попадает в положительный электрод, а образовавшаяся при этом дырка на шаге 5 заполняется электроном вновь, из-за чего образуется дырка, смещенная к отрицательному электроду.

Получается, что дырки движутся от положительного электрода к отрицательному, т. е. в направлении, противоположном электронам. По этой причине дырки можно рассматривать как положительно заряженные частицы, а кремний, легированный бором или индием, называют имеющим проводимость **p-типа**.

### Дополнительные материалы 3. Проводимость в диодах

Рассмотрим брусок из кремния, сделанный так, что половина его имеет проводимость p-типа, а половина – n-типа (рис. 1.8).

Если к этому бруску не приложено никаких внешних электрических полей, то дырки и электроны имеют возможность свободно перемещаться в нем. Некоторые электроны из области с проводимостью n-типа пересекают p-n-переход и заполняют дырки в области проводимости p-типа. При этом атомы с прилипшими (избыточными) электронами становятся отрицательными.

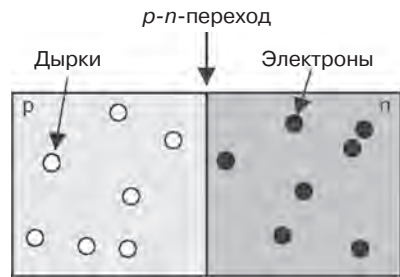


Рис. 1.8

Аналогично, в области с проводимостью n-типа вблизи p-n-перехода из-за потери электронов атомы становятся заряженными положительно (рис. 1.9).

Хотя атомы по обе стороны p-n-перехода и имеют противоположные заряды, но выступать в роли носителей заряда они не могут, так как они зафиксированы в кристаллической решетке полупроводника. Таким образом, слева от p-n-перехода (в области А на рис. 1.9) формируется отрицательный пространственный заряд, а справа, в области В, – положительный заряд. Оба этих заряда создают разность потенциалов на p-n-переходе, как будто вместо p-n-перехода включена батарейка. Конечно, на самом деле ее нет, но мы будем ссылаться на это явление как на «мнимую батарейку». Для p-n-переходов в кремнии разность потенциалов на p-n-переходе составляет примерно 0,7 В, а в германии – примерно 0,2 В.

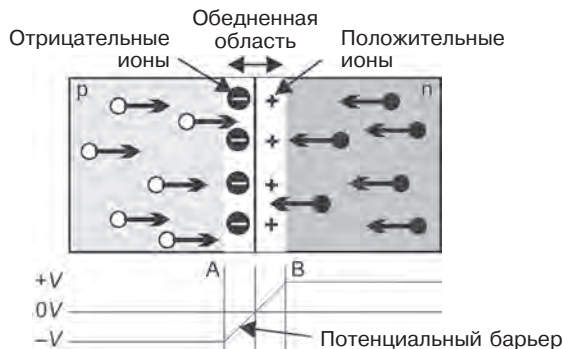


Рис. 1.9

окончание ⇒



⇒ окончание

Область вблизи  $p$ - $n$ -перехода, в которой присутствуют только ионизированные атомы кристаллической решетки полупроводника, а свободных носителей заряда нет, называется обедненной областью. Если проследить за изменением потенциала при движении со стороны  $p$ -области в сторону  $n$ -области, то мы увидим его возрастание до 0,7 В (для кремния), которое называют потенциальный барьер. Очевидно, что чем больше носителей заряда пересекут  $p$ - $n$ -переход, тем выше станет потенциальный барьер, препятствующий пересечению  $p$ - $n$ -перехода новыми носителями заряда.

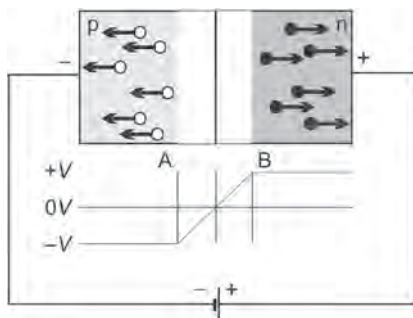


Рис. 1.10

Если брусок полупроводника с  $p$ - $n$ -переходом включить в электрическую цепь, то в зависимости от полярности приложенного к нему напряжения  $p$ - $n$ -переход может оказаться смещен в прямом или обратном направлении. При обратном смещении, когда к  $n$ -области приложено положительное напряжение относительно  $p$ -области, внешнее напряжение складывается с внутренней разностью потенциалов на  $p$ - $n$ -переходе и увеличивает высоту потенциального барьера. Обедненная область в полупроводнике становится шире, а шансы носителей заряда проникнуть через  $p$ - $n$ -переход становятся очень малы. Ток в этом случае через  $p$ - $n$ -переход не течет.

Если к  $p$ -области приложено положительное напряжение относительно  $n$ -области, внешнее напряжение вычитается из внутренней разности потенциалов на  $p$ - $n$ -переходе и снижает высоту потенциального барьера. Обедненная область в полупроводнике становится уже, а шансы носителей заряда проникнуть через  $p$ - $n$ -переход увеличиваются. Если внешнее напряжение станет больше 0,7 В (для кремния), потенциальный барьер и обедненная область исчезают, и уже ничто не мешает току течь через прямо смещенный  $p$ - $n$ -переход.

Таким образом,  $p$ - $n$ -переход проявляет необычное свойство – пропускать ток только в одном направлении (от  $p$ -области к  $n$ -области).  $p$ - $n$ -переходы мы найдем не только в диодах, но и во множестве других полупроводниковых приборов, например в биполярных и полевых транзисторах.

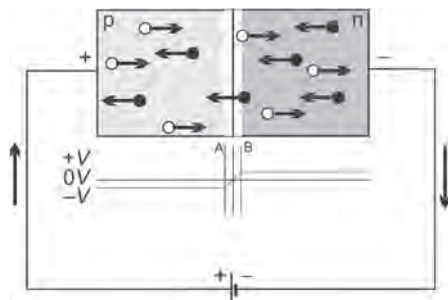


Рис. 1.11

## Вопросы по схемам

1. Начертите схему включения дверного звонка в цепь, включающую батарею из 4 элементов, кнопку-выключатель и сам звонок (условные обозначения элементов схемы приведены в приложении А). Отметьте на схеме точку с самым высоким потенциалом. Покажите направление протекания тока.
2. Начертите схему включения дверного звонка в цепь, включающую две кнопки включения, А и Б. Звонок должен звенеть, когда нажата одна из этих кнопок. Что произойдет, если нажать обе кнопки одновременно?
3. Начертите схемы подключения к батарее с напряжением 4,5 В электрического мотора постоянного тока через однополюсный переключатель с индикатором включенного состояния выключателя, выполненным на светодиоде с резистором для ограничения тока через него.
4. Перечислите виды преобразования энергии в схеме по вопросу 3, происходящие после включения выключателя.
5. Назовите четыре хороших проводника электрического тока. Дайте примеры применения каждого из них и укажите, какой из них самый лучший проводник.
6. Назовите четыре изолятора и дайте примеры применения каждого из них.
7. Напряжение на лампочке от карманного фонарика равно 2,4 В, а ток через нее 700 мА. Чему равно сопротивление нити накала этой лампочки?
8. Какой ток течет через резистор номиналом 220 Ом при напряжении на нем 5 В?
9. Какая мощность выделяется в лампе, описанной в вопросе 7?
10. Какая мощность выделяется в резисторе, описанном в вопросе 8?
11. К выводам батареи с напряжением 2 В подключен резистор 100 Ом. Какой ток течет через резистор? Какова скорость преобразования энергии в этом случае и в какую форму она преобразуется?

### В Интернете

В Интернете можно найти море информации по электронной тематике. Для этого в вашем компьютере должны быть установлены программы-браузеры Internet Explorer, Safari, Netscape или Mozilla Firefox.

Для поиска информации по отдельным темам можно использовать поисковые системы Google или Yahoo! и ключевые слова, например «диод». В системе Yahoo! на тему «диод» имеется более 7 млн ссылок. В них входят как учебные и разъяснительные материалы (на сайтах Wikipedia и How stuff works), так и технические описания изготовителей и каталоги поставщиков.

В системе Yahoo! имеется сайт ответов (<http://answers.yahoo.com>), на котором рассмотрено множество тем, включая инженерную электронику. Вы можете послать свой вопрос или поискать ответы на вопросы, которые задавали другие пользователи этого сайта.

Интернет поможет вам для поиска ответов на вопросы, приведенные как выше, так и ниже.

## Вопросы по диодам

1. Перечислите выводы диода. В каком направлении течет ток через диод при его прямом смещении?

- Опишите с помощью графика, как изменяется ток через диод при его прямом смещении, когда напряжение на нем изменяется от 0 до 5 В.
- Используя спецификации на диоды или интернетовскую информацию, перечислите и прокомментируйте параметры малосигнальных диодов.
- Повторите это для мощных выпрямительных диодов.
- Перечислите особенности шести типов светодиодов и укажите области применения каждого из них.
- Начертите символы малосигнального диода, стабилитрона (диода Зенера), фотодиода и светодиода. Отметьте анод и катод у каждого типа диодов.
- Поищите в этой или другой книге по электронике, либо в Интернете, простые электронные схемы с применением диодов. Начертите эти схемы и опишите, как свойства диодов используются в них.

## Тесты

- Примерами проводников являются:
  - нейлон;
  - алюминий;
  - резина;
  - стекло.
- Примерами изоляторов являются:
  - медь;
  - сталь;
  - поливинилхлорид;
  - углерод.
- Напряжение на резисторе номиналом 120 Ом равно 15 В. Ток через него равен:
  - 125 мА;
  - 8 А;
  - 1,25 А;
  - 105 мА.
- Кремниевый диод смещен прямо так, что напряжение на его аноде на 0,5 В выше, чем на катоде. Ток через него:
  - 0,5 А;
  - 0 А;
  - не известен;
  - достаточен, чтобы сжечь диод.

### Вспомогательный веб-сайт

Такая картинка, как эта, подскажет вам, что на вспомогательном веб-сайте еще много чего есть по данной теме. Адрес этого ресурса: <http://www.elsevierdirect.com/companions/9780080966342>.

На этом сайте приведены вопросы по электрическим цепям и закону Ома. В него также входит окно калькулятора, помогающее при поисках ответов.