

Лекция 4

Тема Элементы радиоэлектронных устройств

1.1 Диоды, p-n – переход

Понятие «диод» объединяет широкий круг приборов различного назначения с разными принципами действия. В начале XX в. появился электровакуумный диод - электронная лампа с двумя электродами: подогреваемым катодом и холодным анодом (рисунок 1). Такой диод пропускает ток только в одном направлении, так как носителями тока в вакууме являются испускаемые раскаленным заряд в области p-n - перехода катодом электроны. Вакуумный диод в настоящее время повсеместно вытеснен полупроводниковыми диодами и применяется лишь в высоковольтных выпрямителях (рентгеновские установки, источники напряжения для телевизионных трубок) и при некоторых физических измерениях, требующих полного отсутствия обратного тока.

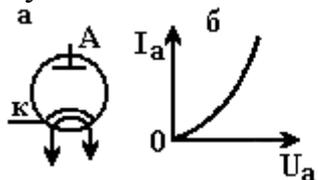


Рисунок 1- Обозначение (а) и вольт-амперная характеристика (б) диода

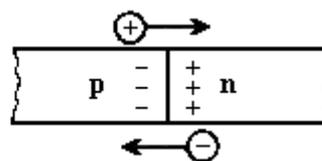


Рисунок 2- Пространственный заряд в области p-n-перехода вакуумного диода

Электронно-дырочный, или p-n-переход - это область полупроводников, в которой имеет место пространственное изменение типа проводимости от электронной (n) к дырочной (p). В n-области основными подвижными носителями электрического заряда являются электроны, в p-области - дырки. Находящиеся вблизи p-n-перехода подвижные носители заряда диффундируют в область с проводимостью, обусловленной носителями противоположного знака, и взаимно рекомбинируют. В результате у p-n-перехода образуется обедненный свободными носителями двойной слой пространственного заряда (рисунок 2). В p-области этот слой создается оставшимися после рекомбинации свободных носителей связанными с кристаллической решеткой отрицательными ионами акцепторной примеси, в n-области - положительными ионами донорной, и его электрическое поле противодействует дальнейшей диффузии. Разность потенциалов между p и n областями, или потенциальный барьер, составляет десятые доли вольта.

В полупроводниках постоянно образуются и рекомбинируют тепловые электронно-дырочные пары, создавая некоторое количество неосновных носителей (электронов в p-области и дырок в n-области). Находящиеся вблизи p-n-перехода неосновные носители, прежде чем успеют рекомбинировать с основными, могут попасть в поле потенциального

барьера и служить причиной дрейфового тока. При отсутствии внешних воздействий этот ток постоянно компенсируется диффузионным током основных носителей: устанавливается динамическое равновесие.

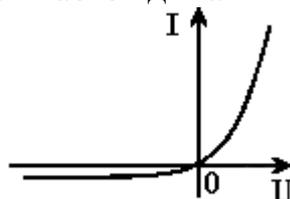


Рисунок 3 - Вольтамперная характеристика р - п-перехода

Если к р-области приложить отрицательный относительно п-области потенциал (обратное смещение), то его поле будет направлено по полю потенциального барьера. С увеличением напряжения обратного смещения диффузионный ток основных носителей убывает и далее совсем прекращается, а дрейфовый ток неосновных носителей (обратный ток) возрастает, быстро достигая насыщения (рисунок 3). Обратный ток ограничивается интенсивностью образования электронно-дырочных пар, поэтому он сильно зависит от температуры перехода.

Если к р-области приложить положительный относительно п-области потенциал (прямое смещение), то его поле будет направлено против поля потенциального барьера. С увеличением напряжения прямого смещения потенциальный барьер снижается и далее исчезает, а диффузия, подвижных носителей заряда через р-п-переход возрастает. Пересекающие переход носители становятся неосновными и рекомбинируют с основными носителями области, в которую они диффундировали. Пополнение рекомбинировавших основных носителей обеспечивается притоком их из внешней цепи - через р-п-переход протекает прямой ток. Этот ток называют диффузионным, так как он поддерживается за счет диффузии подвижных носителей заряда через р-п-переход.

На основе р-п-переходов изготавливают выпрямительные и импульсные диоды, стабилитроны, диоды СВЧ, фотодиоды, светоизлучающие диоды, полупроводниковые квантовые генераторы.

Выпрямительные диоды выпускают на токи до 500 А. Допустимые обратные напряжения лежат в диапазоне от 20 В до 2 кВ. Диоды для токов до 100 мА называются универсальными и могут иметь различные применения. Из-за большого времени жизни инжектированных дырок ($\sim 10^{-5}$ — 10^4 с) выпрямительные диоды применяются на частотах 50—2000 Гц.

Технологические приемы, такие, например, как легирование германия и кремния золотом, позволили создать быстродействующие импульсные диоды, имеющие время переключения до 10^{-10} с.

1.2 Некоторые специальные диоды

При больших обратных смещениях резко возрастает обратный ток вследствие пробоя р-п-перехода (рисунок 4). Пробой возникает при

достаточно сильном электрическом поле, когда неосновные носители ускоряются настолько, что ионизируют атомы полупроводника. Если мощность, выделяющаяся в р-п-переходе, поддерживается на допустимом уровне, диод сохраняет работоспособность и после пробоя. Такой пробой является основным рабочим режимом для диодов, называемых стабилитронами.

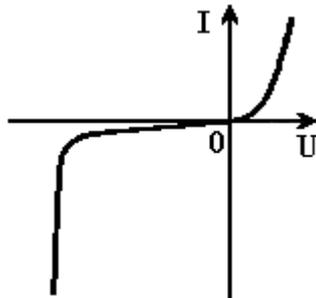


Рисунок 4 - Вольтамперная характеристика стабилитрона

При изменении величины обратного смещения (потенциального барьера) емкость между р и п областями (барьерная емкость изменяется. Это явление используется в диодах, называемых варикапами, в которых постоянная составляющая приложенного напряжения меняет условия прохождения переменной составляющей небольшой амплитуды.

Приборы, в которых используется зависимость емкости от мгновенных значений приложенного напряжения, называются варакторами.

Если р и п области сильно легированы, то при малых значениях приложенного напряжения существен вклад тока через р-п-переход, обусловленного туннельным эффектом. Диоды с использованием этого эффекта, или туннельные диоды, имеют вольтамперную характеристику с областью отрицательного сопротивления, в которой ток возрастает при уменьшении напряжения (рисунок 5, а). Туннельный пробой при обратном смещении положен в основу действия низковольтных стабилитронов.

При очень сильном легировании резкое нарастание обратного тока начинается сразу же с увеличением обратного напряжения от нуля и обратная ветвь оказывается круче прямой ветви (рисунок 5, б). Диоды с такой характеристикой называются обращенными и применяются в схемах с низкими уровнями напряжения.

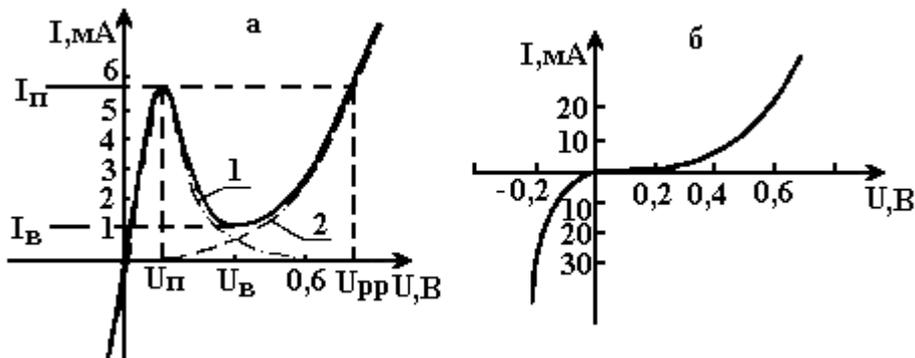


Рисунок 5 - Типичные вольтамперные характеристики туннельного (а) и обращенного (б) диодов: 1 - туннельный ток; 2 - диффузионный ток

1.3 Биполярный транзистор

Транзисторы подразделяют на два основных класса: биполярные и полевые.

Биполярным транзистором называют полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими электрическими переходами и тремя (или более) выводами, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда.

Имеется две разновидности биполярных транзисторов: бездрейфовые (диффузионные) и дрейфовые – они отличаются принципом работы. Рассмотрим бездрейфовые биполярные транзисторы. Конструктивно биполярный транзистор представляет собой пластину монокристалла полупроводника с электропроводностью p - или n - типа, по обеим сторонам которой вплавлены (или внесены другим образом) полупроводники, обладающие другим типом электропроводности. На границе раздела областей с разным типом электропроводности образуются $p-n$ - или $n-p$ - переходы. Каждая из областей, называемых эмиттером 1, коллектором 2 и базой 3, снабжается омическим контактом, от которого делается вывод Э, К и Б соответственно (рисунок 17.1). Транзистор укрепляют на кристаллодержателе и помещают в герметизированный корпус, в дно которого через стеклянные изоляторы проходят выводы. Корпус может быть металлическим, пластмассовым или стеклянным.

При рассмотрении процессов, происходящих в транзисторе, его удобно представлять плоскостными структурными схемами. Изображенный на рисунке 17.1 транзистор в виде структурной схемы показан на рисунке 17.2, а). Он имеет структуру $p-n-p$. На рисунке 17.2, б) показан транзистор с другим чередованием областей ($n-p-n$), на рисунке 17.2, в), г) – соответствующие структурной схеме условные обозначения транзисторов.

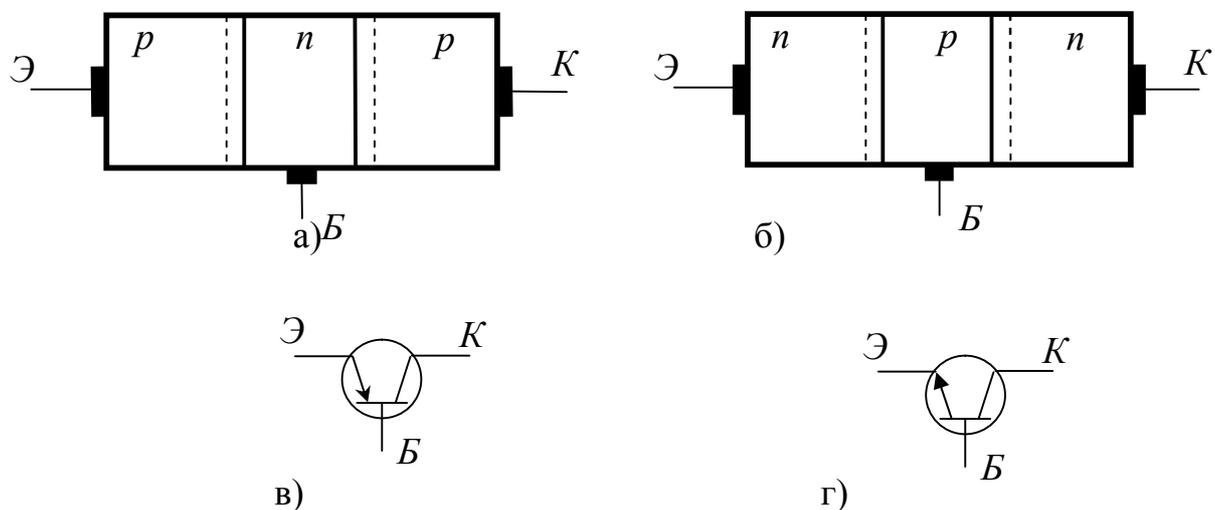


Рисунок 17.2

Разницы в принципе работы транзисторов обеих структур нет, но полярность подключения выводов к источнику питания противоположная. Выводы от каждой из областей называются так же, как и области: эмиттерный, базовый, коллекторный. Переход эмиттер – база называется эмиттерным, коллектор – база – коллекторным. Назначение эмиттера – инжекция (вспрыскивание) в область базы не основных для нее носителей заряда, для чего область эмиттера выполняют более насыщенной основными носителями (более низкоомной), чем область базы. Назначение коллектора – экстракция (втягивание) носителей из базы, в которой различают три области: активную (между эмиттером и коллектором, через нее приходят носители заряда в активном режиме работы транзистора), пассивную (между эмиттером и выводом базы) и периферическую (за выводом базы).

Транзисторы классифицируют по различным признакам: по мощности – малой, средней, большой; по диапазону рабочих частот – низкой, средней, большой; по методу изготовления – сплавные, микросплавные, диффузионные, планарные, мезаструктуры.

1.4 Схемы включения биполярного транзистора и режимы его работы

При включении транзистора в схему один из его выводов делают общим для входной и выходной цепей, поэтому схемы включения бывают: общей базой (ОБ) (рисунок 17.3, а)); общим эмиттером (ОЭ) (рисунок 17.3, б)); общим коллектором (ОК) (рисунок 17.3, в)). Относительно общего вывода, на котором считают $\varphi = 0$, измеряют напряжения входной и выходной цепей транзистора. Наибольшее применение имеет схема включения с ОЭ. Физические процессы в транзисторе удобнее рассматривать на примере схемы ОБ.

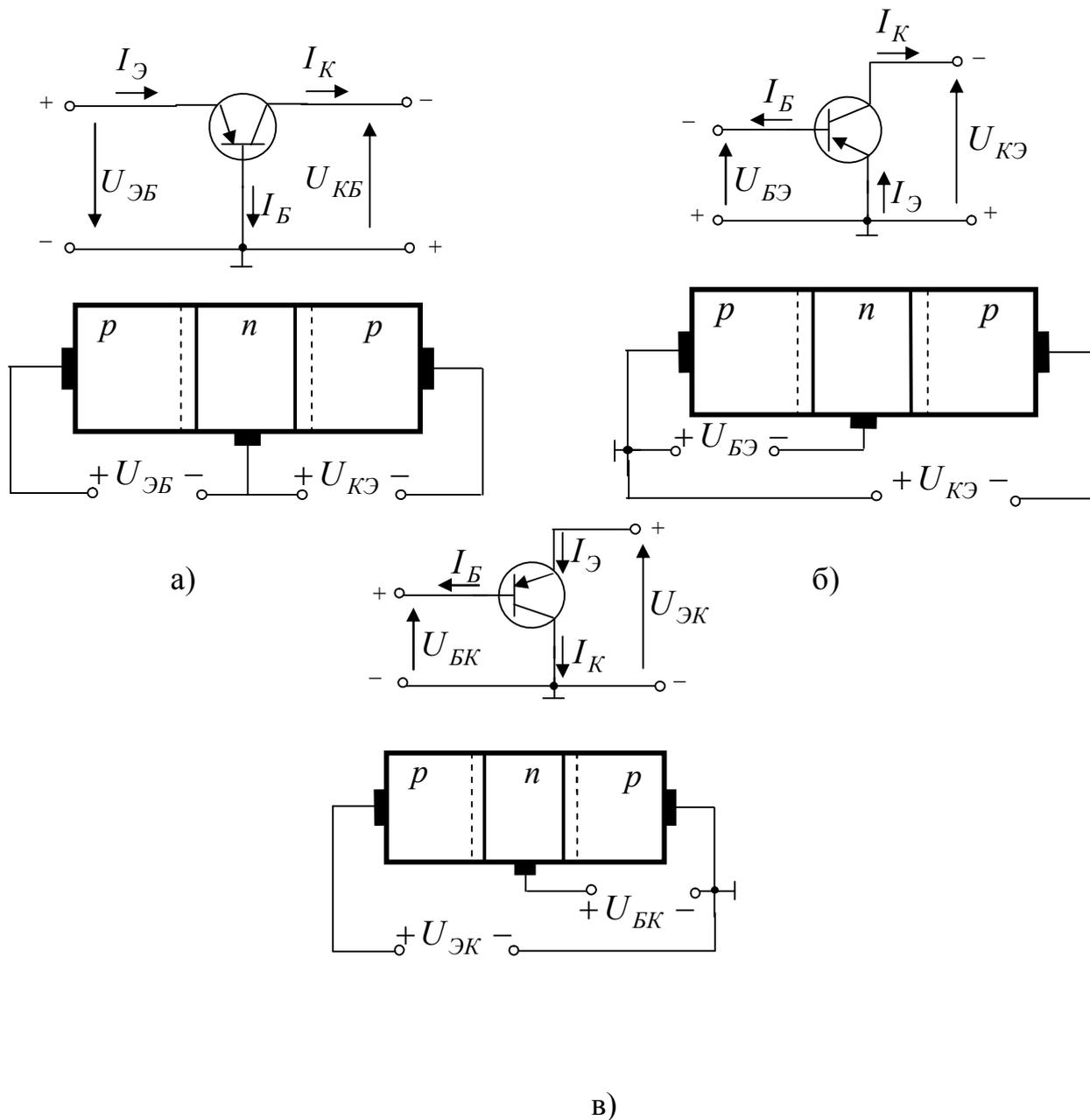


Рисунок 17.3

В зависимости от смещения, созданного на эмиттерном и коллекторном $p-n$ -переходах, транзистор может работать в трех режимах. Если один переход смещен в прямом направлении, а другой – в обратном, режим называют активным (рисунок 17.4, а)). Если в прямом направлении включен эмиттерный переход, а коллекторный – в обратном, такое включение называют нормальным (рисунок 17.4, б)). Если смещение на $p-n$ -переходах противоположное, включение называют инверсным (рисунок 17.4, в)). В последнем случае коллектор выполняет роль эмиттера, а эмиттер – роль коллектора. Активный режим используется в усилительных схемах, в схемах генерирования, где транзистор выполняет функции активного

элемента схемы. Если оба $n-p$ -перехода смещены в обратном направлении, транзистор работает в режиме отсечки. Если оба $n-p$ -перехода смещены в прямом направлении, транзистор работает в режиме насыщения. Режимы отсечки и насыщения используют в ключевых режимах работы транзистора: режим отсечки соответствует состоянию «отключено», режим насыщения – «включено». На рисунке 17.3 знаки потенциалов выводов даны для активного режима.

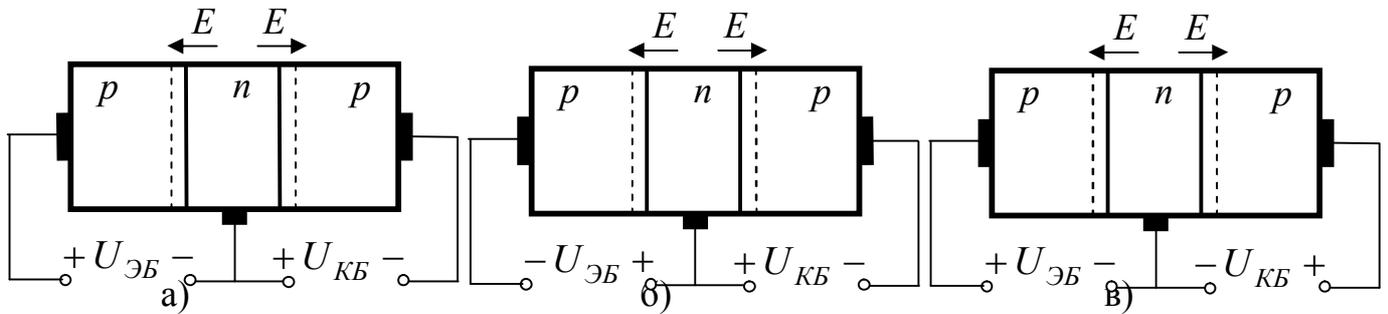


Рисунок 17.4

1.5 Усилительные свойства биполярного транзистора

Биполярный транзистор обладает свойством усиливать электрический входной сигнал, благодаря чему его можно использовать в качестве активного элемента. Под усилением сигнала обычно подразумевается усиление мощности полезного сигнала, которое можно наблюдать при изменении или тока, или напряжения, или того и другого. В зависимости от схемы включения (ОБ, ОЭ, ОК) транзистор усиливает либо ток, либо напряжение, либо то и другое.

Схема с общей базой. В такой схеме значение тока коллектора близко к значению тока эмиттера, т. е. усиления по току не происходит. Однако в этом случае имеется усиление по напряжению и, следовательно, по мощности. Покажем это. В активном режиме коллекторный переход смещен в обратном направлении, его потенциальный барьер высок, поэтому инжекция дырок из коллектора в базу невозможна. Чтобы инжекция не происходила и при включении в коллекторную цепь резистора нагрузки с высоким сопротивлением R_K , необходимо, чтобы при этом не изменился знак потенциала коллектора.

Поскольку сопротивления эмиттерного и коллекторного переходов, а также нагрузки включены последовательно и ток через них почти одинаков, небольшое изменение тока эмиттера вызовет небольшое изменение напряжения в эмиттерной цепи, тогда как в коллекторной цепи это изменение будет весьма значительным, если R_K велико. В этом случае напряжение, а, следовательно, и мощность возрастут во много раз. В самом деле, изменение напряжения на эмиттере на $\Delta U_{Э}$, вызовет изменение

эмиттерного тока на $\Delta I_{\mathcal{E}} = \Delta U_{\mathcal{E}} / R_{\mathcal{E}}$. Ток коллектора изменится практически на такое же значение: $\Delta I_K \approx \Delta I_{\mathcal{E}}$, а напряжение на нагрузке изменится на величину $\Delta U_K = R_K \Delta I_K \approx R_K \Delta I_{\mathcal{E}}$. Если подставить в ΔU_K значение $\Delta I_{\mathcal{E}}$, то $\Delta U_K = R_K \Delta U_{\mathcal{E}} / R_{\mathcal{E}}$, откуда видно, что приращение напряжения на R_K больше приращения напряжения в эмиттерной цепи в $R_K / R_{\mathcal{E}}$ раз.

А так как $R_K \gg R_{\mathcal{E}}$, то $\Delta U_K \gg \Delta U_{\mathcal{E}}$.

Приращение входной мощности $\Delta P_{BX} = R_{\mathcal{E}} \Delta I_{\mathcal{E}}^2$, а приращение выходной мощности $\Delta P_{ВЫХ} = R_K \Delta I_K^2 \approx R_K \Delta I_{\mathcal{E}}^2 = \frac{R_K}{R_{\mathcal{E}}} \Delta P_{BX}$ — оно больше ΔP_{BX} в $R_K / R_{\mathcal{E}}$ раз. Следовательно, $\Delta P_{ВЫХ} \gg \Delta P_{BX}$.

При работе транзистора в усилительном режиме на его вход подается переменный сигнал, который нужно усилить. Напряжение источника питания постоянно, но переменное напряжение, подаваемое на коллектор (даже малое), приводит к большим изменениям (колебаниям) переменного напряжения сигнала на резисторе R_K , т. е. в схеме происходит усиление малого переменного входного сигнала.

Схема с ОЭ. Здесь происходит усиление и по току, и по напряжению. Входным током является ток базы, значительно меньший тока эмиттера. Изменяя входное напряжение, меняем высоту потенциального барьера и число основных носителей заряда эмиттера через базу и соответственно через коллектор. Так как в базу от источника поступает меньше носителей, чем инжектируется из эмиттера в базу и коллектор, то незначительное увеличение тока во входной цепи вызывает существенное изменение тока в выходной цепи.

Таким образом, транзистор, включенный по схеме с ОЭ, характеризуется большим усилением по току. При этом имеется и усиление по напряжению: так как выходное сопротивление велико, в цепь коллектора можно включить резистор R_K с большим сопротивлением, напряжение на котором будет больше, чем входное. Соответственно происходит и усиление по мощности.

Схема с ОК. В схеме с ОК происходит усиление по току и по мощности, усиления по напряжению нет.

1.6 Статические характеристики биполярного транзистора

Статические характеристики описывают взаимосвязь между входными и выходными токами и напряжениями транзистора, когда в цепи коллектора нет нагрузки. Эти характеристики используют при практических расчетах схем на транзисторах. Можно составить ряд семейств таких характеристик, но наиболее употребляемыми являются входные $I_{BX} = f(U_{BX})$ при $U_{ВЫХ} = const$ и выходные $I_{ВЫХ} = f(U_{ВЫХ})$ при $I_{BX} = const$.

Входные и выходные статические характеристики для схемы с ОБ

Семейство входных статических характеристик представляет собой зависимости $I_{\text{Э}} = f(U_{\text{ЭБ}})$ при $U_{\text{КБ}} = \text{const}$ (рисунок 17.7, а)). По виду эти характеристики напоминают прямые ветви вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов. При небольших напряжениях ток изменяется по экспоненциальному закону, с ростом напряжения характер зависимостей становится прямолинейным. При $U_{\text{КБ}} = 0$ характеристики совпадают с характеристикой $p-n$ -перехода, включенного в прямом направлении.

При увеличении абсолютного значения напряжения на коллекторе ($|U_{\text{КБ}}| > 0$) кривые незначительно смещаются влево и вверх и располагаются достаточно плотно, так как влияние $U_{\text{КБ}}$ на ток $I_{\text{Э}}$ мало. Оно проявляется только в том, что при повышении $|U_{\text{КБ}}|$ увеличивается смещение коллекторного перехода, т. е. уменьшается толщина базы (на рисунке 17.7, а)) расстояние между кривыми для разных значений $U_{\text{КБ}}$ показано значительно большим, чем реальное).

Уменьшение толщины базы вызывает увеличение градиента концентрации неосновных носителей заряда базы (дырок, инжектированных из эмиттера), поэтому скорость прохождения дырками базы увеличивается, а следовательно, растет и ток эмиттера.

Следует обратить внимание на то, что при $U_{\text{ЭБ}} = 0$ и $U_{\text{КБ}} \neq 0$ ток эмиттера не равен нулю. В этом случае транзистор работает в режиме отсечки ($U_{\text{КБ}} < 0$) или насыщения ($U_{\text{КБ}} > 0$).

Входное сопротивление транзистора в схеме с ОБ $R_{\text{ВХ}} = dU_{\text{ЭБ}} / dI_{\text{Э}}$ (при $U_{\text{КБ}} = \text{const}$) очень мало и составляет единицы — десятки Ом, так как небольшое изменение напряжения эмиттера значительно влияет на высоту потенциального барьера эмиттерного перехода, включенного в прямом направлении, и, следовательно, на ток эмиттера.

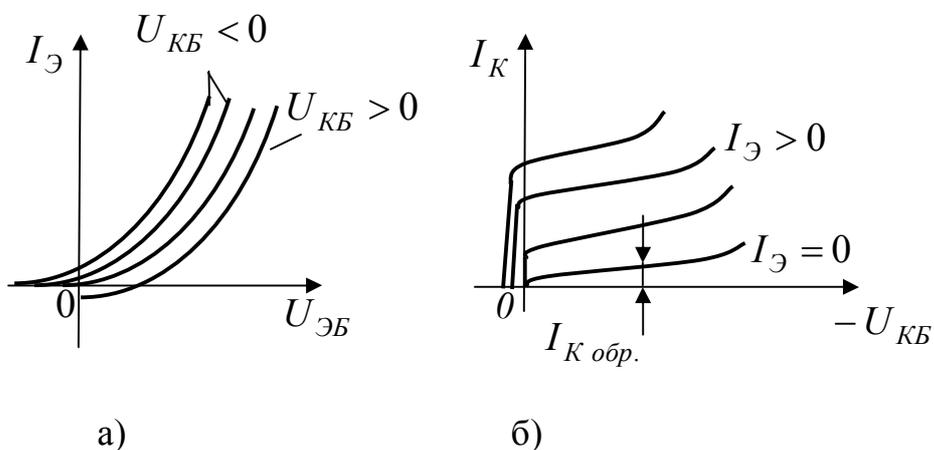


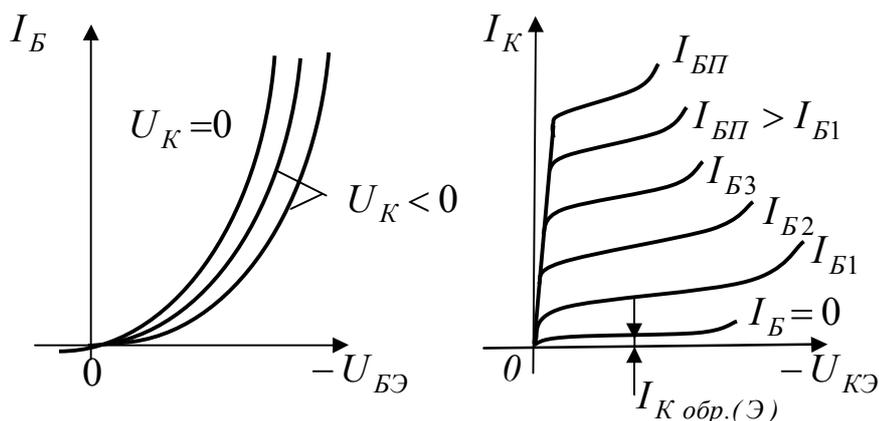
Рисунок 17.7

Семейство выходных статических характеристик представляет собой зависимость $I_K = f(U_{KB})$ при $I_{\mathcal{E}} = const$ и показано на рисунке 17.7, б).

При увеличении тока эмиттера ток коллектора увеличивается при заданном напряжении на коллекторе. При $I_{\mathcal{E}} = 0$ через коллектор проходит обратный ток коллекторного перехода $I_{K\text{обр.}}$, который практически не зависит от напряжения на коллекторе. При напряжении на коллекторе, равном нулю ($U_{KB} = 0$), $I_K \neq 0$, так как ток эмиттера в этом случае не равен нулю. При прямом напряжении на коллекторном переходе ($U_{KB} > 0$) ток с изменением напряжения резко меняется -транзистор работает в режиме насыщения.

Выходное сопротивление в схеме с ОБ $R_{ВЫХ} = dU_{KB} / dI_K$ (при $I_{\mathcal{E}} = const$) очень велико, оно достигает единиц мегаом, так как изменение напряжения на коллекторе почти не влияет на ток коллектора, значение которого определяется током эмиттера и обратным током коллекторного перехода $I_{K\text{обр.}}$. На значение $I_{K\text{обр.}}$ напряжение коллектора влияния не оказывает.

Входные и выходные статические характеристики транзистора для схемы с ОЭ. Семейство входных статических характеристик представляет собой зависимости $I_B = f(U_{БЭ})$ при $U_{КЭ} = const$ и показано на рисунке 17.8, а). Ток базы представляет собой алгебраическую сумму токов, один из которых вызван рекомбинацией носителей заряда эмиттера и базы (он пропорционален току эмиттера), другой является обратным током коллекторного перехода. Чем больше напряжение $U_{БЭ}$, тем больше ток базы, так как при увеличении прямого напряжения на эмиттерном переходе снижается потенциальный барьер. Преодолеть его в этом случае может большее число основных носителей заряда эмиттера (дырок), и большее число их сможет рекомбинировать с электронами базы. Рекомбинационная составляющая тока базы, являясь частью тока эмиттера (хотя и незначительной), определяет характер входной характеристики, который близок к характеру входной характеристики для схемы с ОБ.



а)

б)

Рисунок 17.8

При увеличении абсолютного значения напряжения на коллекторе $|U_{КЭ}|$ ток базы уменьшается, характеристики смещаются вправо от характеристики при $U_{КЭ} = 0$. Это объясняется тем, что ширина коллекторного перехода увеличивается, а поскольку он находится в основном в базе, ширина базы уменьшается, что вызывает уменьшение рекомбинационной составляющей тока базы.

Входное сопротивление транзистора, включенного по схеме с ОЭ, $R_{ВХ} = dU_{БЭ} / dI_B$ (при $U_{КЭ} = const$) сравнительно мало, но гораздо больше, чем в схеме с ОБ (если считать $\Delta U_{БЭ} = \Delta U_{ЭБ}$, то изменение тока базы ΔI_B будет значительно меньшим, чем изменение тока эмиттера $\Delta I_Э$ в схеме с ОБ).

Семейство выходных статических характеристик представляет собой зависимости $I_K = f(U_{КЭ})$ при $I_B = const$ и показано на рисунке 17.8, б). Выходные характеристики не пересекают оси ординат и практически сходятся в начале координат, так как при напряжении на коллекторе, равном нулю, ток коллектора практически равен нулю. В начальной части характеристики имеют большую крутизну. Это объясняется тем, что при напряжениях на коллекторе $U_{КЭ}$, меньших по абсолютному значению напряжения на базе $U_{БЭ}$, коллекторный переход включен в прямом направлении (напряжение на коллекторном переходе равно $|U_{КЭ}| - |U_{БЭ}|$; см. рисунок 17.3, б)). Поэтому достаточно незначительно изменить напряжение $U_{КЭ}$, чтобы ток I_K сильно изменился.

Этот участок характеризуется малым выходным сопротивлением $R_{ВЫХ} = \Delta U_{КЭ} / \Delta I_K$. На участке $|U_{КЭ}| > |U_{БЭ}|$ коллекторный переход смещен в обратном направлении, выходное сопротивление велико и составляет единицы – десятки килоом. При разомкнутой цепи базы в цепи коллектора проходит обратный ток, равный $I_{K\text{обр.}(Э)} = (1 + \beta_{cm}) I_{K\text{обр.}}$.