

Содержание

Предисловие	8
Сокращения терминов, аббревиатуры	10
Введение	13
Тема 1. Полупроводниковые приборы	17
1.1. Электронно-дырочный переход	17
1.2. Диоды и их свойства	19
1.3. Разновидности диодов	21
1.4. Транзисторы	26
1.4.1. Биполярные транзисторы	26
1.4.2. Понятие о полевых транзисторах	31
1.5. Биполярный транзистор с изолированным затвором	33
1.6. Тиристоры	34
1.7. Интегральные микросхемы	37
Вопросы к теме 1	39
Тема 2. Источники вторичного электропитания	41
2.1. Общие положения	41
2.2. Однофазные выпрямители	42
2.3. Трехфазные выпрямители	45
2.4. Сглаживающие фильтры	47
2.5. Стабилизаторы напряжения и тока	51
2.6. Управляемые выпрямители	54
2.7. Внешние характеристики выпрямителей	55
Вопросы к теме 2	56
Тема 3. Электронные усилители	58
3.1. Назначение и классификация электронных усилителей	58
3.2. Характеристики усилителей	60
3.3. Типовая схема однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе, включенного по схеме с ОЭ	62
3.4. Эмиттерный повторитель	66
3.5. Дифференциальный усилитель	67
3.6. Режимы работы усилительных каскадов	69
3.7. Каскадное соединение усилителей	70
3.8. Усилители мощности на транзисторах	71

3.9. Операционные усилители	73
Вопросы к теме 3	74
Тема 4. Импульсные устройства. Автогенераторы	76
4.1. Общие понятия	76
4.2. Параметры импульсов и импульсных устройств	77
4.3. Простейшие формирователи импульсов	78
4.4. Ограничители уровня	79
4.5. Транзисторный ключ	80
4.6. Триггер	82
4.7. Электронные генераторы	83
4.7.1. Автогенератор типа LC	84
4.7.2. Автогенераторы типа RC	85
4.7.3. Мультивибраторы	86
4.7.4. Генератор импульсов треугольной формы	89
4.7.5. Ждущий мультивибратор	90
4.7.6. Генератор пилообразного напряжения	90
Вопросы к теме 4	91
Тема 5. Логические основы цифровых устройств	93
5.1. Общие сведения о цифровых устройствах	93
5.2. Элементы алгебры логики	96
5.3. Основные логические операции и способы их аппаратной реализации	99
5.4. Универсальные логические операции и их особенности	102
5.5. Представление логических функций математическими выражениями	104
5.6. Переход от логической функции к логической схеме	105
5.7. Минимизация логических функций	106
5.8. Запись и реализация логических функций в универсальных базисах	107
5.9. Программируемые логические матрицы	110
Вопросы к теме 5	112
Тема 6. Функциональные узлы цифровых устройств	114
6.1. Комбинационные и последовательностные устройства	114
6.2. Дешифраторы и шифраторы	116
6.3. Мультиплексоры и демультимплексоры	118
6.4. Компаратор	120
6.5. Двоичные полусумматоры и сумматоры	121
6.6. Цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи	123
6.6.1. Цифроаналоговые преобразователи	123
6.6.2. Аналого-цифровые преобразователи	125
6.7. Триггеры	127

6.7.1. Асинхронный RS-триггер	127
6.7.2. Синхронный RS-триггер	129
6.7.3. Т-триггер	129
6.7.4. D-триггер	129
6.7.5. JK-триггер	131
6.8. Счётчики	132
6.8.1. Классификация счётчиков	132
6.8.2. Счётчик с непосредственными связями	133
6.8.3. Суммирующий синхронный счётчик	135
6.8.4. Реверсивный синхронный счётчик	136
6.8.5. Десятичный счётчик	137
6.9. Регистры и регистровая память	138
6.10. Арифметико-логические устройства	140
6.10.1. Классификация и обобщенная структура АЛУ	140
6.10.2. Универсальное АЛУ в интегральном исполнении	142
6.11. Запоминающие устройства	144
6.11.1. Классификация запоминающих устройств	144
6.11.2. Схемы элементов памяти	145
Вопросы к теме 6	150
Тема 7. Микропроцессорные устройства	151
7.1. Общие сведения о микропроцессорах	151
7.2. Типы микропроцессоров и архитектура вычислительных устройств	153
7.2.1. Основные типы микропроцессоров	153
7.2.2. Основные команды и регистры микропроцессоров	155
7.2.3. Архитектура вычислительных устройств	157
7.2.4. Структура и функционирование микропроцессоров	159
7.3. Микропроцессорные системы и микроконтроллеры	163
7.3.1. Микропроцессорные комплекты и микропроцессорные системы	164
7.3.2. Микроконтроллеры	166
7.3.3. Многопроцессорные системы	167
Вопросы к теме 7	168
Тема 8. Структура и свойства среды моделирования схем электронных устройств NI Multisim 10	169
8.1. Общие положения	169
8.2. Общие сведения о среде интерактивного проектирования электронных схем NI Multisim 10	171
8.2.1. Установка MS10	171
8.2.2. Основные элементы программной среды MS10	172

8.2.3. Командные строки инструментальной линейки	177
8.2.4. Измерительные приборы, источники питания и устройства визуализации	180
8.3. Технология сборки схем	181

Тема 9. Моделирование схем аналоговых электронных устройств 185

9.1. Полупроводниковые диод, стабилитрон и тиристор	185
9.2. Однофазные полупроводниковые выпрямители	191
9.3. Биполярные и полевые транзисторы	194
9.4. Простейшие транзисторные усилители	200
9.4.1. Усилитель на биполярном транзисторе с ОЭ	200
9.4.2. Усилитель на полевом транзисторе с ОИ	204
9.4.3. Истоковый повторитель	207
9.4.4. Дифференциальный усилитель на биполярных транзисторах	208
9.5. Электронные устройства на операционных усилителях	210
9.6. Аналоговые компараторы	217
9.7. Мультивибраторы	224
9.7.1. Симметричный и несимметричный мультивибраторы и одновибратор	224
9.7.2. Генератор линейно изменяющегося напряжения	227
9.8. Генераторы синусоидальных колебаний	228
9.8.1. Ёмкостная трёхточечная схема LC-генератора	228
9.8.2. Индуктивная трёхточечная схема LC-генератора	235
9.8.3. RC-генератор синусоидальных колебаний	236

Тема 10. Моделирование схем цифровых и аналого-цифровых устройств 240

10.1. Библиотеки цифровых устройств и инструментарий программной среды MS10	240
10.1.1. Генератор бинарного слова	240
10.1.2. Логический анализатор	245
10.1.3. Схема проверки настроек инструментов Word Generator и Logic Analyzer	248
10.2. Логические элементы и схемы	250
10.2.1. Двоичные логические элементы	250
10.2.2. Логические схемы на элементах ИЛИ, И и НЕ	252
10.3. Триггеры	253
10.3.1. RS-триггер на логических элементах ИЛИ-НЕ	253
10.3.2. Триггеры Т-, D- и JK-типа	255

10.4. Дешифратор и шифратор	255
10.5. Демультимплексор и мультиплексор	258
10.6. Цифровой компаратор	262
10.7. Универсальный регистр	264
10.8. Счётчики	269
10.9. Цифроаналоговый преобразователь	271
10.10. Аналого-цифровой преобразователь	274
10.11. Оптоэлектронные приборы	280
Заключение	285
Приложение. Каталог схемных файлов электронных устройств	286
Список литературы	289
Предметный указатель	291

Предисловие

Современный прогресс развития электроники, широкое внедрение интегральных микросхем и микропроцессоров дали возможность в десятки раз уменьшить массу и размеры электронной аппаратуры управления и контроля технологическими процессами многих отраслей промышленности, причем микросхемы и микропроцессоры используются в совокупности аппаратных и программных средств с преобразователями аналоговых сигналов, с унификацией информационных магистралей.

В современных электронных устройствах (дешифраторах, сумматорах, триггерах, регистрах, счетчиках и многих других) основным видом сигналов являются цифровые. Цифровая техника относится к наиболее динамично развиваемой сфере и во многом определяет общий технический прогресс. Однако и в цифровой век аналоговые компоненты остаются востребованными, причем именно цифровые технологии стимулируют разработку и выпуск аналоговых и аналого-цифровых микросхем.

Ускоренное развитие электроники как области науки и техники вызывает потребность к ее познанию при подготовке специалистов многих направлений. Поэтому в Государственных образовательных стандартах предусмотрено изучение основ микроэлектроники, информационной или промышленной электроники в виде отдельной дисциплины, а для неэлектротехнических направлений подготовки бакалавров (550 000 — технические науки) и для неэлектротехнических направлений подготовки дипломированных специалистов (650 000 — техника и технологии) — в виде раздела "Основы электроники" общепрофессиональной дисциплины для вузов 651600 (150400) "Электротехника и электроника".

В настоящее время имеется много хороших учебников и учебных пособий по электротехнике и электронике (перечень некоторых из них приведен в списке литературы), рассчитанных на изучение дисциплины на третьем уровне (180...330 часов).

В учебных планах и в рабочих программах на изучение раздела "Основы электроники" указанной дисциплины в аудитории рекомендовано не более 36 часов, включая часы, выделяемые на проведение лабораторно-практических занятий. В рамках

указанного объёма часов на изучение основ электроники удаётся рассмотреть только базовые электронные приборы и узлы, их характеристики и кратко изложить инженерные приёмы расчёта основных параметров указанных устройств.

Многолетней практикой доказано, что процесс познания электроники неразрывно связан как с теоретическим осмыслением явлений и процессов, происходящих в электронных устройствах, так и с экспериментальными исследованиями схем электронных устройств в лаборатории.

Наряду с натурными экспериментами в настоящее время широкое распространение получило компьютерное проектирование и испытание электронных схем в таких средах схемотехнического моделирования, как Electronics Workbench, DesignLab, P-Spice, Micro-Logic, LabVIEW, NI Multisim, Matlab и др. На этапе начального освоения студентами методов проектирования и испытания электронных устройств наиболее приемлемым средством, на наш взгляд, является программная среда NI Multisim 10 компании Electronics Workbench Group, входящей в корпорацию National Instruments.

Большое количество и разнообразие моделей электронных устройств, средств анализа и виртуальных приборов делает среду MS10 удобным инструментом для демонстрации и визуализации проявления многих фундаментальных явлений и процессов аналоговой и цифровой электроники.

Схемные файлы моделей электронных устройств можно скачать с сайта издательства ДМК Пресс по адресу www.dmk-press.ru или с сайта автора www.marchenko.elinf.ru, а профессиональную либо студенческую 30-дневную версию среды Multisim 10 - с сайта корпорации National Instruments www.ni.com/multisim.

Данное учебное пособие подготовлено на основе лекций, читаемых автором в «МАТИ» — РГТУ им. К. Э. Циолковского, и предназначено для студентов, изучающих, и молодых преподавателей, излагающих в ограниченном объёме часов, основы электроники в рамках общепрофессиональной дисциплины для вузов "Общая электротехника и электроника".

Автор считает своим долгом выразить глубокую благодарность рецензентам рукописи пособия д. т. н., профессору А. Е. Краснопольскому (МИСиС) и к. т. н., профессору Ю. Е. Бабичеву (МГГУ) за полезные рекомендации и замечания, учтенные автором при окончательной подготовке рукописи к изданию. Автор благодарит также руководителя инновационных программ корпорации National Instruments в России П. Р. Сепояна за оказанное содействие в издании этой книги.

Сокращения терминов, аббревиатуры

АЛУ — арифметико-логическое устройство;

АЦП — аналого-цифровой преобразователь;

АЧХ — амплитудно-частотная характеристика;

ВАХ — вольт-амперная характеристика;

ГТИ — генератор тактовых импульсов;

ЗУ — запоминающее устройство;

ЕСКД — единая система конструкторской документации;

И²Л — интегрально-инжекционная логическая ИМС;

И, ИЛИ, НЕ — дизъюнктор, конъюнктор, инвертор;

ИВП — источник вторичного электропитания;

ИМС — интегральная микросхема;

КМОП — ИМС на основе комплементарных МОП-транзисторов;

КМДП — комплементарная МДП-структура ИМС;

КОП — код операции;

МДП — металл-диэлектрик-полупроводник;

МОП — металл-окисел-полупроводник;

МП — микропроцессор;

МПК — микропроцессорный комплект;

МПС — микропроцессорная система;

ОБ, ОК, ОЭ — общая база, общий коллектор, общий эмиттер;

ОЗ, ОИ, ОС — общий затвор, общий исток, общий сток;
ОЗУ — оперативное запоминающее устройство;
ООС — отрицательная обратная связь;
ОУ — операционный усилитель;
ПЗУ — постоянное запоминающее устройство;
ПК — персональный компьютер;
ПЛМ — программируемая логическая матрица;
ПМЛ — программируемая матричная логика;
ППЗУ — программируемое постоянное запоминающее устройство;
ПОС — положительная обратная связь;
РЕТЛ — резисторно-ёмкостная логическая ИМС;
РПЗУ — репрограммируемое постоянное запоминающее устройство;
РОН — регистры общего назначения;
РТЛ — резистивно-транзисторная логическая ИМС;
СБИС — сверхбольшая ИМС;
СВЧ — сверхвысокая частота;
СДНФ — совершенная дизъюнктивная нормальная форма;
СКНФ — совершенная конъюнктивная нормальная форма;
ТКС — температурный коэффициент сопротивления;
ТЛНС — транзисторная логическая ИМС с непосредственной связью;
ТКН — температурный коэффициент напряжения;
ТТЛ — транзисторно-транзисторная логическая структура ИМС;
УН, УР, УТ — усилитель напряжения, мощности, тока;
УВЧ, УНЧ, УПТ — усилитель высокой, низкой, промежуточной частоты;
УСВЧ — усилитель сверхвысокой частоты;
УУ — устройство управления;
ФАЛ — функция алгебры логики;
ФЧХ — фазочастотная характеристика;
ЦАП — цифроаналоговый преобразователь;
ЦП — центральный процессор;
ШИ — шинный интерфейс;
ЭВМ — электронно-вычислительная машина;
ЭДС — электродвижущая сила;
ЭЛС — эмиттерно-связанная логическая структура ИМС;
CD-ROM — привод компакт-диска;

CISC — микропроцессор классической архитектуры;

CMOS — полупроводниковая МОП-структура ИМС;

DSP — цифровой сигнальный микропроцессор;

MISC — микропроцессор, работающий с минимальным набором команд;

MS10 — программная среда NI Multisim 10;

RAM — оперативная память;

RISC — микропроцессор с неполным набором команд;

ROM — постоянная память;

TTL — транзисторно-транзисторная логическая структура ИМС;

VLIW — микропроцессор, имеющий очень длинные команды.

В книге использовано большое количество терминов, связанных с работой в среде NI Multisim 10. Выделенные **полужирным шрифтом** термины и символные обозначения в текстах тем 8, 9 и 10 относятся к командам, опциям, закладкам и кнопкам меню среды MS10, названиям её библиотек, обозначениям компонентов и инструментов, они набраны шрифтом обычного начертания и в таком виде, как они отображаются на экране монитора и на моделях электронных устройств. Примеры набора обозначений:

команд: **File, View, Open, Simulate**; библиотек: **TTL, Basic, Source, Mixed**; названий инструментов: **Multimeter, Word Generator**; компонентов: **OPAMP, VD1, R2, B, X1, AD846** и т. д.

Однако *параметры* базовых элементов (резисторов, конденсаторов, индуктивных катушек), используемые при написании формул и при выполнении расчётов, записаны в виде индексированных величин, например, сопротивление резистора **R1** обозначено как R_1 , ёмкость конденсатора **C2** — как C_2 и т. д.

Введение

Современная электроника стала одним из важнейших направлений научно-технического прогресса в мире. Создание больших и сверхбольших интегральных микросхем, микропроцессоров и микропроцессорных систем позволило организовать массовое производство электронных вычислительных машин и компьютеров высокого быстродействия, различных видов электронной аппаратуры, систем и устройств управления технологическими процессами, систем связи, экспертных, контролирующих и других систем.

Электроника — это отрасль науки и техники, связанная с исследованиями, разработкой, изготовлением и применением электронных, ионных и полупроводниковых устройств.

В истории развития электроники можно выделить четыре основных этапа: электронных ламп (с 1904 г.), транзисторов (с 1947 г.), интегральных схем (с 1958 г.), функциональных устройств с использованием объемных эффектов (с 1980 г.), и четыре главные области применения: электросвязь, радиоэлектронная аппаратура широкого применения, вычислительная техника и промышленная электроника.

Электросвязь охватывает следующие направления техники: радиосвязь, радиовещание, телевидение, звуковое вещание, автоматическую электросвязь, многоканальную электросвязь, радиорелейную, космическую, волоконно-оптическую и сотовую связи. В сфере телекоммуникаций прогнозируется, что в ближайшем будущем 80% систем связи перейдут на цифровые стандарты, произойдет существенный скачок в развитии микросотовой персональной телефонии, на которую будет приходиться до 15% мирового рынка мобильной связи. Это обеспечит повсеместную возможность приема и передачи информации любых форматов и объемов.

К радиоэлектронной аппаратуре относятся: радиоприемники, телевизоры, магнитофоны, радиолы, магнитолы, музыкальные центры, устройства бытовой автоматики, электронные часы, электронные игрушки и др.

Вычислительная техника связана с разработкой и применением электронно-вычислительных машин, автоматизированных систем управления, систем автоматизирован-

ного проектирования, автоматизированных информационных, обучающих и контролируемых систем, гибких автоматизированных производств и др. Специалисты прогнозируют, что в ближайшие годы ожидается создание и широкое распространение карманных компьютеров, рост использования суперЭВМ с параллельной обработкой информации.

Промышленная электроника включает электротехническое и энергетическое оборудование, устройства электропитания, станки с числовым программным управлением, аппаратуру автоматики, телеуправления, телеметрии, радиолокации и радионавигации, измерительную аппаратуру, лазерную технику, ядерную электронику, медицинскую аппаратуру, биологическую электронику и др.

В литературе представлены многие направления развития электроники, в которых в качестве классификационных признаков выступают: специфика технологии производства, особенности использования электронных устройств, технические решения и характеристики электронных приборов и узлов и др. Среди современных направлений электроники, излагаемых в учебных дисциплинах, назовем *микроэлектронику*, *информационную* и *функциональную* (в том числе *молекулярную*) электроники.

Микроэлектроника продолжает развиваться быстрыми темпами как в направлении совершенствования полупроводниковой интегральной технологии, так и в направлении использования новых физических явлений.

В *интегральной микроэлектронике* используется принцип дискретной электроники, основанный на разработке электронной схемы по законам теории цепей. Этот принцип связан с ростом числа элементов микросхемы и межэлементных соединений по мере усложнения выполняемых ею функций. Однако повышение степени интеграции микросхем и связанное с этим уменьшение размеров элементов (уже достигнут топологический уровень 90...45 нм) имеет определенные пределы. К тому же интеграция свыше сотен тысяч элементов на одном кристалле оказывается технологически трудно выполнимой и не всегда экономически целесообразной.

Функциональная микроэлектроника предполагает принципиально другой подход: получение специальных сред с наперед заданными свойствами, основываясь непосредственно на физических явлениях в таких материалах, как сверхпроводники, сегнетоэлектрики, материалы с фотопроводящими свойствами, аморфные материалы, органические полупроводники и др. Для обработки информации используют оптические и магнитные явления в диэлектриках, закономерности распространения ультразвука, эффект накопления и переноса зарядов в приборах с зарядной связью, явления, основанные на квантовых когерентных свойствах — эффект Джозефсона и др. Реализация элементов на указанных свойствах позволяет получить приборы со сложным схмотехническим или системотехническим функциональным назначением.

В функциональной микроэлектронике успешно используют явления, связанные с изменением структуры тел на молекулярном уровне. Эти явления привели к возникновению нового направления — молекулярной электроники и биоэлектроники, в которых электронные элементы и устройства организованы на уровне отдельных молекул и их комплексов. К этому направлению относят также фазовые переходы в твердых

телах и жидких кристаллах, приводящие к резким изменениям электрических, магнитных и оптических свойств и высокой чувствительности к внешним воздействиям, что позволяет легко осуществлять ряд операций по управлению и преобразованию потоков информации в различных функциональных устройствах.

В настоящее время ведутся большие исследования в различных направлениях биоэлектроники, результаты которых показывают, что использование явлений живой природы может привести к новой научно-технической революции в этой области техники. К 2020 году прогнозируется начало выпуска биокомпьютеров, встраиваемых в живые организмы.

Современное структурное и схемное проектирование основано на использовании мощных силовых элементов, аналоговых и цифровых микросхем, номенклатура которых чрезвычайно разнообразна. Однако в любом устройстве можно выделить основные электронные приборы, на которых они построены. Среди них выделим:

- *электронные электровакуумные приборы* (электронные лампы, электронно-лучевые трубки: осциллографические кинескопы, дисплеи и др.);
- *ионные электровакуумные или газоразрядные приборы*, принцип действия которых основан на взаимодействии электронов с ионной плазмой (тиратроны, игнитроны, ионные разрядники, газоразрядные стабилитроны);
- *полупроводниковые приборы*, у которых движение зарядов происходит в твёрдом теле полупроводников.

Основными *классами* полупроводниковых приборов являются:

- диоды, биполярные и полевые транзисторы, тиристоры, фотоэлектронные и оптоэлектронные приборы;
- приборы, выполненные в виде интегральных микросхем разной степени интеграции и представляющие собой совокупность нескольких взаимосвязанных компонентов (транзисторов, диодов, резисторов и др.), изготовленных в едином технологическом цикле на полупроводниковых или диэлектрических подложках.

В зависимости *от физической природы сигналов* на входах и выходах различают четыре вида приборов-преобразователей сигналов:

- *электропреобразовательные приборы*, у которых электрические сигналы на входах и выходах;
- *электросветовые приборы*, у которых под воздействием входных электрических сигналов на выходах формируются световые сигналы;
- *фотоэлектрические приборы*, преобразующие входные световые сигналы в электрические;
- *термоэлектрические приборы*, у которых тепловые сигналы на входах и электрические на выходах.

В зависимости *от формы сигналов*, обращающихся в устройствах, различают аналоговые, импульсные, цифровые устройства и их комбинации.

Основными типами *аналоговых* устройств являются: автогенераторы гармонических колебаний и релаксационные генераторы, микрофоны, умножители (делители) и преобразователи частоты, модуляторы, демодуляторы (модемы), детекторы, усилители, в том числе операционные.

К *импульсным* устройствам относят функциональные узлы, предназначенные для формирования импульсных сигналов, изменения их параметров и выполнения над сигналами таких операций преобразования, как интегрирование, дифференцирование, задержки по времени, изменение формы, длительности и др.

Функциональные узлы, предназначенные для выполнения различных операций над объектами информации в виде цифровых сигналов, относят к *цифровым* устройствам.

Тема 1

Полупроводниковые приборы

1.1. Электронно-дырочный переход

Электроника базируется в основном на использовании полупроводниковых приборов: диодов, транзисторов, тиристоров и интегральных микросхем (ИМС).

В полупроводниковых приборах используется свойство односторонней проводимости p - n -переходов. *Электронно-дырочным* называют такой p - n -переход, который образован двумя областями полупроводника с разными типами проводимости: электронной (n) и дырочной (p). Получают p - n -переход с помощью диффузии или эпитаксии.

Полупроводник без примеси имеет собственную удельную электропроводность $\sigma_n = 10^2 \dots 10^8$ См/м (у проводников $\sigma_{me} = 10^4 \dots 10^8$ См/м, у диэлектриков $\sigma_d < 10^{-8}$ См/м). Согласно зонной теории к полупроводникам относят вещества, ширина запрещенной энергетической зоны которых $\Delta W < 3$ эВ (рис. 1.1). Так, у германия (Ge) $\Delta W = 0,72$ эВ, у кремния (Si) $\Delta W = 1,11$ эВ, у арсенида галлия (GaAs) $\Delta W = 1,41$ эВ.

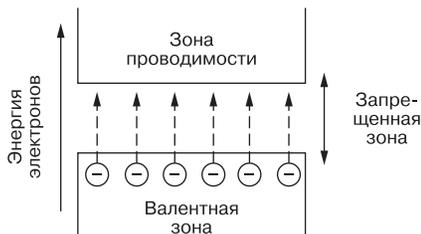


Рис. 1.1

У проводников запрещенная зона отсутствует: валентная зона и зона проводимости частично перекрываются, что обеспечивает хорошую электропроводность металлов.

Электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне определяют электропроводность четырехвалентного полупроводника.

Электронно-дырочная проводимость возникает в результате разрыва валентных связей, являясь *собственной* проводимостью, которая обычно невелика. Под воздействием электрического поля, температуры и других внешних факторов электрические свойства полупроводников изменяются в значительно бóльшей степени, чем свойства проводников и диэлектриков.

Для увеличения электропроводности в полупроводники вводят незначительное количество *примесей*, при этом оказывается, что в зависимости от рода примеси получают как полупроводники с дырочной проводимостью (при добавках трёхвалентной примеси — акцепторов типа индий (In)), называемых полупроводниками *p*-типа, так и полупроводники с электронной проводимостью (при добавках пятивалентной примеси — доноров типа мышьяк (As)), называемых полупроводниками *n*-типа.

При сплавлении полупроводников различных типов создаётся область объёмного заряда по обе стороны от границы раздела, называемая *электронно-дырочным* или *p-n-переходом*. При этом возникает так называемый запирающий (*барьерный*) слой в несколько микрометров, лишенный носителей заряда, с напряженностью E_z электрического поля, которая препятствует диффузии носителей заряда (рис. 1.2, а). Потенциальная энергия поля $W_0 = q_e (\varphi_a - \varphi_b) = q_e U_\varphi$, где U_φ — контактная разность потенциалов; $q_e = -1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона.

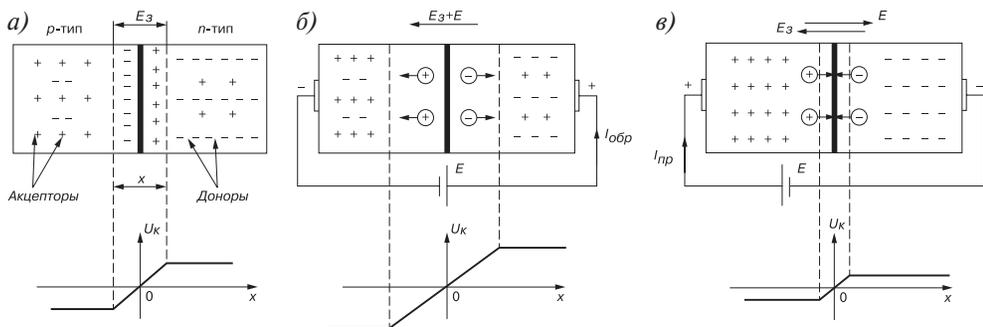


Рис. 1.2

Если к *p-n-переходу* приложить *обратное напряжение* (рис. 1.2, б), то создаваемая им напряженность E электрического поля повышает потенциальный барьер и препятствует переходу электронов из *n*-области в *p*-область и дырок из *p*-области в *n*-область. При этом поток неосновных носителей (дырок из *n*-области и электронов из *p*-области), их *экстракция*, образует обратный ток $I_{обр}$.

Если включить внешний источник энергии E , как это показано на рис. 1.2, в, то создаваемая им напряженность электрического поля будет противоположной направлению напряженности E_z объёмного заряда, и в область раздела полупроводников будет *инжектироваться* все большее количество дырок (являющимися неосновными для *n*-области носителями заряда), которые и образуют прямой ток $I_{пр}$. При напряжении 0,3...0,5 В запирающий слой исчезнет, и ток $I_{пр}$ определяется только сопротивлением полупроводника.

Встречной инжекцией электронов в p -область можно пренебречь, так как число дырок в рассматриваемом примере, а следовательно, и основных носителей заряда больше в p -области, чем свободных электронов в n -области, т. е.

$$N_a \gg N_d,$$

где N_a и N_d — концентрации акцепторов и доноров в p - и n -областях.

Область кристалла, имеющая более высокую концентрацию примесей, называют *эмиттером*, а вторую, с меньшей концентрацией, — *базой*.

1.2. Диоды и их свойства

Полупроводниковым диодом называют прибор с одним p - n -переходом, имеющим два вывода: анод A и катод K (рис. 1.3).

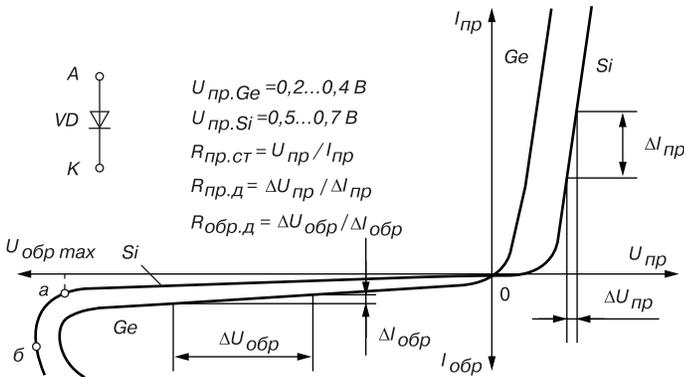


Рис. 1.3

При включении p - n -перехода под *прямое напряжение* $U_{пр}$ сопротивление p - n -перехода $R_{пр}$ снижается, а ток $I_{пр}$ возрастает. При *обратном* напряжении $U_{обр}$ обратный ток $I_{обр}$ неосновных носителей заряда оказывается во много сотен или тысяч раз меньше прямого тока. При напряжении $U > U_{обр.max}$ (см. точку a на вольт-амперной характеристике (ВАХ) диода (рис. 1.3)) начинается лавинообразный процесс нарастания обратного тока $I_{обр}$, соответствующий электрическому пробоему p - n -перехода, переходящий (если не ограничить ток) в необратимый тепловой пробой (после точки b на рис. 1.3).

Из ВАХ диода следует, что он обладает неодинаковой электрической проводимостью в прямом и обратном направлениях его включения. Поэтому полупроводниковые диоды используют в схемах выпрямления переменного тока.

Так как напряжение на полностью открытом диоде не превышает $0,5...0,7$ В, то для приближенных расчетов диод рассматривают как *вентиль*: открыт — закрыт, имеющий ВАХ, изображенную на рис. 1.4.

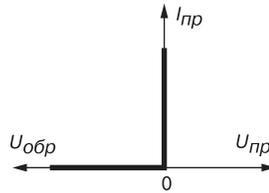


Рис. 1.4

Анализ типовых ВАХ диодов (см. рис. 1.3) показывает, что прямое напряжение U_{np} на германиевом диоде почти в два раза меньше, чем на кремниевом, при одинаковых значениях прямого тока I_{np} , а обратный ток $I_{обр}$ кремниевого диода значительно меньше обратного тока германиевого при одинаковых обратных напряжениях $U_{обр}$. К тому же, германиевый диод начинает проводить ток при ничтожно малом прямом напряжении U_{np} , а кремниевый — только при $U_{np} = 0,4...0,5$ В.

Исходя из этих свойств, германиевые диоды применяют как в схемах выпрямления переменного тока, так и для обработки сигналов малой амплитуды (до 0,3 В), а кремниевые, наиболее распространённые — как в схемах выпрямления, так и в схемах устройств, в которых обратный ток недопустим или должен быть ничтожно мал. К тому же, кремниевые диоды сохраняют работоспособность до температуры окружающей среды 125...150 °С, тогда как германиевые могут работать только до 70 °С.

Вольт-амперная характеристика, т. е. зависимость тока, протекающего через $p-n$ -переход, от значения и полярности приложенного к нему напряжения U , достаточно хорошо соответствует выражению

$$I = I_0(e^{\frac{qU}{kT}} - 1) = I_0(e^{U/\varphi_T} - 1),$$

где I_0 — ток насыщения; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; $\varphi_T = T/11600$ — температурный потенциал электрона, равный при $t = 20$ °С,

$$\varphi_T = \frac{273 + 20}{11600} \approx 0,025 \text{ В} = 25 \text{ мВ}.$$

При отрицательном (обратном) напряжении от десятых вольта и выше слагаемым $e^{-U_{обр}/0,025}$ можно пренебречь по сравнению с единицей, и ток оказывается равным $I = I_{обр}$, не зависящим от напряжения. При прямом приложенном напряжении в десятые доли вольта и выше можно пренебречь единицей по сравнению со слагаемым $e^{U_{np}/0,025}$, и, следовательно, ВАХ оказывается близкой к экспоненте.

Пусть имеем идеализированный $p-n$ -переход при температуре $t = 20$ °С, о котором известно, что концентрация донорной примеси составляет $N_d = 2,5 \cdot 10^{15}$ атомов/см³, акцепторной примеси $N_a = 2 \cdot 10^{18}$ атомов/см³, а собственная концентрация носителей в кристалле, из которого изготовлен переход, равна $N_i = 3,5 \cdot 10^{14}$ атомов/см³. Определим прямой ток I_{np} и контактную разность потенциалов U_ϕ при приложенном к зажимам диода напряжении $U_{np} = 0,6$ В и токе $I_0 = 1$ мкА.

Прямой ток

$$I = I_0(e^{U/\varphi_T} - 1) = 10^{-6}(e^{0,6/0,025} - 1) \approx 0,054 = 54 \text{ мА.}$$

Контактная разность потенциалов на идеализированном переходе, образованная приграничными зарядами,

$$U_\varphi = \varphi_T \ln \frac{N_d N_a}{N_i^2} = 0,025 \ln \frac{2,5 \cdot 10^{15} \cdot 2 \cdot 10^{18}}{(3,5 \cdot 10^{14})^2} \approx \\ \approx 0,025 \ln(4,08 \cdot 10^4) = 0,265 \text{ мВ.}$$

Разность напряжений $\Delta U = U_{np} - U_\varphi = 0,335$ В объясняется падением напряжения на сопротивлениях n - и p -областей полупроводника.

1.3. Разновидности диодов

В зависимости от назначения и свойств различают выпрямительные диоды, стабилитроны, высокочастотные диоды, импульсные диоды, варикапы, диоды Шоттки, светодиоды, фотодиоды, диодные оптроны и т. п.

Выпрямительные диоды используют в схемах преобразования (выпрямления) переменного тока в постоянный ток. Как правило, это плоскостные диоды средней и большой мощности. В высокочастотных и импульсных маломощных цепях электронных устройств используют точечные диоды: кремниевые типа КД или 2Д и германиевые типа ГД или 1Д, из арсенида галлия типа 3Д. Например, диоды ГД107А, КД203Д рассеивают мощность P от 1 до 1,5 Вт, а диод КД512А — мощность $P > 1,5$ Вт.

К *маломощным* относят диоды с мощностью рассеивания до 0,3 Вт, к диодам *средней мощности* от 0,3 до 10 Вт, диоды *большой мощности* с мощностью рассеивания $P > 10$ Вт.

Основные параметры выпрямительных диодов:

- I_{np} — прямой ток;
- U_{np} — прямое напряжение;
- I_{npmax} — максимальный допустимый прямой ток;
- $U_{обр.max}$ — максимальное допустимое обратное напряжение;
- $I_{обр}$ — обратный ток, который нормируется при определенном обратном напряжении.

В настоящее время выпускаются так называемые *диодные столбы*, в которых для увеличения обратного напряжения последовательно соединены от 5 до 50 диодов с допустимым обратным напряжением от 2 до 40 кВ.

Стабилитроны или опорные кремниевые диоды предназначены для использования в параметрических стабилизаторах напряжения (рис. 1.5). Рабочим участком ВАХ стабилитрона является участок обратной её ветви, соответствующий области обратного электрического пробоя p - n -перехода (рис. 1.6) и ограниченный минимальным и максимальным значениями тока.

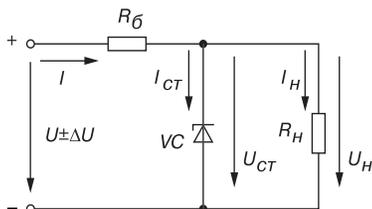


Рис. 1.5

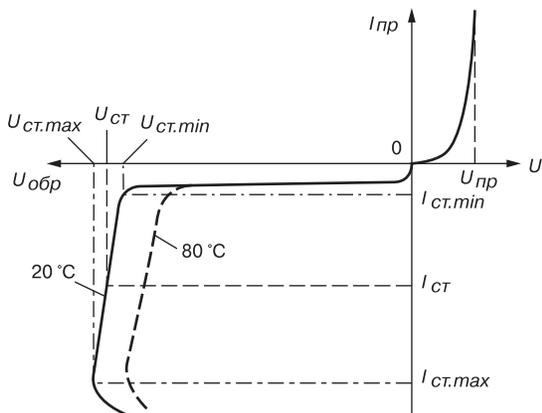


Рис. 1.6

При работе в этой области обратное напряжение на стабилитроне U_{cm} незначительно изменяется при относительно больших изменениях тока стабилитрона I_{cm} . Поэтому при изменении входного напряжения $U \pm \Delta U = \pm U_{\delta} + U_{cm}$ изменяется в основном напряжение $\pm U_{\delta} = R_{\delta} I$ на балластном резисторе R_{δ} , напряжение U_n на нагрузке R_n почти не изменяется.

При прямом включении стабилитрон может рассматриваться как обычный диод, однако в связи с повышенной концентрацией примесей напряжение $U_{np} \approx 0,3 \dots 0,4$ В мало изменяется при значительных изменениях прямого тока I_{np} . Прибор, в котором используется прямая ветвь в схемах стабилизации напряжения, называют *стабистором*.

Основными параметрами стабилитрона являются:

- $U_{cm} = 3 \dots 180$ В — напряжение на стабилитроне;
- $R_{\delta} = \frac{\Delta U_{cm}}{\Delta I_{cm}} = \frac{U_{cm,max} - U_{cm,min}}{I_{cm,max} - I_{cm,min}}$ — динамическое сопротивление на участке стабилизации;
- $I_{cm,min}$ и $I_{cm,max}$ — минимальный и максимальный токи стабилизации (от 5 мА до 5 А);
- $TКН \% = \frac{\Delta U_{cm}}{\Delta T} 100 = 0,3 \dots 0,4$ %/град — температурный коэффициент напряжения на участке стабилизации, характеризующий относительное изменение напряжения стабилизации, вызванное изменением температуры на 1 °С при постоянном токе, протекающем через стабилитрон.

Примеры маркировки стабилитронов:

КС168А ($U_{cm} = 6,8$ В); Д814В ($U_{cm} = 9 \dots 10$ В; $I_{cm} = 3 \dots 30$ мА).

Высокочастотные диоды — приборы универсального назначения (для выпрямления токов в широком диапазоне частот — до сотен мегагерц, генерации колебаний СВЧ-диапазона, модуляции сигналов, детектирования и других нелинейных преобразований).

Импульсные диоды используют в ключевых схемах при малых длительностях импульсов и переходных процессов (микросекунды и доли микросекунд). Важным моментом является инерционность включения и выключения диодов (малая длительность рекомбинации носителей заряда — восстановление обратного сопротивления за счет уменьшения так называемой барьерной ёмкости $C_{бар}$ p - n -перехода).

Варикапы — это полупроводниковые диоды, предназначенные для использования их ёмкости, управляемой обратным напряжением $U_{обр}$ (рис. 1.7).

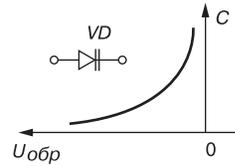


Рис. 1.7

В общем случае диод обладает барьерной и диффузионной ёмкостями. *Барьерная ёмкость* проявляется при приложении к p - n -переходу обратного изменяющегося во времени напряжения. При этом через p - n -переход протекает ток. Та доля тока (ток смещения), которая не связана с движением носителей заряда через p - n -переход,

и определяет барьерную ёмкость $C_{бар} = \left| \frac{dq_{обр}}{dU} \right|$ (появление тока смещения связано с

изменением объёмного заряда). Абсолютное значение отношения $\left| \frac{dq_{обр}}{dU} \right|$ взято потому, что объёмный заряд в p - n -переходе может быть положительным и отрицательным.

Диффузионную ёмкость обычно связывают с изменением заряда инжектированных неосновных носителей при изменении напряжения на диоде: $C_{диф} = \left| \frac{dq_{инж}}{dU} \right|$. Диффузионная ёмкость проявляется при прямом смещении p - n -перехода диода.

В качестве варикапов используют диоды при обратном постоянном смещении, когда проявляется только барьерная ёмкость.

Основные параметры варикапа:

- C — ёмкость, измеренная между выводами варикапа при заданном обратном напряжении (рис. 1.7). Для различных варикапов ёмкость может быть от нескольких единиц до нескольких сотен пикофарад;
- $k_c = 5 \dots 20$ — коэффициент перекрытия по ёмкости отношения ёмкостей варикапа при двух значениях обратных напряжений;

- $Q = \frac{1}{\omega RC_{бар}}$ — добротность варикапа (значение Q — от десятков до нескольких сотен) — это отношение реактивного сопротивления варикапа на заданной частоте переменного сигнала к активным сопротивлениям потерь R при заданных значениях ёмкости и обратного напряжения.

Пример маркировки: варикап типа KB110A ($C = 12$ пФ; $U_{обр} = 45$ В).

Варикапы применяют в основном в устройствах высоких и сверхвысоких частот, например, для настройки колебательных контуров.

Диоды Шоттки — это полупроводниковые приборы, в которых используются свойства потенциального барьера (*барьера Шоттки*) на контакте металл — полупроводник.

В рассматриваемых диодах из-за разной высоты потенциальных барьеров для электронов и дырок нет инжекции неосновных носителей заряда, нет и таких медленных процессов, как накопление и рассасывание неосновных носителей в базе. В результате инерционность диодов с выпрямлением на контакте металл — полупроводник определяется величиной барьерной ёмкости выпрямляющего контакта ($C_{бар} \approx 1$ пФ). Кроме того, у этих диодов незначительные активные потери (прямое напряжение $U_{пр} \approx 0,4$ В, что на 0,2 В меньше, чем у обычных диодов).

ВАХ диодов Шоттки — строгой экспонента (рис. 1.8).

В связи с тем, что барьерная ёмкость и последовательное активное сопротивление в таких диодах небольшие, соответственно мало и время перезарядки ёмкости; это даёт возможность использовать диоды Шоттки в качестве сверхскоростных импульсных диодов ($f = 3 \dots 15$ ГГц), например, в некоторых схемах в качестве быстродействующих логарифмических элементов и в мощных высокочастотных выпрямителях, в которых диоды способны работать на частотах до 1 МГц при $U_{обр} = 50$ В и $I_{пр} = 10$ А.

Туннельные диоды — это полупроводниковые приборы (не имеющие *p-n*-перехода), использующие эффект Ганна — возникновение на ВАХ участка отрицательного дифференциального сопротивления (рис. 1.9):

$$R_d = -\Delta U / \Delta I.$$

Отношение токов $I_{max} / I_{min} = 5 \dots 10$. Это свойство диодов Ганна используют при разработке усилителей, генераторов синусоидальных и релаксационных колебаний, в переключающих устройствах с частотами от 100 МГц до 10 ГГц.

Светодиоды — это излучающие полупроводниковые приборы (индикаторы), предназначенные для непосредственного преобразования электрической энергии в энергию некогерентного светового излучения.

В основе принципа функционирования светодиодов лежит преобразование электрической энергии в электромагнитное излучение, спектр которого полностью или частично лежит в видимой области, диапазон длин волн которой составляет 0,45...0,68 мкм. Светодиодная структура представляет собой *p-n*-переход, в котором при протекании прямого тока в несколько миллиампер в обеих областях перехода происходит рекомбинация инжектированных электронов и дырок, но наиболее эффективное преобразование инжектированных электронов в световую энергию протекает в базовой *p*-области.

Максимальное значение энергии, которое может выделиться при рекомбинации, равно ширине запрещённой зоны данного полупроводника. В полупроводниковых

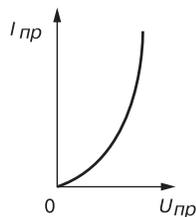


Рис. 1.8

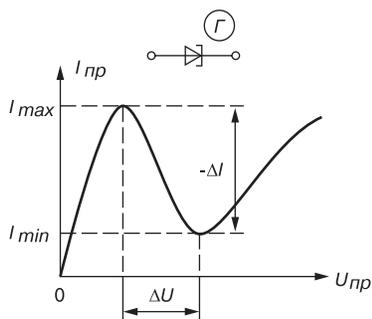


Рис. 1.9

материалах с шириной запрещённой зоны менее 1,8 эВ может возбуждаться излучение с длиной волны более 0,7 мкм, которое лежит за пределами диапазона длин волн видимого света. Поэтому основными полупроводниковыми материалами, применяемыми для изготовления серийных светодиодов, являются фосфид галлия (GaP), твёрдые растворы (GaAsP, GaAlP) и карбид кремния (SiC) с шириной запрещённой зоны более 2 эВ.

Условное изображение и яркостная характеристика $B(I_{пр})$ светодиода, где B — яркость света в канделах, приведены на рис. 1.10.

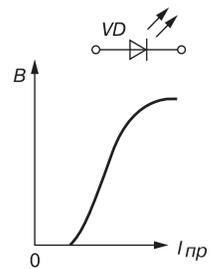


Рис. 1.10

Фотодиод — это полупроводниковый прибор с $p-n$ -переходом, обратный ток которого зависит от освещенности Φ (рис. 1.11, а).

При поглощении квантов света в $p-n$ -переходе или в прилегающих к нему областях кристалла полупроводника образуются новые носители заряда (пары электрон-дырка), поэтому обратный ток (фототок) через фотодиод при освещении возрастает. С увеличением светового потока Φ сопротивление перехода уменьшается (рис. 1.11, б).

Приборы, предназначенные для использования этого явления, называют **фоторезисторами**, а транзисторы и тиристоры, реагирующие на эффект облучения световым потоком и способные одновременно усиливать фототок, называют соответственно **фототранзисторами** и **фототиристорами**.

Диодные оптрона — это приборы, состоящие из оптически связанных между собой элементов оптронной пары (управляемого светодиода и принимающего излучение фотодиода) и предназначенные для выполнения функциональных электрических и оптических преобразований.

На рис. 1.12, а изображена схема диодного оптрона с внутренней прямой оптической связью. Изменение входного тока $I_{вх}$ через светодиод сопровождается изменением яркости его свечения и изменением освещенности фотодиода, что приводит к уменьшению сопротивления фотодиода и соответственно к увеличению тока $I_{вых}$ через выход оптрона (рис. 1.12, б).

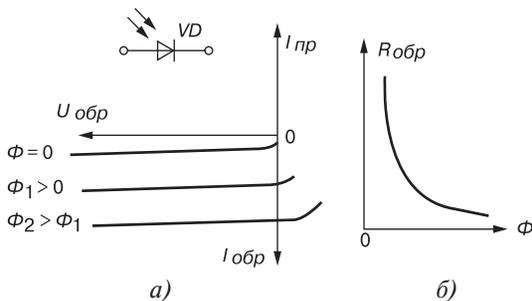


Рис. 1.11

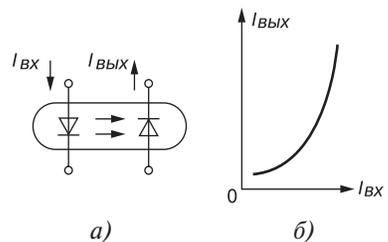


Рис. 1.12

Важным свойством такого оптрона является полная электрическая развязка входа и выхода прибора, что исключает обратную электрическую связь с его выхода на вход.