

10. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

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 объёмных 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, волоконно-оптическую и сотовую связи.

К *радиоэлектронной аппаратуре* относят: радиоприемники, телевизоры, аудиоустройства, устройства бытовой автоматики, электронные часы, электронные игрушки и др.

Вычислительная техника связана с разработкой и применением электронно-вычислительных машин, автоматизированных систем управления, автоматизированных информационных, обучающих и контролируемых систем и др.

Промышленная электроника включает устройства электропитания, станки с ЧПУ, аппаратуру автоматики, телеуправления, телеметрии, измерительную аппаратуру, лазерную технику и др.

10.1. Общие сведения о полупроводниках

Полупроводники своим названием обязаны тому, что их электропроводность меньше электропроводности металлов и больше электропроводности диэлектриков. К полупроводникам относятся элементы IV, V и VI групп Периодической системы элементов Менделеева (Si, Ge, As, Se, Te) и некоторые химические соединения, например оксиды, сульфиды, селениды, сплавы элементов различных групп. Различают собственные и примесные полупроводники [1, 5, 11].

Собственными полупроводниками являются химически чистые полупроводники, а их проводимость называется *собственной проводимостью*. Рассмотрим механизм собственной проводимости на примере кремния Si, имеющего кристаллическую решётку, в которой каждый атом связан ковалентными связями с четырьмя ближайшими

соседями. Упрощённая плоская схема атомов в кристалле Si представлена на рис. 10.1. В идеальном кристалле при 0 К такая структура представляет собой диэлектрик, так как валентные электроны участвуют в образовании связей и, следовательно, не участвуют в проводимости.

При повышении температуры (или под действием других внешних факторов) тепловые колебания решётки могут привести к разрыву некоторых валентных связей, в результате чего часть электронов отщепляется и они становятся свободными. В покинутом электроном месте возникает *дырка*, заполнить которую могут электроны из соседней пары. В результате дырка, так же как и освободившийся электрон, будет двигаться по кристаллу. Движение электронов проводимости и дырок в отсутствие электрического поля является хаотическим. Если к кристаллу приложить электрическое поле, то электроны начнут двигаться против поля, дырки – по полю, что приведёт к возникновению собственной проводимости кремния, обусловленной как электронами, так и дырками.

Проводимость собственных полупроводников, обусловленная электронами, называется *собственной электронной проводимостью* или *проводимостью n-типа* (от лат. *negative* – отрицательный). Проводимость полупроводников, обусловленная квазичастицами – дырками, называется *собственной дырочной проводимостью* или *проводимостью p-типа* (от лат. *positive* – положительный).

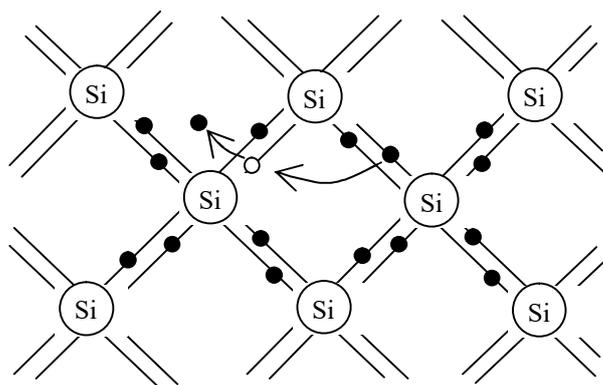


Рис. 10.1. Собственная проводимость кремния

Проводимость полупроводников, обусловленная примесями, называется *примесной проводимостью*, а сами полупроводники – *примесными полупроводниками*. Примесями являются элементы, атомы которых имеют валентность, отличную на единицу от валентности основных элементов.

Например, при замещении атома кремния пятивалентным атомом мышьяка (рис. 10.2, *а*) один электрон не может образовать ковалентной связи, он оказывается лишним и может быть легко при тепловых колебаниях решётки отщеплён от атома, т.е. стать свободным. Образование свободного электрона не сопровождается нарушением ковалентной связи, следовательно, дырка не возникает. Избыточный положительный заряд, возникающий вблизи атома примеси, связан с атомом примеси и поэтому перемещаться по решётке не может. Таким образом, в полупроводниках с примесью, валентность которой на единицу больше валентности основных атомов, носителями заряда являются электроны; возникает *электронная примесная проводимость (проводимость n-типа)*. Примеси, являющиеся источником электронов, называются *донорными*.

Если в решётку кремния введён примесный атом с тремя валентными электронами, например бор (рис. 10.2, *б*), то для образования связей с четырьмя ближайшими соседями у атома бора не хватает одного электрона, одна из связей остаётся неуполноценной и четвёртый электрон может быть захвачен от соседнего атома основного вещества, где образуется дырка. Последовательное заполнение образующихся дырок электронами эквивалентно движению дырок в полупроводнике, т.е. дырки перемещаются в решётке кремния как свободные заряды. Избыточный отрицательный заряд, возникающий вблизи атома примеси, связан с атомом примеси и по решётке перемещаться не может. Таким образом, в полупроводниках с примесью, валентность которой на единицу меньше валентности основных атомов, носителями заряда являются дырки, возникает *дырочная проводимость (проводимость p-типа)*. Примеси, захватывающие электроны, называются *акцепторами*.

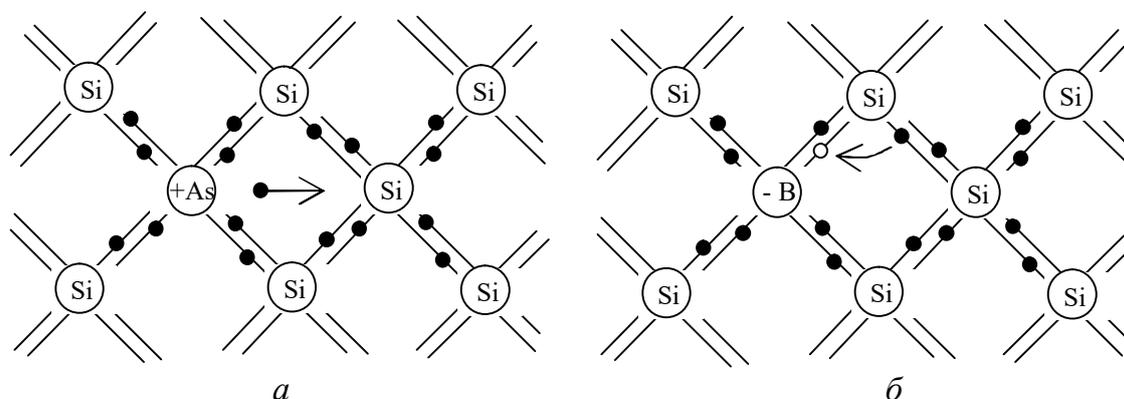


Рис. 10.2. Примесная проводимость кремния:
а – электронная; *б* – дырочная

Граница соприкосновения двух полупроводников, один из которых имеет электронную, а другой дырочную проводимость, называется *электронно-дырочным переходом* (или *p-n-переходом*). Принцип работы большинства полупроводниковых устройств основан на явлениях, возникающих в этом переходе. В полупроводнике *n*-типа из-за ухода электронов вблизи границы остаётся нескомпенсированный положительный объёмный заряд неподвижных ионизированных донорных атомов. В полупроводнике *p*-типа из-за ухода дырок вблизи границы образуется отрицательный объёмный заряд неподвижных ионизированных акцепторов (рис. 10.3, *а*). Эти объёмные заряды образуют у границы двойной электрический слой, поле которого, направленное от *n*-области к *p*-области, препятствует дальнейшему переходу электронов в направлении $n \rightarrow p$ и дырок в направлении $p \rightarrow n$.

Если значение электрического потенциала на границе раздела полупроводников ($x = 0$) принять равным нулю $\varphi(0) = 0$, то распределение потенциала в полупроводниках *p*- и *n*-типов будет определяться зависимостью (рис. 10.3, *б*)

$$\varphi = \int_0^x \varepsilon dx, \quad (10.1)$$

где ε – напряжённость электрического поля *p-n*-перехода.

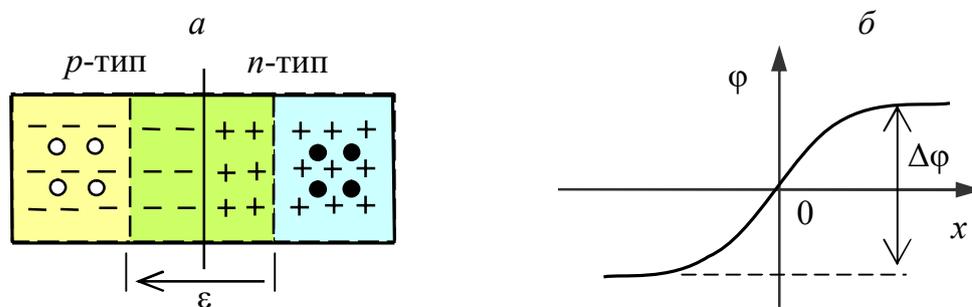


Рис. 10.3. *p-n*-переход:
а – распределение связанных и свободных зарядов;
б – электрический потенциал на границе раздела

Толщина слоя *p-n*-перехода в полупроводниках составляет примерно $10^{-6} - 10^{-7}$ м, а контактная разность потенциалов – десятые доли вольт. Носители тока способны преодолеть такую разность потенциалов лишь при температуре в несколько тысяч градусов, т.е. при обычных температурах равновесный контактный слой является *запирающим* (характеризуется повышенным сопротивлением).

Сопротивление запирающего слоя можно изменить с помощью внешнего электрического поля. Если к полупроводникам p - и n -типов соответственно подключить отрицательный и положительный полюсы постоянного напряжения, то внешнее электрическое поле будет совпадать по направлению с полем контактного слоя и вызывать движение электронов в n -полупроводнике и дырок в p -полупроводнике от границы p - n -перехода в противоположные стороны. В результате запирающий слой расширится и его сопротивление возрастёт (рис. 10.4, a). Направление внешнего поля, расширяющего запирающий слой, называется *обратным (запирающим)*. В этом направлении электрический ток через p - n -переход практически не проходит. Ток в запирающем слое в этом направлении образуется лишь за счёт неосновных носителей тока (электронов в p -полупроводнике и дырок в n -полупроводнике), но ими можно пренебречь, так как концентрации неосновных носителей тока в примесных полупроводниках весьма малы.

Если приложенное к p - n -переходу внешнее электрическое поле направлено противоположно полю контактного слоя (к полупроводникам p - и n -типов соответственно подключить положительный и отрицательный полюсы постоянного напряжения), то оно вызывает движение электронов в n -полупроводнике и дырок в p -полупроводнике к границе p - n -перехода навстречу друг другу.

В этой области они рекомбинируют, толщина контактного слоя и его сопротивление уменьшаются (рис. 10.4, b). Следовательно, в этом направлении электрический ток проходит сквозь p - n -переход в направлении от p -полупроводника к n -полупроводнику; внешнее электрическое поле называется *прямым (пропускным)*.

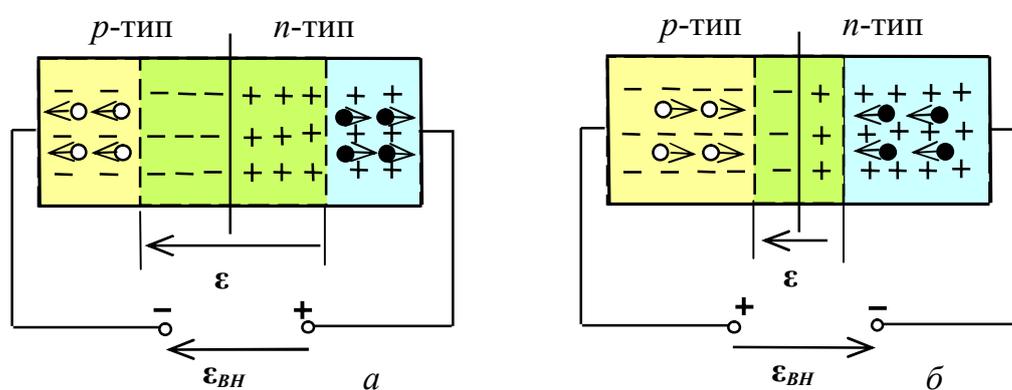


Рис. 10.4. Подключение к p - n -переходу внешнего электрического поля:
 a – обратного; b – прямого

10.2. Полупроводниковые приборы

10.2.1. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковый диод – устройство с одним $p-n$ -переходом и двумя выводами (рис. 10.5) [11]. В полупроводниковых диодах используется свойство $p-n$ -перехода или контакта металла с полупроводником хорошо проводить ток в одном направлении и практически не пропускать его в противоположном направлении. Эти токи и соответствующие им напряжения между выводами диода называются *прямыми* и *обратными токами*, *прямыми* и *обратными напряжениями*.

Прямой ток в полупроводниковом диоде направлен от *анодного вывода* – *анода* (А) к *катодному выводу* – *катоду* (К).

Полупроводниковые диоды по конструкции делятся на *точечные* и *плоскостные*.

Точечный диод – это прибор, в котором размеры электрического перехода меньше размеров областей, окружающих его и определяющих процессы в переходе. Такой переход, например, возникает при сплавлении кончика вольфрамовой проволоки, покрытой алюминием, в полупроводник n -типа. Если через диод в прямом направлении пропустить кратковременный импульс тока, то резко повышается диффузия алюминия и образуется слой, обладающий p -проводимостью. На границе этого слоя возникает $p-n$ -переход, обладающий высоким коэффициентом выпрямления. Из-за малой площади перехода точечный диод относится к маломощным приборам и применяется в качестве детекторов (выпрямителей) высокочастотных колебаний.



Рис. 10.5. Внешний вид полупроводниковых диодов

Плоскостной диод представляет собой прибор, в котором p - n -переход возникает на значительной по площади границе между полупроводниками p - и n -типов. В таких диодах переход получается методами сплавления полупроводниковых пластин p - и n -типов или диффузии в исходную полупроводниковую пластину примесных атомов.

По функциональному назначению полупроводниковые диоды делят на следующие основные виды (рис. 10.6):

- выпрямительные;
- стабилитроны;
- варикапы;
- импульсные;
- фотодиоды;
- светодиоды.

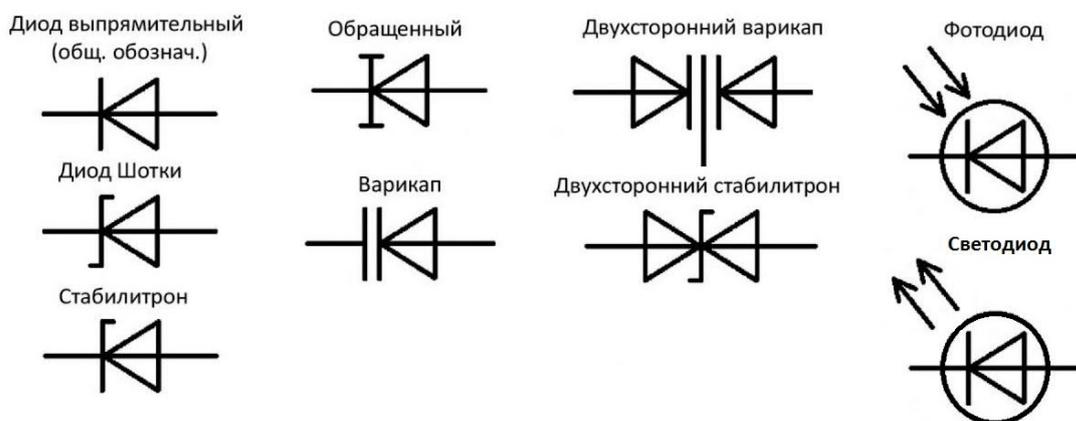


Рис. 10.6. Условные изображения различных видов полупроводниковых диодов

В качестве параметров, характеризующих эксплуатационные качества полупроводникового диода, обычно указывают:

- максимально допустимое постоянное $U_{обр.мах}$ и импульсное обратное напряжение $U_{обр.имп.мах}$;
- постоянный обратный ток, указывается при максимально допустимом обратном напряжении $I_{обр.мах}$;
- максимально допустимый средний за период прямой $I_{пр.мах}$ и кратковременный импульсный ток $I_{пр.имп.мах}$;
- номинальный средний прямой ток $I_{пр.ср}$;
- прямое падение напряжения при среднем прямом токе $U_{пр}$;
- максимальная рабочая частота диода $f_{мах}$;
- ёмкость C ;
- максимально допустимая температура корпуса диода $T_{к.мах}$;
- максимально допустимая рассеиваемая мощность $P_{мах}$.

Выпрямительные диоды – диоды, используемые для преобразования переменного тока в постоянный.

По максимально допустимому среднему прямому току $I_{np.cp}$ выпрямительные диоды делятся на три группы: диоды *малой мощности* ($I_{np.cp} \leq 0,3$ А), диоды *средней мощности* ($0,3$ А $< I_{np.cp} < 10$ А) и *мощные (силовые) диоды* ($I_{np.cp} \geq 10$ А). Диоды средней и большой мощности требуют отвода тепла, поэтому они имеют конструктивные элементы для установки на радиатор.

Частотный диапазон выпрямительных диодов невелик. При преобразовании промышленного переменного тока рабочая частота составляет 50 Гц, предельная частота выпрямительных диодов не превышает 20 кГц.

Электрические свойства выпрямительного диода описывает его вольт-амперная характеристика (ВАХ) (рис. 10.7), вид которой зависит от способа получения *p–n*-перехода, концентрации свободных дырок и электронов, конструкции и т.д.

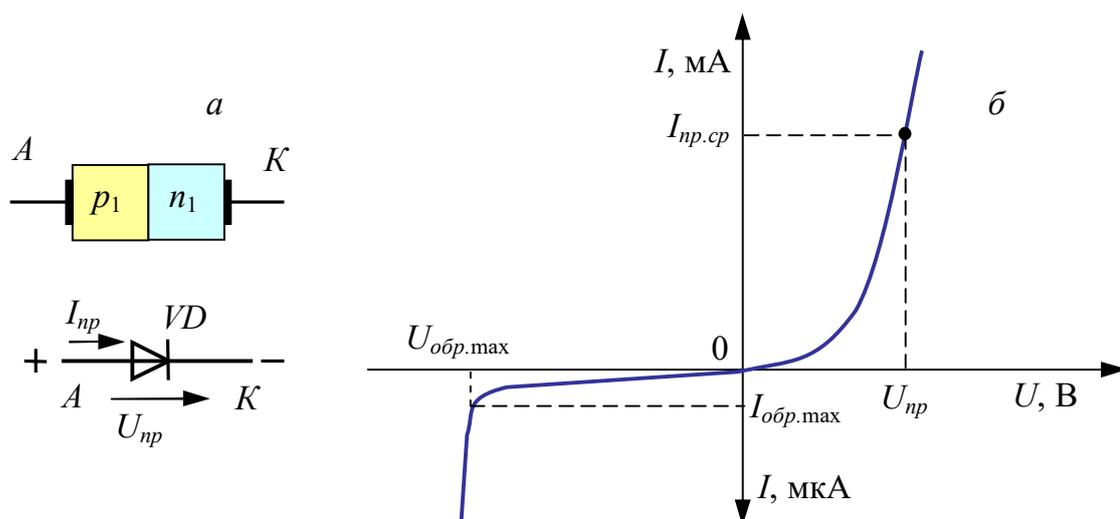


Рис. 10.7. Выпрямительный диод:

а – структура и условное обозначение; *б* – вольт-амперная характеристика

Среди выпрямительных диодов следует особо выделить диоды Шотки, создаваемые на базе контакта металл-полупроводник и отличающиеся более высокой рабочей частотой (для 1 МГц и более), низким прямым падением напряжения (менее 0,6 В).

К особой разновидности плоскостных диодов относятся *полупроводниковые стабилитроны* (диоды Зенера), которые применяются для стабилизации напряжения в электрических цепях. В этих диодах используется явление неразрушающего электрического пробоя *p–n*-перехода при определённых значениях обратного напряжения. Значе-

ние напряжения неразрушающего пробоя определяется конструкцией $p-n$ -перехода и электрофизическими свойствами полупроводника.

Стабилитрон препятствует превышению напряжения выше определённого порога на конкретном участке схемы. Может выполнять как защитные так и ограничительные функции, работают они только в цепях постоянного тока. Однотипные стабилитроны можно соединять последовательно для повышения стабилизируемого напряжения или образования делителя напряжений.

На рис. 10.8, *а* приведена простейшая схема включения стабилитрона как стабилизатора напряжения. При изменении напряжения U_{ex} между входными выводами стабилизатора и условия $U_{ex} > U_{cm}$ напряжение между выходными выводами (между катодом и анодом стабилитрона) U_{cm} изменяется незначительно (рис. 10.8, *б*).

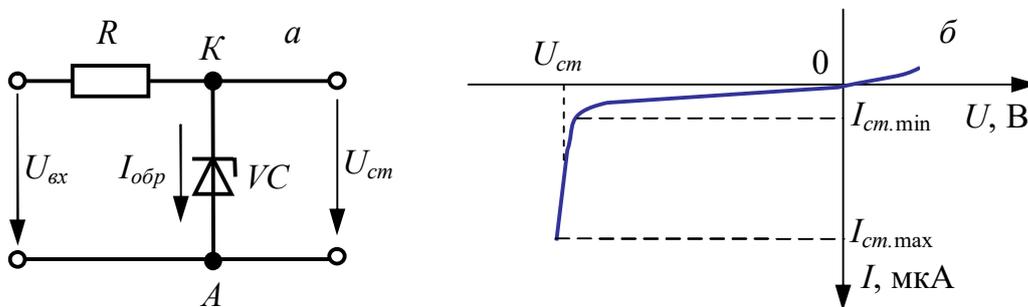


Рис.10.8. Полупроводниковый стабилитрон:
а – схема включения; *б* – вольт-амперная характеристика

В качестве параметров, характеризующих эксплуатационные качества полупроводникового стабилитрона, обычно указывают:

- номинальное напряжение стабилизации U_{cm} (от 1,8 до 400 В);
- минимальный и максимальный токи стабилизации $I_{cm.min}$ и $I_{cm.max}$ (от 5 мА до 5 А);
- температурный коэффициент напряжения (ТКН) на участке стабилизации;
- динамическое сопротивление на участке стабилизации $R_{диф}$;
- максимально допустимая рассеиваемая мощность P_{max} .

Варикап (ёмкостной диод) полупроводниковый диод, работа которого основана на зависимости барьерной ёмкости $p-n$ -перехода от обратного напряжения. Нормальный режим работы варикапа – с обратным смещением. Варикапы применяются в качестве элементов с электрически управляемой ёмкостью в схемах перестройки частоты колебательного контура в частотно-избирательных цепях, деления и умножения частоты, частотной модуляции и др.

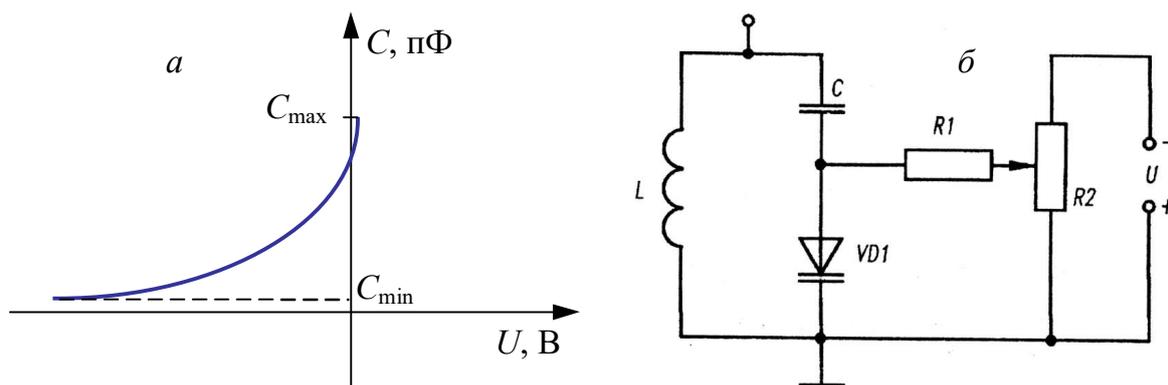


Рис.10.9. Полупроводниковый вариакп:

a – характеристика; *б* – пример включения в колебательном контуре генератора

Основные электрические и эксплуатационные параметры вариакпа:

- общая ёмкость C – ёмкость, измеренная между выводами вариакпа при заданном обратном напряжении (от 5 до 1000 пФ);
- коэффициент перекрытия по ёмкости k_c – отношение ёмкостей при двух заданных значениях обратного напряжения на вариакпе;
- добротность Q – отношение реактивного сопротивления вариакпа на заданной частоте к сопротивлению потерь при заданном значении ёмкости или обратного напряжения;
- постоянный обратный ток $I_{обр}$ – постоянный ток, ток утечки, протекающий через вариакп при заданном обратном напряжении;
- максимально допустимое постоянное обратное напряжение $U_{обр.мах}$;
- максимально допустимая рассеиваемая мощность $P_{мах}$.

Светодиод (диоды Генри Раунда) излучает свет при пропускании через него электрического тока. Светодиоды применяются в устройствах индикации приборов, сотовых телефонах для подсветки дисплея и клавиатуры, мощные светодиоды используют как источник света в фонарях и т.д. Светодиоды бывают разного цвета свечения.

Фотодиод преобразует свет, попавший на его фоточувствительную область, в изменение электрического сопротивления. Применяется как датчик света.

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

10.2.2. Тиристоры

Тиристор (рис. 10.10) – полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями и тремя или более последовательно включенными $p-n$ -переходами, обладающий способностью принудительного переключения из одного устойчивого состояния (отсечки) в другое (насыщения).

Основной областью применения тиристорov является:

- электронные ключи;
- управляемые выпрямители;
- преобразователи (инверторы);
- регуляторы мощности (диммеры);
- электронное зажигание.



Рис. 10.10. Внешний вид тиристорov

Основные электрические и эксплуатационные параметры тиристорov:

- напряжение отпирания U_{om} ;
- допустимое обратное напряжение тиристора $U_{обр.max}$;
- прямой ток удержания $I_{yд}$;
- прямое напряжение на открытом тиристоре $U_{пр}$;
- максимально допустимый средний за период $I_{пр.max}$ и кратковременный импульсный ток $I_{пр.имп.max}$;
- минимальные значения управляющего напряжения U_y и тока I_y , необходимые для включения тиристора;
- время включения и выключения $t_{вкл}$ и $t_{выкл}$;
- максимально допустимая рассеиваемая мощность P_{max} .

Тиристоры подразделяются на диодные (*динисторы*), имеющие два вывода (анод и катод), и триодные (*тринисторы*), имеющие три вывода (анод, катод и управляющий электрод).

В двухвыводных приборах – *динисторах* – переход прибора в проводящее состояние происходит самостоятельно, если напряжение между его анодом и катодом превысит напряжение отпирания.

Структура и обозначение динистора представлены на рис. 10.11, *а*. Такой тиристор имеет два вывода – анодный и катодный. Переключение диодного тиристора из одного устойчивого состояния в другое описывается его статической характеристикой (рис. 10.11, *б*).

Когда разность потенциалов между анодом и катодом динистора прямой полярности превысит величину напряжения отпирания U_{om} , произойдёт отпирание тиристора – резкий переход в состояние насыщения (динисторный эффект). Чтобы выключить динистор, нужно уменьшить анодное напряжение до значения, при котором ток анода станет меньше тока удержания $I_{y\delta}$. На практике уменьшают напряжение анода до нуля или прикладывают к аноду напряжение отрицательной полярности. Недостатком динистора является большая зависимость напряжения отпирания U_{om} и тока удержания $I_{y\delta}$ от температуры. При её увеличении эти параметры уменьшаются, обеспечивая температурную нестабильность.

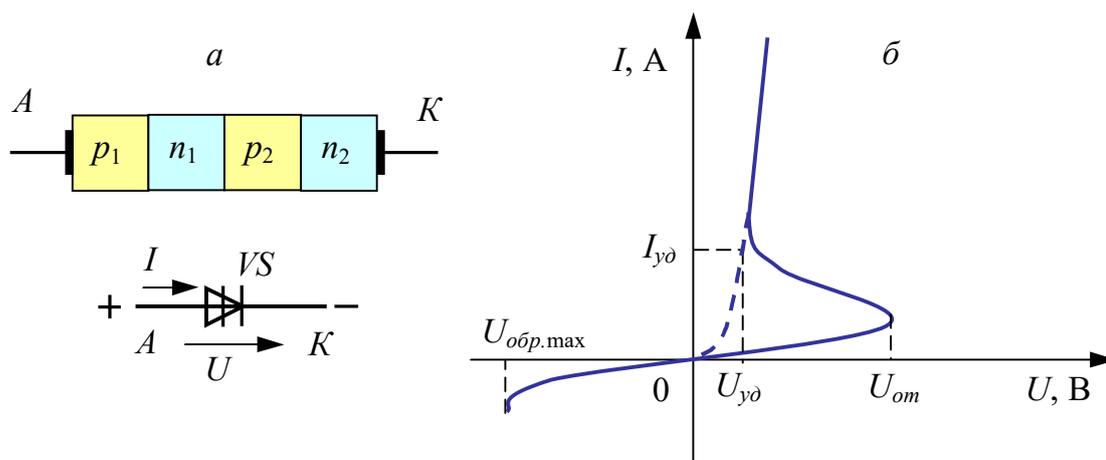


Рис. 10.11. Диодный тиристор:

а – структура и условное обозначение; *б* – вольт-амперная характеристика

Триодный тиристор кроме анодного и катодного выводов имеет ещё вывод управляющего электрода УЭ, который подключается либо к ближайшей к катоду *p*-области, либо к ближайшей к аноду *n*-области. В соответствии с этим различают катодное и анодное управление тиристором, различающиеся полярностью управляющего напряжения. Структура, условное обозначение и ВАХ тристора представлены на рис. 10.12.

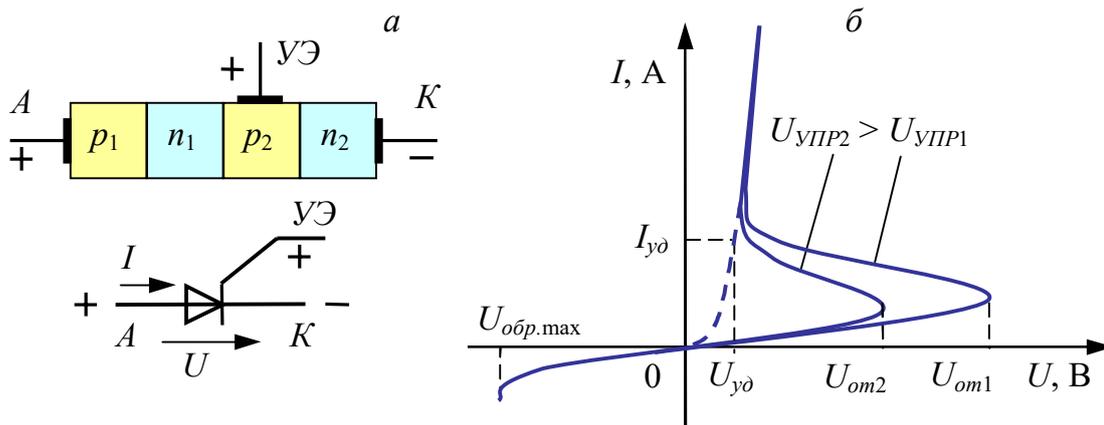


Рис. 10.12. Триодный тиристор:

a – структура и условное обозначение; *б* – вольт-амперная характеристика

При изменении напряжения управления U_y изменяется напряжение отпирания тиристора U_{om} . Следовательно, тиристор можно использовать как управляемый ключ. После открытия тиристора ток I_y управляющего электрода перестает оказывать какое-либо влияние на работу тиристора. Запирание тристора происходит самостоятельно аналогично динистору, либо по второму управляющему сигналу в *полностью управляемых тиристорах*. При подаче на анод синусоидального напряжения тиристор закрывается во время отрицательной полуволны напряжения.

Принципиальных различий между динистором и тристором нет, однако если открытие динистора происходит при достижении прямым напряжением определённого значения U_{om} , то в триисторе напряжение отпирания может быть специально снижено, путём подачи импульса тока определённой длительности и величины на его управляющий электрод при положительной разности потенциалов между анодом и катодом. Однако у тиристоров есть одно свойство, не позволяющее им коммутировать нагрузку в цепи переменного тока – односторонняя проводимость. Для управления нагрузкой, работающей на переменном токе, используются *симисторы*.

Симистор (симметричный триодный тиристор) или триак (от англ. TRIAC — triode for alternating current) – полупроводниковый прибор, являющийся разновидностью тиристоров и используемый для коммутации в цепях переменного тока. В электронике часто рассматривается как управляемый выключатель (ключ). Упрощённо симистор можно представить в виде эквивалентной схемы из двух триодных тиристоров (триисторов), включённых встречно-параллельно.

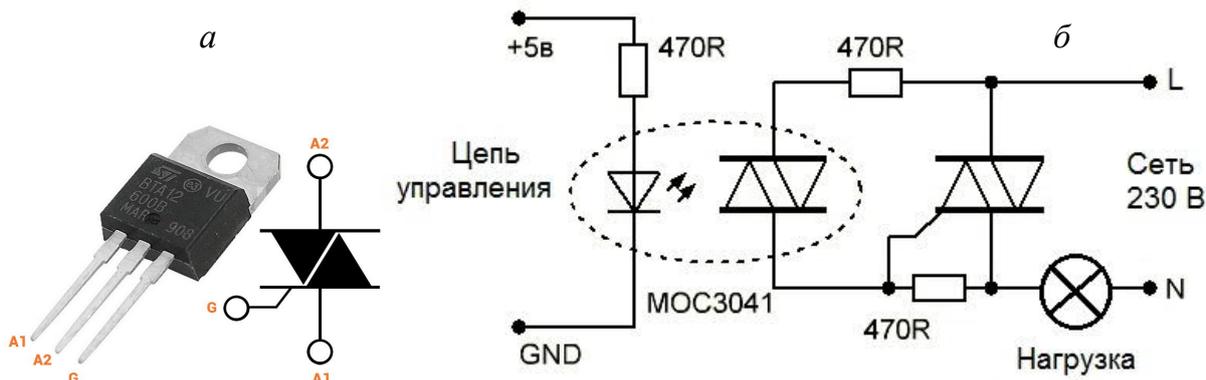


Рис. 10.13. Схема применения симистора для управления нагрузкой

На рис. 10.13, *a* нижний вывод симистора называется условным катодом (A1 или MT1), верхний – условным анодом (A2 или MT2), вывод слева – управляющим электродом (G – gate).

Для управления нагрузкой основные электроды симистора включаются в цепь последовательно с нагрузкой. В закрытом состоянии проводимость симистора отсутствует, нагрузка выключена. При подаче на управляющий электрод отпирающего сигнала между основными электродами симистора возникает проводимость, нагрузка оказывается включённой. Симистор в открытом состоянии проводит ток в обоих направлениях.

Другой особенностью симистора, как и других тиристоров, является то, что для его удержания в открытом состоянии нет необходимости постоянно подавать сигнал на управляющий электрод (в отличие от транзистора). Симистор остаётся открытым, пока протекающий через основные выводы ток превышает некоторую величину, называемую током удержания. Отсюда следует, что выключение нагрузки в цепи переменного тока происходит вблизи моментов времени, когда ток через основные электроды симистора меняет направление (смена полярности напряжения в сети).

Для отпирания симистора на его управляющий электрод подаётся напряжение относительно условного катода. Полярность управляющего напряжения, как правило, должна быть либо отрицательной, либо должна совпадать с полярностью напряжения на условном аноде. Поэтому часто используется такой метод управления симистором, при котором сигнал на управляющий электрод подаётся с условного анода через токоограничительный резистор и выключатель. Управлять симистором часто удобно, задавая определённую силу тока управляющего электрода, достаточную для отпирания.

10.2.3. Биполярные транзисторы

Биполярный транзистор – электропреобразовательный полупроводниковый прибор с двумя электрическими $p-n$ -переходами, предназначенный для усиления, преобразования и генерации электрических сигналов. Устройство биполярных транзисторов основано на явлениях взаимодействия двух близко расположенных $p-n$ -переходов. Транзистор называется биполярным, потому что физические процессы в нём связаны с движением носителей зарядов обоих знаков (свободных дырок и электронов).

Биполярные транзисторы (рис. 10.14) служат для усиления входного сигнала в усилительных устройствах, при формировании генераторов сигналов и для реализации ключевых режимов работы электронных устройств: для коммутации сигналов в измерительных усилителях, в силовых преобразователях частоты и др. [1, 5, 11].

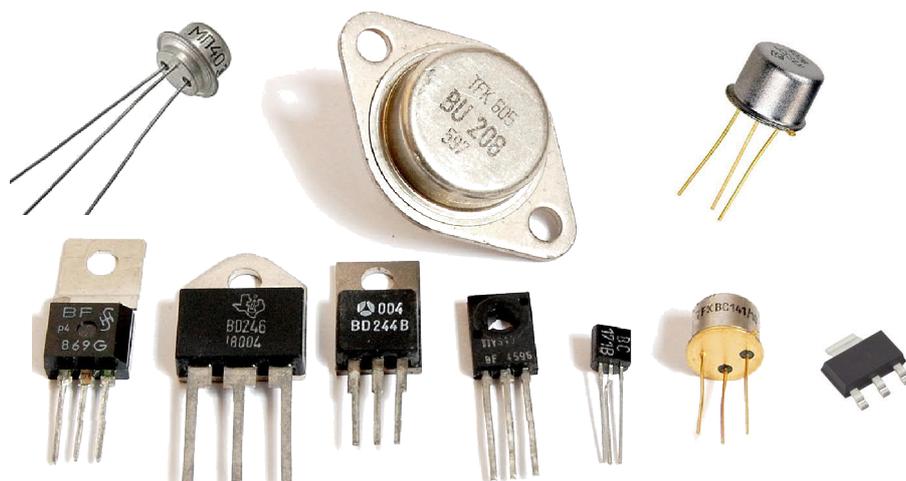


Рис. 10.14. Внешний вид биполярных транзисторов

В первых транзисторах в качестве полупроводникового материала использовался германий. В настоящее время биполярные транзисторы изготавливают в основном из монокристаллического кремния и монокристаллического арсенида галлия. Благодаря очень высокой подвижности носителей в арсениде галлия приборы на его основе обладают высоким быстродействием и используются в сверхбыстродействующих логических схемах и в схемах СВЧ-усилителей.

К основным параметрам биполярного транзистора относятся:

- коэффициент передачи по току h_{21} ;
- максимально допустимый ток коллектора $I_{к.макс}$;
- максимально допустимое напряжение коллектор – база $U_{кб.макс}$;

- максимально допустимое напряжение между коллектором и эмиттером $U_{кэ.мах}$;
- напряжение насыщения коллектор – эмиттер $U_{кэ.нас}$;
- входное сопротивление для переменных сигналов h_{11} ;
- выходная проводимость для переменных сигналов h_{22} ;
- предельная частота усиления, до которой коэффициент передачи тока выше 1;
- максимально допустимая мощность $P_{к.мах}$.

Биполярные транзисторы классифицируют:

- по мощности рассеяния (маломощные (до 0,3 Вт), средней мощности (от 0,3 Вт до 1,5 Вт) и мощные (свыше 1,5 Вт));
- по частотным свойствам (низкочастотные (до 3 МГц), средней частоты (от 3 до 30 МГц), высокой (от 30 до 300 МГц) и сверхвысокой частоты (более 300 МГц));
- по назначению: универсальные, усилительные, генераторные, переключательные и импульсные.

Структура. Биполярный транзистор состоит из трёх полупроводниковых слоёв с чередующимся типом примесной проводимости. Слой, который находится в середине, называется базой («Б», англ. В), один из слоев, лежащих по краям – эмиттер (обозначается «Э», англ. E), другой слой на противоположном конце транзистора носит название коллектор («К», англ. С). В зависимости от порядка чередования слоёв разного типа проводимости различают *n-p-n* и *p-n-p* транзисторы (рис. 10.15, а, б).

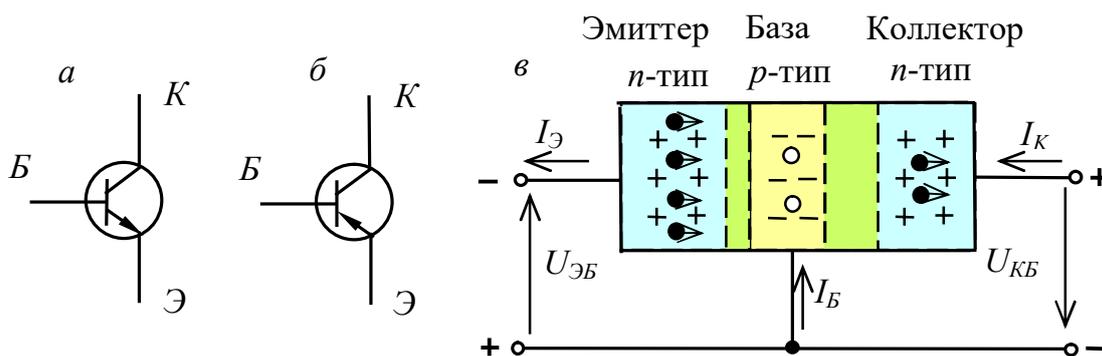


Рис. 10.15. Обозначение и структура биполярного транзистора:
а – *n-p-n*-транзистор; б – *p-n-p*-транзистор; в – структура *n-p-n*-транзистора

Биполярный транзистор имеет два перехода: эмиттерный и коллекторный. На переходы транзистора в зависимости от его режима работы и функционального назначения подают прямое или обратное на-

пряжение. Если на эмиттерном переходе напряжение прямое, а на коллекторном обратное, то такое включение транзистора считают нормальным, при противоположной полярности напряжений – инверсным.

Принцип действия транзистора заключается в следующем (рис. 10.16). Если к эмиттерному переходу транзистора приложить прямое напряжение, а к коллекторному – обратное, то электроны через эмиттерный переход инжектируют в базу. В области базы осуществляется рекомбинация электронов и дырок, также часть электронов в результате воздействия электрического поля, создаваемого напряжением между коллектором и базой $U_{КБ}$, поступает в коллекторный переход, где происходит их экстракция в коллектор. В результате описанных процессов формируются токи в переходах транзистора: эмиттера $I_Э$, коллектора $I_К$, базы $I_Б$.

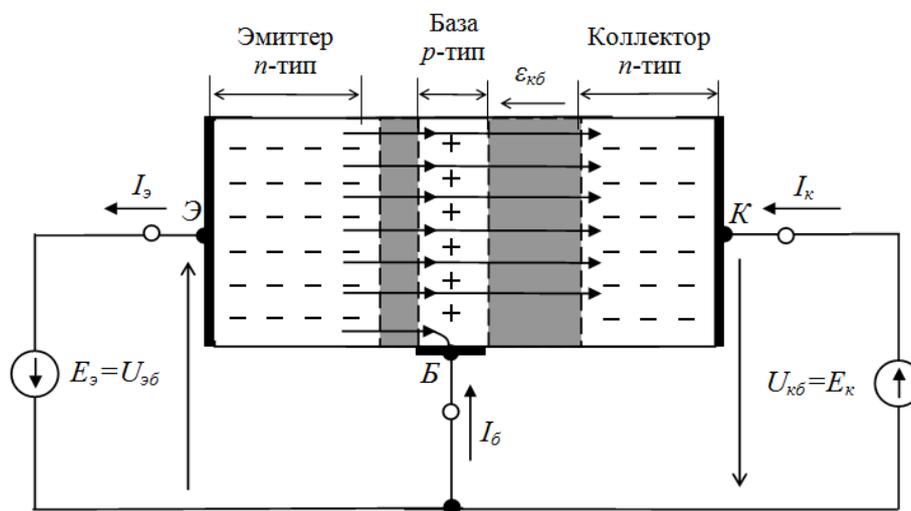


Рис. 10.16. Принцип работы биполярного транзистора с общей базой

Общая площадь перехода база-эмиттер выполняется значительно меньше площади перехода коллектор-база, что увеличивает вероятность захвата неосновных носителей из базового слоя и улучшает коэффициент передачи.

Режим работы биполярных транзисторов зависит от полярности напряжений, подаваемых на выводы транзистора:

1. *Активный режим* – это нормальный режим работы транзистора: эмиттерный переход включен в прямом направлении, коллекторный – в обратном. В активном режиме транзистор может реализовать все основные свои функции, им можно управлять. Этот режим характеризуется высоким коэффициентом передачи тока эмиттера и минимальными искажениями выходного сигнала.

2. *Режим отсечки* – оба перехода подключены в обратном направлении, ток в выходной цепи транзистора практически равен нулю. Режим отсечки соответствует условию $U_{бэ} < 0,6 - 0,7$ В или $I_б = 0$. Режим отсечки применяется для размыкания электрических цепей.

3. *Режим насыщения* – к эмиттерному и коллекторному переходам приложено прямое напряжение, выходной ток при этом зависит только от параметров нагрузки. Режим насыщения применяется для замыкания электрических цепей.

Схемы включения. Как правило, транзистор включают по трём основным схемам: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ), с общим коллектором (ОК) (рис. 10.17). Общим называют электрод, который является общим при контроле потенциалов на входе и выходе транзистора.

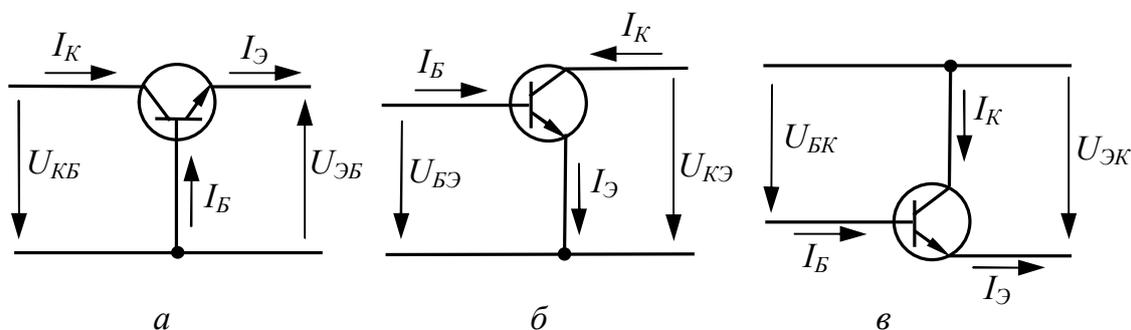


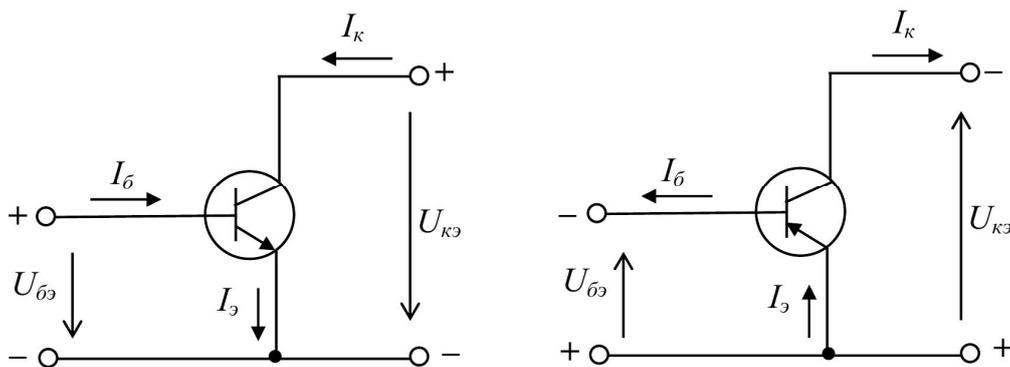
Рис. 10.17. Схемы включения биполярного транзистора:
 а – с общей базой; б – с общим эмиттером; в – с общим коллектором

Схема включения с ОБ характеризуется низким входным сопротивлением, усиливает входной сигнал по напряжению и мощности. Среди всех трёх конфигураций обладает наименьшим входным (-) и наибольшим выходным сопротивлением. Имеет коэффициент усиления по току, близкий к единице (-), и большой коэффициент усиления по напряжению. Не инвертирует фазу сигнала.

Схема включения с ОК называется *эмиттерным повторителем*. Она осуществляет усиление входного сигнала по току и мощности и не является усилителем напряжения. Имеет высокое входное и малое выходное сопротивление, поэтому применяется в качестве согласующего устройства между высокоомным источником сигнала и низкоомной нагрузкой, чтобы исключить влияние нагрузки на входной сигнал.

В схеме включения с ОЭ осуществляется усиление входного сигнала по току, напряжению и мощности. По сравнению со схемой с ОБ имеет большее входное сопротивление. Выходное переменное напряжение инвертируется относительно входного.

На практике для усиления сигнала наибольшее применение находит схема включения с ОЭ, так как осуществляет усиление по току, напряжению, мощности, схема также имеет высокое входное и низкое выходное сопротивления. Чаще всего в схемах применяют транзисторы структуры *n-p-n*. Это связано с тем, что в схемах эмиттеры транзисторов соединены с отрицательным источником питания.



Характеристики. Работу биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ, определяют статическими входными базовыми $I_B(U_{БЭ})$ при $U_{КЭ} = \text{const}$ (рис. 10.18, а) и выходными коллекторными $I_K(U_{КЭ})$ при $I_B = \text{const}$ (рис. 10.18, б) характеристиками.

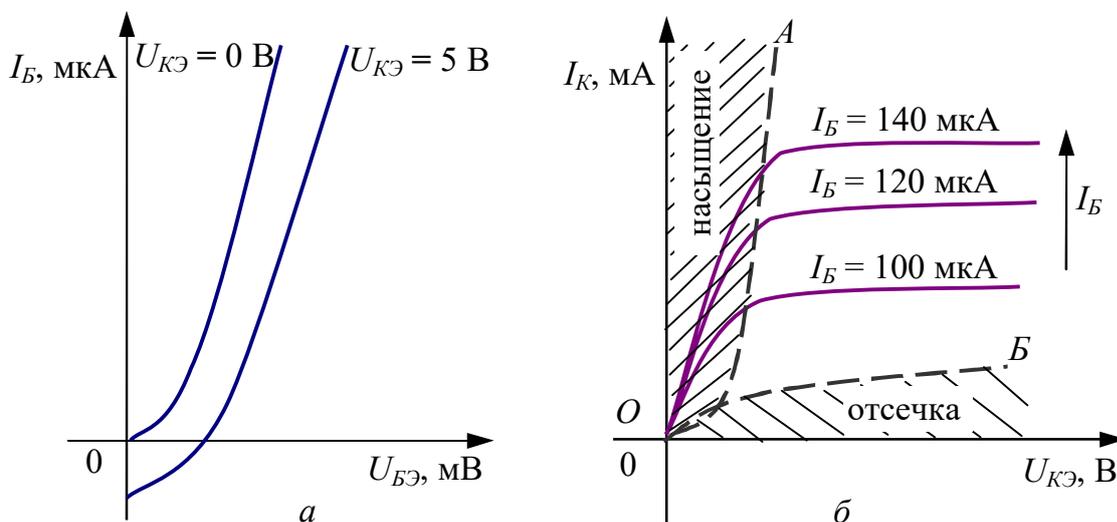


Рис. 10.18. Характеристики биполярного транзистора по схеме с ОЭ:
а – входные; б – выходные

На выходных характеристиках отмечены: область насыщения – левее линии OA , в которой выходные характеристики нелинейны, ниже линии OB ($I_B = 0$) – область отсечки, в которой выходной ток отсутствует. Область между линиями OA и OB – линейный активный режим.

Статические характеристики используются для расчёта параметров транзисторов и выбора соответствующего рабочего участка характеристики транзистора.

h-параметры. При работе транзистора в активном режиме его можно рассматривать как линейный четырёхполюсник (рис. 10.19). Четырёхполюсник представляет собой линейную электрическую схему, имеющую два входных и два выходных контакта.



Рис. 10.19. Линейный четырёхполюсник

Для транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером, работающим в малосигнальном (линейном) режиме, когда амплитуды переменных составляющих входных сигналов не выходят за пределы линейного участка характеристики, наибольшее распространение получило представление его в виде четырёхполюсника, характеризующегося h -параметрами.

На рис. 10.12 параметры \dot{I}_1 и \dot{U}_1 считаются входными, а параметры \dot{I}_2 и \dot{U}_2 – выходными. Используя в качестве переменных четырёхполюсника I и U , можно применить систему h -параметров

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = h_{11}\dot{I}_1 + h_{12}\dot{U}_2; \\ \dot{I}_2 = h_{21}\dot{I}_1 + h_{22}\dot{U}_2. \end{cases} \quad (1)$$

h -параметры определяются экспериментально: h_{12} и h_{22} рассчитываются при постоянном значении тока базы ($I_B = \text{const}$) а h_{11} и h_{21} при постоянном значении напряжения на коллекторе ($U_{КЭ} = \text{const}$).

– входное сопротивление транзистора

$$h_{11} = \left. \frac{d\dot{U}_1}{d\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2 = \text{const}} ; \quad (2)$$

– выходная проводимость транзистора

$$h_{22} = \left. \frac{d\dot{I}_2}{d\dot{U}_2} \right|_{\dot{I}_1 = \text{const}} ; \quad (3)$$

– коэффициент обратной связи транзистора по напряжению

$$h_{12} = \left. \frac{d\dot{U}_1}{d\dot{U}_2} \right|_{I_1 = \text{const}} ; \quad (4)$$

– коэффициент передачи тока транзистора

$$h_{21} = \left. \frac{d\dot{I}_2}{d\dot{I}_1} \right|_{U_2 = \text{const}} . \quad (5)$$

В зависимости от схемы включения транзистора (ОЭ, ОБ, ОК) будут соответствующими токи и напряжения. Например, для схемы с ОЭ: $I_1 = I_B$; $I_2 = I_K$; $U_1 = U_{БЭ}$; $U_2 = U_{КЭ}$.

Составные биполярные транзисторы. Составной транзистор (или схема) Дарлингтона (часто — пара Дарлингтона) была предложена в 1953 году инженером Bell Laboratories Сидни Дарлингтоном. Схема является каскадным соединением двух (редко — трёх или более) биполярных транзисторов, включённых таким образом, что нагрузкой в эмиттерной цепи предыдущего каскада является переход база-эмиттер транзистора последующего каскада (то есть эмиттер предыдущего транзистора соединяется с базой последующего), при этом коллекторы транзисторов соединены. В этой схеме ток эмиттера предыдущего транзистора является базовым током последующего транзистора.

Коэффициент усиления по току пары Дарлингтона очень высок и приблизительно равен произведению коэффициентов усиления по току транзисторов, составляющих такую пару. У мощных транзисторов включенных по схеме пары Дарлингтона, конструктивно выпускаемой в одном корпусе (например, транзистор КТ825) гарантированный коэффициент усиления по току при нормальных условиях эксплуатации) не менее 750. У пар Дарлингтона, собранных на мало-мощных транзисторах этот коэффициент может достигать значения 50000. Высокий коэффициент усиления по току обеспечивает управление малым током, поданным на управляющий вход составного транзистора, выходными токами, превышающими входной на несколько порядков.

Примером схемы Дарлингтона, выполненной в одном корпусе со встроенным эмиттерным резистором, служит мощный *n-p-n*-транзистор Дарлингтона типа КТ827 (рис. 10.13, а), его типовой коэффициент усиления по току около 1000 при коллекторном токе 10 А.

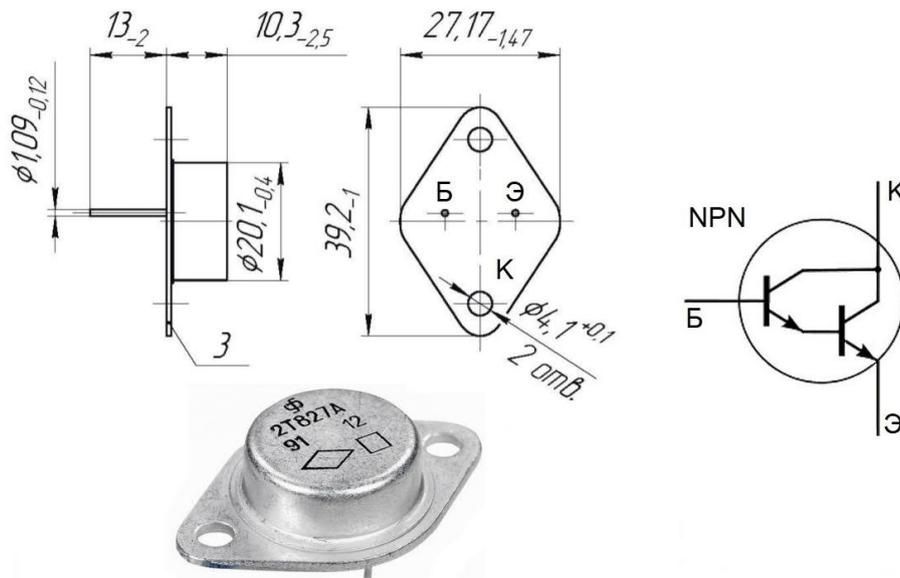


Рис. 10.13. Составной транзистор (или схема) Дарлингтона:
 а – внешний вид; б – принципиальная схема

Паре Дарлингтона подобно соединение транзисторов по схеме Шиклаи, названное так в честь его изобретателя Джорджа К. Шиклаи, также иногда называемое *комплементарным транзистором Дарлингтона*. В отличие от схемы Дарлингтона, состоящей из двух транзисторов одного типа проводимости, схема Шиклаи содержит транзисторы разного типа проводимости: *n-p-n* (рис. 10.14, а) и *p-n-p* (рис. 10.14, б). Пара Шиклаи электрически эквивалентна *n-p-n*-транзистору с большим коэффициентом усиления. Чаще всего соединение транзисторов по схеме Шиклаи применяется в мощных двухтактных выходных каскадах усилителей мощности звуковой частоты, когда используются транзисторы только одной проводимости.

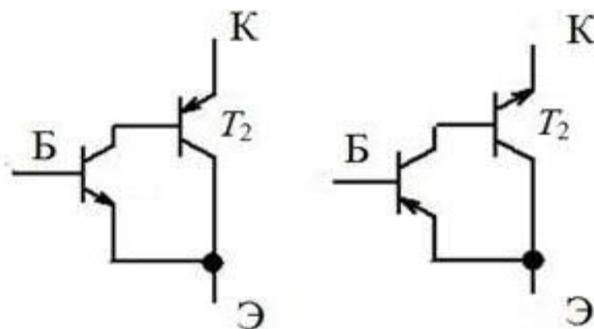


Рис. 10.14. Составной транзистор (или схема) Шиклаи:
 а – *n-p-n*-тип; б – *p-n-p*-тип

10.2.4. Полевые транзисторы

В полевых транзисторах поток носителей заряда протекает через проводящий слой (канал) и управляется электрическим полем (отсюда название – полевой). Процессы инжекции и диффузии, как в биполярных транзисторах, отсутствуют [1, 5, 11].

Полевые транзисторы разделяют на два класса: с управляющим $p-n$ -переходом и с изолированным затвором на основе конструкции металл – диэлектрик – полупроводник (МДП-транзисторы). Металлический электрод, создающий эффект поля, называется затвором Z . Два других электрода – исток I и сток C . Сток и исток могут изменять своё назначение при определённой полярности напряжения. Стоком из них считается электрод, к которому движутся носители заряда. Например, если канал p -типа, то носителями заряда будут дырки, а полярность стока – отрицательная. Полевые МДП-транзисторы отличаются от полевых транзисторов с управляющим $p-n$ -переходом тем, что электрод затвора изолирован от проводящего канала слоем диэлектрика (оксид кремния SiO_2). Область, прилежащую к рабочему каналу, называют подложкой Π ; если проводящий канал n -типа, то подложка p -типа, и наоборот.

Обозначение полевых транзисторов на схемах показано на рис. 10.13 и заметно отличается от обозначения биполярных транзисторов, хотя внешний вид корпусов тех и других устройств полностью совпадает (см. рис. 10.8).

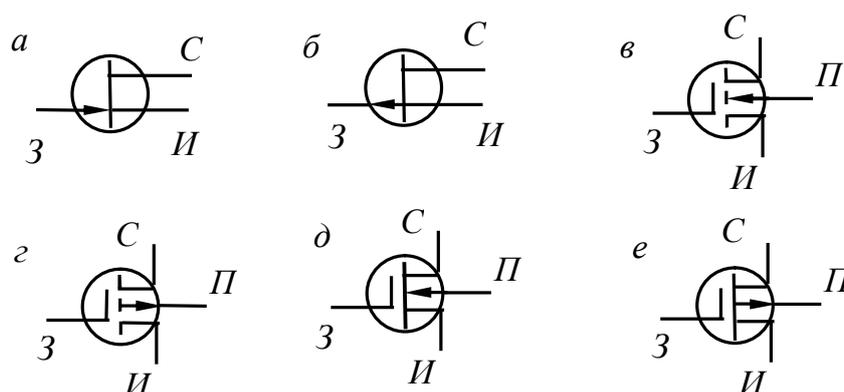


Рис. 10.13. Обозначение на схемах полевого транзистора:

- a* – с управляющим $p-n$ -переходом и n -каналом;
- б* – с управляющим $p-n$ -переходом и p -каналом;
- в* – МДП-транзистор с индуцированным n -каналом;
- г* – МДП-транзистор с индуцированным p -каналом;
- д* – МДП-транзистор со встроенным n -каналом;
- е* – МДП-транзистор со встроенным p -каналом

Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом – это полевой транзистор, в котором пластина из полупроводника, например n -типа, имеет на противоположных концах электроды (исток и сток), с помощью которых она включена в управляемую цепь. Управляющая цепь подключается к третьему электроду (затвору) и образуется областью с другим типом проводимости – p -типа.

Рассмотрим структуру и принцип действия полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом и каналом проводимости n -типа (рис. 10.14). Если между истоком и стоком включен источник с ЭДС E_C положительным полюсом к стоку, то в n -канале есть ток проводимости I_C , значение которого зависит от сопротивления канала. В свою очередь, сопротивление n -канала зависит от его ширины, которую можно изменить, включив между затвором и истоком источник ЭДС E_3 отрицательным полюсом к затвору, тогда p - n -переход подключен в обратном направлении. Ширина p - n -перехода, обеднённого подвижными носителями заряда, влияет на ширину n -канала и тем самым на его проводимость.

Напряжение p - n -перехода вдоль канала непостоянное.

$$U_{p-n}(x) = -E_3 - R_K(x)I_C, \quad (10.12)$$

где $R_K(x)$ – сопротивление канала.

Наибольшего значения сопротивление, а следовательно, и напряжение достигает у стока, где перекрытие канала будет максимальным.

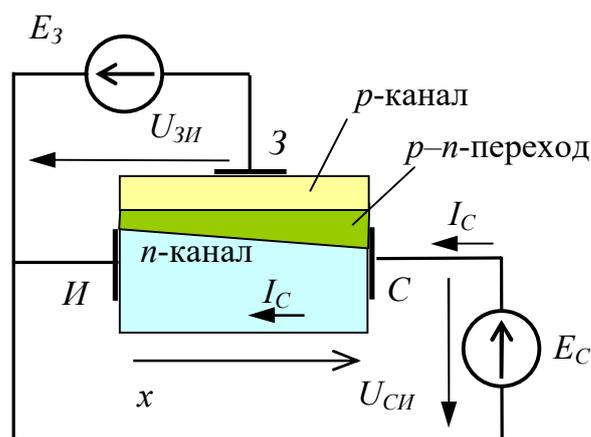


Рис. 10.14. Структура полевого транзистора с управляющим p - n -переходом и n -каналом

Статические выходные ВАХ полевого транзистора с управляющим p - n -переходом показаны на рис. 10.15, а. Они представляют зависимость тока стока I_C от напряжения $U_{СИ}$ при постоянном напряжении

на затворе $U_{ЗИ}$ – стоковые характеристики. Особенностью характеристик является наличие трёх областей: линейной, насыщения и электрического пробоя. Чрезмерное увеличение напряжения $U_{СИ}$ вызывает лавинный пробой между затвором и стоком.

Передаточные статические ВАХ изображены на рис. 10.15, б и представляют собой зависимость тока стока I_C от напряжения $U_{ЗИ}$ при постоянном напряжении $U_{СИ}$ – стокзатворные характеристики. При напряжении $U_{ЗИ}$, меньшем напряжения отсечки $U_{ЗИ\text{ отс}}$, канал закрыт ($I_C = I_3$). Изменение полярности напряжений $U_{СИ}$ или $U_{ЗИ}$ нарушает работу затвора.

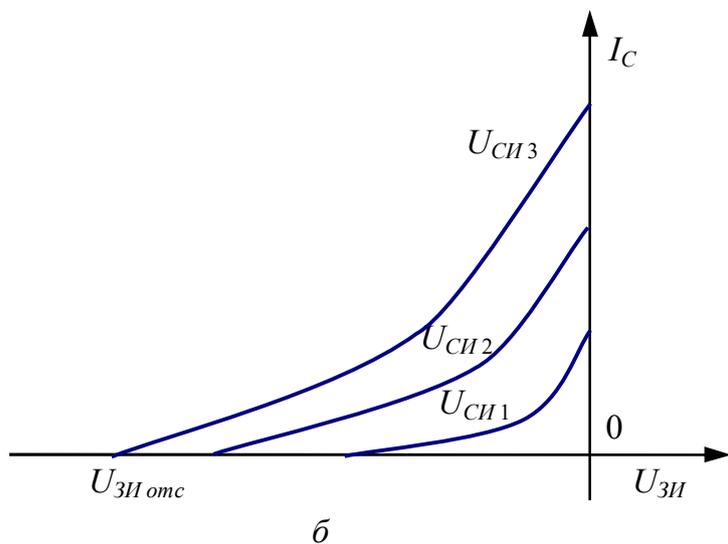
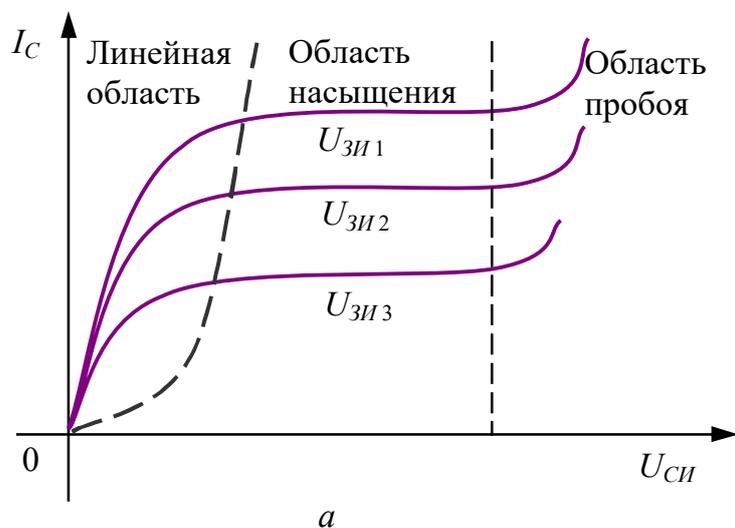


Рис.10.15. Вольт-амперные характеристики полевого транзистора с управляющим p - n -переходом:
 а – выходные; б – передаточные

Параметры полевого транзистора с управляющим p - n -переходом можно определить по выходным и передаточным статическим ВАХ:

– крутизна характеристики

$$S = \left. \frac{\Delta I_C}{U_{ЗИ}} \right|_{U_{СИ} = \text{const}} ; \quad (10.13)$$

– выходное дифференциальное сопротивление

$$R_C = \left. \frac{\Delta U_{СИ}}{\Delta I_C} \right|_{U_{СИ} = \text{const}} ; \quad (10.14)$$

– сопротивление открытого канала

$$R_{КО} = \frac{U_{СИ}}{I_C} ; \quad (10.15)$$

– коэффициент усиления

$$K = \left. \frac{\Delta U_{СИ}}{\Delta U_{ЗИ}} \right|_{I_C = \text{const}} . \quad (10.16)$$

В рассмотренном случае полевой транзистор включен по схеме с общим истоком (ОИ). Возможно включение по схеме с общим стоком (ОС) или общим затвором (ОЗ).

Структура МДП-транзистора со встроенным каналом показана на рис. 10.16, *а*. Такой транзистор работает в двух режимах: обеднения и обогащения. В режиме обеднения для канала n -типа на затвор подаётся отрицательное напряжение, которое отталкивает электроны во встроенном канале. При этом создаются обеднённые слои между каналом и изолирующим слоем, ток стока уменьшается. В режиме обогащения для канала p -типа на затвор подаётся положительное напряжение. В этом случае ток стока увеличивается за счёт поступления электронов в проводящий канал из области подложки.

Структура МДП-транзистора с индуцированным каналом представлена на рис. 10.16, *б*. Области n -типа вокруг истока и стока при напряжении на затворе, равном нулю, представляют собой два встречно включенных диода и ток стока при этом незначителен. При подаче положительного напряжения на затвор к изолирующей прокладке затвора притягиваются электроны из p -подложки, и на затворе транзистора индуцируется проводящий канал. В результате увеличивается ток стока. Полевой транзистор с индуцированным каналом работает только в режиме обогащения.

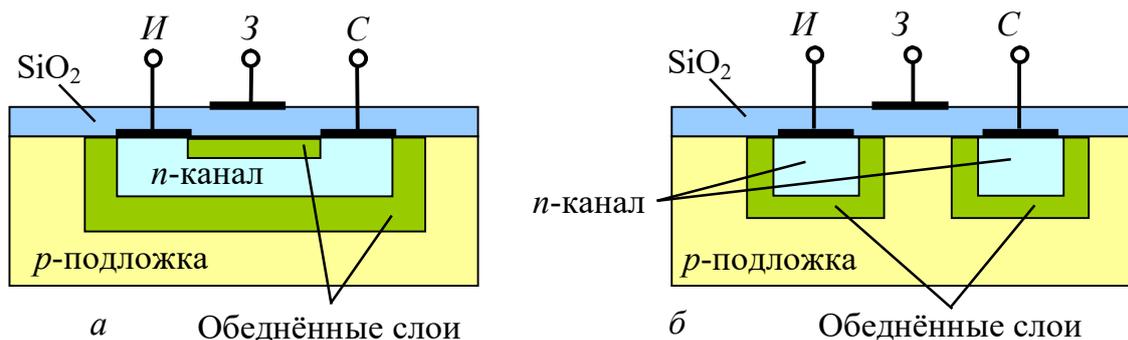


Рис. 10.16. Структура МДП-транзистора:
a – со встроенным каналом; *б* – с индуцированным каналом

Параметры и характеристики полевого МДП-транзистора соответствуют параметрам и характеристикам полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом.

Перед биполярными полевые транзисторы имеют существенные преимущества, к которым относятся большое входное сопротивление, малый уровень собственных шумов, незначительное влияние температуры на усилительные свойства.

10.2.5. Классификация электронных устройств

Полупроводниковые приборы широко применяются в различных устройствах автоматики, телемеханики, обработки информации и т.д. По своим функциональным задачам электронные устройства можно условно разделить на три группы:

- преобразовательные, в том числе выпрямительные;
- усилительные;
- импульсные, в том числе логические.

Преобразовательные электронные устройства осуществляют преобразование напряжения и тока источника энергии в напряжение и ток, необходимые приёмнику энергии. Выпрямительные устройства служат для преобразования синусоидальных напряжений и токов в постоянные. Обратное преобразование реализуют инверторы, а изменение значений постоянного напряжения и частоты синусоидального тока – преобразователи напряжения и частоты. Преобразовательные устройства широко применяются в электроприводе, устройствах электросварки.

В усилительных электронных устройствах те или иные параметры сигналов увеличиваются до значений, необходимых для работы исполнительных органов различных механизмов (приёмников энергии).

С помощью импульсных и логических электронных устройств создают системы управления. Первые обеспечивают необходимую временную программу, а вторые – необходимую логическую программу совместной работы отдельных частей объекта управления.

Контрольные вопросы и задания

1. Какое устройство называют полупроводниковым диодом? Как изображают полупроводниковый диод на электрической схеме?
2. Изобразите вольт-амперную характеристику полупроводникового диода и перечислите параметры, характеризующие его нагрузочную способность.
3. Для чего применяют полупроводниковые стабилитроны? Изобразите схему включения стабилитрона в цепь.
4. Каково устройство биполярных транзисторов? Приведите обозначение *n-p-n*-транзистора и *p-n-p*-транзистора на схеме.
5. Дайте определение процессов инжекции и экстракции.
6. Объясните принцип действия биполярного транзистора.
7. Перечислите и дайте характеристику режимов работы биполярных транзисторов.
8. Перечислите основные параметры биполярного транзистора.
9. Какие схемы включения применяют для биполярных транзисторов? Перечислите области применения этих схем.
10. Изобразите и поясните базовые и коллекторные характеристики биполярного транзистора.
11. Что называют *h*-параметрами биполярного транзистора?
12. Как обозначают на схемах полевые транзисторы?
13. В чём заключается принцип действия полевых транзисторов с управляющим *p-n*-переходом?
14. Изобразите статические выходные и передаточные вольт-амперные характеристики полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом.
15. Перечислите основные параметры полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом.
16. Какую структуру имеют МДП-транзисторы?
17. Что называют тиристором? Каковы структура, обозначение и вольт-амперная характеристика диодного (триодного) тиристора?