

Тема 10. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ. ДИОДЫ. ТРАНЗИСТОРЫ

1. Классификация элементов электроники
2. Электронно-дырочный переход
3. Устройство и характеристики полупроводниковых диодов
4. Устройство и характеристики транзисторов

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОНИКИ

Электроника — область науки и техники, занимающаяся созданием и практическим использованием различных устройств и приборов, работа которых основана на изменении концентрации и перемещении заряженных частиц (электронов) в вакууме, газе или твердых кристаллических телах, и других физических явлениях (НБИК).

Электроника изучает:

- физические явления, связанные со сменой концентрации и перемещением заряженных частиц в вакууме, газе и твердых телах;
- электрические характеристики и параметры электровакуумных, ионных и полупроводниковых приборов;
- свойства устройств и систем, в которых применяются вакуумные, ионные и полупроводниковые приборы.

Первое из этих направлений составляет основу **физической электроники**, второй и третий – **технической электроники**.

В свою очередь техническая электроника имеет четыре основных направления:

- радиоэлектроника – связана с радиотехникой, является основой для радиосвязи, телевидения, радиолокации, радиоуправления, радионавигации, радиоастрономии;
- промышленная электроника – применение электронных устройств в различных отраслях промышленности в части контроля, измерения, управления преобразования электрической энергии;
- ядерная электроника — изучает процессы получения, изучения и использования элементарных частиц;
- биологическая электроника – охватывает процессы использования электронных приборов в биологических исследованиях, медицине.

Можно выделить другие направления электроники.

Оптоэлектроника — устройства, в которых используются электрический ток и потоки фотонов.

Аудио-видеотехника — устройства усиления и преобразования звука и видео изображений.

Микроэлектроника — электронные устройства, в которых в качестве активных элементов используются микросхемы.

Цифровая микроэлектроника — устройства на микропроцессорах или логических микросхемах. Например: электронный калькулятор, компьютер, цифровой телевизор, мобильный телефон, принтер, робот, панель управления промышленным оборудованием, средствами транспорта, и другие бытовые и промышленные устройства.

Электронные приборы и элементы классифицируют по следующим признакам:

1) По виду рабочего пространства:

- а) электровакуумные;
- б) полупроводниковые;
- в) газоразрядные;
- г) на основе специальных типов проводников (например, с нелинейной зависимостью);
- д) жидкостные и жидкокристаллические.

Электрoвакуумные элементы (приборы)

Электрoвакуумными приборами (ЭВП) называют приборы, в которых рабочее пространство, изолированное газонепроницаемой оболочкой, имеет высокую степень разрежения или заполнено специальной средой (пары или газы) и действие которых основано на использовании электрических явлений в вакууме или газе.

Под вакуумом следует понимать состояние газа, в частности воздуха, при давлении ниже атмосферного. Если электроны движутся в пространстве свободно, не сталкиваясь с оставшимися после откачки газа молекулами, то говорят о высоком вакууме.

Электрoвакуумные приборы делятся на электронные, в которых течет чисто электронный ток в вакууме, и **ионные (газоразрядные)**, для которых характерен электрический разряд в газе (или парах). В электронных приборах ионизация практически отсутствует, а давление газа менее 100 мкПа (высокий вакуум). В ионных приборах давление $133 \cdot 10^{-3}$ Па (10^{-3} мм рт. ст.) и выше. При этом значительная часть движущихся электронов сталкивается с молекулами газа и ионизирует их.

Есть еще группа **проводниковых (безразрядных)** ЭВП. К ним относятся лампы накаливания, стабилизаторы тока (бареттеры), вакуумные конденсаторы и др.

Особую группу ЭВП составляют электронные лампы, предназначенные для различных преобразований электрических величин. Эти лампы бывают генераторными, усилительными, выпрямительными, частотно-преобразовательными, детекторными, измерительными и др. Большинство их рассчитано на работу в непрерывном режиме. Выпускаются лампы и для импульсного режима. В них протекают кратковременные токи — электрические импульсы.

В зависимости от рабочих частот электронные лампы подразделяются на низко-, высоко- и сверхвысокочастотные.

Электронные лампы, имеющие два электрода — катод и анод, называются **диодами**. Диоды для выпрямления переменного тока в источниках питания называются кенотронами.

Лампы, имеющие помимо катода и анода электроды в виде сеток, с общим числом электродов от трех до восьми, — это соответственно триод, тетрод, пентод, гексод, гептод и октод. При этом лампы с двумя и более сетками называются многоэлектродными.

Если лампа содержит несколько систем электродов с независимыми потоками электронов, то ее называют комбинированной (двойной диод, двойной триод, триод — пентод, двойной диод — пентод и др.).

Основные ионные приборы — это тиратроны, стабилитроны, лампы со знаковой индикацией, ионные разрядники и др.

Большую группу составляют **электронно-лучевые приборы**, к которым относятся кинескопы (приемные телевизионные трубки), передающие телевизионные трубки, осциллографические и запоминающие трубки, электронно-оптические преобразователи изображений, электронно-лучевые переключатели, индикаторные трубки радиолокационных и гидроакустических станций и др.

В группу **фотоэлектронных приборов** входят электрoвакуумные фотоэлементы (электронные и ионные) и фотоэлектронные умножители.

К **электроосветительным приборам** следует отнести лампы накаливания, газоразрядные источники света и люминесцентные лампы.

Особое место занимают рентгеновские трубки, счетчики элементарных частиц и другие специальные приборы.

Электрoвакуумные приборы классифицируются еще по типу катода (накаленный или холодный), по материалу и устройству баллона (стеклянный, металлический, керамический, комбинированный), по роду охлаждения (естественное (лучистое), принудительное — воздушное, водяное, паровое).

Полупроводниковые элементы (приборы)

Полупроводниковыми элементами называются приборы, действие которых основано на использовании свойств полупроводниковых материалов.

Полупроводниковые электронные приборы являются в настоящее время основными элементами радиоэлектронных устройств. Они позволяют успешно выполнять все элементарные операции радиоэлектроники: генерирование, усиление, преобразование, регистрацию электрических колебаний, а также управление параметрами колебаний или сигналов.

Развитие полупроводниковой электроники оказывает сильное влияние на пути развития других направлений электроники в том числе вакуумной, оставляя для каждого направления преимущественные области приложений. Полупроводниковые приборы совсем вытеснили вакуумные в области информационной радиоэлектроники, составляющей основу функционирования электронных вычислительных машин, больших управляющих и информационных систем, в которых в процессе обработки информации участвует большое количество элементов, выполняющих преобразование на уровне слабых сигналов.

Полупроводниковые материалы по своему удельному сопротивлению занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками.

Основными материалами для производства полупроводниковых приборов являются кремний (Si), карбид кремния (SiC), соединения галлия и индия.

Электропроводность полупроводников зависит от наличия примесей и внешних энергетических воздействий (температуры, излучения, давления и т.д.). Протекание тока обуславливают два типа носителей заряда – электроны и дырки. В зависимости от химического состава различают чистые и примесные полупроводники.

Для изготовления электронных приборов используют твердые полупроводники, имеющие кристаллическое строение.

На основе полупроводников изготавливаются полупроводниковые резисторы, диоды, транзисторы, тиристоры, интегральные микросхемы и т.д.

Газоразрядные элементы (приборы)

Газоразрядные элементы это разновидность электровакуумных приборов, действие которых основано на использовании явления газового разряда – совокупности электрических, оптических и тепловых явлений, сопровождающих прохождение электрического тока через инертные газы, водород или пары металла (ртути). Возникающие при этом электрические разряды сопровождаются излучением света (свечением), характерного для данного газа или пара спектрального состава.

Простейший газоразрядный прибор представляет собой диод (с накаливаемым или холодным катодом) со стеклянным или керамическим баллоном, заполненный разреженным газом или парами ртути. При подаче напряжения на электроды происходит эмиссия электронов из катода, и они устремляются к аноду. Сталкиваясь с атомами (или молекулами) газа, заполняющего баллон, электроны отдают им свою энергию. При определенном значении напряжения энергия электронов оказывается достаточной для ионизации атомов газа. В результате между электродами возникает газовый разряд – дуговой, тлеющий, искровой или коронный. Свойства разряда зависят от давления газа, типа катода, конструкции прибора, силы пропускаемого тока.

Жидкостные и жидкокристаллические элементы (приборы)

Необычное сочетание слов «жидкие кристаллы», вероятно, многим уже знакомо, хотя далеко не все себе представляют, что же стоит за этим странным и, казалось бы, противоречивым понятием. Эти удивительные вещества удачно сочетают в себе анизотропные свойства кристаллов и текучие свойства жидкостей.

В то же время, вероятно, каждый человек носит при себе жидкокристаллические (ЖК) индикаторы и по несколько десятков раз в день посматривает на свои электронные часы. ЖК-циферблат которых аккуратно отсчитывает часы, минуты, секунды, а иногда и доли секунд.

Именно ЖК-индикаторы являются основой современных калькуляторов, портативных компьютеров «Notebooks», миниатюрных плоских экранов телевизоров, словарей-переводчиков, пейджеров и многих других современных электронных технических и бытовых приборов и устройств.

Мировое производство ЖК-индикаторов и дисплеев исчисляется миллиардами и, по прогнозам будет увеличиваться и дальше.

Со времени открытия жидких кристаллов прошло более 100 лет. Впервые их обнаружил австрийский ботаник Фридрих Рейнитцер, однако понимание природы ЖК-состояния веществ установление и исследование их структурной организации приходило значительно позднее.

Ситуация резко изменилась в середине 60-х годов, когда в связи с бурным развитием микроэлектроники и микроминиатюризации приборов потребовались вещества, способные отражать и передавать информацию, потребляя при этом минимум энергии. И вот здесь на помощь пришли жидкие кристаллы, двойственный характер которых позволил создать управляемые внешним электрическим полем быстродействующие и экономичные ЖК-индикаторы, являющиеся по существу основным элементом многомиллионной «армии» часов, калькуляторов, плоских экранов телевизоров и т. д.

2) По функциональному назначению:

- а) электропреобразовательные (диоды, транзисторы);
- б) электронносветовые (светодиод);
- в) фотоэлектрические (фоторезистор);
- г) термоэлектрические (термопара);
- д) магнитодиоды и т.д.

3) По частоте рабочих сигналов:

- а) низкочастотные (НЧ) – до 1 МГц;
- б) высокочастотные (ВЧ) — ÷ Гц;
- в) сверхвысокочастотные (СВЧ);
- г) оптические приборы (лазеры).

4) По мощности обрабатываемых сигналов:

- а) маломощные;
- б) средней мощности
- в) большой мощности.

5) По виду обрабатываемых сигналов:

- а) аналоговые;
- б) цифровые.

В аналоговых цепях используется непрерывный диапазон изменения напряжения. К цифровым относятся устройства и схемы, основанные на некотором количестве дискретных уровней напряжения.

б) По виду вольт-амперной характеристики (ВАХ) (или по способу действия в электрической цепи) выделяют две группы электронных компонентов (ЭК):

- **пассивные** или **линейные** ЭК — ЭК, ВАХ которых имеет линейный характер;
- **активные** или **нелинейные** ЭК — ЭК, ВАХ которых имеет нелинейный характер.

Пассивными являются следующие элементы:

- базовые ЭК, имеющиеся практически во всех электронных схемах радиоэлектронной аппаратуры (**РЭА**) - сопротивления, реализованные в виде резисторов; ёмкости, реализованные в виде конденсаторов;
- ЭК, в которых используется явление электромагнитной индукции - трансформаторы; дроссели (катушки индуктивности);

- ЭК, построенные на базе электромагнитов - соленоиды; реле;
- пьезоэлектрические ЭК - кварцевый резонатор;
- линии задержки, применяемые в радиоэлектронике;
- всевозможные соединители и разъединители цепи — ключи, применяемые для создания электрических цепей;
- предохранители, применяемые для защиты цепей от перенапряжения и короткого замыкания;
- индикаторы, применяемые для создания световых сигналов;
- динамики (точнее, динамические головки громкоговорителей), применяемые для создания звуковых сигналов;
- микрофон и видеокамера, применяемые для формирования сигнала;
- антенны, применяемые для излучения или приёма радиоволн;
- аккумуляторы, применяемые для обеспечения работы устройств вне сети электрического тока.

К активным элементам относят:

- вакуумные приборы - электронные лампы (электровакуумный диод, триод, тетрод, пентод, гексод, гептод, октод, нонод); комбинированные лампы и другие;
- полупроводниковые приборы (получили распространение в дальнейшем) - диод, стабилитрон; транзистор (полевой, биполярный, биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT), биполярный транзистор со статической индукцией); тиристор, симистор; более сложные комплексы на их основе — интегральные схемы (микросхемы) — цифровые и аналоговые;
- фотоэлектрические ЭК - фоторезистор; фотодиод; фототранзистор; оптрон (оптопара); солнечная батарея.

2. ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД

Электронно-дырочным или $p-n$ -переходом называют переходный слой у границы раздела двух областей полупроводника с различным типом электропроводности. Он составляет основу многих полупроводниковых приборов.

Модель $p-n$ -перехода показана на рис. 12.4, а. Ионы примесей изображены квадратиками, а электроны и дырки — соответственно темными и светлыми кружками. В области p основными носителями являются дырки, а ионизированные атомы примесей представляют собой отрицательные ионы. В равновесном состоянии эта область электрически нейтральна, так как концентрация дырок равна концентрации ионов. В области n основные носители — электроны, а атомы доноров — положительные ионы. Эта область также нейтральна. При возникновении контакта между такими областями носители стремятся равномерно распределиться по всему объему. Начинается диффузия дырок из области p в область n и электронов в обратном направлении. Дырки и электроны подходят к границе раздела областей и здесь рекомбинируют. Так как часть дырок и электронов исчезает, то соответствующее число ионов примесей оказывается нескомпенсированным. Здесь возникают избыточные объемные заряды (рис. 12.4, б).

В области p возникает объемный заряд: а) положительный? б) отрицательный?

Из области p ушли дырки и остались нескомпенсированные отрицательные ионы примесей, поэтому здесь образуется отрицательный объемный заряд $-Q$. По этой же причине в области n у границы раздела создается положительный объемный заряд $+Q$. Между объемными зарядами возникает электрическое поле, вектор напряженности которого E_q направлен из области n в область p . В установившемся состоянии поле объемных зарядов пол-

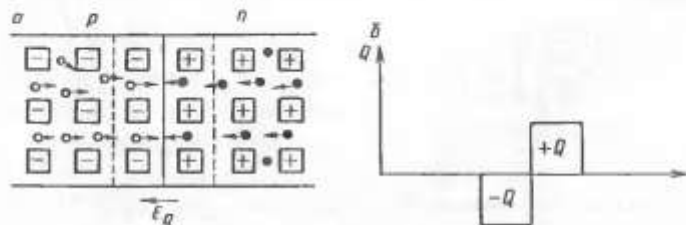


Рис. 12.4

ностью затормозит диффузию. В результате этого возникает зона с низкой концентрацией носителей, в которой существует электрическое поле. Эта зона и есть $p-n$ -переход. Ширина $p-n$ -перехода составляет около 0,1—1 мкм и зависит от концентрации примесей в полупроводниках. Разность потенциалов между p -областью и n -областью полупроводника для германия — 0,3—0,4 В.

При включении кристалла полупроводника с $p-n$ -переходом в электрическую цепь состояние перехода меняется.

Если подключить положительный полюс источника питания к области p , а отрицательный — к области n (рис. 12.5), будет ли протекать в цепи ток? — в) да; г) нет.

При подключении источника питания положительным полюсом к области p , а отрицательным — к области n электрическое поле, создаваемое источником, направлено против поля объемных зарядов. Основные носители начнут двигаться к переходу и через переход потечет электрический ток. Так как концентрация основных носителей велика, то даже при небольшом напряжении ток будет значительным. Такое включение $p-n$ -перехода называют прямым, а состояние перехода — открытым.

Если поменять полярность источника питания, то его поле будет направлено согласно с полем объемных зарядов. Под действием суммарного электрического поля основные носители отойдут от перехода. Зона объемных зарядов станет шире. В этом случае включение $p-n$ -перехода называют обратным. Через переход могут проходить только неосновные носители, а так как их концентрация на много порядков ниже, чем основных, то и обратный ток на несколько порядков меньше прямого.

Такое состояние перехода называется закрытым.

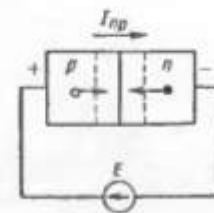


Рис. 12.5

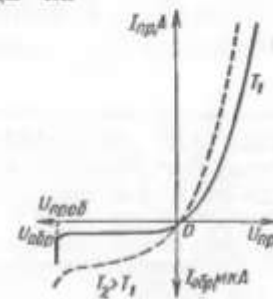


Рис. 12.6

При каком включении сопротивление $p-n$ -перехода выше: д) прямом? е) обратном?

Зависимость тока через переход от приложенного напряжения называют вольт-амперной характеристикой (ВАХ) перехода. Ее общий вид показан на рис. 12.6. Часть характеристики $I_{пр} = f(U_{пр})$ называют *прямой ветвью*. Она соответствует прямому включению перехода. *Обратная ветвь* характеристики $I_{обр} = f(U_{обр})$ соответствует закрытому состоянию перехода. Обратный ток создается неосновными носителями, а их концентрация в полупроводнике ограничена. Поэтому уже при малых напряжениях наступает насыщение, т. е. все носители участвуют в создании тока. Концентрация неосновных носителей заряда зависит от температуры. С увеличением температуры на каждые 10° обратный ток увеличивается для германия в 2 раза, а для кремния — в 2,5 раза.

В каком полупроводнике ток $I_{обр}$ больше при одинаковой температуре перехода: ж) в германии? в) в кремнии?

Концентрация неосновных носителей заряда зависит от энергии связей электронов с атомами самого полупроводника. У германия эта энергия значительно меньше, чем у кремния. Поэтому концентрация неосновных носителей в германии будет значительно выше и обратный ток почти на порядок больше, чем в кремнии.

Если $U_{обр}$ постепенно повышать, то при определенном значении напряжения обратный ток через переход резко увеличивается — происходит пробой перехода. Можно выделить два основных вида пробоя: электрический и тепловой. При *электрическом пробое* напряжение на переходе поддерживается почти постоянным. При отключении перехода от источника его свойства восстанавливаются. При *тепловом пробое* область $p-n$ -перехода разогревается и переход разрушается. Электрический пробой может существовать длительно, если не перейдет в тепловой.

Как изменится напряжение теплового пробоя при повышении температуры окружающей среды: и) увеличится? к) уменьшится?

При повышении температуры окружающей среды ухудшается теплоотвод и напряжение теплового пробоя уменьшится. Поэтому полупроводниковые приборы монтируются на радиаторах, имеющих большую поверхность охлаждения.

3. Устройство и характеристики полупроводниковых диодов

Диодом называют полупроводниковый прибор с одним $p-n$ -переходом и двумя внешними выводами. По назначению диоды делятся на выпрямительные, высокочастотные, импульсные, стабилитроны и т. д.

Выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного тока низкой частоты в постоянный ток. Их основу составляет кристалл полупроводника двухслойной структуры, в котором создан $p-n$ -переход. Кристалл защищают от внешних воздействий пластмассовым или металлическим корпусом.

На рис. 12.7 а, б соответственно показаны внешний вид и ВАХ маломощного диода в пластмассовом корпусе КД105. На рис. 12.7, в приведено условное обозначение диодов. На рис. 12.8, а, б даны соответственно внешний вид и характеристика диода средней мощности 2Д201.

При прямом включении ток через диод в 10^3 — 10^4 раз превышает обратный ток. Практически диод пропускает ток только в одном направлении.

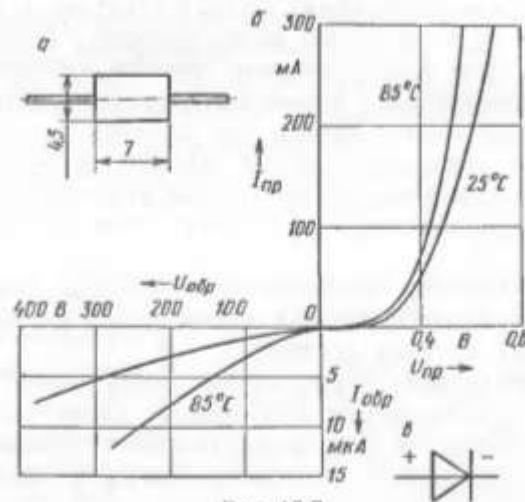


Рис. 12.7

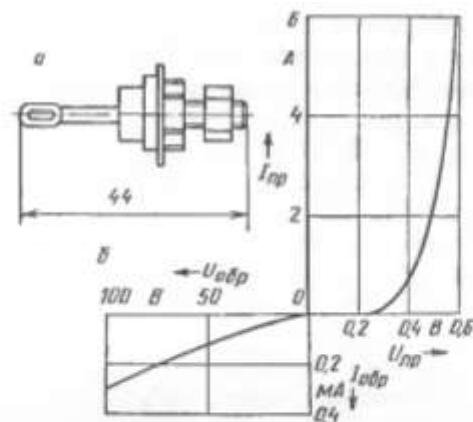


Рис. 12.8

Наряду с диодами широко применяются выпрямительные столбы и блоки, которые содержат в одном корпусе несколько диодов. Диоды могут иметь отдельные выводы или их соединяют в выпрямительные схемы. На рис. 12.9 *а, б* показаны соответственно внешний вид и схема выпрямительного блока КЦ402. В диодных матрицах и сборках, которые выпускаются в виде интегральных микросхем, несколько диодов изготовлены на одном кристалле полупроводника.

При выборе типа диода для конкретной схемы выпрямления надо знать значения его предельных эксплуатационных параметров. К таким параметрам относятся предельно допустимый постоянный ток диода $I_{пр\ max}$ и максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр\ max}$. Кроме того, указывается диапазон рабочих температур.

Если $U_{обр\ max}$ диода меньше, чем требуется, то включают последовательно несколько диодов. Для увеличения пропускаемого прямого тока диоды можно включать параллельно. Так как ВАХ диодов даже одного типа могут существенно отличаться друг от друга, то для выравнивания напряжения по диодам и тока между ними включают дополнительно резисторы (рис. 12.10, *а, б*).

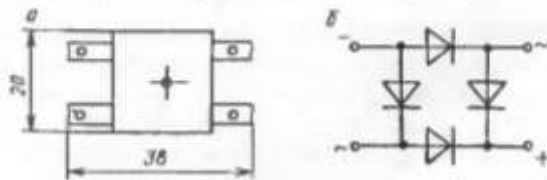


Рис. 12.9

Стабилитроны представляют собой кремниевые полупроводниковые диоды, которые нормально работают при электрическом пробое $p-n$ -перехода. При этом напряжение на диоде слабо зависит от протекающего тока. Как отмечалось в § 12.2, электрический пробой не вызывает разрушения $p-n$ -перехода и при отводе тепла может существовать длительно.

Стабилитроны применяют для поддержания (стабилизации) постоянного напряжения на нагрузке при изменении напряжения источника питания. Вольт-амперная характеристика стабилитрона и его условное обозначение приведены на рис. 12.11, *а, б*. Рабочий участок характеристики заключен между минимальным $I_{ст\ min}$ и максималь-

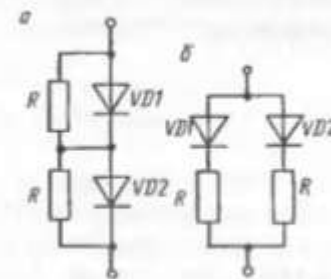


Рис. 12.10

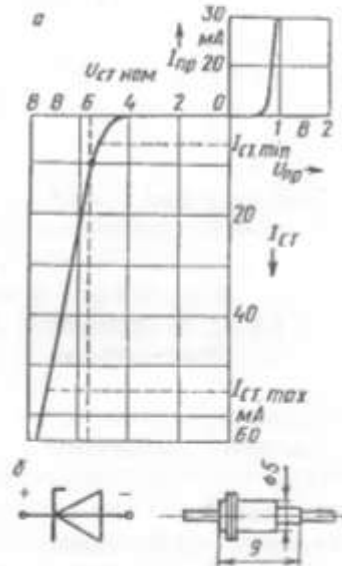


Рис. 12.11

ным $I_{ст\ max}$ значениями тока стабилитрона. При $I_{ст} < I_{ст\ min}$ стабилитрон работает неустойчиво, а $I_{ст} > I_{ст\ max}$ может привести к разрушению стабилитрона от перегрева.

Качество работы стабилитрона оценивается наклоном характеристики или дифференциальным сопротивлением:

$$r_{ст} = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}}$$

Чем меньше $r_{ст}$, тем стабильнее напряжение на приборе.

Стабилитроны выбирают по напряжению стабилизации $U_{ст. ном.}$, номинальному току $I_{ст. ном.}$, максимальной мощности $P_{ст\ max}$, которую может рассеять стабилитрон. Они выпускаются на напряжения от нескольких вольт до сотен вольт и токи — от миллиампер до нескольких ампер.

Принятое в настоящее время обозначение полупроводниковых приборов состоит из четырех элементов. Первый элемент указывает на применяемый полупроводниковый материал: 1 или Г — германий, 2 или К — кремний, 3 или А — арсенид галлия. Второй элемент связан с назначением диода: Д — выпрямительные, универсальные и импульсные диоды, С — стабилитроны, Ц — выпрямительные столбы и блоки. Третий элемент (трехзначная группа цифр) обозначает основные параметры прибора, а четвертый (буква) — разновидность данного типа диодов, которая может отличаться по величине какого-то параметра (тока, обратного напряжения и т. д.) от других диодов этого же типа. Например, КД104А — кремниевый выпрямительный диод, разновидность А.

4. Устройство и характеристики транзисторов

Биполярным транзистором называют полупроводниковый прибор с двумя $p-n$ -переходами и тремя выводами, обеспечивающий усиление мощности электрических сигналов.

Основой биполярного транзистора (в дальнейшем будем называть его просто транзистором) является кристалл полупроводника, в котором создано два $p-n$ -перехода. В зависимости от чередования слоев с разным типом электропроводности различают два вида транзисторов: $p-n-p$ и $n-p-n$. На рис. 12.12 приведены соответственно их структурные схемы (а, б) и условные обозна-

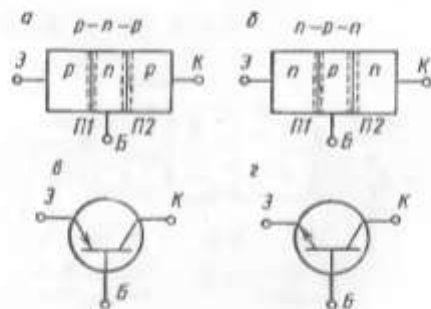


Рис. 12.12

чения (в, г). Средний слой кристалла называют *базой*. Ее толщина составляет всего несколько микрометров, и концентрация примесей здесь значительно меньше, чем в соседних слоях. Крайние слои называют *эмиттером* и *коллектором*. Все три слоя имеют выводы. Для защиты от внешних воздействий кристалл герметично закрывается металлическим или пластмассовым корпусом.

Для нормальной работы между выводами транзистора должны быть включены источники питания. Их можно включить таким образом, чтобы оба перехода оказались под обратным напряжением. Этот режим работы транзистора называют *отсечкой*. Все токи транзистора практически равны нулю и между электродами существует как бы разрыв цепи. Если изменить полярность источников, то оба перехода окажутся под прямым напряжением. Сопротивление переходов в этом случае мало, и транзистор можно рассматривать как узел электрической цепи. Такой режим его работы называют *насыщением*. Транзистор работает в активном режиме, когда эмиттерный переход находится под прямым напряжением (открыт), а коллекторный — под обратным напряжением (закрыт).

На рис. 12.13 показана схема включения транзистора $p-n-p$ при работе в активном режиме. Пусть вывод эмиттера разомкнут. Тогда через коллекторный переход будет протекать малый ток $I_{К0}$ закрытого перехода, обусловленный концентрацией неосновных носителей в базе и коллекторе. Как и обратный ток через диод, он практически не зависит от E_K .

Теперь включим эмиттерный источник $E_Э$. Эмиттерный переход открыт, и через него начнут проходить основные носители — дырки из эмиттера в базу, а электроны — из базы в эмиттер. Потечет ток эмиттера $I_Э$. Так как концентрация примесей в базе значительно меньше, чем в

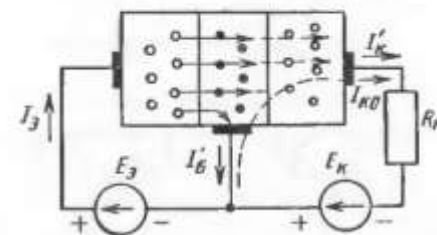


Рис. 12.13

эмиттере, то $I_{\text{Э}}$ обусловлен в основном перемещением дырок. Попав в область базы, дырки будут перемещаться под действием диффузии от эмиттерного перехода к коллекторному, поскольку концентрация их у эмиттерного перехода выше, чем у коллекторного.

Как изменится при этом ток коллектора: а) увеличится? б) уменьшится?

Источник питания $E_{\text{К}}$ включен так, что область коллектора отрицательна по отношению к базе. Дырки — это положительные носители заряда. Поэтому они пройдут через коллекторный переход в коллектор и тем самым увеличат ток коллектора на некоторую величину $I'_{\text{К}}$. Чем больше $I_{\text{Э}}$, тем больше дырок проходит из эмиттера в базу и тем больше их подойдет к коллекторному переходу. Поэтому можно считать, что $I'_{\text{К}} = \alpha I_{\text{Э}}$, где α — коэффициент передачи тока эмиттера. Часть дырок успевает рекомбинировать в базе, и $\alpha < 1$. В современных транзисторах база очень тонкая и рекомбинация невелика, поэтому $\alpha = 0,99$ и больше.

Полный ток коллектора

$$I_{\text{К}} = I'_{\text{К}} + I_{\text{К0}} = \alpha I_{\text{Э}} + I_{\text{К0}}. \quad (12.1)$$

Рекомбинация дырок в базе уменьшает концентрацию электронов и повышает потенциал базы. Источник $E_{\text{Э}}$ восполняет убыль электронов и создает дополнительную составляющую тока базы $I'_{\text{Б}}$.

Полный ток базы

$$I_{\text{Б}} = I'_{\text{Б}} + I_{\text{К0}}. \quad (12.2)$$

По первому закону Кирхгофа, для транзистора можно записать следующее уравнение токов:

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{К}} + I_{\text{Б}}. \quad (12.3)$$

Откуда, используя (12.1) и (12.2),

$$I_{\text{Б}} = I_{\text{Э}} - I_{\text{К}} = (1 - \alpha)I_{\text{Э}} - I_{\text{К0}}. \quad (12.4)$$

Если пренебречь относительно малым током $I_{\text{К0}}$, то уравнения (12.1) и (12.4) можно упростить:

$$I_{\text{К}} = \alpha I_{\text{Э}}; \quad I_{\text{Б}} = (1 - \alpha)I_{\text{Э}}.$$

Ясно, что $I_{\text{К}} \approx I_{\text{Э}}$ и $I_{\text{Б}} \ll I_{\text{К}}$.

Три схемы позволяют получить усиление мощности электрического сигнала. Если источник сигнала включить в эмиттерную цепь, а нагрузку в цепь коллектора (см. рис. 12.13), то получим схему включения транзистора с

общей базой (ОБ). База является общим электродом для входной и выходной (источника сигнала и нагрузки) цепей. Эта схема включения обеспечивает усиление сигнала по напряжению и мощности, но ток в нагрузке будет меньше, чем входной ток источника сигнала.

На рис. 12.14 показаны еще две схемы включения транзистора: а — с общим эмиттером (ОЭ) и б — с общим

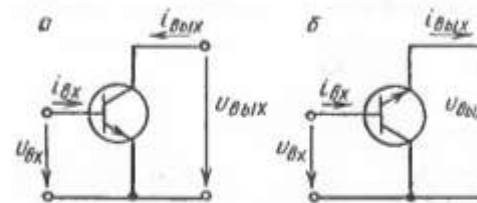


Рис. 12.14

коллектором (ОК). В схеме ОЭ входной ток — это ток базы $I_{\text{Б}}$, а выходной ток — ток коллектора $I_{\text{К}}$. Отношение этих токов называют коэффициентом передачи тока базы β . Так как $\alpha = 0,99$ и больше, то $\beta \gg 1$. Схема ОЭ обеспечивает усиление тока и напряжения сигнала и максимальное усиление мощности. Она чаще всего применяется в электронных устройствах.

Будет ли усиление сигнала по току в схеме ОК? — в) да; г) нет.

Характеристики транзистора зависят от схемы его включения. Чаще всего используются два семейства характеристик: входные (рис. 12.15, а) и выходные (рис. 12.15, б). Они приведены для транзистора КТ315, включенного по схеме ОЭ.

Выходные характеристики транзистора — это зависимости $I_{\text{К}} = f(U_{\text{КЭ}})$ при $I_{\text{Б}} = \text{const}$. При $I_{\text{Б}} = 0$ $I_{\text{К}} = I_{\text{К0}}$.

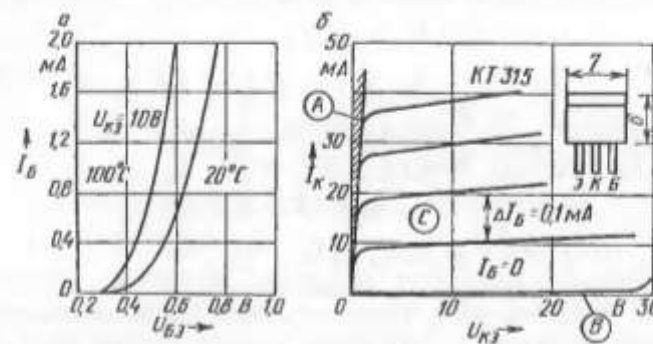


Рис. 12.15

Этот ток протекает через эмиттер и коллектор и мало зависит от напряжения $U_{кэ}$. При увеличении тока базы ток коллектора увеличивается в соответствии с уравнением.

$$I_k = \beta I_B + I_{к0}$$

Каждому значению I_B соответствует своя характеристика. Характеристики смещены относительно начала координат, так как

$$U_{кб} = U_{кэ} - U_{бэ},$$

и при $U_{кэ} < U_{бэ}$ коллекторный переход оказывается под прямым напряжением, т. е. открытым. Этой области характеристик соответствует режим насыщения (область *A* на рис. 12.15, б). Режиму отсечки соответствует область *B*, а активному режиму — область *C*.

Зависимости $I_B = f(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = \text{const}$ называют входными характеристиками.

При нагреве транзистора во всех его областях увеличивается концентрация неосновных носителей. Это ведет к увеличению обратного тока через $p - n$ -переходы, и все характеристики смещаются в область больших токов. Поэтому в практических схемах приходится предусматривать особые мероприятия для термостабилизации работы транзистора.

Биполярные транзисторы делятся на группы в зависимости от частоты сигнала и мощности, которую транзистор может рассеять. Для выбора типа транзистора в конкретных схемах применяются основные параметры, которые приводятся в справочниках. Напряжение $U_{кэ}$ транзистора при его работе не должно превышать предельно допустимое $U_{кэ \text{ max}}$, иначе коллекторный переход транзистора может быть пробит и транзистор выйдет из строя. Во избежание перегрева мощность, которая выделяется в транзисторе, не должна превышать предельно допустимую $P_{к \text{ max}}$.

Можно ли увеличить предельно допустимую мощность транзистора? — д) да; е) нет.

Для увеличения предельно допустимой мощности транзисторы устанавливают на радиаторах, увеличивающих отвод тепла. Например, у транзистора ГТ705 без теплоотвода допустимая мощность составляет 1,6 Вт, а при использовании радиатора — 15 Вт.

Полевым транзистором называют полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления мощно-

сти электрического сигнала. Выходной ток транзистора управляется электрическим полем.

Различают полевые транзисторы с *управляющим p - n-переходом* и с *изолированным затвором*. На рис. 12.16, а представлена структура транзистора с изолированным затвором или МОП-транзистора, на рис. 12.16, б — его условное обозначение, на рис. 12.16, в — схема включения. В кристалле кремния с n -электропроводностью по специальной технологии создаются две области с p -электропроводностью. Одна из областей называется *истоком* (И), вторая — *стоком* (С). Исток и сток соединены тонким каналом из такого же материала. Поверхность кристалла покрывается слоем диэлектрика, в качестве которого часто используется пленка оксида кремния. На диэлектрик над каналом напыляется слой металла — *затвор* (З). Все три электрода — исток, сток и затвор — имеют внешние выводы. Сам кристалл закрыт от внешних воздействий корпусом.

Между истоком и стоком включен источник питания E_H . Он включен так, чтобы основные носители в канале (на рис. 12.16 — дырки) перемещались от истока к стоку. Полевые транзисторы могут быть и с n -каналом.

При отсутствии напряжения между затвором и истоком ток стока I_C определяется сопротивлением канала.

Если между затвором и истоком подать напряжение $U_{зи}$ таким образом, что на затворе будет (+), а на истоке (-), то между затвором и n -областью возникает электрическое поле, которое выталкивает дырки из канала в n -область. Концентрация носителей становится меньше. Такой режим называют *режимом обеднения*.

При уменьшении концентрации носителей сопротивление канала возрастает и ток стока I_C уменьшается. При некотором $U_{зи}$, называемом *напряжением отсечки*, ток равен нулю.

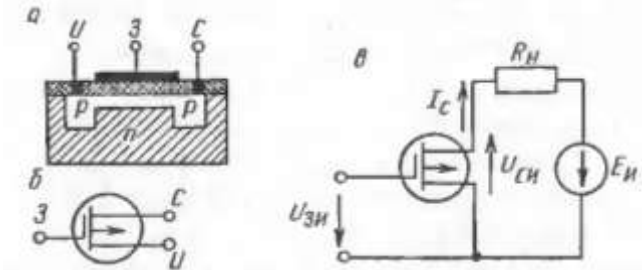


Рис. 2.16

Если поменять полярность и на затворе будет (-), а на истоке (+), то направление напряженности электрического поля изменится, и дырки будут втягиваться в канал из n-области. Концентрация носителей увеличится. Этот режим называют **режимом обогащения**.

Увеличение концентрации основных носителей заряда приводит к увеличению проводимости канала и возрастанию I_C .

Зависимость тока стока I_C от $U_{зи}$ при $U_{си} = \text{const}$ называют *характеристикой управления* транзистора. На рис. 12.17 показан ее внешний вид для рассмотренного

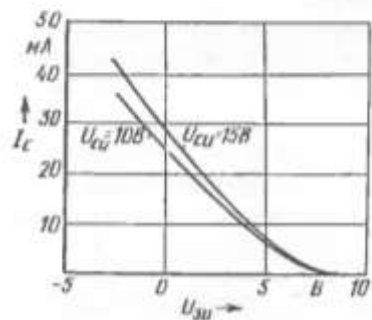


Рис. 12.17

типа транзистора. Так как затвор изолирован от канала с помощью диэлектрика, входное сопротивление полевого транзистора составляет $10^{12} - 10^{14}$ Ом, что значительно превосходит входное сопротивление биполярных транзисторов (около 10^3 Ом). Поэтому ток затвора практически равен нулю, а током I_C можно управлять почти без затрат мощности в управляющей цепи.

Основными параметрами полевых транзисторов являются *крутизна характеристики* S и *внутреннее сопротивление* R_i :

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{зи}} \quad \text{при } U_{си} = \text{const};$$

$$R_i = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_C} \quad \text{при } U_{зи} = \text{const}.$$

Обозначение транзисторов, как и других полупроводниковых приборов, состоит из четырех элементов. Первый из них — буква или цифра — указывает на полупроводниковый материал. Второй элемент обозначения для биполярного транзистора — буква Т, а для полевого — П. Далее трехзначная группа цифр обозначает тип транзистора по принятой классификации, и четвертый элемент — буква — разновидность данного типа. Например, КТ315А — это кремниевый биполярный транзистор малой мощности, высокой частоты, разновидность по классификационному параметру — А.