

В. Ш. БЕРИКАШВИЛИ

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Учебник

*Рекомендовано
федеральным государственным автономным учреждением
«Федеральный институт развития образования» (ФГАУ «ФИРО»)
в качестве учебника для использования в учебном процессе
образовательных учреждений, реализующих программы
среднего профессионального образования*

Регистрационный номер рецензии 313 от 08 июля 2013 г. ФГАУ «ФИРО»



Москва
Издательский центр «Академия»
2013

УДК 621.38(075.32)
ББК 32.85я723
Б488

Рецензент —

преподаватель спец. дисциплин высшей категории Московского колледжа
градостроительства и сервиса № 38 (ГБОУ СПО КГиС),
канд. техн. наук *В. Н. Иванов*

Берикашвили В. Ш.

Б488 Основы электроники : учебник для студ. учреждений сред.
проф. образования / В.Ш.Берикашвили.— М. : Издательский
центр «Академия», 2013. — 208 с.

ISBN 978-5-4468-0114-5

Изложены основы теории и практики построения электронных приборов, устройств и цепей на современной элементной базе с использованием новых конструктивных и схемотехнических решений. Рассмотрены принципы работы и структура электронных приборов и устройств. Показана тенденция перехода разработок электронных устройств от энергоемких и низкочастотных к миниатюрным и сверхвысокочастотным. Приведены типовые схемотехнические решения аналоговых и цифровых интегральных микросхем. Рассмотрено построение функциональных электронных устройств на основе операционных усилителей, компараторов, таймеров, оптронов и других оптоэлектронных устройств. Даны структурные схемы и принципы работы микропроцессоров, однокристальных ЭВМ и контроллеров.

Учебник может быть использован при изучении общепрофессиональной дисциплины «Основы электроники» в соответствии с ФГОС СПО для специальности 270843 «Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования промышленных и гражданских зданий».

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

УДК 621.38(075.32)
ББК 32.85я723

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение
любым способом без согласия правообладателя запрещается*

© Берикашвили В. Ш., 2013
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2013
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2013

ISBN 978-5-4468-0114-5

Данный учебник является частью учебно-методического комплекта по специальности 270843 «Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования промышленных и гражданских зданий».

Учебник предназначен для изучения общепрофессиональной дисциплины «Основы электроники».

Учебно-методические комплекты нового поколения включают традиционные и инновационные учебные материалы, позволяющие обеспечить изучение общеобразовательных и общепрофессиональных дисциплин и профессиональных модулей. Каждый комплект содержит в себе учебники и учебные пособия, средства обучения и контроля, необходимые для освоения общих и профессиональных компетенций, в том числе и с учетом требований работодателя.

Учебные издания дополняются электронными образовательными ресурсами. Электронные ресурсы содержат теоретические и практические модули с интерактивными упражнениями и тренажерами, мультимедийные объекты, ссылки на дополнительные материалы и ресурсы в Интернете. В них включен терминологический словарь и электронный журнал, в котором фиксируются основные параметры учебного процесса: время работы, результат выполнения контрольных и практических заданий. Электронные ресурсы легко встраиваются в учебный процесс и могут быть адаптированы к различным учебным программам.

Учебно-методический комплект по дисциплине «Основы электроники» включает электронный образовательный ресурс «Основы электроники».

Учебно-методический комплект разработан на основании Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования с учетом его профиля.

Электронная техника стала стремительно развиваться в 60-е гг. XX в. в связи с возросшей потребностью передачи информации на большие расстояния и развитием вычислительной техники. Открытие полупроводников резко изменило характер электронных устройств: они стали малогабаритными и более надежными, появилась возможность их миниатюризации и значительного снижения энергоемкости.

В настоящее время существует целая отрасль электронной техники — микроэлектроника, разрабатывающая и производящая аналоговые, цифровые и специализированные микросхемы с числом элементарных полупроводниковых устройств от 10^3 до 10^6 . Микроэлектронные устройства получили широкое распространение в радиотехнике, электронике, системах связи, вычислительной и бытовой технике, благодаря чему электронные и радиотехнические устройства стали легкими, малогабаритными, экономичными и широкодоступными.

В последние годы стремительно развивается импульсная цифровая техника. Например, посредством импульсных сигналов передают данные о состоянии технических объектов (в телеметрии), управляют космическими кораблями при стыковке, создают высококачественные цифровые радиовещание и телевидение. В повседневной жизни мы сталкиваемся с импульсами и импульсными устройствами, иногда и не подозревая об их существовании. Кнопочный пульт позволяет нам на расстоянии управлять телевизором с помощью импульсов инфракрасного излучения. Спутниковая антенна принимает цифровые радиоимпульсы. Набирая номер телефона, мы посылаем импульсы телефонной станции, которая расшифровывает их и соединяет нас с требуемым абонентом.

Наиболее высокий уровень развития характерен для цифровой вычислительной техники. Современные вычислительные машины имеют тактовую частоту импульсов 2 ГГц, а в быстродействующих вычислительных комплексах передача информации происходит со скоростью до $2 \cdot 10^9$ импульсов в секунду.

Бытовые приборы также насыщены цифровой электронной техникой. В современных автомобилях электроника используется в системах зажигания, контрольной и охранной сигнализации. В последних моделях автомобилей устанавливаются микропроцессоры, определяющие оптимальные режимы работы двигателя.

Строительство новых жилых домов связано с одновременным монтажом силовых и информационных сетей. В жилых, офисных и промышленных зданиях используются различные контрольно-измерительные приборы, системы охранной сигнализации и системы управления энергией.

В настоящее время приоритетными направлениями развития науки и техники являются информационные технологии, высокотехнологичные производственные процессы и энергосберегающие технологии. Эти направления тесно связаны с развитием информационной и энергетической электроники, применением микропроцессорной вычислительной техники в системах автоматического управления, телекоммуникационных и информационных системах.

Целью настоящей книги является ознакомление будущих специалистов в области монтажа, наладки и эксплуатации электрооборудования промышленных и гражданских зданий с основами электронной техники, включая элементную базу, аппаратные средства информатики и энергетической электроники, элементы цифровой и микропроцессорной техники.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

1.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Электронная техника (электроника) — область науки и техники, связанная с изучением физических свойств, методов исследования и применения устройств, основанных на взаимодействии электронов с электрическим и магнитным полями в вакууме или твердом теле.

В настоящее время под электронной техникой понимают также приборы и устройства, основанные на электронных потоках и их взаимодействии с веществом и электромагнитными полями. В основе электронных устройств лежат электронные приборы.

Электронные приборы — элементарные электронные устройства, выполняющие определенные функции. Различают вакуумные и твердотельные электронные приборы.

К *вакуумным* электронным приборам относят электронные лампы, электроннолучевые трубки и газоразрядные приборы (магнетроны, гиротроны, фотоэлектронные умножители, электронно-оптические преобразователи и т. п.); к *твердотельным* — полупроводниковые диоды, транзисторы, тиристоры, светодиоды, фотодиоды, полупроводниковые лазеры, интегральные микросхемы.

Под электронной техникой понимают также разнообразные электронные устройства, связанные с использованием элементарных электронных приборов, начиная от простых усилителей и заканчивая сложными вычислительными машинами. К ним относятся и различные бытовые и музыкальные электронные устройства. Особое место занимают электронные устройства, связанные с формированием, распознаванием и преобразованием радиосигналов: их изучением и описанием занимается **радиоэлектроника**.

Характерной является область электроники, к которой относятся импульсные устройства и электронные устройства, связанные с цифровой и вычислительной техникой.

Другое направление электроники, связанное с преобразованием и использованием оптических сигналов и изображений, называется **оптоэлектроникой**.

Специфичны и разделы электроники, посвященные методам исследования физических явлений, измерениям физических величин, характеристик и параметров электронных устройств, в том числе электрических цепей и электромагнитных полей. Приборы, осуществляющие измерения параметров и исследования процессов, протекающих в электрических цепях и устройствах, называют электронными **измерительными приборами**.

Элементы электронной техники являются кирпичиками, из которых конструируются более сложные электронные устройства. Базовые, или основные элементы электронной техники — резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы, микросхемы и т.п. Приборы, не увеличивающие амплитуду и не изменяющие частоту электрических сигналов, называются **пассивными** (конденсаторы, резисторы, катушки индуктивности). **Активными** элементами электронной техники называют диоды, транзисторы, светодиоды, лазеры, оптроны, управляющие микросхемы, обладающие способностью усиливать напряжение, изменять частоту или преобразовывать электрический ток в свет.

С помощью электронных приборов (базовых элементов) создают электронные устройства (усилители, генераторы, радиоприемники и т.п.).

Аналоговая электроника — это электронная техника, работающая с непрерывными сигналами (непрерывно меняющиеся напряжения и ток). К устройствам аналоговой электроники относятся усилители, смесители, преобразователи частоты, фильтры, стабилизаторы напряжения, тока, частоты, а также генераторы гармонических колебаний.

Импульсная электроника — это электронная техника, работающая с импульсными сигналами (одиночные импульсы напряжения и тока или последовательности импульсов). К устройствам импульсной электроники относятся импульсные усилители и генераторы, компараторы и т.п.

Цифровая электроника — это электронная техника, работающая с отдельными (дискретными) значениями напряжений, токов, частот. К устройствам цифровой электроники относятся логические устройства, оперирующие с сигналами 0 и 1, аналого-цифровые

и цифроаналоговые преобразователи, микропроцессоры, персональные вычислительные машины, сложные вычислительные устройства. Цифровая электроника тесно связана с импульсной техникой, так как сигналы в ней передаются последовательностями импульсов.

Электронная техника начала развиваться в начале прошлого века с изобретения радио.

В радиотехнических системах передачи информации и радиовещании используются мощные высокочастотные колебания напряжения, создающие радиоволны. Модуляция высокочастотных колебаний (т. е. изменение их амплитуды, частоты или фазы) позволяет передавать звуковые частоты и видеосигналы с помощью радиоволн. Для реализации такой передачи информации необходимы мощные высокочастотные генераторы. Для приема сигналов от передатчика на больших расстояниях необходимы высокочувствительные приемники, осуществляющие прием, фильтрацию, преобразование и усиление сигналов.

Благодаря современным достижениям радиоэлектроники во всем мире широко используются радиовещание и телевидение, причем телевизионные и радиосигналы через спутниковые ретрансляторы можно принимать в любой точке земного шара.

Современные системы передачи телефонной и цифровой информации, как правило, многоканальные. Они основаны на импульсно-кодовой модуляции, осуществляют передачу в режиме спектрального или временного уплотнения. Развитие этих систем связано с непрерывным ростом потребности людей в общении. Сейчас во всем мире широко применяют местные и международные телефонные сети, сеть Интернет, банковские и другие системы связи.

Многие современные радиотехнические системы передачи информации работают в прерывистом импульсном режиме. Наиболее качественная передача звука и телевизионного изображения осуществляется в цифровом виде в режиме импульсно-кодовой модуляции в цифровых радиорелейных и спутниковых системах связи. Использование импульсного режима в радиотехнических системах связи обусловлено тем, что в импульсе можно развить большую мощность сигнала, перекрывающую радиопомехи. При этом средняя мощность передатчика может быть сравнительно низкой. Спутниковая радиосвязь и цифровое телевидение основаны на принципах работы с импульсными цифровыми данными, что обеспечивает их помехоустойчивость и высокое качество передачи изображения.

Наряду с развитием радиотехнических систем происходило развитие вычислительной техники и электронно-вычислительных

систем, которые также оперируют импульсными электрическими сигналами. Современные вычислительные машины имеют тактовую частоту 2 ГГц, а передача информации в вычислительных комплексах происходит со скоростью до $2 \cdot 10^9$ импульсов в секунду. На крупных промышленных и научных предприятиях вычислительные машины объединены в комплексы, состоящие из множества вычислительных машин, сети датчиков и исполнительных механизмов. Это позволяет контролировать производство и управлять им без участия человека и в оптимальном режиме.

Следует особо отметить появление новых направлений электроники, связанных с развитием спутниковых и волоконно-оптических систем связи. Они способствовали появлению цифрового телевидения и сотовой связи, совершенствованию радиотехнических систем, включая навигационные. Бурное развитие направлений электроники, относящихся к информационным технологиям, позволило удовлетворить потребность человечества в обмене аудио-, видео- и цифровой информацией по телефону, по электронной почте. Другая ценность таких систем в создании специализированных локальных, региональных и глобальных вычислительных систем обработки данных (банковских, транспортных, гостиничных и т.д.), повышающих качество жизни людей.

С развитием информационных технологий связано возникновение «функциональной электроники», где элементы обработки процессов основаны на использовании полей разной физической природы — магнитных, электрических, акустических и оптических. Другое новое направление электроники связано с развитием нанотехнологии, которая позволяет получать новые материалы с новыми свойствами, а также электронные приборы с сотнями тысяч активных элементов размером в несколько молекул. Уже сейчас создают элементы памяти размерами менее 0,1 мкм, элементы солнечных батарей, сверхчувствительные датчики для контроля вредных примесей в атмосфере. В перспективе устройства нанoeлектроники станут доступными, повседневными и незаменимыми помощниками в нашей жизни.

1.2. МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

При изготовлении электронных приборов и устройств используют самые разнообразные материалы, выполняющие функции

проводников, диэлектриков, полупроводников. Металлы широко применяются в качестве соединительных проводников и элементов катушек индуктивности; органические и неорганические диэлектрики — в качестве изоляторов и составных частей конденсаторов, полупроводники — для изготовления диодов и транзисторов.

Материалы могут быть органическими (на основе углеродных соединений) и неорганическими, чистыми химическими элементами или соединениями. Обычно материалы используются в твердом виде, но есть устройства, в которых применяются жидкости (жидкие кристаллы и электролиты) и газы (газоразрядные ячейки). Многие электронные приборы и устройства основаны на использовании физических особенностей границ раздела материалов с разными свойствами (проводники и полупроводники, проводники и диэлектрики), материалов с различными фазовыми состояниями (твердых и жидких, жидких и газообразных), материалов и вакуума (электронные лампы).

Известно, что все вещества состоят из одного или более химических элементов. Мельчайшими составными частицами вещества являются атом и молекула. Как правило, атомы различных химически чистых элементов соединяются с образованием молекул вещества. Например, молекулы водорода, кислорода, азота и инертных газов состоят из двух атомов.

Молекулы, из которых состоит вещество, определяют свойства данного вещества. Например, молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода, что и определяет ее физические свойства (плотность, температуры кипения и замерзания). Молекулы органических веществ состоят из многих атомов, соединенных определенным образом. Различие структур соединений одних и тех же атомов определяет получение веществ с различными физическими свойствами.

Атом состоит из электронов, вращающихся вокруг ядра, находящегося в центре атома и содержащего протоны и нейтроны. Отрицательно заряженные электроны притягиваются к ядру с положительно заряженными протонами и непрерывно вращаются по орбитам, или оболочкам, вокруг него. Атомы разных элементов отличаются друг от друга числом протонов и электронов, например, у атома водорода один протон и один электрон, а атом углерода имеет четыре протона и четыре электрона. Число электронов в атоме равно числу протонов, однако они не могут находиться на одном расстоянии от ядра, так как отталкиваются друг от друга. Электроны также не могут находиться на произвольных расстояниях от ядра и занимают только разрешенные энергетические уровни. На

первом уровне могут находиться максимум два электрона, а на втором и далее — до восьми.

Число протонов определяет атомный номер элемента в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева, общее число протонов и нейтронов — его атомную массу, а число электронов, занимающих последний энергетический уровень, во многом определяет физические и химические свойства вещества. Если последний разрешенный энергетический уровень атома полностью заполнен, то этот атом инертен (инертными газами являются гелий, неон, аргон, криптон, ксенон). Если на последнем энергетическом уровне атома находятся от одного до трех электронов, то они слабо связаны с ядром и атом склонен отдавать эти электроны при соединении с другими элементами. При этом говорят, что он обладает *металлическими свойствами*. Если до полного заполнения последнего энергетического уровня атома не хватает одного, двух или трех электронов (т. е. имеется от одной до трех вакансий), то атом склонен притягивать электроны при соединении с другими элементами. При этом говорят, что он обладает *неметаллическими свойствами*.

В металлических веществах электроны, слабо связанные с ядром (так называемые свободные электроны), под действием электрического потенциала покидают свои орбиты и начинают упорядоченное движение, образуя поток электронов, или электрический ток. Такие вещества, имеющие хорошую электрическую проводимость, называются *проводниками*. Хороший проводник имеет большое число несвязанных (или слабо связанных) с ядром электронов, которые способствуют возникновению электрического тока. Проводник обладает на небольших отрезках (до 1 м) столь малым сопротивлением, что им можно пренебречь. Примерами хороших проводников являются серебро, медь, алюминий. Наличие свободных электронов и, соответственно, свойства металлических соединений определяют высокую теплопроводность проводников.

Диэлектрик (изолятор) — это материал, имеющий только связанные электроны, т. е. не имеющий свободных электронов. Изоляторы препятствуют протеканию электрического тока и, следовательно, обладают очень большим сопротивлением (приближающимся к сопротивлению разомкнутой цепи). Примерами изоляторов могут служить диоксид кремния (кварц), стекло, сухое дерево, резина, поливинилхлорид, слюда, полистирол и др. Если диэлектрик поместить в электрическое поле, то электроны его молекул ориентируются в определенном порядке за счет поляризации. При этом говорят, что молекулы диэлектрика поляризуются.

Атомы **полупроводников** относятся к четвертой группе Периодической системы элементов Д. И. Менделеева. К ним относятся углерод (C), кремний (Si) и германий (Ge). Как правило, чистые полупроводники являются аморфными веществами. Однако при определенных условиях при получении из расплавов они могут образовывать монокристаллы с правильной кристаллической решеткой.

К полупроводникам относятся и некоторые соединения металла и неметалла, например, арсенид галлия (GaAs) и уникальные соединения — карбид кремния (SiC) и нитрид кремния (SiN).

Полупроводники имеют слабую собственную проводимость, обусловленную наличием небольшого количества свободных электронов. Причем появление свободного электрона под действием температуры или света создает появление положительно заряженного атома с недостающим электроном, который называется **дыркой**. При этом дырка может захватывать электрон соседнего атома, который в этом случае станет дыркой. Таким образом, дырки могут перемещаться до тех пор, пока не найдут свободный электрон и соединятся с ним. Свободные электроны и дырки полупроводника — основные носители зарядов, они создают слабую собственную проводимость. Процесс образования электронов и дырок под действием теплоты или света представляет собой генерацию носителей зарядов. Количество свободных электронов и дырок в полупроводниках возрастает при повышении температуры, что приводит к увеличению их проводимости, в отличие от металлов, проводимость которых с ростом температуры падает.

Проводимость полупроводника можно повысить посредством введения определенного количества легирующих присадок (примесей). Некоторые присадки (например, атомы мышьяка As, неметалла пятой группы) вносят в кристаллическую решетку атома германия дополнительные электроны, в результате чего получают полупроводник *n*-типа (*negative*). Такие атомы называются атомами-донорами. Добавление к кристаллическому германию атомов-акцепторов (например, атомов алюминия Al, металла третьей группы) создает недостаток электронов в его внешней оболочке, т. е. образование дырок, имеющих положительный заряд. Такие полупроводники называются полупроводниками *p*-типа (*positive*). Полученные при внедрении примесей электроны являются основными носителями для полупроводников *n*-типа, а дырки — для полупроводников *p*-типа.

Явления проводимости в металлах, диэлектриках и полупроводниках хорошо описываются на основе зонной теории, которая

вводит понятие энергетического состояния электрона, обладающего кинетической и потенциальной энергией. Согласно зонной теории энергия электрона в твердом теле может изменяться в некоторых пределах практически непрерывно, но при этом существуют интервалы значений энергии (запрещенные уровни), которые электрон может преодолевать только скачком. Электроны в твердом веществе могут находиться только в валентной зоне (ВЗ) или в зоне проводимости (ЗП), между которыми имеется запрещенная зона (ЗЗ). Для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости требуется придать ему дополнительную энергию ΔE , называемую энергией активации и измеряемую в электрон-вольтах (эВ). У атомов полупроводникового кремния энергия активации $\Delta E_{Si} = 1,12$ эВ выше, чем у атомов германия $\Delta E_{Ge} = 0,72$ эВ, поэтому перевести кремний в проводящее состояние труднее. Введением легирующих примесей можно уменьшить зону проводимости или увеличить валентную зону и таким образом уменьшить ширину запрещенной зоны.

Расположение электронов и ширина запрещенной зоны полностью определяют электрические свойства вещества. Дело в том, что валентные электроны сильно связаны с атомами и не могут переходить от атома к атому под действием электрического поля. И наоборот, электроны, находящиеся в зоне проводимости, менее связаны с атомами и легко перемещаются от одного атома к другому под воздействием электрического поля. Зонная теория объясняет это наличием многих свободных уровней в зоне проводимости.

У диэлектриков валентная зона полностью заполнена электронами и отделена от зоны проводимости широким барьером запрещенной зоны. Вследствие этого у диэлектриков нет свободных электронов в зоне проводимости и, соответственно, они имеют плохую проводимость.

Полупроводники имеют заполненную валентную зону и сравнительно узкую запрещенную зону. При низких температурах электроны полупроводников находятся в валентной зоне и, следовательно, ведут себя как диэлектрики.

С повышением температуры и под воздействием света часть электронов полупроводника приобретает энергию, достаточную для преодоления ЗЗ, и перескакивает в ЗП, создавая тем самым условия для появления электропроводности. В связи с переходом части электронов в ЗП в ВЗ полупроводника образуется соответствующее число свободных энергетических уровней — дырок. Это позволяет электронам перемещаться внутри ВЗ под действием электрическо-

го поля с одного уровня на другой, создавая дырочную проводимость. С повышением температуры все больше электронов проникает в ЗП, повышая тем самым электропроводность полупроводника, причем сильнее она повышается у полупроводников с более узкой ЗЗ.

При приложении напряжения энергетические зоны в веществе становятся наклонными, причем угол их наклона возрастает с увеличением напряженности электрического поля.

Если потенциальная энергия электрона в поле $E_{\pi} = q\varphi$ (где q — заряд электрона; φ — разность потенциалов) выше энергии активации ΔE , то электроны могут проникать (туннелировать) из ВЗ в ЗП, создавая электронную проводимость. При этом одновременно образуются и дырки (атомы без одного электрона), создающие дырочную проводимость.

Введение в полупроводник легирующих примесей приводит к появлению дополнительных энергетических уровней внутри ЗЗ. Если эти дополнительные уровни находятся вблизи ЗП (при введении донорной примеси), то электроны примесных атомов легко переходят в нее, увеличивая проводимость полупроводника. Если же дополнительные уровни находятся вблизи ВЗ (при введении акцепторной примеси), то на них легко переходят электроны полупроводника из ВЗ, создавая дырки и увеличивая дырочную проводимость.

К полупроводникам относятся вещества, у которых ширина ЗЗ не превышает 2,5 эВ. При температуре 300 К ширина ЗЗ у кремния (Si) составляет 1,12 эВ, у германия (G) — 0,75 эВ, у арсенида галлия (GaAs) — 1,43 эВ, у карбида кремния (SiC) — 2,4...3,4 эВ. Энергия ионизации донорных и акцепторных примесей находится в пределах 0,01...0,05 эВ. Средняя энергия теплового возбуждения при комнатной температуре составляет 0,025 эВ. Поэтому введение в полупроводник ничтожного количества примесей приводит к многократному увеличению проводимости.

Согласно зонной теории в полупроводниках под действием теплоты, света и колебаний кристаллической решетки постоянно происходит образование свободных электронов и дырок, т.е. генерация носителей зарядов. Одновременно происходит обратный процесс — возвращение электронов в валентную зону (рекомбинация носителей зарядов). Эти процессы приводят к формированию равновесной концентрации электронов и дырок в объеме полупроводника.

Под воздействием электрического поля начинается генерация новых носителей зарядов и возникает избыточная (неравновесная) концентрация электронов и дырок. Избыточная концентрация но-

сителей зарядов может образовываться в некоторых областях полупроводниковой структуры за счет инжекции (впрыскивания) и экстракции (втягивания) электронов электрическим полем, а также в результате аккумуляции зарядов в ловушках.

Прямая рекомбинация электронов и дырок маловероятна, так как в основном они находятся в разных местах полупроводниковой структуры. Обычно рекомбинация проходит с участием рекомбинационных ловушек, роль которых выполняют примесные атомы либо дефекты кристаллической решетки и поверхности. При этом электрон из зоны проводимости переходит в ловушку и находится там до тех пор, пока к нему не подойдет дырка; после чего происходит второй этап рекомбинации — электрон переходит на свободный уровень в валентной зоне дырки.

Поскольку при рекомбинации электрон переходит на более низкий энергетический уровень, выделяется избыточная энергия. Если при этом излучается квант света — **фотон**, рекомбинация называется излучательной. При безызлучательной рекомбинации энергия электрона передается кристаллической решетке полупроводника с образованием кванта тепловой энергии колебаний — **фонона**.

1.3. ОБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА p — n -ПЕРЕХОДА

Если полупроводник p -типа соединить с полупроводником n -типа и поместить в высокотемпературный вакуумный реактор, то под действием диффузии образуется монолитный пограничный слой с разными типами полупроводников по обеим сторонам границы раздела. Этот пограничный слой, называемый p — n -переходом, обладает особыми свойствами. Электроны в нем из области с проводимостью n -типа в нормальном состоянии под действием температурных колебаний и диффузии перетекают в область с проводимостью p -типа, чтобы заполнить в ней притягивающие их дырки. Дырки также диффундируют в n -область. Одновременно в p -области образуются некомпенсированные заряды акцепторной примеси, а в n -области — положительные заряды донорной примеси. Эти заряды создают электрическое поле и контактную разность потенциалов, препятствующую дальнейшему перемещению основных носителей зарядов и создающую для них потенциальный барьер. Перетекание электронов продолжается до тех пор, пока в p — n -переходе не образуется нейтральная зона, или так называ-

емый обедненный слой, и потенциальный барьер достигнет максимальной величины.

Вместе с тем электрическое поле контактной разности потенциалов обеспечивает возможность движения случайно возникающих неосновных носителей зарядов (дырок из n -области и электронов из p -области). Это приводит к появлению дрейфового тока, состоящего из электронной и дырочной составляющих. Если нет приложенного напряжения, то быстро наступает равновесие, которое собственно и препятствует дальнейшему росту потенциального барьера.

В обедненном приконтактном слое полупроводника атомы, как и в диэлектрике, нейтральны и дипольно ориентированы, а потенциальный барьер препятствует дальнейшему движению основных носителей зарядов. Для того чтобы пересечь границу раздела, носители зарядов должны обладать энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера. Источником этой энергии может служить внешняя электродвижущая сила (ЭДС), приложенная к полупроводникам по обе стороны p — n -перехода.

При прямом включении источника ЭДС, когда плюс подключается к полупроводнику p -типа, а минус к полупроводнику n -типа, электрический ток будет протекать только тогда, когда напряжение $U_{\text{п.б}}$ превысит потенциальный барьер. Высота потенциального барьера зависит от типа применяемого полупроводника. Для германия она составляет 0,3 В, а для кремния — 0,6 В. Если внешнее напряжение превышает потенциальный барьер, области с электронной и дырочной проводимостями сближаются, обедненная область исчезает, электроны впрыскиваются (инжектируются) в p -область, объединяются с дырками (рекомбинируют) и, перемещаясь далее от атома к атому, создают электрический ток в цепи. Аналогично дырки инжектируются в n -область, где рекомбинируют, соединяясь с электронами.

Инжектированные носители зарядов рекомбинируют не сразу, а в течение некоторого времени (времени жизни носителей зарядов), пробегая при этом в среднем некоторое расстояние (диффузионную длину пробега).

При обратном включении источника напряжения электроны полупроводника с проводимостью n -типа (n -области) притягиваются положительным полюсом источника напряжения смещения, а дырки p -области притягиваются отрицательным полюсом. В результате обедненный слой расширяется и увеличивается потенциальный барьер, препятствующий проникновению электронов через границу раздела. Таким образом, через p — n -переход, при обратном включе-

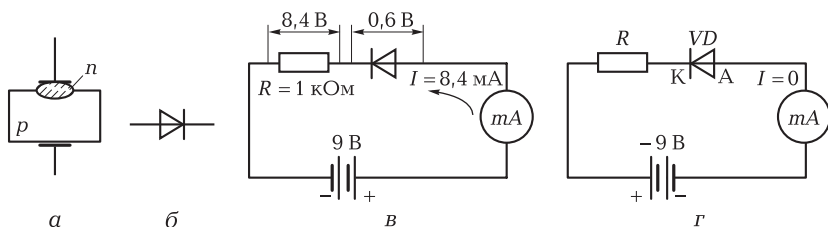


Рис. 1.1. Структура плоскостного полупроводникового диода [а], его УГО [б] и схемы снятия ВАХ при прямом [в] и обратном [г] включении источника внешней ЭДС

нии напряжения ток практически не будет проходить. Следовательно, p — n -переход имеет одностороннюю проводимость, т.е. в одном направлении он пропускает ток, а в другом — не пропускает.

Структура полупроводникового диода с p — n -переходом и его условное графическое обозначение (УГО) показаны на рис. 1.1, а, б. Кремниевый диод состоит из двух слоев. Первый (вплавленный) слой состоит из кремния, легированного фосфором (n -область). Примесь фосфора создает избыток электронов в зоне проводимости (электронную проводимость). Второй слой состоит из кремния, легированного бором (p -область), в котором имеется избыток атомов с недостатком электронов (т.е. дырок). В этом слое преобладает дырочная проводимость. В контактной области образуется p — n -переход, создающий одностороннюю проводимость. В показанной на рис. 1.1 структуре p -область является более массивной и содержит большее количество примесей, чем n -область, поэтому ее называют **базой**.

Зависимость силы тока в диоде от подаваемого к его обкладкам напряжения называется **вольт-амперной характеристикой** (ВАХ). Схема для снятия ВАХ диодов при прямом включении внешнего источника напряжения, т.е. когда плюс подключается к полупроводнику p -типа, а минус — к полупроводнику n -типа, показана на рис. 1.1, в. Схема снятия ВАХ диодов при обратном включении внешнего источника ЭДС, т.е. когда плюс подключается к полупроводнику p -типа, а минус — к полупроводнику n -типа, показана на рис. 1.1, г.

Типичные вольт-амперные характеристики кремниевых и германиевых диодов показаны на рис. 1.2. Тангенс угла наклона кривой зависимости тока от напряжения определяет крутизну ВАХ, которая зависит от поперечного сечения p — n -перехода диода. Обратное напряжение, при котором происходит пробой диода ($U_{\text{проб}}$) зависит

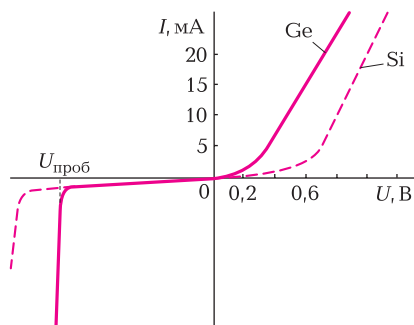


Рис. 1.2. Вольт-амперные характеристики германиевого (Ge) и кремниевого (Si) диодов

от толщины слоев p - и n -типов и ширины запрещенной зоны полупроводника. У кремниевых диодов $U_{\text{проб}}$ больше, чем у германиевых, и может достигать 1 000 В.

Пробой p — n -перехода может быть электрическим (обратимым) или тепловым (необратимым). Электрические пробой в свою очередь подразделяются на лавинные и туннельные.

При лавинном пробое отдельные электроны p -области (неосновные носители зарядов) под действием высокого обратного напряжения p — n -перехода вырываются из нее и, соударяясь с атомами перехода, вызывают лавинное размножение электронов, а следовательно, и резкое возрастание тока. Напряжение на диоде падает. При этом попытки его повышения приводят к усилению тока, перегреву диода и его разрушению.

Туннельный пробой наблюдается у некоторых диодов с высокими концентрациями легирующих присадок и узкой зоной p — n -перехода, когда под действием обратного напряжения верхний уровень валентной зоны их p -области начинает превышать нижний уровень зоны проводимости n -области. В этом случае электроны могут переходить из p -области в n -область без затрат энергии на преодоление запрещенной зоны (т.е. могут туннелировать). При дальнейшем повышении обратного напряжения начинается линейное нарастание тока за счет туннелирования. После снятия напряжения свойства p — n -перехода восстанавливаются.

Тепловой пробой p — n -перехода наступает при нарушении теплового баланса, т.е. когда выделяемое количество теплоты превышает количество теплоты, рассеиваемое в p — n -переходе. При этом температура перехода повышается, наступает разрушение кристаллической решетки и диода.

Емкость p — n -перехода определяет быстродействие электронных приборов и называется **барьерной** (зарядной). Барьерная емкость зависит в основном от площади перехода и приложенного напряжения. При повышении прямого напряжения ширина перехода уменьшается, а число нескомпенсированных зарядов и емкость увеличиваются. При повышении обратного напряжения барьерная емкость снижается.

Барьерную емкость сплавного несимметричного p — n -перехода, у которого концентрация акцепторов $N_{ак}$ в p -области больше, чем концентрация доноров N_d в n -области, можно рассчитать по формуле:

$$C_{p-n} = S \sqrt{0,5 \epsilon_0 \epsilon N_{ак} / U},$$

где S — площадь перехода; ϵ_0 , ϵ — диэлектрические проницаемости соответственно полупроводника и p — n -перехода; U — обратное напряжение перехода.

Барьерная емкость ухудшает свойства полупроводниковых приборов на основе p — n -перехода, используемых при выпрямлении токов высокой частоты, и снижает быстродействие этих приборов при выполнении с их помощью переключений в импульсных электронных ключах, поэтому ее стараются уменьшить путем уменьшения площади перехода.

Изменение емкости p — n -перехода при изменении напряжения используют в схемах электронного изменения частоты генераторов с применением варикапов (диодов с изменяемой емкостью).

При прямом токе в базе диода с p — n -переходом возникает диффузная емкость, связанная с появлением не успевших рекомбинировать неосновных носителей зарядов. При резком переключении полярности диода диффузная емкость вызывает появление скачка обратного тока, т. е. временное нарушение запирающего свойства перехода. Этот эффект, связанный с «рассасыванием» зарядов, также нежелателен и его устраняют специальными диодами Шоттки, созданными на основе контактного перехода металл — полупроводник.

Следует отметить, что работа многих электронных приборов основана на физических явлениях, происходящих в зоне контакта веществ с разными электропроводящими свойствами, поэтому рассмотрим эти явления подробнее.

Контактные явления — это общее название физических явлений, возникающих в области контакта двух материалов с различной электропроводностью. К числу важнейших контактных

явлений относится возникновение контактной разности потенциалов металлов, имеющих различную работу выхода электронов $A_{\text{вых}}$.

Работой выхода называется работа, которую затрачивает электрон для преодоления силы притяжения к атомам вещества, т. е. для выхода из вещества в вакуум.

При тесном соприкосновении металлов с разной работой выхода или соединении их в вакуумной диффузной печи на свободных концах этих металлов возникает контактная разность потенциалов, обусловленная перетеканием части электронов из одного металла в другой и появлением разной концентрации электронов в проводниках. В результате один из проводников оказывается заряженным положительно, а другой — отрицательно. Созданная при этом разность потенциалов, характерная для данной пары металлов, препятствует дальнейшему перетеканию электронов. В отличие от ЭДС источников тока при замыкании этой цепи контактная разность потенциалов не приводит к возникновению электрического тока, так как электроны находятся в равновесном состоянии по обеим сторонам соединения.

Если зону контакта (спай) металлов нагревать, то равновесие электронов нарушится и возникнет термоэлектродвижущая сила. Разность напряжений при термоЭДС мала, КПД преобразования теплоты в электричество незначителен вследствие высокой теплопроводности металлов, поэтому термоЭДС используют только в датчиках температуры. На основе контактной разности потенциалов работают термопары из сплавов хромеля и алюмеля, имеющие линейную зависимость силы тока от температуры в диапазоне от 50 до 500 °С. Термопары из платины и родия имеют линейную зависимость тока в температурном диапазоне от 50 до 1 200 °С.

Контактная разность потенциалов возникает и при соприкосновении полупроводников с различными типами проводимости. Контакт между полупроводниками с p - и n -проводимостями создает область p — n -перехода с обедненным (запорным) слоем, обладающим односторонней проводимостью. Возникающая при соединении таких полупроводников контактная разность потенциалов обладает теми же свойствами, что и при соединении разнородных металлов.

Возникновение при нагреве соединения разнородных полупроводников термоЭДС используется при создании источников питания для радиоприемников и маломощных радиопередатчиков. Благодаря тому, что теплопроводность полупроводников меньше, чем

металлов, КПД полупроводниковых термогенераторов выше, чем металлических, и они могут применяться там, где нет других источников тока. Для нагрева спаев термогенераторов применяются нагревательные устройства.

Как уже отмечалось ранее, металлы имеют свободные электроны проводимости. Следовательно, при контакте металла с легированным полупроводником может образоваться контактный переход, похожий на p — n -переход в полупроводниках.

Переходы металл—полупроводник впервые были исследованы немецким ученым Шоттки, поэтому и запирающий контакт называют барьером Шоттки. На основе таких контактов были созданы диоды Шоттки, обладающие высоким быстродействием вследствие того, что в них не происходит накопления диффузных зарядов. Эти диоды используются в СВЧ-схемах и ускоряющих цепях ключевых каскадов, которые будут рассмотрены далее.

Особенности поведения электронов в полупроводниках и контактных зонах позволили создать новые уникальные электронные приборы, устройства и практически важные изделия современной электронной техники.

Свойства p — n -переходов используются в разных электронных полупроводниковых приборах: диодах, транзисторах, тиристорах, динисторах, светодиодах, фотодиодах и других приборах, составляющих современную элементную базу электронной техники. На основе полупроводников с p — n -переходами формируются также сложные микросхемы, имеющие сотни и тысячи электронных элементов на одном кристалле и выполняющие сложные цифровые или специальные аналоговые функции.

1.4. ЭЛЕКТРОННЫЕ ВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

Электронные лампы. Первыми в радиоэлектронной технике начали использовать вакуумные электронные приборы — электронные лампы (рис. 1.3).

Работа электронной лампы основана на создании потока электронов в вакууме и управлении им с помощью электрических полей, формируемых специальными электродами. Электронная лампа состоит из нескольких металлических электродов, заключенных в стеклянный, керамический или металлокерамический баллон, внутри которого создан высокий вакуум. Один из электродов (катод) нагревают спиралью до температуры 500...700 °С.

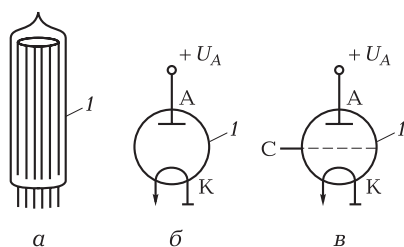


Рис. 1.3. Внешний вид (а), схемы диода (а) и триода (б):

1 — стеклянный баллон; К — катод; А — анод; С — управляющая сетка

Под действием высокой температуры электроны покидают металлическую поверхность катода и образуют вокруг него электронное облако.

В простейшей электронной лампе **дуод** второй электрод (анод) имеет форму цилиндра, охватывающего катод. Если к диоду подвести постоянное напряжение, как в полупроводниковом диоде (см. рис. 1.1, в), т. е. плюс — на анод и минус — на катод (прямое включение), электроны под действием электрического поля устремятся от катода к аноду, создавая электрический ток в цепи. Если в цепь включить резистор R , то при появлении тока в лампе на нем появится перепад напряжений.

При малом анодном напряжении только небольшая часть электронов притягивается анодом, а остальные электроны образуют пространственный заряд вокруг катода. По мере возрастания анодного напряжения увеличивается число электронов, достигающих катода, и ток в цепи растет, а плотность пространственного заряда уменьшается. Когда напряжение и ток возрастают настолько, что пространственный заряд полностью «рассасывается» и все электроны, испускаемые катодом, достигают анода, рост тока увеличением анодного напряжения замедляется и наступает режим насыщения.

Измеряя зависимость тока от напряжения, получают ВАХ диода, как в полупроводниковом диоде (см. рис. 1.2).

Если поменять полярность подключаемого к диоду напряжения, т. е. к аноду подвести минус, а к катоду — плюс (обратное включение), возникновения электрического тока в электронной лампе не произойдет, так как анод при этом остается «холодным» и не испускает электроны. Следовательно, электронная лампа диод обладает односторонней (вентильной) проводимостью.

Это свойство используется при применении электронных ламп в качестве детектора в радиоэлектронных устройствах и в качестве выпрямителя при преобразовании переменного напряжения в постоянное.

Электронная лампа **триод** имеет третий электрод, устанавливаемый между анодом и катодом. Он располагается ближе к катоду,

поэтому напряжение, подаваемое на электрод, сильнее влияет на поток электронов между анодом и катодом. Поскольку третий электрод выполняется действительно в виде сетки или спирали, окружающей катод, то сам он забирает мало электронов, а большая их часть проскакивает к аноду. Из-за близкого расположения сетки к катоду небольшие изменения напряжения на ней сильнее сказываются на потоке электронов к аноду и значении анодного тока. Именно это свойство триода используется для усиления электрических сигналов.

На основе триодов и других электронных ламп разработано множество электронных устройств, в частности электронных усилителей разнообразного назначения: резонансных, широкополосных, импульсных, силовых и т. п. Работа триодов во всех усилителях примерно одинаковая, а различие усилителей определяется внешними электрическими цепями.

Ламповый генератор — устройство, в котором при помощи электронной лампы создаются незатухающие электрические колебания. Основными элементами простейшего лампового генератора являются электронная лампа (триод) с источниками питания и колебательный контур (см. подразд. 2.2).

Клистрон — это электронный прибор, представляющий собой сочетание многоэлектродной лампы с объемными резонаторами и предназначенный для усиления и генерирования колебаний сверхвысоких частот (в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн). Отражательный клистрон — электронный прибор для генерации ультравысоких частот (свыше 100 ГГц), относящихся к миллиметровому диапазону длин волн.

Магнетрон — это многорезонаторный электронный прибор для генерации сверхвысоких частот большой мощности. Анод магнетрона представляет собой массивный цилиндр, в центральной полости которого расположен катод, а в стенках находятся цилиндрические резонаторные полости.

Для создания нужной траектории электронов, идущих от катода к аноду, применяется поперечное магнитное поле. Под действием этого поля искривляется путь в соответствии с законом Лоренца вылетающих из катода электронов. Приближаясь к аноду, электроны движутся почти по касательной к его цилиндрической поверхности с прорезями, направленными к резонаторным полостям. Под действием случайных изменений потока электронов в резонаторах возникают колебания, которые модулируют эти потоки электронов, создавая, таким образом, устойчивую генерацию СВЧ-колебаний. Часть энергии колебаний отбирается в рабочую

линию из одного резонатора коаксиальным волноводом с помощью петли связи.

Лампа бегущей волны (ЛБВ) — специальная электронная лампа для усиления и генерации колебаний сверхвысоких частот (дециметровых и сантиметровых волн). Внутри этой лампы, выполненной в виде цилиндра диаметром 3 см и длиной 15... 20 см, вдоль провода, свитого в длинную спираль, распространяется электромагнитная волна со скоростью света ($c \approx 300\,000$ км/с). Вдоль оси спирали электрическое поле этой волны распространяется с меньшей скоростью (так как эта последняя скорость представляет собой проекцию скорости распространения волн вдоль спирали на направление оси спирали). Одновременно вдоль оси спирали движется пучок электронов приблизительно со скоростью перемещения поля. Взаимодействуя с электрическим полем волны, электроны отдают ему часть своей энергии и тем самым усиливают волну, распространяющуюся по спирали. При достаточно большом усилении в лампе наступает генерация колебаний. Основные достоинства лампы бегущей волны как усилителя: возможность прямого усиления СВЧ-сигналов в широкой полосе частот (до 10 % средней частоты) и сравнительно низкий шумовой фактор.

Лампа обратной волны (ЛОВ) — электронная лампа, в которой в отличие от лампы бегущей волны электроны, сконцентрированные в узкий пучок, движутся не в одном направлении с движущимся вдоль замедляющего устройства полем бегущей волны, а встречно. При этом так же, как и в ЛБВ, взаимодействие движущихся электронов с полем бегущей волны приводит к усилению этого поля. Основная область применения лампы обратной волны — генерация колебаний в диапазоне дециметровых и сантиметровых волн.

Электронно-лучевые трубки. Модификациями электронных ламп являются такие электровакуумные приборы, как кинескопы телевизоров, электронно-лучевые трубки осциллографов, рентгеновские трубки, электронно-оптические преобразователи и т. п.

В основе действия электронно-лучевых трубок и кинескопов лежит принцип электронной пушки. Это нагреваемый спиралью катод и ряд электродов, формирующих направленный пучок электронов, интенсивность которых регулируется сеточным электродом.

Специальные генераторы в осциллографах и телевизорах формируют линейно изменяющееся напряжение, которое подается на отклоняющие электроды и создает развертку изображения по вертикали и горизонтали. В результате на экране получают двумерную картину изображения.