



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (МАМИ)

О. В. Миловзоров, И. Г. Панков

ЭЛЕКТРОНИКА

УЧЕБНИК ДЛЯ ПРИКЛАДНОГО БАКАЛАВРИАТА

5-е издание, переработанное и дополненное

*Рекомендовано Учебно–методическим отделом
высшего образования в качестве учебника
для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по инженерно–техническим направлениям и специальностям*

*Допущено Министерством образования Российской Федерации
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров
«Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных
производств» и направлению подготовки дипломированных
специалистов «Конструкторск–технологическое обеспечение
машиностроительных производств»*

**Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru**

Москва ■ Юрайт ■ 2015

УДК 621.38
ББК 32.85я73
М60

Авторы:

Миловзоров Олег Владимирович — профессор, кандидат технических наук, профессор Рязанского института (филиала) Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ), член-корреспондент Российской инженерной академии;

Панков Иван Григорьевич — кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой механико-технологических дисциплин факультета дневного обучения, директор Рязанского института (филиала) Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ), член-корреспондент Российской инженерной академии.

Рецензенты:

кафедра автоматизации информационных и технологических процессов Рязанской государственной радиотехнической академии (заведующий кафедрой — доктор технических наук, профессор *Мусолин А. К.*);

Белов Б. И. — доктор технических наук, профессор Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана.

Миловзоров, О. В.

М60 Электроника : учебник для прикладного бакалавриата / О. В. Миловзоров, И. Г. Панков. — 5-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2015. — 407 с. — Серия : Бакалавр. Прикладной курс.

ISBN 978-5-9916-5488-3

В учебнике рассмотрен широкий круг вопросов, касающихся основ полупроводниковой электроники, аналоговой и цифровой схмотехники. Описана работа полупроводниковых приборов — диодов, биполярных и полевых транзисторов и схем на их основе; схмотехника аналоговых устройств на основе операционных усилителей, силовая электроника. Освещены вопросы цифровой схмотехники, включая основы алгебры логики, простейшие логические элементы, комбинационные и последовательностные устройства, полупроводниковые запоминающие устройства, микропроцессоры и интерфейсные схемы, программируемые логические интегральные схемы. Рассмотрены микроархитектуры современных процессоров.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Для студентов технических вузов.

УДК 621.38
ББК 32.85я73

ISBN 978-5-9916-5488-3

© Миловзоров О. В., Панков И. Г., 2013
© ООО «Издательство Юрайт», 2015

Оглавление

Предисловие	9
Глава 1. Полупроводниковые элементы и основы микроэлектроники	12
1.1. Физические основы полупроводниковой электроники....	12
1.1.1. Виды электронных приборов	12
1.1.2. Электрофизические свойства полупроводников	13
1.1.3. <i>P-n</i> -переход и его свойства	17
1.1.4. Основные технологические процессы изготовления <i>p-n</i> -переходов	20
1.2. Полупроводниковые диоды	21
1.2.1. Выпрямительные диоды.....	23
1.2.2. Стабилитроны.....	24
1.2.3. Диоды Шоттки.....	26
1.2.4. Варикапы	28
1.2.5. Светодиоды	28
1.2.6. Фотодиоды.....	29
1.2.7. Оптроны	30
1.3. Биполярные транзисторы.....	31
1.3.1. Схема с общей базой	33
1.3.2. Схема с общим эмиттером	35
1.3.3. Входные и выходные характеристики схемы с общим эмиттером.....	37
1.3.4. Схема с общим коллектором	40
1.3.5. Технология изготовления биполярных транзисторов	42
1.4. Полевые транзисторы	43
1.4.1. Полевые транзисторы с управляющим <i>p-n</i> -переходом	44
1.4.2. Полевые транзисторы с изолированным затвором ...	46
1.5. Тиристоры	50
1.6. Основы микроэлектроники.....	52
1.6.1. Технология полупроводниковых ИМС.....	53
1.6.2. Компоненты ИМС.....	55
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>59</i>

Глава 2. Аналоговая схемотехника.....	61
2.1. Усилители	61
2.1.1. Усилители и их место в электронных устройствах	61
2.1.2. Основные параметры усилителей.....	63
2.2. Каскады усилителей низкой частоты	66
2.2.1. Каскады на биполярных транзисторах	66
2.2.2. Отрицательная обратная связь в усилителях.....	69
2.2.3. Усилительные каскады на полевых транзисторах	71
2.2.4. Дифференциальный каскад	74
2.3. Выходные каскады усилителей	76
2.3.1. Режимы работы выходных каскадов усилителей.....	76
2.3.2. Однотактные и двухтактные выходные каскады.....	79
2.4. Операционные усилители	81
2.4.1. Свойства операционных усилителей.....	81
2.4.2. Основные схемы включения операционных усилителей	84
2.5. Вычислительные схемы на основе операционных усилителей	87
2.5.1. Схема суммирования.....	88
2.5.2. Схема вычитания	88
2.5.3. Схемы интегрирования и дифференцирования	90
2.5.4. Функциональные преобразователи	94
2.6. Генераторы на основе операционных усилителей	97
2.6.1. Мультивибратор	97
2.6.2. Генератор пилообразного напряжения	98
2.7. Компараторы, цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи	100
2.7.1. Цифроаналоговые преобразователи	101
2.7.2. Аналого-цифровые преобразователи.....	103
2.8. Источники вторичного электропитания	106
2.8.1. Структуры источников электропитания.....	106
2.8.2. Выпрямительные устройства	108
2.8.3. Сглаживающие фильтры	111
2.8.4. Линейные стабилизаторы напряжения	113
2.8.5. Импульсные стабилизаторы напряжения	115
2.9. Силовые устройства на основе тиристоров и мощных транзисторов	117
2.9.1. Управляемые выпрямители.....	117
2.9.2. Инверторы и преобразователи частоты.....	120
2.9.3. Тиристорное управление двигателем постоянного тока.....	122

2.10. Электромагнитная совместимость электронных устройств	125
2.10.1. Помехи в цепях питания	125
2.10.2. Экранирование электронных устройств	128
2.10.3. Использование гальванической развязки	129
2.10.4. Конструктивные методы борьбы с помехами.....	132
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	134
Глава 3. Основы схемотехники цифровых устройств ...	136
3.1. Двоичная система счисления	136
3.2. Алгебра логики	141
3.2.1. Основные теоремы и положения алгебры логики	142
3.2.2. Булевы функции	144
3.2.3. Минимизация булевых функций	146
3.2.4. Минимизация булевых функций с помощью карт Карно.....	147
3.2.5. Алгебра логики и цифровые электронные схемы	150
3.3. Ключевые схемы	154
3.3.1. Ключевая схема на биполярном транзисторе	155
3.3.2. Ключевая схема на комплементарных транзисторах.....	158
3.4. Логические элементы интегральных микросхем.....	160
3.4.1. Транзисторно-транзисторные логические элементы	160
3.4.2. Логические элементы на КМОП-транзисторах....	164
3.5. Дешифраторы и шифраторы	166
3.5.1. Дешифраторы.....	167
3.5.2. Шифраторы	172
3.6. Распределители и мультиплексоры	174
3.6.1. Распределители	174
3.6.2. Мультиплексоры.....	175
3.6.3. Реализация логических функций на основе мультиплексоров	176
3.7. Сумматоры	180
3.7.1. Синтез одноразрядного сумматора	180
3.7.2. Последовательный многоразрядный сумматор	182
3.7.3. Параллельные сумматоры	183
3.8. Арифметико-логические устройства и матричные умножители	186
3.9. Триггеры	189
3.9.1. Триггер с установочными входами (<i>RS</i> -триггер)....	190

3.9.2. Триггер задержки (<i>D</i> -триггер)	193
3.9.3. <i>T</i> -триггер	194
3.9.4. <i>JK</i> -триггер	195
3.10. Счетчики	197
3.11. Регистры	203
3.11.1. Регистровые файлы	204
3.11.2. Регистры сдвига	205
3.11.3. Универсальные регистры	206
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	207

Глава 4. Схемотехника программируемых цифровых вычислительных устройств..... 210

4.1. Запоминающие устройства	210
4.1.1. Важнейшие параметры ЗУ	211
4.1.2. Классификация полупроводниковых ЗУ	213
4.1.3. Структура адресных ЗУ	217
4.2. Запоминающие устройства для хранения постоянной информации	219
4.2.1. Масочные ЗУ	220
4.2.2. ЗУ типа PROM	221
4.2.3. ЗУ типов EPROM и EEPROM	222
4.2.4. Флэш-память	225
4.3. Запоминающие устройства для хранения оперативной информации	227
4.3.1. Статические ЗУ	227
4.3.2. Динамические ЗУ	229
4.4. Микропроцессоры	231
4.4.1. Структура и принципы работы микропроцессорной системы	233
4.4.2. Режимы обмена в микропроцессорной системе ...	239
4.5. Однокристалльный микропроцессор Intel 8086 (K1810 BM86)	242
4.5.1. Структура МП Intel 8086	243
4.5.2. Мультиплексирование информационных линий	246
4.5.3. Сегментация памяти	246
4.5.4. Управляющие сигналы МП Intel 8086	248
4.5.5. Структура команды МП Intel 8086	249
4.6. Режимы адресации и система команд микропроцессора Intel 8086	250
4.6.1. Режимы адресации	250
4.6.2. Система команд	253

4.7. Тенденции развития однокристальных микропроцессоров и систем на их основе.....	265
4.7.1. Основные этапы развития однокристальных микропроцессоров.....	270
4.8. Микроконтроллеры	283
4.9. Интерфейсные устройства	286
4.9.1. Интерфейсы и интерфейсные БИС	289
4.9.2. Шинные формирователи и буферные регистры... ..	290
4.9.3. Параллельные периферийные адаптеры	291
4.9.4. Программируемые связные адаптеры	293
4.10. Программируемые контроллеры	297
4.10.1. Программируемые контроллеры прерываний....	297
4.10.2. Контроллеры прямого доступа к памяти	301
4.10.3. Программируемые интервальные таймеры	302
4.11. Средства программируемой матричной логики.....	304
4.11.1. Программируемые логические матрицы.....	304
4.11.2. Программируемая матричная логика.....	307
4.11.3. Модернизация схем ПЛМ и ПМЛ	308
4.11.4. Базовые матричные кристаллы	311
4.12. Программируемые логические интегральные схемы ...	314
4.12.1. Средства обеспечения программируемости ПЛИС	314
4.12.2. Сложные программируемые логические устройства (CPLD).....	317
4.12.3. Программируемые пользователем вентильные матрицы (FPGA).....	319
4.12.4. СБИС программируемой логики «система на кристалле»	325
4.13. Средства автоматизированного проектирования электронных устройств	328
4.13.1. Автоматизированное проектирование электронных устройств.....	328
4.13.2. Обзор современных пакетов автоматизированного проектирования электронной аппаратуры.....	330
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	333
Глава 5. Микроархитектуры процессоров	336
5.1. Микроархитектура Р6.....	336
5.1.1. Структура процессоров Р6	338
5.1.2. Подсистема упорядоченной предварительной обработки.....	338

5.1.3. Подсистема исполнения с изменением последовательности	341
5.1.4. Набор исполнительных блоков	342
5.1.5. Подсистема упорядоченного завершения	344
5.1.6. Подсистема памяти	345
5.1.7. Порядок выполнения команд программы.....	346
5.2. Микроархитектура NetBurst.....	351
5.2.1. Структура процессоров NetBurst.....	352
5.2.2. Входная подсистема.....	352
5.2.3. Подсистема исполнения с изменением последовательности	356
5.2.4. Подсистема исполнения.....	357
5.2.5. Подсистема памяти	359
5.2.6. Описание конвейера	360
5.2.7. Система повторного исполнения микроопераций.....	362
5.2.8. Технология Hyper Threading	364
5.3. Микроархитектура многоядерных процессоров.....	366
5.3.1. Микроархитектура Nehalem.....	367
5.3.2. Перспективы развития многоядерных процессоров Intel	380
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>381</i>
Заключение	383
Приложения.....	385
Приложение 1. Примеры условных обозначений некоторых активных и пассивных элементов на принципиальных электрических схемах	385
Приложение 2. Примеры условных обозначений некоторых аналоговых и цифровых интегральных элементов на принципиальных электрических схемах.....	387
Приложение 3. Ряды предпочтительных номиналов резисторов и конденсаторов	390
Предметный указатель	393
Литература	406

*Посвящается
Владимиру Петровичу Миловзорову*

Предисловие

Обучение высококвалифицированных специалистов в области конструкторской и технологической подготовки машиностроительного производства невозможно без освоения основ полупроводниковой аналоговой и цифровой схемотехники. В современном машиностроительном производстве широко применяются самые разнообразные технические средства, базирующиеся на электронике. Это универсальные металлорежущие станки и станки с ЧПУ, промышленные контроллеры, роботы-манипуляторы, гибкие производственные модули и системы, автоматические транспортные и складские системы. Наконец, современное производство немислимо без повсеместного использования современной компьютерной техники. Фундаментом для изучения всего многообразия технических средств, используемых в современном автоматизированном машиностроительном производстве, является дисциплина «Электроника».

Дисциплина «Электроника» входит в базовую часть профессионального цикла подготовки бакалавров по направлению подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительного производства». В соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) в результате изучения дисциплины «Электроника» бакалавр должен:

знать

- основные типы и области применения электронных приборов и устройств;
- параметры современных полупроводниковых устройств (усилителей, генераторов, вторичных источников питания, цифровых преобразователей, микропроцессорных управляющих и исполнительных комплексов);

уметь

- разрабатывать принципиальные электрические схемы;
- проектировать типовые электрические и электронные устройства;

владеть

— навыками работы с электротехнической аппаратурой и электронными устройствами.

Базовые знания, полученные при изучении дисциплины «Электроника», особенно ее раздела «Микропроцессорная техника», необходимы для освоения таких дисциплин, как «Управление системами и процессами», «Аппаратные и программные средства систем управления», «Автоматизация производственных процессов». Материал, изложенный в учебнике, соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта и охватывает все основные направления современной полупроводниковой схемотехники, включая основы полупроводниковых приборов, аналоговую и цифровую схемотехнику. Особое внимание уделяется основам микропроцессорной техники, без которой невозможно представить современное автоматизированное машиностроительное производство.

Изложение материала построено таким образом, чтобы ранее изложенный материал становился основой для рассмотрения последующего. Сначала дается общее представление о физических основах полупроводниковой электроники и рассматриваются дискретные полупроводниковые приборы. Затем изучаются базовые транзисторные каскады, являющиеся основой для самых сложных аналоговых и цифровых устройств. Далее излагается более сложный материал — аналоговая и цифровая полупроводниковая схемотехника и, в заключение, описывается устройство микропроцессоров и программируемых логических интегральных схем.

Материал учебника разделен на пять глав. Первая глава посвящена основам полупроводниковой схемотехники. В ней рассмотрена работа диодов, биполярных и полевых транзисторов, тиристоров, основные схемы включения транзисторов, а также изложены основы микроэлектроники. Вторая глава освещает особенности аналоговой схемотехники. Здесь дано описание различных усилительных каскадов, аналоговых устройств на основе операционных усилителей, цифроаналоговых и аналого-цифровых устройств, а также схемотехники силовых устройств и вторичных источников электропитания. Третья глава начинается с изложения основ цифровой схемотехники — двоичной арифметики и булевой алгебры — после чего рассматриваются основные логические элементы, комбинационные

и последовательностные устройства. Четвертая, самая большая по объему, глава посвящена вопросам схемотехники программируемых цифровых устройств, речь идет о полупроводниковых запоминающих устройствах, микропроцессорах и их программировании, интерфейсных устройствах. В конце четвертой главы рассмотрены различные направления программируемой матричной логики, включая программируемые логические интегральные схемы, а также средства автоматизированного проектирования электронных устройств. В пятой главе рассматривается архитектура современных микропроцессоров. Этот материал важен для правильного понимания принципов работы современных систем, основанных на микропроцессорах.

В конце каждой главы имеются контрольные вопросы и задания, которые помогут студентам проверить усвоение материала.

В приложениях 1, 2, 3 приведены начальные сведения об электрических принципиальных схемах, в том числе условные обозначения дискретных и интегральных элементов, правила обозначения соединений элементов, сведения о номинальных значениях и допустимых отклонениях резисторов и конденсаторов. Этот материал будет полезен тем, кто по роду своей деятельности должен уметь «читать» принципиальные электрические схемы, разбираться в работе электронных устройств на уровне его схемы.

В учебнике приведен предметный указатель.

При изложении материала большое внимание уделено описанию физики происходящих процессов, хотя бы и в ущерб формульному описанию работы устройств. Приведены простые практические примеры, позволяющие глубже вникнуть в изучаемый вопрос.

Учебник может быть полезен для изучения дисциплины «Электротехника и электроника», которая входит в базовую часть профессионального цикла подготовки бакалавров по направлениям подготовки 150100 «Материаловедение и технологии материалов», 150400 «Металлургия», 150700 «Машиностроение», 151000 «Технологические машины и оборудование», 152100 «Нanomатериалы».

Глава 1

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ОСНОВЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

В результате изучения главы 1 студент должен:

знать

- физику процессов, происходящих в полупроводниковых материалах;
- основные элементы полупроводниковой электроники и их характеристики;
- основные схемы включения транзисторов;
- основы технологии изготовления микросхем;

уметь

- разбираться в работе основных полупроводниковых приборов;
- выбирать схему включения транзистора в зависимости от требований к электрической схеме;

владеть

- методикой расчета схем включения транзисторов.
-

1.1. Физические основы полупроводниковой электроники

1.1.1. Виды электронных приборов

Электронными называют приборы, в которых ток создается движением электронов в вакууме, газе или полупроводнике.

В своем развитии электроника прошла несколько этапов. Первые электронные устройства выполнялись на электровакуумных приборах (так называемых катодных или электронных лампах). С середины XX в. широкое применение нашли полупроводниковые приборы (транзисторы, диоды, тиристоры), изготавливаемые как отдельные, самостоятельные элементы, из которых собирались электронные устройства. В последней четверти XX в. основой

многих электронных устройств стали интегральные микросхемы, представляющие собой пластинку полупроводника с размещенным на ней множеством транзисторов и других элементов электрических цепей. Со времени их изобретения (США, 1959 г.) интегральные микросхемы постоянно совершенствуются и усложняются. В современных сверхбольших интегральных схемах счет идет уже на десятки и сотни миллионов транзисторов и других элементов.

В настоящее время для решения тех или иных задач (преобразование вида энергии, усиление сигналов, генерирование мощных излучений, управление электродвигателями, обработка цифровой информации и ее отображение и т.п.) используются все виды электронных приборов, но явное преимущество сохраняется за полупроводниковыми приборами и микросхемами.

1.1.2. Электрофизические свойства полупроводников

Все вещества образованы атомами, состоящими из положительно заряженных ядер и вращающихся вокруг них отрицательно заряженных электронов. Ядро включает электрически нейтральные частицы — нейтроны и положительно заряженные протоны. Количество протонов определяет заряд ядра. Отрицательный заряд электрона по величине равен положительному заряду протона. В нормальном состоянии число электронов, образующих электронную оболочку атома, равно числу протонов в ядре, и атом электрически нейтрален. Электроны вращаются вокруг ядра по орбитам, сгруппированным в слои. Каждому слою соответствует строго определенная энергия электрона W (так называемый разрешенный энергетический уровень). Количество электронов в слоях строго определено: в первом, ближайшем к ядру слое может находиться не более двух электронов, во втором — не более восьми и т.д. Электроны целиком заполненных слоев устойчивы к внешним воздействиям. «Не уместившиеся» во внутренних слоях электроны образуют незаполненный внешний слой, который легко отдает и принимает электроны. Эти электроны определяют валентность элемента при химических реакциях. Чем дальше от ядра расположена орбита электрона, тем большей энергией он обладает. Под воздействием энергии теплоты, света, радиации или каких-либо других внешних факторов электрон из валентной зоны может перейти на новую, более удаленную от ядра орбиту. Такой электрон

называется возбужденным, а при дальнейшем увеличении энергии, называемой работой выхода, электрон покидает поверхность вещества.

В кристалле происходит взаимодействие между соседними атомами, заключающееся в том, что на электроны атома воздействуют ядра соседних атомов. В результате разрешенные энергетические уровни электронов смещаются и расщепляются на несколько — по числу соседних атомов в кристаллической решетке. Эти уровни создают энергетические зоны. Совокупность энергетических уровней, соответствующих внешнему слою электронов, образует *валентную зону*. Разрешенные уровни энергии, которые остаются незанятыми, составляют *зону проводимости*, так как ее уровни могут занимать возбужденные электроны, обеспечивающие электропроводность вещества. Между валентной зоной и зоной проводимости может располагаться *запрещенная зона*.

Зонная структура лежит в основе разделения веществ на проводники, полупроводники и диэлектрики. На рис. 1.1 показано расположение энергетических зон для этих групп веществ. У проводников (металлов) валентная зона 1 и зона проводимости 2 перекрывают друг друга (рис. 1.1, а) и валентные электроны легко переходят в зону проводимости. У диэлектриков (рис. 1.1, б) ширина запрещенной зоны велика (более 6 эВ (электрон-вольт)), и для перехода валентных электронов в зону проводимости надо сообщить значительную энергию (такой процесс происходит при пробое изоляции). У полупроводников (рис. 1.1, в) запрещенная зона относительно мала и колеблется от 0,1 до 3,0 эВ.

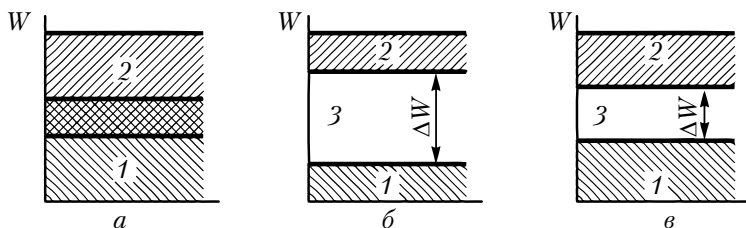


Рис. 1.1. Энергетические зоны проводника (а), диэлектрика (б) и полупроводника (в):

1 — валентная зона; 2 — зона проводимости;
3 — запрещенная зона

В кристаллической решетке четырехвалентного полупроводника (например, кремния) каждый атом связан с четырьмя соседними атомами с помощью двух валентных электронов — по одному от каждого атома. Такая связь называется *ковалентной*. При ее образовании электрон принадлежит уже не одному, а обоим связанным между собой атомам, т.е. является для них общим. В результате вокруг каждого ядра образуется восьмиэлектронная оболочка, устойчивая к внешним воздействиям. Так как все валентные электроны оказываются прочно связанными между собой, свободных электронов, способных обеспечить электропроводность, нет. Такую структуру имеют химически чистые полупроводники при температуре абсолютный нуль (рис. 1.2, *а*).

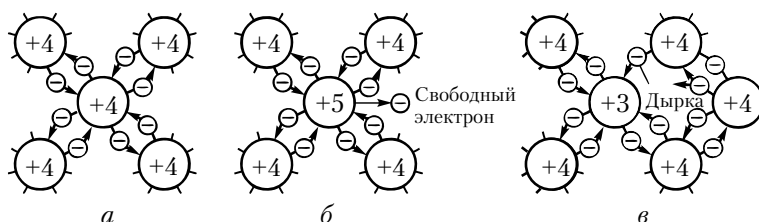


Рис. 1.2. Кристаллическая структура чистого полупроводника (*а*), полупроводника с донорной (*б*) и акцепторной (*в*) примесью

Под воздействием внешних факторов (например, при повышении температуры) отдельные электроны атомов кристаллической решетки приобретают энергию, достаточную для освобождения от ковалентных связей, и становятся свободными.

При освобождении электрона от ковалентной связи в кристаллической решетке возникает как бы свободное место, обладающее положительным зарядом. Такое место называется *дыркой*, а процесс образования пары «свободный электрон — дырка» — генерацией. В дырку может «перескочить» валентный электрон из ковалентной связи соседнего атома. В результате ковалентная связь в одном атоме восстановится (этот процесс называется рекомбинацией), а в соседнем разрушится, образуя новую дырку. Такое перемещение дырки по кристаллу равносильно перемещению положительного заряда.

При отсутствии внешнего электрического поля дырки перемещаются хаотически. Если же приложить к кристаллу разность потенциалов, то под действием созданного электрического поля движение дырок и электронов становится упорядоченным, и в кристалле возникает электрический ток. Таким образом, проводимость полупроводника обусловлена перемещением как отрицательно заряженных электронов, так и положительно заряженных дырок. Соответственно различают два типа проводимости — *электронную*, или *проводимость n -типа*, и *дырочную*, или *проводимость p -типа*.

Для создания полупроводниковых элементов широко применяют *примесные полупроводники*. С четырехвалентным германием и кремнием используют пятивалентные (мышьяк, сурьму, фосфор) и трехвалентные примеси (бор, алюминий, индий, галлий).

В случае пятивалентной примеси (рис. 1.2, б) четыре валентных электрона примесного атома совместно с четырьмя электронами соседних атомов основного вещества образуют ковалентные связи, а пятый валентный электрон оказывается «лишним». В результате даже при комнатной температуре «лишние» электроны легко освобождаются от своих атомов, переходя в зону проводимости. В таких полупроводниках электропроводность обеспечивается главным образом избытком свободных электронов. Их называют полупроводниками n -типа, а примеси — *донорными*.

За счет тепловой энергии в полупроводнике n -типа могут образовываться и отдельные дырки при генерации пар «свободный электрон — дырка». Поэтому электроны в полупроводнике n -типа называют основными, а дырки — неосновными носителями зарядов.

При введении трехвалентной примеси (рис. 1.2, в) в одной из ковалентных связей примесного атома и атома основного полупроводника отсутствует электрон, т.е. образуется дырка. Разрешенные энергетические уровни валентных зон примеси и основного полупроводника находятся рядом. Электрон валентной зоны атома основного полупроводника легко захватывается трехвалентным атомом примеси, в результате чего дырка образуется уже в атоме основного полупроводника и, таким образом, перемещается по кристаллической решетке. Дырки в таких полупроводниках ста-

новятся основными носителями зарядов, создавая эффект перемещения положительных зарядов. Трехвалентные примеси называют *акцепторными*, а полупроводники с такой примесью — полупроводниками p -типа. Неосновными носителями в этом случае выступает небольшое количество свободных электронов, образовавшихся в результате тепловой генерации пар «свободный электрон — дырка».

1.1.3. P - n -переход и его свойства

Тонкий слой полупроводника между двумя областями, одна из которых представляет полупроводник p -типа, а другая n -типа, называют p - n -переходом. Концентрации основных носителей заряда в p - и n -областях могут быть равны или существенно различаться. В первом случае p - n -переход называют симметричным, во втором — несимметричным. Чаще используют несимметричные переходы.

Пусть концентрация акцепторной примеси в p -области больше, чем концентрация донорной примеси в n -области (рис. 1.3, a). Соответственно, концентрация дырок (светлые кружки) в p -области будет больше, чем концентрация электронов (черные кружки) в n -области.

За счет диффузии дырки из p -области и электроны из n -области стремятся равномерно распределиться по всему объему. Если бы электроны и дырки были нейтральными, то диффузия в конечном итоге привела бы к полному выравниванию их концентраций по всему объему кристалла. Однако этого не происходит. Дырки, переходя из p -области в n -область, рекомбинируют с частью электронов, принадлежащих атомам донорной примеси. В результате оставшиеся без электронов положительно заряженные ионы донорной примеси образуют приграничный слой с положительным зарядом. В то же время уход этих дырок из p -области приводит к тому, что атомы акцепторной примеси, захватившие соседний электрон, образуют некомпенсированный отрицательный заряд ионов в приграничной области. Аналогично происходит диффузионное перемещение электронов из n -области в p -область, приводящее к тому же эффекту. В результате на границе, разделяющей n -область и p -область, образуется узкий, в доли микрона, приграничный слой, одна сторона которого заряжена отрицательно (p -область), а другая — положительно (n -область).

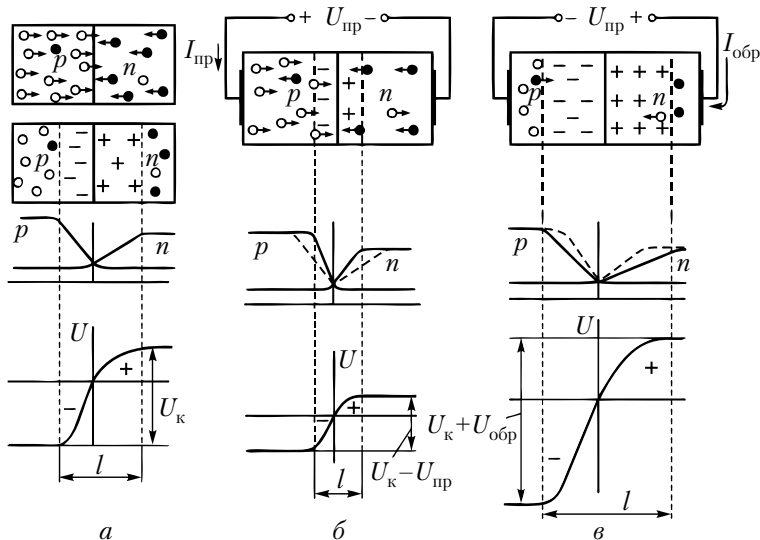


Рис. 1.3. P-n-структура:

a — в равновесном состоянии; *б* — при прямом внешнем напряжении; *в* — при обратном внешнем напряжении; l — ширина p - n -перехода

Разность потенциалов, образованную приграничными зарядами, называют *контактной разностью потенциалов* U_K (см. рис. 1.3, *a*), или *потенциальным барьером*, преодолеть который носители не в состоянии. Дырки, подошедшие к границе со стороны p -области, отталкиваются назад положительным зарядом, а электроны, подошедшие из n -области, — отрицательным зарядом. Таким образом, образуется p - n -переход, представляющий собой слой полупроводника с пониженным содержанием носителей — так называемый обедненный слой, который имеет относительно высокое электрическое сопротивление.

Свойства p - n -структуры изменяются, если к ней приложить внешнее напряжение. Если внешнее напряжение противоположно по знаку контактной разности потенциалов (рис. 1.3, *б*), то дырки p -области, отталкиваясь от приложенного положительного потенциала внешнего источника, приближаются к границе между областями, компенсируют заряд части отрицательных ионов и сужают ширину p - n -перехода со стороны p -области. Аналогично этому, электроны n -области, отталкиваясь от отрицательного потен-

циала внешнего источника, компенсируют заряд части положительных ионов и сужают ширину p - n -перехода со стороны n -области. Потенциальный барьер сужается, через него начинают проникать дырки из p -области и электроны из n -области и через p - n -переход начинает течь ток.

С увеличением внешнего напряжения ток возрастает неограниченно, так как создается основными носителями, концентрация которых постоянно восполняется источником внешнего напряжения.

Полярность внешнего напряжения, приводящая к снижению потенциального барьера, называется прямой, или открывающей, а созданный ею ток — прямым. При подаче такого напряжения p - n -переход открыт.

Если к p - n -структуре приложить напряжение обратной полярности (рис. 1.3, *в*), то эффект будет противоположным. Под действием электрического поля источника дырки p -области смещаются к отрицательному потенциалу внешнего напряжения, а электроны n -области — к положительному потенциалу. Таким образом, основные носители зарядов отодвигаются внешним полем от границы, увеличивая ширину p - n -перехода, который оказывается почти свободным от носителей заряда. Электрическое сопротивление p - n -перехода при этом возрастает. Такая полярность внешнего напряжения называется обратной, запирающей. При подаче такого напряжения p - n -переход закрыт.

Тем не менее при обратном напряжении наблюдается протекание небольшого тока $I_{\text{обр}}$. Этот ток, в отличие от прямого, определяется носителями не примесной, а собственной проводимости, образующейся в результате генерации пар «свободный электрон—дырка» под воздействием температуры. Эти носители обозначены на рис. 1.3, *в* единственным электроном в p -области и единственной дыркой в n -области. Значение обратного тока практически не зависит от внешнего напряжения. Это объясняется тем, что в единицу времени количество генерируемых пар «свободных электрон—дырка» при неизменной температуре остается постоянным, и даже при $U_{\text{обр}}$ в доли вольта все носители участвуют в создании обратного тока.

При подаче обратного напряжения p - n -переход уподобляется конденсатору, пластинами которого являются p - и n -области, разделенные диэлектриком. Роль диэлектрика выполняет приграничная область, почти свободная от носителей заряда. Эту емкость p - n -перехода называют *барьерной*. Она тем больше, чем меньше ширина p - n -перехода и чем больше его площадь.

1.1.4. Основные технологические процессы изготовления p - n -переходов

Метод сплавления. Этот технологический процесс заключается в том, что в пластинку полупроводника одного типа проводимости вводят примесь, необходимую для образования полупроводника другого типа проводимости. Например, на пластинку германия n -типа помещают таблетку индия и нагревают ее до температуры плавления. При этом примесь расплавляется, и в ней частично растворяется материал полупроводника, создавая в приграничной зоне слой проводимости p -типа. Сплавные p - n -переходы имеют высокую надежность, работоспособны при больших обратных напряжениях и обладают малым собственным сопротивлением, обеспечивающим малое прямое падение напряжения на них.

Метод диффузии. В этом технологическом процессе p - и n -области получают в полупроводнике путем проникновения акцепторных или донорных примесей, содержащихся в атмосфере паров, куда помещают нагретую до высокой температуры пластинку полупроводника. Так как атомы примеси диффундируют внутрь пластины с поверхности, наибольшая концентрация примеси наблюдается в приповерхностной области и убывает с увеличением расстояния в глубь полупроводника.

Метод эпитаксиального наращивания. Процесс кристаллизации одного вещества на кристалле-подложке другого называется *эпитаксиальным наращиванием*. При этом кристаллическая решетка подложки определяет структуру решетки, в которой кристаллизуется наращиваемый слой. Полупроводниковые эпитаксиальные слои (пленки) могут быть получены различными способами: герметическим испарением в вакууме; кристаллизацией в расплавленном веществе, содержащем примесь; осаждением из парообразной формы. Изменяя тип примеси и условия наращивания, можно в широких пределах менять электрические свойства эпитаксиальной пленки.

Ионное легирование. Процесс заключается в бомбардировке ионами примеси нагретой полупроводниковой пластины, находящейся в вакууме. Ионы предварительно разгоняются до определенной скорости и, внедряясь в пластину полупроводника, играют роль донорных или акцепторных примесей.

Оксидное маскирование. Этот процесс используют для того, чтобы обеспечить проникновение примеси только в определенные участки пластины, защитив от них остальную ее поверхность. В полупроводниковых структурах на основе кремния в качестве маски используется диоксид кремния SiO_2 , который является хорошим изолятором и обладает по сравнению с чистым кремнием значительно меньшей скоростью диффузии в него примесей. Для получения пленки оксида кремниевую пластину нагревают до $900\text{--}1200\text{ }^\circ\text{C}$ в атмосфере кислорода. После охлаждения те участки полупроводника, которые должны подвергаться воздействию примесей, освобождают от пленки окисла травлением.

Фотолитография. Это процесс получения на поверхности пленки оксида необходимого рисунка расположения окон. Оксидную пленку покрывают фоторезистом (светочувствительным слоем) и экспонируют (засвечивают) ультрафиолетовыми лучами через маску, на которой выполнен рисунок в виде прозрачных и непрозрачных участков. Участки фоторезиста, подвергнувшиеся освещению, оказываются задубленными (нерастворимыми), а с неосвещенных участков фоторезист удаляют растворителем.

Травление пленки диоксида кремния с участков, не защищенных задубленным фоторезистом, производят плавиковой кислотой, в результате в оксидной пленке образуются окна, через которые производится диффузия, эпитаксиальное наращивание или ионное легирование.

1.2. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с двумя выводами (приставка «ди-» означает два) и одним p - n -переходом.

По функциональному назначению, принципу образования p - n -перехода и использованию тех или иных его свойств диоды делятся на выпрямительные, стабилитроны, импульсные, диоды Шоттки, фотодиоды, светодиоды и т.п. Один из вариантов конструкции и условное обозначение диода приведены на рис. 1.4, *а*, *б*. Вывод от p -области называют *анодом*, а от n -области — *катодом*.

Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода, т.е. зависимость протекающего через диод тока от приложенного к нему напряжения, определяется вольт-амперной характеристикой p - n -перехода (рис. 1.4, в). При подаче к диоду прямого напряжения диод открыт и пропускает прямой ток, при этом падение напряжения на диоде составляет десятые доли вольт. При подаче обратного напряжения диод заперт, и если оно не достигает значения $U_{обр.мах}$, то через диод протекает пренебрежительно малый обратный ток I_0 ($I_{пр}$ и $I_{обр}$ на рис. 1.4, в показаны в разных масштабах). При подаче обратного напряжения, превышающего значение $U_{обр.мах}$, наступает пробой p - n -перехода, при котором обратный ток резко возрастает.

Различают два вида пробоя: электрический (обратимый) и тепловой (необратимый, выводящий полупроводниковый диод из строя). Под воздействием сильного электрического поля электроны освобождаются от ковалентных связей и получают энергию, достаточную для преодоления высокого потенциального барьера. Двигаясь с большой скоростью в p - n -переходе, электроны сталкиваются с нейтральными атомами и ионизируют их, в результате чего появляются новые свободные электроны и дырки. Этот

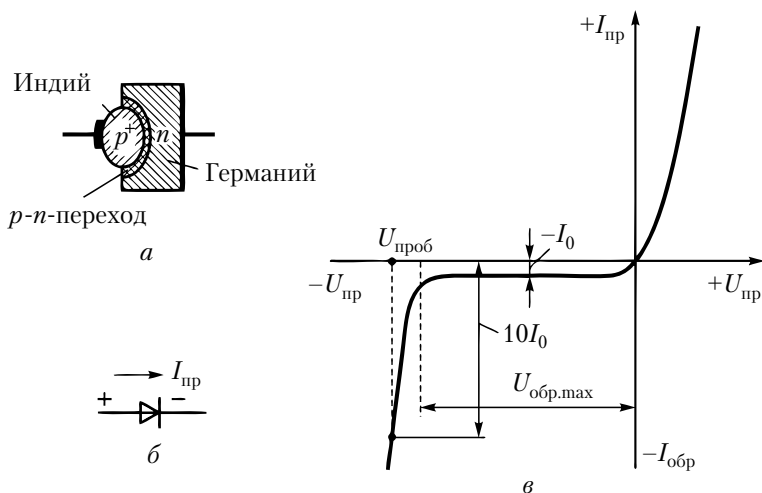


Рис. 1.4. Полупроводниковый диод:

a — вариант конструкции; b — условное обозначение;
 v — вольт-амперная характеристика