

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.

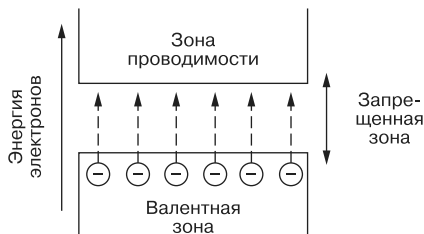


Рис. 1.1

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.

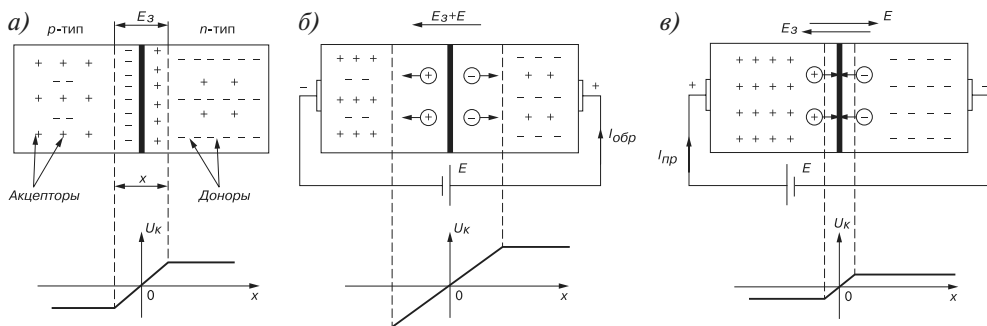


Рис. 1.2

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_{np} . При напряжении 0,3...0,5 В запирающий слой исчезнет, и ток I_{np} 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).

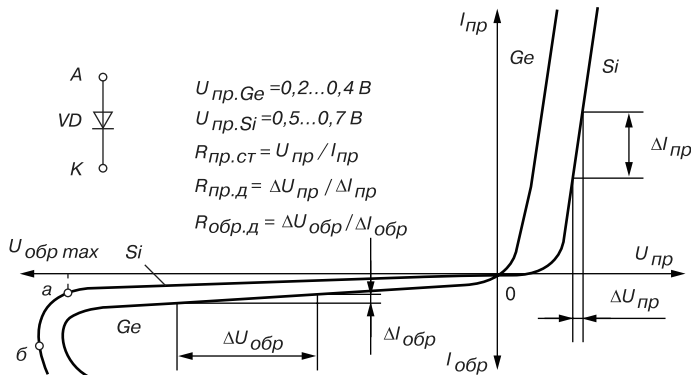


Рис. 1.3

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.

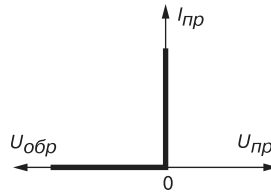


Рис. 1.4

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

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

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 максимальными значениями тока.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru