

Лекция №6

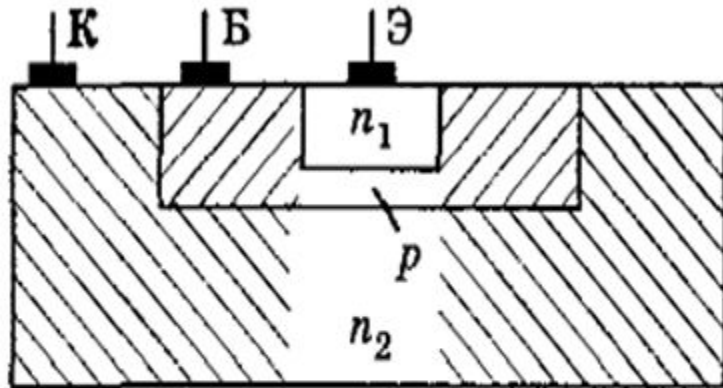
Тема: БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

1. Определение

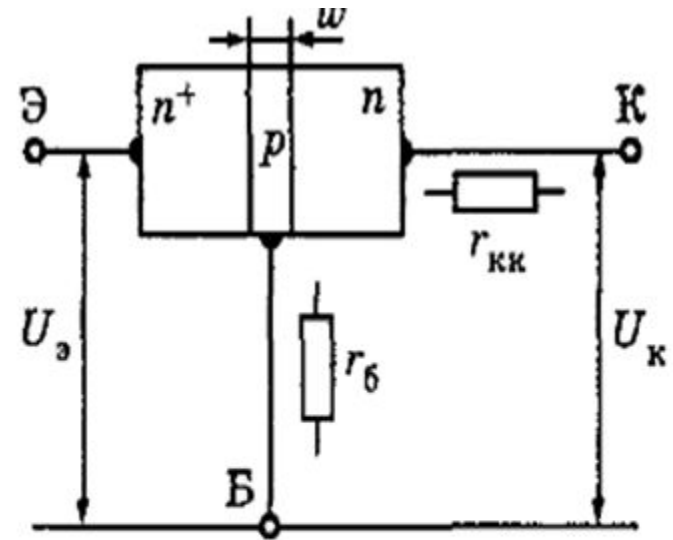
Биполярным транзистором называют электропреобразовательный прибор, имеющий два $p-n$ перехода, пригодный для усиления мощности электрических сигналов. По принципу действия транзисторы делятся на: биполярные и полевые. В работе биполярных транзисторов используются носители обеих полярностей (дырки и электроны), что и отражено в их названии. В полевых (униполярных) транзисторах используется движение носителей одного знака.

Особенность биполярного транзистора состоит в том, что между его электронно-дырочными переходами существует взаимодействие — ток одного из переходов может управлять током другого.

Структура биполярного транзистора



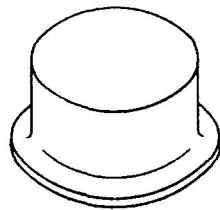
а)



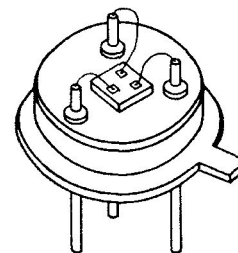
б)

Структура биполярного транзистора:

а — реальная; б — идеализированная (без пассивных областей)

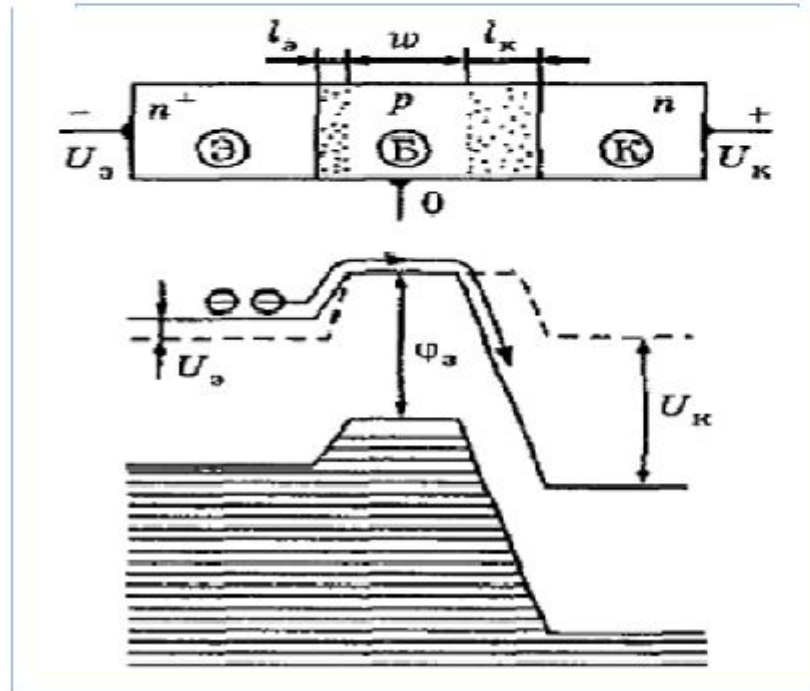
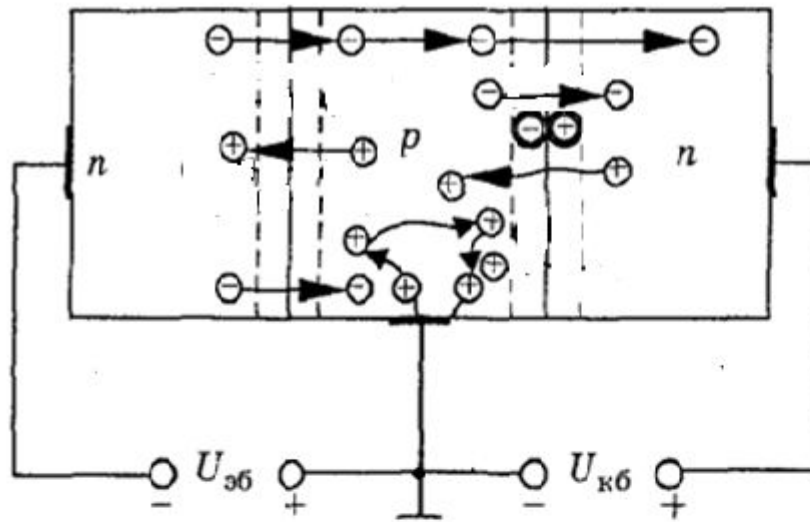


Крышка корпуса



Ножка корпуса

2. Принцип действия биполярного транзистора



При увеличении $U_{эб}$ снижается потенциальный барьер эмиттерного перехода, а так как концентрация электронов в эмиттере значительно больше концентрации дырок в базе, то происходит инжекция электронов из эмиттера в базу и дырок из базы в эмиттер. Это вызывает протекание токов инжекции: $I_{эп}$ — электронного и $I_{эр}$ — дырочного. Так как число дырок в области базы значительно меньше количества электронов в области эмиттера, то $I_{эр} \ll I_{эп}$.

Коэффициент инжекции или эффективность эмиттерного перехода

$$\gamma = \frac{I_{эн}}{I_{эн} + I_{эр}},$$

который показывает, какую долю от общего тока эмиттера составляет ток инжектированных в базу носителей заряда (в данном случае электронов). На практике коэффициент инжекции оказывается близким к единице ($\gamma = 0,98 \dots 0,995$). Дырки, инжектированные из области базы в область эмиттера, полностью рекомбинируют. В дальнейшем этот процесс не рассматривается, поскольку инжекция электронов из эмиттера в базу является доминирующей.

Процесс переноса неосновных носителей через базу характеризуется коэффициентом переноса

$$\varepsilon = \frac{I_{кп}}{I_{эн}},$$

величина которого зависит от ширины базы, диффузионной длины носителей и близка к единице: $\varepsilon = 0,988...0,995$.

Экстракция электронов может сопровождаться ударной ионизацией атомов полупроводника и лавинным умножением носителей заряда в коллекторном переходе. Процесс умножения носителей оценивается коэффициентом лавинного умножения

$$M = \frac{I'_{кп}}{I_{эн}}.$$

В связи с этим ток коллектора, вызванный инжекцией основных носителей заряда через эмиттерный переход, равен

$$I_{к\text{ упр}} = \alpha M I_{э},$$

где $\alpha = \varepsilon M$ — статический коэффициент передачи тока эмиттера.

Кроме управляемого тока коллектора, который зависит от количества носителей, инжектированных из эмиттера в базу и экстрагированных из базы в коллектор с учетом коэффициента

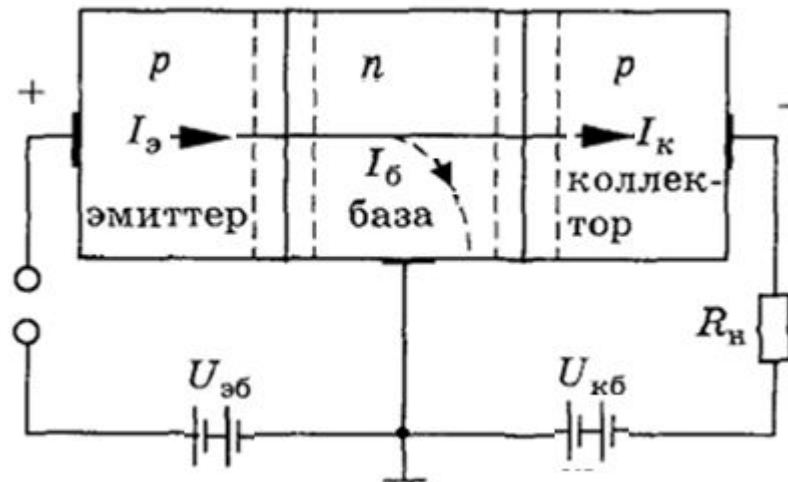
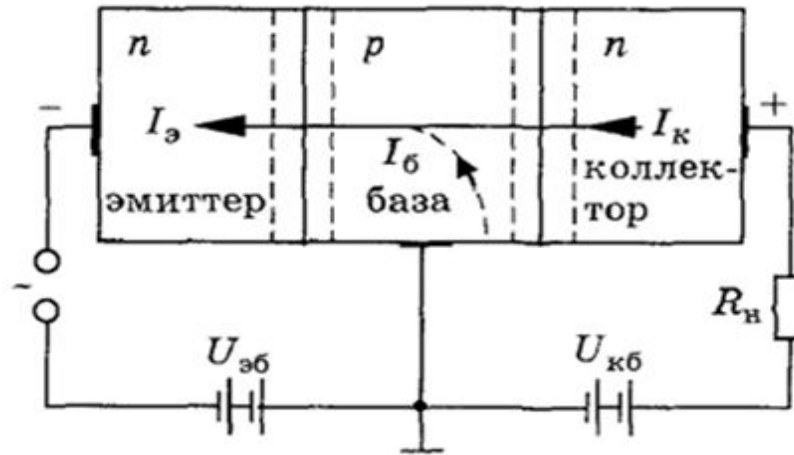
лавинного размножения, протекает обратный неуправляемый ток $I_{кбо}$.

Причина появления этого тока обусловлена дрейфом неосновных носителей базы и коллектора к обратносмещенному коллекторному переходу и их экстракцией через него. Этот ток имеет такую же природу, как и обратный ток полупроводникового диода. Поэтому его называют обратным током коллекторного перехода.

Таким образом, принцип действия транзистора основан на следующих физических процессах:

- 1) инжекции носителей через прямосмещенный эмиттерный переход;
- 2) рекомбинации и диффузионном переносе носителей через область базы от эмиттерного к коллекторному переходу;
- 3) экстракции носителей через обратносмещенный коллекторный переход.

4. Направления токов в биполярном транзисторе n-p-n и p-n-p ТИПОВ



Ток эмиттера $I_{\text{э}}$ имеет две составляющие — электронную $I_{\text{эн}}$ и дырочную $I_{\text{эр}}$:

$$I_{\text{э}} = I_{\text{эн}} + I_{\text{эр}}.$$

Ток коллектора имеет две составляющие — управляемый ток $I_{\text{к упр}}$ и обратный ток $I_{\text{кбо}}$:

$$I_{\text{к}} = \alpha I_{\text{э}} + I_{\text{кбо}}.$$

Обратный ток коллектора в цепи базы противоположен току рекомбинации

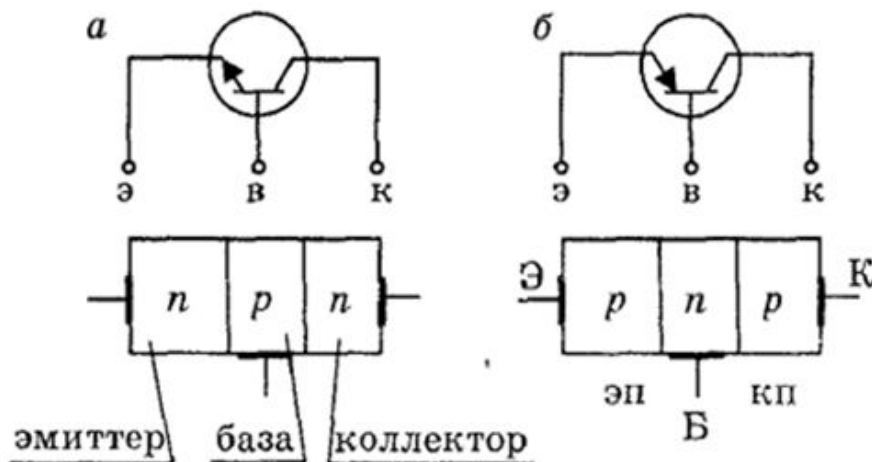
$$I_{\text{б}} = I_{\text{брек}} - I_{\text{кбо}}; \quad I_{\text{б}} = (1 - \alpha) I_{\text{э}} - I_{\text{кбо}}.$$

С учетом уравнений получаем

$$I_{\text{э}} = I_{\text{б}} + I_{\text{к}}. \quad I_{\text{к}} = \alpha I_{\text{э}} \quad I_{\text{б}} = (1 - \alpha) I_{\text{э}} \quad I_{\text{к}} = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} I_{\text{б}} = \beta I_{\text{б}}$$

Эти выражения устанавливают связь между токами транзистора согласно первому закону Кирхгофа через два параметра - коэффициенты передачи токов α и β .

Условно-графические обозначения биполярных транзисторах



Схематическое и условное графические изображения биполярных транзисторов *n-p-n*-типа (а) и *p-n-p*-типа (б)

По порядку чередования *p-n* переходов транзисторы бывают: *n-p-n* и *p-n-p* типов.

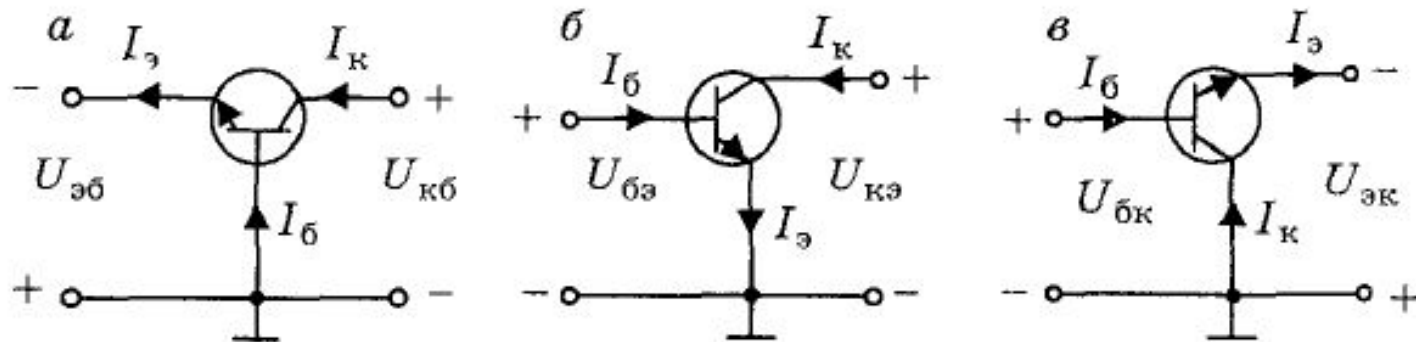
Область транзистора, расположенная между *p-n* переходами, называют базой. Одна из примыкающих к базе областей должна наиболее эффективно осуществлять

инжекцию носителей в базу, а другая — экстрагировать носители из базы.

Область транзистора, из которой происходит инжекция носителей в базу, называют эмиттером, а переход эмиттерным.

Область транзистора, осуществляющая экстракцию носителей из базы, называют коллектором, а переход коллекторным.

3. Схемы включения БТ

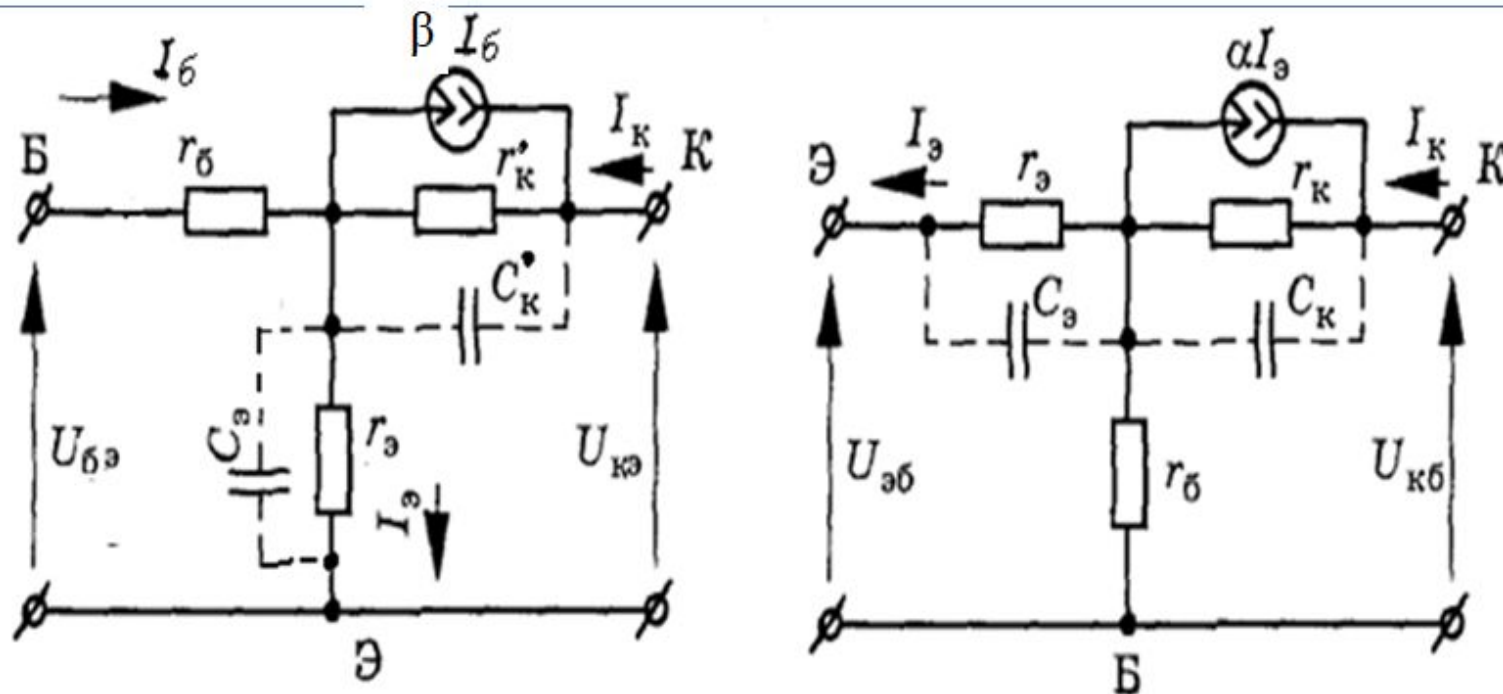


**Схемы включения биполярных транзисторов:
с общей базой (а); с общим эмиттером (б); с общим коллектором (в);**

В зависимости от того, какой электрод транзистора является общим для входной и выходной цепей, различают три схемы включения. Потенциал общего электрода принимается за нулевой (земля). Отсчет напряжений на остальных электродах производится относительно точки нулевого потенциала.

На рис. а показана схема включения транзистора с общей базой (ОБ), на рис. б — схема с общим эмиттером (ОЭ), на рис. в — схема с общим коллектором (ОК).

Эквивалентные схемы биполярного транзистора и малосигнальные дифференциальные параметры



**T-образная физическая эквивалентная схема транзистора
с ОЭ и с ОБ с генератором тока**

Малосигнальные параметры транзистора в схеме ОЭ

Параметры эквивалентной схемы $r_{э}$, $r_{б}$, $r_{к}$ отображают реальные сопротивления транзистора и определяются как отношения приращений напряжений в цепях транзистора к вызвавшим их приращениям токов (на низких частотах такие приращения играют роль переменных сигналов).

Согласно эквивалентной схеме

$$r_{э} = \left. \frac{dU_{бэ}}{dI_{э}} \right|_{I_{к}=\text{const}}$$

и составляет единицы-десятки Ом;

$$r_{к}^{\bullet} \cong \left. \frac{dU_{кэ}}{dI_{к}} \right|_{I_{э}=\text{const}} \quad r_{к} \cong \left. \frac{dU_{кб}}{dI_{к}} \right|_{I_{э}=\text{const}}$$

Сопротивление базы r_b имеет две составляющие: распределенное сопротивление базы r'_b и диффузионное сопротивление r''_b . Распределенное сопротивление базы r'_b представляет собой область базы, через которую происходит перенос носителей. С уменьшением толщины базы r'_b возрастает. Диффузионное сопротивление базы r''_b учитывает эффект Эрли, заключающийся во влиянии коллекторного напряжения на ширину базы за счет изменения ширины коллекторного перехода.

5. Статические характеристики БТ в схеме ОБ

Статические характеристики транзистора устанавливают функциональную связь между его токами и напряжениями. На практике наибольшее распространение получили статические характеристики, в которых в качестве независимых переменных приняты входной ток и выходное напряжение. Они описываются следующей системой уравнений:

$$U_{\text{ВХ}} = f(I_{\text{ВХ}} U_{\text{ВЫХ}}),$$

$$I_{\text{ВЫХ}} = f(I_{\text{ВХ}} U_{\text{ВЫХ}}).$$

Основными характеристиками этой системы уравнений являются:

а) входная $U_{\text{ВХ}} = f(I_{\text{ВХ}})$ при $U_{\text{ВЫХ}} = \text{const}$;

б) выходная $I_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВЫХ}})$ при $I_{\text{ВХ}} = \text{const}$.

Вспомогательные характеристики являются следствием входных и выходных:

в) характеристика прямой передачи $I_{\text{ВЫХ}} = f(I_{\text{ВХ}})$ при $U_{\text{ВЫХ}} = \text{const}$;

г) характеристика обратной связи $U_{\text{ВХ}} = f(U_{\text{ВЫХ}})$ при $I_{\text{ВХ}} = \text{const}$.

Входные ВАХ в схеме «общая база» (ОБ)

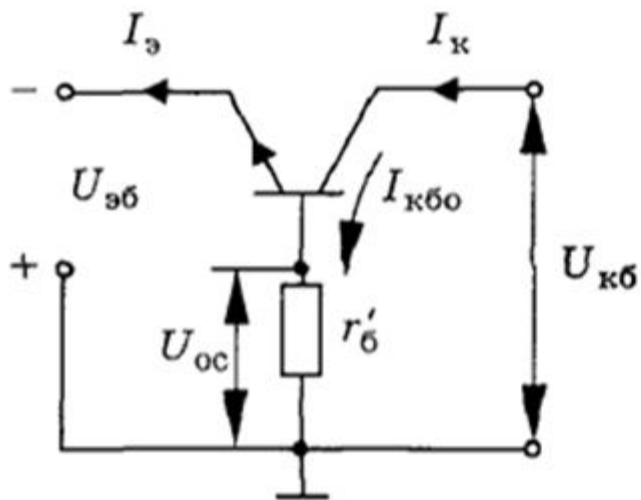


Рис. Включение транзистора в схеме с общей базой в активном режиме

При $U_{кб} = 0$ входная характеристика представляет собой прямую ветвь ВАХ прямосмещенного эмиттерного перехода и может быть описана уравнением

$$I_{э} = I_{эб0} \left(e^{\frac{qU_{эб}}{kT}} - 1 \right).$$

При увеличении по абсолютной величине напряжения на коллекторе входная характеристика смещается в область больших токов за счет уменьшения ширины базы (эффект Эрли) и увеличения градиента концентрации неосновных носителей в ней.

Это приводит к уменьшению рекомбинации носителей в базе и возрастанию тока эмиттера при неизменном напряжении $U_{эб}$. То, что коллекторное напряжение влияет на входную характеристику, свидетельствует о наличии в транзисторе внутренней обратной связи.

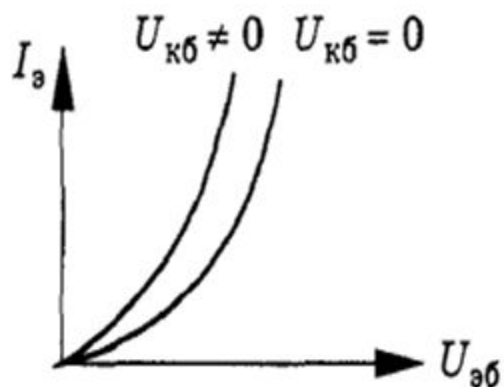


Рис. Семейство статических входных характеристик в схеме с ОБ

1) увеличение абсолютной величины коллекторного напряжения уменьшает ширину базы (эффект Эрли) и рекомбинацию носителей в ней. При неизменном напряжении на эмиттерном переходе происходит увеличение градиента концентрации неосновных носителей в базе, увеличивается коэффициент переноса, что и обуславливает увеличение тока эмиттера;

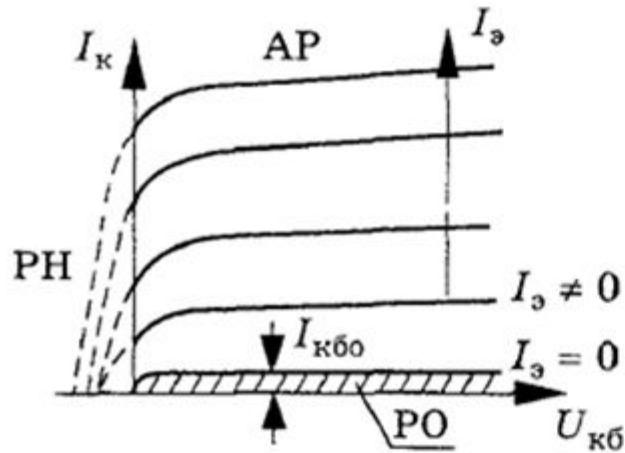
2) внутренняя обратная связь возникает за счет падения напряжения на распределенном сопротивлении базы

при протекании $I_{кб0}$, что приводит к увеличению результирующего напряжения на эмиттерном переходе.

Выходные характеристики в схеме «общая база» (ОБ)

Семейство выходных характеристик $I_K = f(U_{кб})$ при $I_э = \text{const}$ представлено на рис. и выражает зависимость выходного тока от выходного напряжения:

$$I_K = \alpha I_э - I_{кбо} \left(e^{\frac{qU_{кб}}{kT}} - 1 \right).$$



Семейство
статических выходных
характеристик в схеме с ОБ

Если $I_э = 0$, то выходная характеристика представляет собой характеристику обратного смещенного коллекторного перехода. Транзистор работает в режиме отсечки в области, расположенной ниже данной характеристики.

Если во входной цепи эмиттера задан ток $I_э$, то при $U_{кб} = 0$ в коллекторной цепи протекает ток

$I_K = \alpha I_э$, т.е. поля контактной разности потенциалов коллекторного

перехода достаточно для экстракции носителей из базы в коллектор. С увеличением абсолютного значения $U_{кб}$ ток I_K несколько возрастает за счет появления обратного тока $I_{кбо}$, а также некоторого увеличения коэффициента переноса, вызванного уменьшением толщины базы.

Режимы работы биполярных транзисторов

В зависимости от полярности внешних напряжений, подаваемых на электроды транзистора, различают следующие режимы его работы.

1. Активный режим — эмиттерный переход смещен в прямом направлении (открыт), а коллекторный — в обратном направлении (закрыт).

2. Режим отсечки — оба перехода смещены в обратном направлении (закрыты).

3. Режим насыщения — оба перехода смещены в прямом направлении (открыты).

4. Инверсный режим — коллекторный переход смещен в прямом направлении, а эмиттерный — в обратном. В таком режиме коллектор выполняет роль эмиттера, а эмиттер — роль коллектора. При инверсном включении параметры реального транзистора существенно отличаются от параметров при нормальном включении.

В активном режиме токи коллектора и эмиттера почти равны, а ток базы равен их разности. Коллекторный ток практически не зависит от напряжения на коллекторном переходе. Даже поля контактной разности потенциалов достаточно для экстракции всех электронов, достигших коллекторного перехода. Поэтому дифференциальное сопротивление коллекторного перехода

$$r_k = \frac{dU_{кб}}{dI_k} \text{ очень велико (переход включен в обратном направлении).}$$

В цепь коллектора можно включать нагрузку с достаточно большим сопротивлением R_n , практически не изменяя ток коллектора.

Дифференциальное сопротивление прямосмещенного

$$\text{эмиттерного перехода } r_{\text{э}} = \frac{dU_{\text{эб}}}{dI_{\text{э}}} \text{ очень мало: } r_{\text{э}} \ll r_k.$$

При изменении входного (эмиттерного) тока на $\Delta I_{\text{э}}$ практически на такую же величину возрастает коллекторный ток. Однако изменение потребляемой мощности в цепи эмиттера

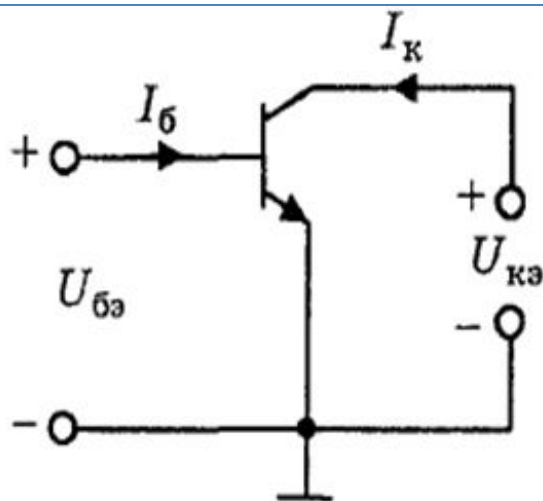
$$\Delta P_{\text{вх}} = \Delta I_{\text{э}}^2 r_{\text{э}}$$

значительно меньше изменения мощности в выходной цепи

$$\Delta P_{\text{вых}} = \Delta I_k^2 R_n \approx \Delta I_{\text{э}}^2 R_n,$$

т.е. транзистор способен управлять большой мощностью в коллекторной цепи при небольших затратах мощности в эмиттерной.

Входные и выходные статические характеристики БТ в схеме «общий эмиттер»



Включение транзистора в схеме с общим эмиттером

При отсутствии внешнего напряжения $U_{кэ} = 0$ входная характеристика представляет собой вольтамперную характеристику двух параллельно включенных $p-n$ переходов. Это соответствует режиму насыщения транзистора. Положительное напряжение, приложенное к коллекторному переходу, создает в коллекторной цепи прямой ток, который по направлению противоположен обычному току коллектора ($I_{к пр} = -I_к$). Поэтому ток базы представляет собой сумму

$$I_б = I_э - I_к = I_э + I_{к пр}$$

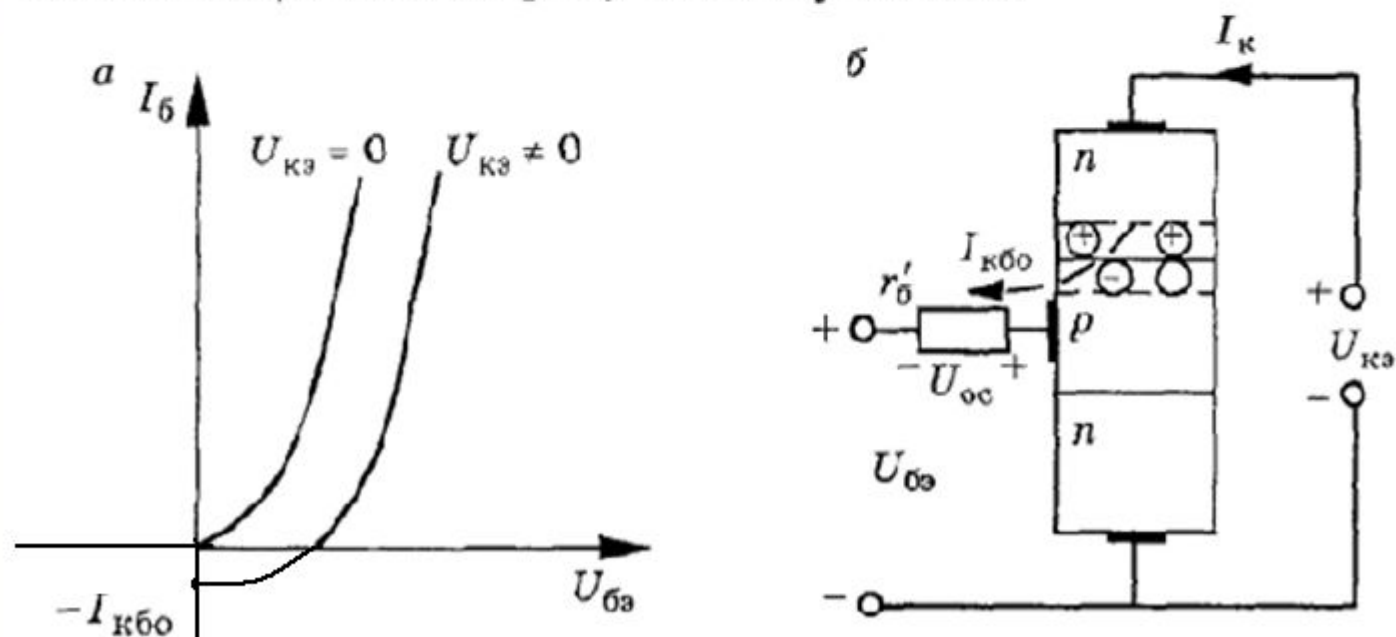
При увеличении напряжения $U_{кэ}$ коллекторный переход включается в обратном направлении и транзистор переходит в активный режим работы. В цепи базы протекает ток

$$I_{б} = I_{б \text{ рек}} - I_{кбо} = (1 - \alpha) I_{э} - I_{кбо} \dots$$

При $U_{бэ} = 0$ ток $I_{э} = 0$ и в цепи базы протекает ток

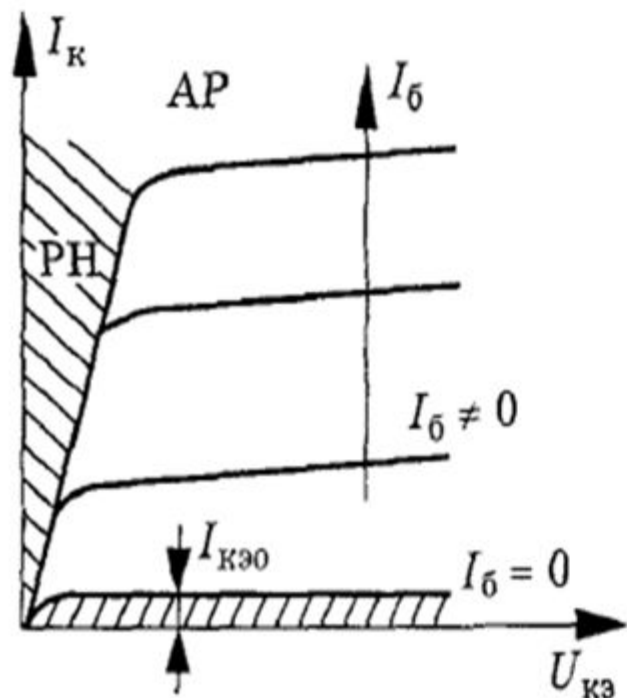
$$I_{б} = -I_{кбо}.$$

Увеличение $U_{бэ}$ приводит к росту рекомбинации носителей в базе, и при некотором напряжении $U_{бэ}$ ток базы становится равным нулю ($I_{б} = 0$), а характеристика смещается в сторону оси напряжений.



Семейство статических входных характеристик в схеме сОЭ (а) и схема включения транзистора сБ (б)

Выходные характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером представлены на рис. и выражают зависимость $I_K = f(U_{кэ})$ при $I_б = \text{const.}$



Семейство статических выходных характеристик в схеме с ОЭ

В схемах с ОЭ и ОК управляющим является входной ток — ток базы $I_б$, поэтому в этих схемах удобнее пользоваться коэффициентом передачи тока базы β

Установим связь между током базы и током коллектора исходя из условий

$$I_э = I_б + I_к \quad I_к = \alpha I_э + I_{кбо} \quad \text{Тогда}$$

$$I_к = \alpha (I_б + I_к) + I_{кбо};$$

$$I_к = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} I_б + \frac{I_{кбо}}{(1 - \alpha)}.$$

Обозначив $\frac{\alpha}{(1 - \alpha)} = \beta \gg 1,$

$$\frac{I_{кбо}}{(1 - \alpha)} = I_{кэо} = (\beta + 1)I_{кбо}, \text{ уравнение} \quad \text{представим в виде}$$

$$I_{к} = \beta I_{б} + (\beta + 1)I_{кбо},$$

где $\beta I_{б}$ — управляемая составляющая тока коллектора, зависящая от входного тока; $I_{кэо} = (\beta + 1)I_{кбо}$ — неуправляемая составляющая тока коллектора.

Параметр β называют статическим коэффициентом передачи тока базы, величина которого составляет десятки-сотни раз.

При токе базы, равном нулю, в коллекторной цепи протекает обратный ток, величина которого равна $I_{кэо}$, и выходная характеристика представляет собой характеристику обратнo-смещенного перехода. Транзистор работает в режиме отсечки в области, расположенной ниже данной характеристики.

При наличии входного тока базы и небольшого напряжения $|U_{кэ}| < |U_{бэ}|$ коллекторный переход открыт и транзистор работает в режиме насыщения, ток коллектора резко возрастает, что соответствует крутому восходящему участку выходных характеристик.

Если $|U_{кэ}| > |U_{бэ}|$, транзистор из режима насыщения переходит в активный режим. Рост коллекторного тока замедляется, характеристика идет более полого. Небольшой рост I_K на пологом участке обусловлен:

1) уменьшением ширины и тока базы I_B (уменьшается рекомбинация носителей в базе) при увеличении $U_{кэ}$. Для поддержания постоянного значения тока базы необходимо увеличивать $U_{бэ}$, что приводит к росту токов эмиттера и коллектора;

2) увеличением напряжения на коллекторном переходе, что приводит к росту ударной ионизации в нем и возрастанию тока коллектора. При больших значениях $U_{кэ}$ возможен электрический пробой $p-n$ перехода.

Классификация БТ по технологии

По применяемому материалу транзисторы классифицируются на германиевые, кремниевые и арсенид-галлиевые.

По технологии изготовления транзисторы бывают: сплавные, диффузионные, эпитаксиальные, планарные. Толщина базы делается значительно меньше диффузионной длины неосновных носителей в ней. При равномерном распределении примеси в базе внутреннее электрическое поле в ней отсутствует, и неосновные носители движутся вследствие процесса диффузии. Такие транзисторы называют диффузионными или бездрейфовыми. При неравномерном распределении примесей в базе имеется внутреннее электрическое поле, и неосновные носители движутся в ней в результате дрейфа и диффузии. Такие транзисторы называют дрейфовыми.

Кроме того, концентрация атомов примесей в эмиттере и коллекторе (низкоомные области) значительно больше, чем в базе (высокоомная область).

Площадь коллекторного перехода больше эмиттерного, что способствует увеличению коэффициента переноса носителей из эмиттера в коллектор.

Классификация БТ по мощности

По мощности, рассеиваемой коллекторным переходом, транзисторы бывают:

малой мощности ($P < 0,3$ Вт);

средней мощности ($0,3$ Вт $< P < 1,5$ Вт);

большой мощности ($P > 1,5$ Вт).

По частотному диапазону транзисторы делятся на:

низкочастотные ($f_{\text{пр}} < 3$ МГц);

среднечастотные (3 МГц $< f_{\text{пр}} < 30$ МГц);

высокочастотные (30 МГц $< f_{\text{пр}} < 300$ МГц);

сверхвысокочастотные ($f_{\text{пр}} > 300$ МГц).

Буквенно-графические обозначения

Обозначение биполярных транзисторов состоит из шести или семи элементов.

Первый элемент — буква или цифра, указывающая исходный материал: Г(1) — германий, К(2) — кремний, А(3) — арсенид галлия.

Второй элемент — буква, указывающая на тип транзистора: Т — биполярный, П — полевой.

Третий элемент — цифра, указывающая на частотные и мощностные свойства прибора.

Таблица

Классификация транзисторов по мощности и частоте

Частота	Мощность		
	малая	средняя	большая
Низкая	1	4	7
Средняя	2	5	8
Высокая	3	6	9

Четвертый, пятый (шестой) элементы — цифры, указывающие порядковый номер разработки.

Шестой (седьмой) элемент — буква, указывающая на разновидность транзистора из данной группы. Примеры обозначения транзисторов: КТ315А; КТ806Б; ГТ108А; КТ3126.