

ТРАНЗИСТОРЫ

Транзисторы - все полупроводниковые приборы, обладающие способностью усиливать мощность входного сигнала и имеющие не менее трех доступных выводов.

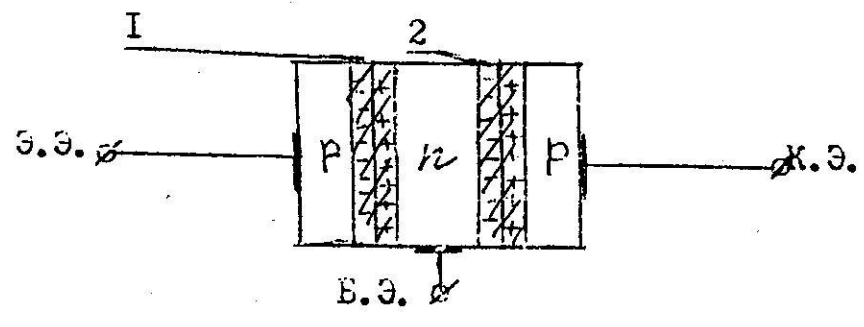
~~Транзистор представляет собой электропреобразовательный полупроводниковый прибор с одним или несколькими электрическими переходами, имеющий три или более выводов, пригодный для усиления мощности.~~

Термин «транзистор» образован соединением первых букв слова «transfer» (передача) и последних букв слова «resistor» (сопротивление).

В зависимости от числа выводов транзисторы делятся на полупроводниковые триоды и полупроводниковые тетроды. По принципу действия различают транзисторы, в которых используется инжекция носителей заряда через p-n-переход (бездрейфовые и дрейфовые), и транзисторы без инжекции (полевые). Инжекционные транзисторы называют также биполярными, так как в процессе переноса тока здесь участвуют два вида носителей заряда — основные и неосновные, а полевые — униполярными поскольку они работают только с основными носителями. Полевые транзисторы по типу управления делятся на транзисторы с p-n-переходом и с изолированным затвором. В бездрейфовых транзисторах неосновные носители переносятся через базовую область, главным образом, посредством диффузии, в то время как в дрейфовых транзисторах этот перенос осуществляется, главным образом, посредством дрейфа носителей под действием внутреннего электрического поля в базе. В полевых транзисторах поток основных носителей заряда дрейфует вдоль ускоряющего электрического поля в управляемом канале.

ТРИОД

Триод - имеет два p - n перехода.

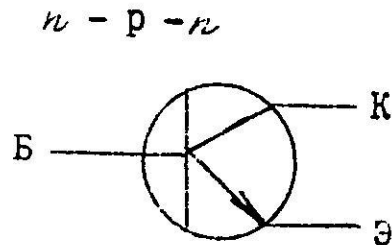
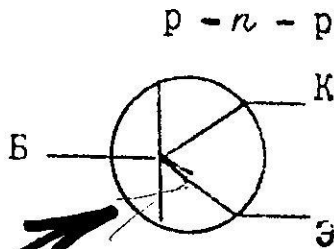


- 1 переход - эмиттерный переход,
- 2 переход - коллекторный переход.

Э.Э. и К.Э. - эмиттерный и коллекторный электрод.

Б.Э. - базовый электрод.

Эмиттер изготовлен на 2-3 пор. больше базы, коллектор меньше, чем эмиттер.



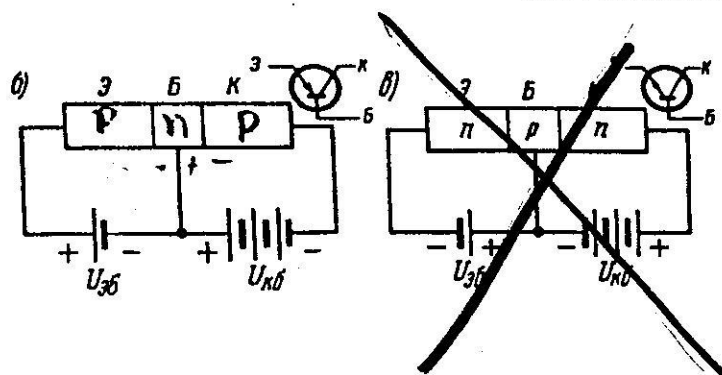
По конструкции современные транзисторы выполняют исключительно плоскостными; точечные транзисторы, вследствие ряда недостатков (главным образом, из-за нестабильности работы), в настоящее время не применяются и промышленностью не выпускаются.

Наконец можно классифицировать плоскостные транзисторы по технологическому признаку, а именно по типу их электрических переходов. По этому признаку транзисторы делятся на слывные, диффузионные, микросплавные, меза, эпитаксиальные, планарные, конверсионные, а также комбинированного типа.

На рис. ~~2~~ представлена схема включения бездрейфового плоскостного транзистора типа $p-n-p$ с двумя $p-n$ -переходами²⁾. Транзистор имеет три области: эмиттер Э с дырочной электропроводностью, базу Б с электронной электропроводностью и коллектор К с дырочной электропроводностью. Переход между эмиттером и базой называется эмиттерным, а между базой и коллектором - коллекторным. Общей точкой схемы является вывод базы.

²⁾ Направление стрелки в линии эмиттера указывает на направление движения дырочного тока.

Во внешней цепи между выводами эмиттера и базы включено малое прямое напряжение $U_{эб}$ порядка нескольких десятых долей вольта. Если пренебречь падением напряжения в областях эмиттера и базы, то это напряжение окажется приложенным к эмиттерному переходу и уменьшит высоту энергетического барьера в нем на величину $eU_{эб}$, создав тем самым возможность инжекции основных



ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ДИАГРАММЫ И ГОБОРАЗПРЕДЕЛЕНИЕ

В зависимости от полярности напряжений, приложенных к эмиттерному и коллекторному переходам триода, возможны четыре режима его работы: активный, отсечки, насыщения и инверсный. Активный режим используется при усилении малых сигналов; в этом режиме прямое напряжение подается на эмиттерный переход, а обратное — на коллекторный. В режиме отсечки к обоим переходам подводятся обратные напряжения, ток, протекающий через триод, в этом случае ничтожно мал; практически триод в режиме отсечки оказывается запертым. В режиме насыщения, наоборот, оба перехода находятся под прямым напряжением, ток в выходной цепи триода при заданном значении R_n максимален и практически не регулируется током входной цепи; в этом режиме триод полностью открыт. Последние два режима используются при работе триода в качестве переключателя; триод продолжительное время работает в этих режимах, в то время как активный режим существует в нем лишь в моменты включения и выключения. Наконец, в инверсном режиме эмиттер и коллектор меняются своими ролями; эмиттер выполняет функции коллектора, а коллектор, наоборот, — функции эмиттера.

Режимы работы /в зависимости от значений U /.

- I. Активный режим — эмиттерный переход включается на U_{np} , коллекторный переход закрыт большим $U_{обр}$.
- II. Режим отсечки — эмиттер и коллектор подключены $U_{обр}$.
- III. Режим насыщения — оба перехода открыты — U_{np} .
- IV. инверсный режим — эмиттер закрыт, коллектор открыт.

Зонная диаграмма. Рассмотрим работу плоскостного транзистора типа $p-n-p$, включенного по схеме с общей базой, в активном режиме. Такой транзистор содержит два параллельных $p-n-p$ -перехода, расположенных друг от друга на расстоянии, меньшем диффузионной длины неосновных носителей в базе. Явления на поверхности транзистора не учитываются.

носителей заряда через эмиттерный переход. Во внешней цепи между выводами коллектора и базы включено обратное напряжение $U_{кб}$ величиной от нескольких вольт до сотен вольт, которое прикладывается к коллекторному переходу и увеличивает в нем (на величину $U_{кб}$) высоту энергетического барьера, в результате чего его электрическое поле усиливается.

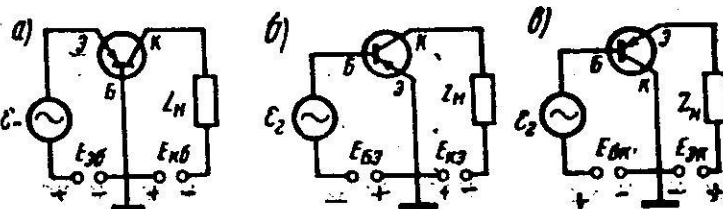
Базу выполняют в виде очень тонкой области толщиной примерно $10-25$ мкм, а в высокочастотных транзисторах — даже $1-2$ мкм. Обозначения напряжений в цепях транзистора снабжают двумя индексами, указывающими на электроды, между которыми включено данное напряжение, причем второй индекс всегда относится к общему электроду схемы.

На рис. 2.43в представлен полупроводниковый триод, имеющий n-p-n-структуру. В нем по сравнению с триодом p-n-p-структуры изменены полярности напряжений во внешних цепях для того, чтобы обеспечить прямое напряжение на эмиттерном переходе и обратное — на коллекторном.

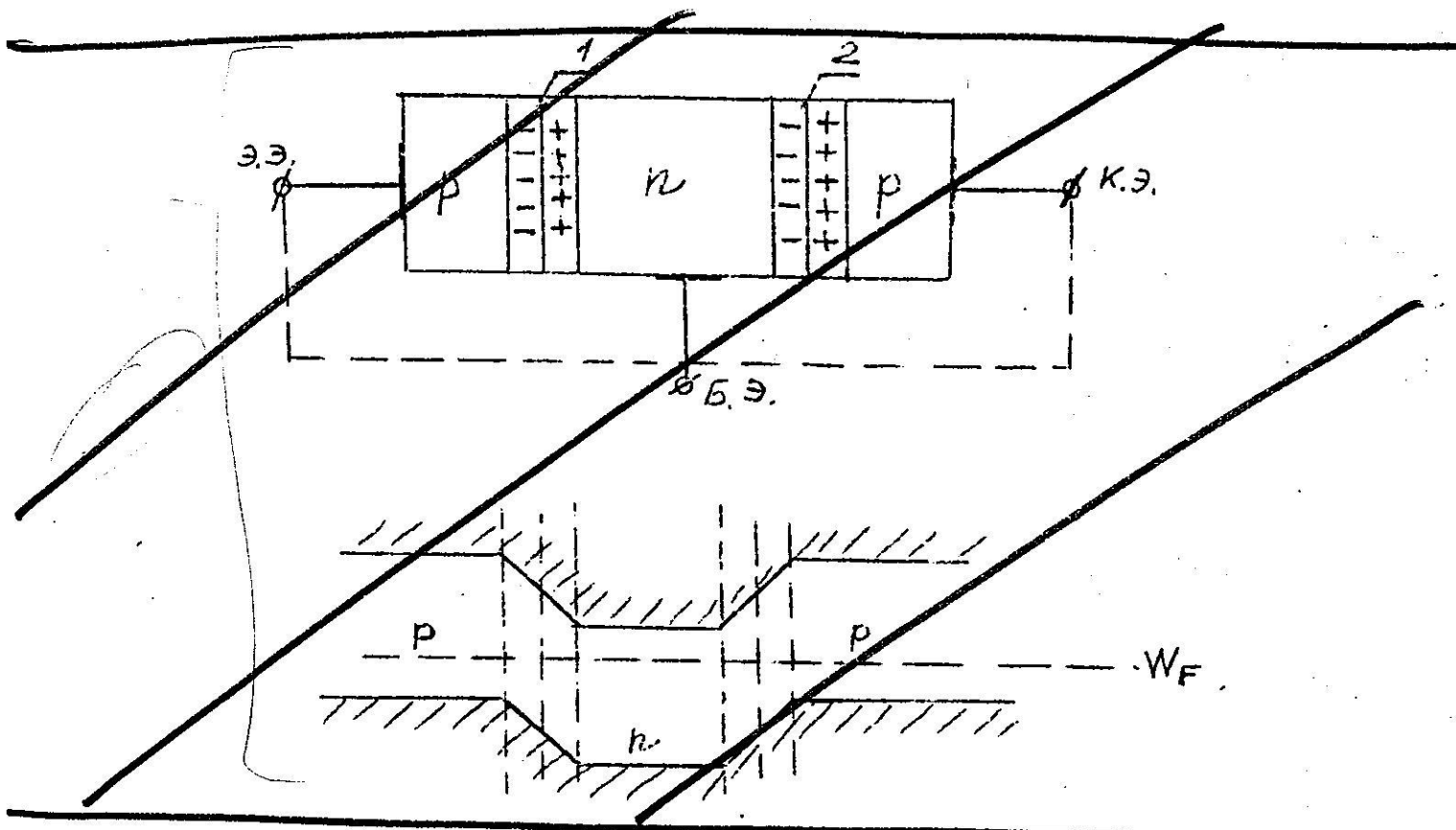
Существуют три схемы включения полупроводниковых триодов: с общей (или заземленной) базой ОБ, с общим (или заземленным) эмиттером ОЭ и с общим (или заземленным) коллектором ОК (рис. 2.44). Наиболее часто применяют схемы включения с общей базой и общим эмиттером. Во всех этих схемах полярность источ-

ников питания определяют из условия, чтобы к эмиттерному переходу было приложено прямое напряжение, а к коллекторному — обратное.

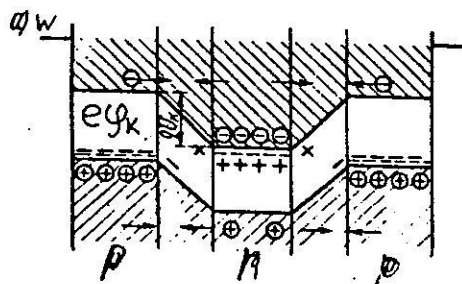
Рис. 2.44. Схема включения транзисторов
а) с общей базой; б) с общим эмиттером; в) с общим коллектором



Хотя напряжения в выходных цепях схем ОБ и ОЭ принято называть коллекторными, они не являются одинаковыми. Из рисунка 2.44б видно, что разность напряжений между выходом (коллектором) и входом (базой) схемы ОЭ $U_{кб} = -U_{кэ} - U_{бэ}$. Аналогично в схеме ОК разность напряжений между выходом (эмиттером) и входом (базой) $U_{бэ} = U_{эк} - U_{бк}$.



На рис. ~~.....~~ приведена зонная диаграмма транзистора для случая равновесия. Уровень Ферми во всех трех областях находится на одной высоте. Все энергетические уровни в *p*-областях, в том числе

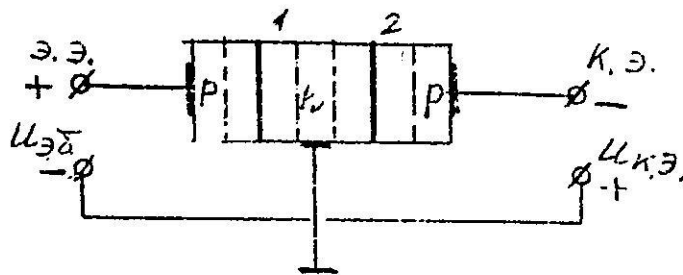


потолок валентной зоны W_B и дно зоны проводимости $W_{пр}$, выше соответствующих уровней в *n*-области на величину ~~.....~~ $e\varphi_k$.

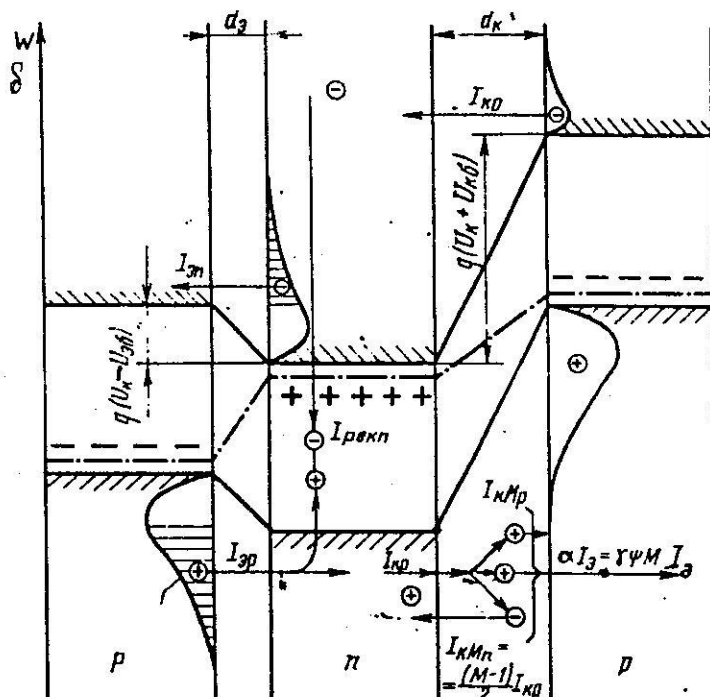
Как и при рассмотрении состояния равновесия в *p-n*-переходе (см. 2.9), можно заключить, что токи через оба перехода транзистора в отсутствие внешних напряжений будут равны нулю, хотя

через каждый переход перемещаются носители заряда в обоих направлениях. Токи, создаваемые этими перемещениями — диффузионный и ток проводимости, — в каждом переходе равны, и поэтому взаимно компенсируются.

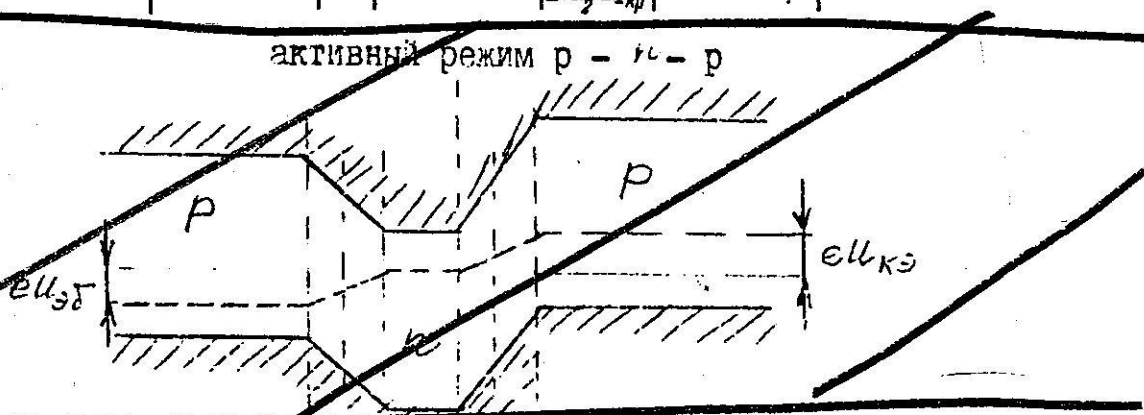
АКТИВНЫЙ РЕЖИМ



При приложении к транзистору нормальных для усилительного режима рабочих напряжений: прямого $U_{ЭБ}$ к эмиттерному переходу и обратного $U_{КБ}$ к коллекторному зонная диаграмма меняется (рис.



активный режим $p - n - p$



Прямое напряжение $U_{ЭБ}$ снижает высоту энергетического барьера в эмиттерном переходе до величины $q(U_K - U_{ЭБ})$, толщина эмиттерного перехода $d_Э$ уменьшается, границы зон проводимости и валентной в базовой области поднимаются на величину $qU_{ЭБ}$ по сравнению с их положением в равновесном состоянии. Под действием приложенного обратного напряжения $U_{КБ}$ высота энергетического барьера в коллекторном переходе увеличивается до значения $q(U_K + U_{КБ})$, толщина коллекторного перехода $d_К$ растет, границы зон проводимости и валентной в коллекторной области поднимаются на величину $qU_{КБ}$ по сравнению с их положением в области базы.

В усилительном режиме в транзисторе типа $p-n-p$ протекают следующие процессы:

Дырки, инжектир. из эмиттера в базу, за счет ее малой толщины /ширина базы $\ll L_p$, $W \ll L_p$ / доходят до коллекторного перехода, рекомбинируя. Достигая коллекторного перехода, ускоряются, проходят через переход в коллектор, создавая ток.

Эффект прохождения носителей через коллекторный переход называется транзисторный эффект.

— инжекция основных носителей области эмиттера — дырок — через эмиттерный переход в область базы, а электронов из базы — в область эмиттера;

— диффузионное перемещение инжектированных в базу дырок, которые являются там неравновесными неосновными носителями, от эмиттерного перехода до коллекторного. Перемещение сопровождается процессом рекомбинации части дырок с основными носителями в базе — электронами; при этом из внешней цепи в базу поступают электроны, которые поддерживают электрическую нейтральность во всем объеме базы, и возмещают в ней убыль электронов вследствие их рекомбинации;

— экстракция дырок, подошедших к коллекторному переходу, под воздействием его ускоряющего поля в область коллектора.

Каждый из перечисленных процессов характеризуется соответствующим параметром.

В транзисторе типа *n-p-n* механизм инжекции и диффузии носителей сохраняется тот же, что и в транзисторе типа *p-n-p*, но рабочий ток создается в этом транзисторе не дырками валентной зоны эмиттерной области, а электронами зоны проводимости.

~~Полный ток через эмиттерный переход~~ В транзисторах обычно концентрация примесей, а следовательно, и основных носителей в эмиттерной области значительно больше, ~~чем в области базы~~. Поэтому в транзисторе типа *p-n-p* $p_p \gg n_n$. Концентрация неосновных носителей определяется из условий: $n_p = n_i^2 / p_p \ll p_n = n_i^2 / n_n$. Полный ток через эмиттерный переход

$$I_s = I_{sp} + I_{sn} = I_{s0} \left[\exp\left(\frac{qU_{be}}{kT}\right) - 1 \right], \quad q \equiv e \quad (2.28)$$

где I_{sp} — дырочный ток; I_{sn} — электронный ток.

Основную часть полного тока составляет дырочный, созданный инжекцией дырок из эмиттера в базу. Этот ток является рабочим, так как он определяет ток в выходной коллекторной цепи, в которую обычно включают сопротивление нагрузки. Ток, создаваемый инжекцией электронов из базы в эмиттер, замыкается во входной цепи эмиттер—база, где служит источником потерь, в коллекторную цепь он не поступает. Этот процесс характеризуется коэффициентом инжекции (или иначе эффективностью эмиттера), определяемым отношением полезного (дырочного) тока через эмиттерный переход к общему прямому току, т. е. к сумме дырочной и электронной составляющих:

$$\gamma = \frac{I_{sp}}{I_{sp} + I_{sn}} = \frac{1}{1 + \frac{I_{sn}}{I_{sp}}} \quad (2.29)$$

Поскольку толщина базы w_b гораздо меньше диффузионной длины дырок в базе $L_{pб}$, после преобразований получим

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_b w_b}{\sigma_a L_{nэ}}} \approx 1 - \frac{\sigma_b w_b}{\sigma_a L_{nэ}}, \quad (2.30)$$

так как

$$\frac{\sigma_b w_b}{\sigma_a L_{nэ}} \ll 1.$$

В этом выражении σ_b и σ_a — удельные электрические проводимости соответственно базы и эмиттера; w_b — толщина базы; $L_{nэ}$ — диффузионная длина электронов в области эмиттера. Таким обра-

зом для получения высокого значения коэффициента инжекции γ , приближающегося к единице, необходимо выполнить три условия: во-первых, $\sigma_b \ll \sigma_a$, для чего концентрация донорных примесей, вносимых в базу, должна быть в 100 и более раз меньше концентрации акцепторных примесей в эмиттере; во-вторых, толщина базовой области должна быть мала (порядка 10—25 мкм), и, наконец, в-третьих, время жизни электронов в эмиттере $\tau_{nэ}$, пропорциональное квадрату их диффузионной длины $L_{nэ}$, должно быть велико. В транзисторах можно получить коэффициент инжекции порядка 0,995 и выше. Выражение (2.30) действительно лишь для малых концентраций инжектированных носителей.

Перенос неравновесных неосновных носителей заряда от эмиттерного перехода до коллекторного. Коллекторное напряжение $U_{кб}$ в основном падает на коллекторном переходе, имеющем большое обратное сопротивление. Падением напряжения в базовой области в первом приближении можно пренебречь и считать движение инжектированных дырок, которые являются в базе неравновесными носителями, чисто диффузионным, возникающим благодаря наличию градиента концентрации дырок в базе dp/dx . Параметром, характеризующим перенос неравновесных неосновных носителей в

базе, служит коэффициент переноса (или иначе эффективность переноса), определяемый как отношение тока $I_{кр}$ неосновных носителей, подошедших к коллекторному переходу, к току $I_{эп}$ неосновных носителей, инжектированных из эмиттера в базу (т. е. дырок в *p-n-p*-транзисторе):

$$\psi = \frac{I_{кр}}{I_{эп}} < 1. \quad (2.31)$$

Токи $I_{эп}$ и $I_{кр}$ пропорциональны градиентам концентрации соответственно при $x=0$ и $x=w_b$. Если принять за начало координат границу между эмиттерным переходом и базой, то плотность дыркового тока можно записать в виде

$$j_p = -qD_p \frac{dp}{dx}.$$

На рис. 2.46 приведена зависимость $p=f(x)$ в базе транзистора 1 и для сравнения та же зависимость в диоде 2. Из рисунка видно, что распределение концентрации неравновесных неосновных носителей в базе транзистора иное, чем в полупроводниковом диоде. Это объясняется наличием коллекторного перехода с обратным напряжением, который действует как неограниченный сток для неосновных носителей, диффундирующих к нему через базу. Отсюда следует, что у коллекторного перехода при $x = w_b$ концентрация дырок должна уменьшиться до нуля. Коллекторный переход ускоряет удаление неосновных носителей из базы по сравнению с их диффузионным удалением от перехода в полупроводниковом диоде. Это, в свою очередь, увеличивает ток через эмиттерный переход. По мере того как дырки, инжектированные в базу, удаляются вглубь базы, на их место из эмиттера поступают новые носители заряда, в результате чего концентрация дырок у эмиттерного перехода остается неизменной.

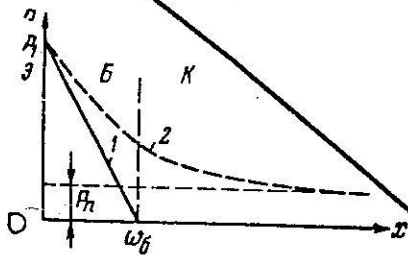


Рис. 2.46. Концентрация избыточных носителей в базе транзистора

Если положить, что плотность дырочного тока в базе j_p постоянна, то dp/dx неизменно в пределах базы и p меняется по линейному закону от p_1 у эмиттерного перехода до нуля у коллекторного перехода. В самом деле, из-за рекомбинации дырок на пути их движения к коллекторному переходу ток j_p не остается постоянным, и кривая p несколько выгибается вниз, так что $|dp/dx|$ при $x=0$ немного больше, чем при $x=w_b$. Используя уравнение непрерывности

Находим коэффициент переноса, считая, что $p_1 \gg p_n$ и $w_b \ll L_{pб}$:

$$\psi = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{w_b}{L_{pб}} \right)^2. \quad (2.36)$$

Чтобы получить большие значения ψ , приближающиеся к единице, следует уменьшить вероятность рекомбинации неосновных носителей в базе, для чего нужно, во-первых, уменьшить толщину базы w_b и, во-вторых, увеличить диффузионную длину дырок в базе $L_{pб}$. Последнее достигается уменьшением концентрации донорных примесей, а следовательно, и электронов в базе. Если положить, например, $L_{pб} = 250$ мкм и $w_b = 25$ мкм, то $\psi = 0,995$.

Изложенное выше относится к работе транзистора на низких частотах. При переходе к высоким частотам, когда время прохождения инжектированными носителями базы окажется сравнимым с периодом сигнала, приложенного между эмиттером и базой, процесс перемещения дырок в базе резко изменится; особенности работы транзистора на высоких частотах будут рассмотрены в дальнейшем.

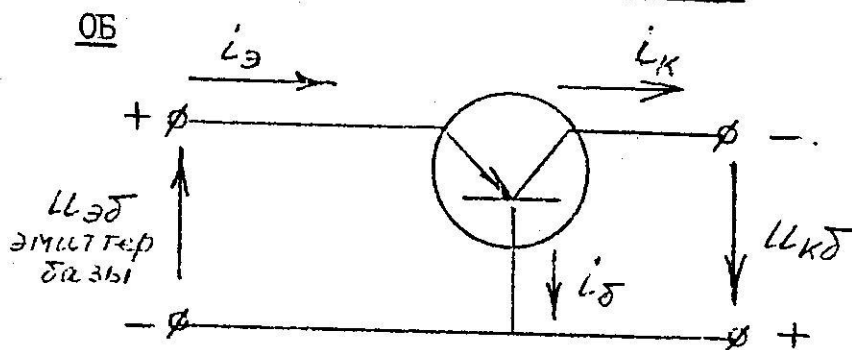
Умножение тока в коллекторном переходе. Неравновесные носители заряда — дырки, подошедшие к коллекторному переходу, экстрагируются его ускоряющим электрическим полем в область коллектора. Можно считать, что все внешнее обратное коллекторное напряжение $U_{кб}$ прикладывается к переходу, и падением напряжения в областях коллектора и базы можно пренебречь. При значениях $U_{кб}$ порядка 10 В в переходе создается сильное электрическое поле напряженностью 10^4 В/см. Одновременно происходит встречная экстракция неосновных носителей коллекторной области — электронов под действием того же ускоряющего поля в область базы. Ток $I_{кб}$, создаваемый этими электронами, называется начальным током коллекторного перехода; он является вредным, так как, увеличивая концентрацию электронов в области ба-

зы, усиливает в ней рекомбинацию дырок (уменьшает $L_{pб}$) и уменьшает коэффициент переноса ψ . Величина тока $I_{к0}$ не зависит от эмиттерного тока $I_{эп}$ и им не управляется.

Экстракция неосновных носителей базы через коллекторный переход характеризуется коэффициентом умножения коллекторного тока в переходе $M = I_{к}/I_{кр}$, где $I_{к}$ — полный управляемый ток через коллекторный переход. В плоскостных транзисторах обычно типа $M = 1$. Коэффициент умножения коллекторного тока оказывается больше единицы в так называемых лавинных транзисторах, в которых умножение потока носителей внутри коллекторного перехода осуществляется в результате многократных столкновений носителей с атомами решетки. Другой способ умножения коллекторного тока ($M > 1$) состоит в использовании в транзисторе p - n -ловушки.

Токи в транзисторе

СХЕМА С ОБЩЕЙ БАЗОЙ



Коэффициент передачи тока для схемы включения с общей базой.

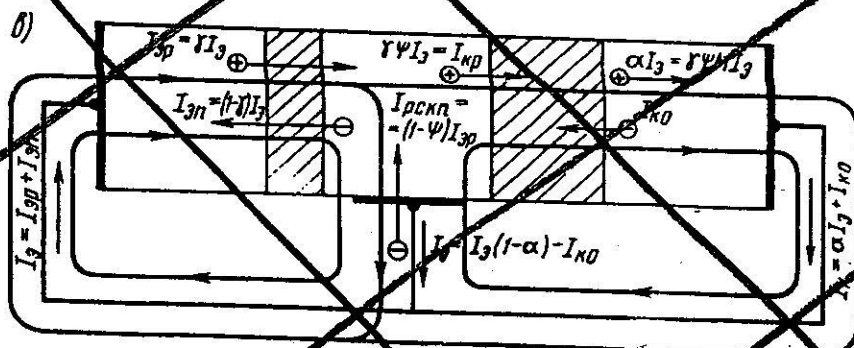
Интегральным коэффициентом передачи эмиттерного тока называется отношение (или коэффициент передачи тока в схеме с общей базой)

$$\alpha_э = \frac{I_{к}}{I_э} \quad (\alpha_э \equiv \alpha) \quad (2.37)$$

Из изложенного выше следует, что

$$\alpha_э = \frac{I_{к}}{I_э} = \frac{I_{к}}{I_{кр}} \cdot \frac{I_{кр}}{I_{эп}} \cdot \frac{I_{эп}}{I_э} = \gamma \psi M \quad (2.38)$$

Распределение токов в областях транзистора типа p - n - p в общем случае при $M \neq 1$ показано на рис. 2.45в.



~~Здесь стрелки внутри транзистора указывают направление движения носителей заряда (электронов или дырок), а стрелки во внешней цепи — направление симметрических токов. Ток I_3 через эмиттерный переход равен сумме дырочного и электронного токов инжекции через переход~~

$$I_3 = I_{3p} + I_{3n}, \quad (2.39)$$

где $I_{3p} = \gamma I_3$, $I_{3n} = I_3(1-\gamma)$.

~~В эмиттерной области вдали от перехода, где инжектированные электроны полностью рекомбинируют, ток принимает чисто дырочный характер, а во внешней цепи он будет создаваться электронами.~~

Ток через коллекторный переход I_K состоит из:

— тока экстракции неравновесных дырок из базы в коллектор через переход

$$I_K^1 = M \cdot I_{Kp} = \frac{M_1}{M_2} I_{3p} \psi = I_3 \gamma \psi M = I_3 \alpha_3 \quad (2.40)$$

— тока экстракции неосновных носителей области коллектора (электронов) через переход — начального тока коллекторного перехода I_{K0} .

Таким образом, результирующий ток в коллекторной области

$$I_K^0 = \alpha_3 I_3 + I_{K0}. \quad (2.41)$$

Ток, протекающий через вывод базы, равен разности эмиттерного и коллекторного токов:

$$I_6 = I_3 - I_K^0 = I_3(1 - \alpha_3) - I_{K0}. \quad (2.42)$$

Из полученной формулы следует, что ток базы может изменять свое направление. При малых значениях входного напряжения $U_{вб}$ ток $I_3(1-\alpha_3)$ меньше I_{K0} , не зависящего от $U_{вб}$, и направление тока I_6 будет противоположно указанному на рис. 2.45в. При используемых на практике значениях $U_{вб}$ $I_3(1-\alpha_3) > I_{K0}$.

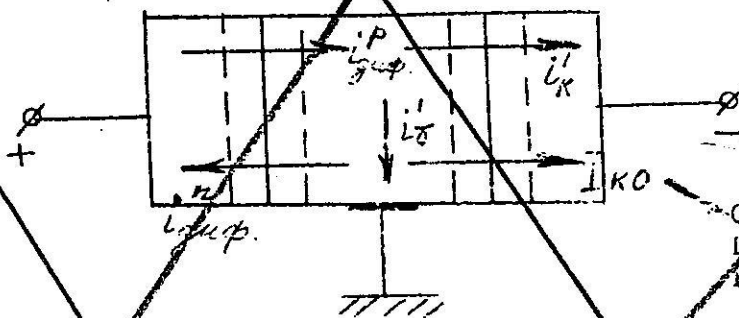
В справочниках обычно приводится значение дифференциально-го коэффициента передачи тока, который определяется как

$$\alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_3} \text{ при } U_{кб} = \text{const}. \quad (2.46)$$

Связь между α и α_3 легко установить, дифференцируя ур-ние (2.41):

$$\alpha = \alpha_3 + I_3 \frac{\Delta \alpha_3}{\Delta I_3},$$

но практически в активном режиме и при малых уровнях инжекции α_3 меняется при изменении эмиттерного тока незначительно, т. е. $\alpha \approx \alpha_3$. Поэтому в дальнейшем будем пользоваться дифференциальным параметром α , называя его просто коэффициентом передачи тока в схеме с общей базой.



— обратный ток коллекторного перехода / ток неосновных носителей/

I_{δ} — рекомбинационный ток базы обусловлен той частью дырок, которые успели прорекомбинировать с электронами базы, образ. дефицит электронов.

$$I_{\delta} = I_E - I_C$$

$$I_C = \alpha I_E + I_{CO}$$

$$I_C = \alpha I_E$$

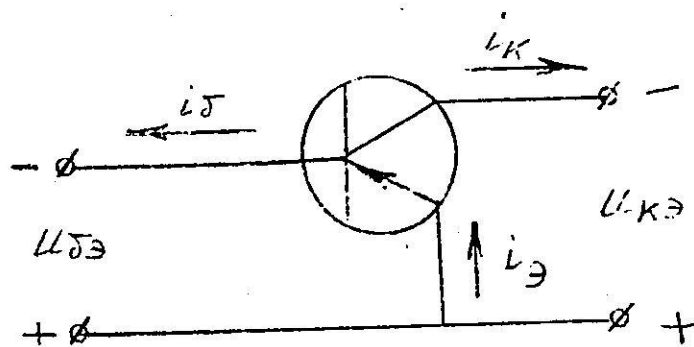
$$\alpha = 0,9 - 0,99$$

$$I_{\delta} = (1 - \alpha) I_E - I_{CO}$$

α — коэффициент передачи тока эмиттера, зависит от уровня инжекции /она наступает в определенный момент/

Коэффициент передачи тока для схем включения с общим эмиттером и с общим коллектором.

03



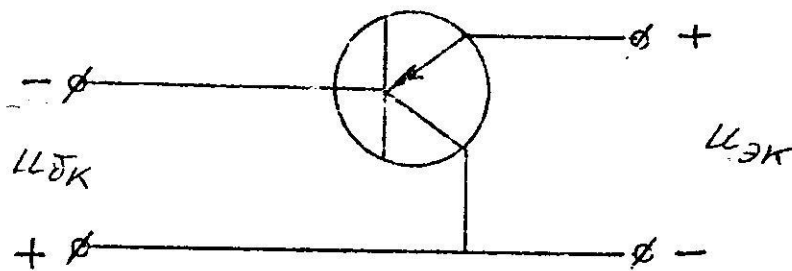
$$\alpha = \text{const}$$

$$I_E = I_C + I_{\delta}$$

Для схемы с общим эмиттером коэффициент передачи тока определяется как $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$; он связан с коэффициентом α следующим образом:

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E - \Delta I_C} = \frac{\Delta I_C / \Delta I_E}{1 - \Delta I_C / \Delta I_E} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (2.47)$$

ОК



Для схемы включения с общим коллектором коэффициент передачи тока

$$K_{i_k} = \frac{\Delta I_s}{\Delta I_б} = \frac{\Delta I_s \Delta I_k}{\Delta I_k \Delta I_б} = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{1}{1-\alpha}. \quad (2.48)$$

Если, например, $\alpha=0,95$, то $\beta=0,95/0,05=19$; $K_{i_k}=1/0,05=20$.

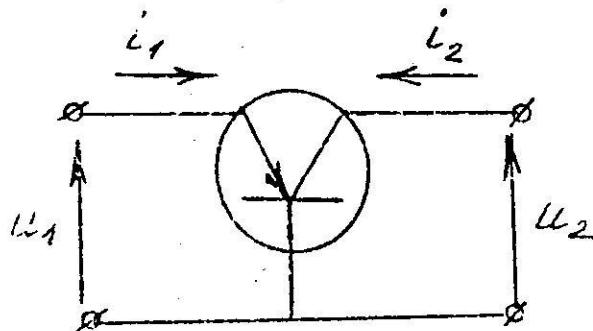
Обычно величина β и K_{i_k} составляют несколько десятков, а иногда превышают и сотню, и только в мощных транзисторах могут быть порядка нескольких единиц.

Другие формулы для пересчета коэффициентов передачи тока имеют вид:

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta+1} = 1 - \frac{1}{K_{i_k}}; \quad K_{i_k} = \beta + 1; \quad \beta = K_{i_k} - 1. \quad (2.49)$$

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

СХЕМА ОБ



$$\begin{cases} i_1 = i_э \\ i_2 = -i_k \\ U_1 = U_{эб} \\ U_2 = -U_{кб} \end{cases}$$

Статические характеристики транзистора отражают зависимость между токами и напряжениями на его выходе и входе. Существуют четыре вида статических характеристик транзистора: входные, связывающие величины I и U на входе транзистора; выходные, связывающие I и U на выходе транзистора; характеристики прямой передачи, дающие зависимость I или U на выходе от I или U на входе, и характеристики обратной связи, выражающие зависимость I или U на входе от I или U на выходе.

1. Входные характеристики.

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= f_1(i_1) \\ i_1 &= f_2(U_1) \end{aligned} \right| U_2 = \text{const}$$

2. Характеристики прямой передачи тока. ~~(напрям.)~~

$$\left. \begin{aligned} i_2 &= f_3(i_1) \\ \cancel{i_2} &= \cancel{f_4(i_1)} \end{aligned} \right| U_2 = \text{const}$$

$$\left(U_2 = f_4(U_1) \middle| i_2 = \text{const} \right)$$

3. Характеристики обратной связи.

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= f_5(U_2) \\ \cancel{i_1} &= \cancel{f_6(i_2)} \end{aligned} \right| i_1 = \text{const}$$

4. Выходные характеристики

$$\left. \begin{aligned} i_2 &= f_6(U_2) \\ U_2 &= f_7(i_2) \end{aligned} \right| i_1 = \text{const}$$

для расчета транзисторной цепи необходимо иметь два семейства характеристик: обычно это входные и выходные, которые являются наиболее важными характеристиками транзистора.

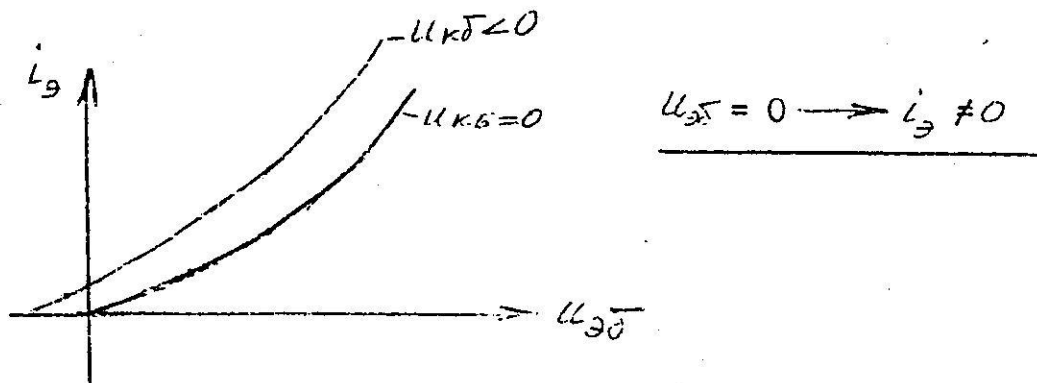
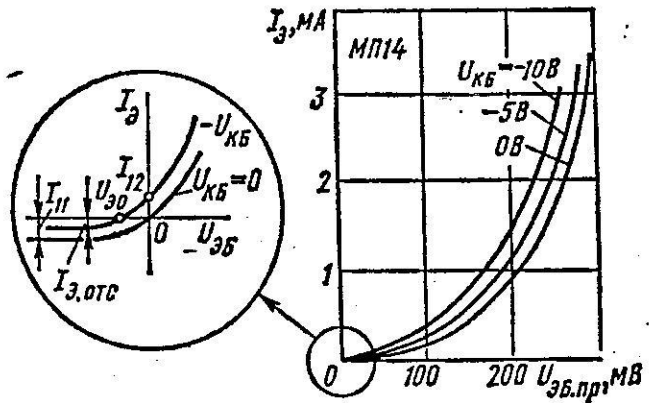
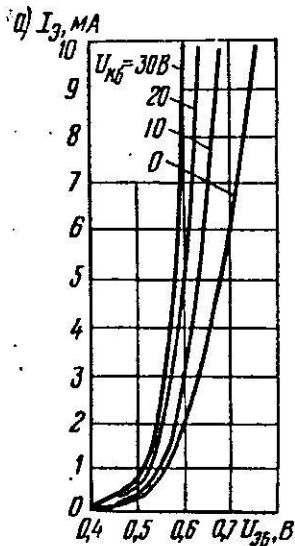
Из трех возможных схем включения транзисторов наиболее широкое применение получили схемы ОБ и ОЭ, поэтому в дальнейшем ограничимся рассмотрением входных и выходных характеристик только этих схем. Характеристики схемы ОК мало отличаются от характеристик схемы ОЭ. Что касается характеристик прямой передачи и обратной связи, то их легко построить графическим способом из семейств выходных и входных характеристик соответственно.

ВХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В СХЕМЕ ОБ

$$i_3 = f(U_{35}) \left| U_{кб} = \text{const}$$

Перейдем к рассмотрению семейств входных характеристик транзистора типа *p-n-p*. В схеме ОБ (рис. 2.55а) входные характеристики $I_3 = f(U_{35})$ при $U_{кб} = \text{const}$ исходят из начала координат. С увеличением напряжения снижается энергетический барьер в

эмиттерном переходе, что усиливает инжекцию дырок из области эмиттера в область базы и встречную инжекцию электронов, поэтому ток $I_3 = I_{3p} + I_{3n}$ увеличивается.



При постоянном токе I_3 с увеличением $U_{кб}$ возрастает толщина коллекторного перехода и уменьшается толщина базы на $\Delta\omega_б$ (рис. 2.51). Градиент концентрации дырок в базе dp/dx должен остаться постоянным, но для этого необходимо уменьшить концентрацию дырок p_1 до p_1 у эмиттерного перехода, а следовательно, и напряжение на эмиттерном переходе $U_{эб}$, так как $p_1 = p_n \exp(qU_{эб}/kT)$. Таким образом, увеличение $U_{кб}$ влечет за собой уменьшение $U_{эб}$, т. е. между коллектором и эмиттером возникает обратная связь по напряжению: входная характеристика перемещается вверх. При $U_{кб} > 2 \div 3$ В изменения $I_к$ настолько незначительны, что коллекторное напряжение практически перестает влиять на входные характеристики и они сливаются друг с другом. При $U_{кб} = 0$ входная характеристика идентична обычной характеристике p - n -перехода при приложении к нему прямого напряжения.

Если обратиться к рис. 2.51, то можно заметить, что с увеличением $U_{кб}$ увеличивается толщина коллекторного перехода и соответственно уменьшается толщина базы на Δw_b (эффект модуляции толщины базы).

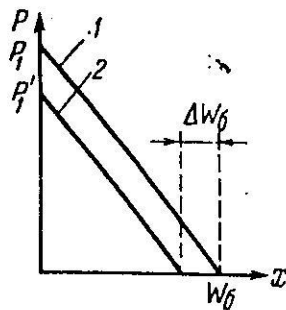
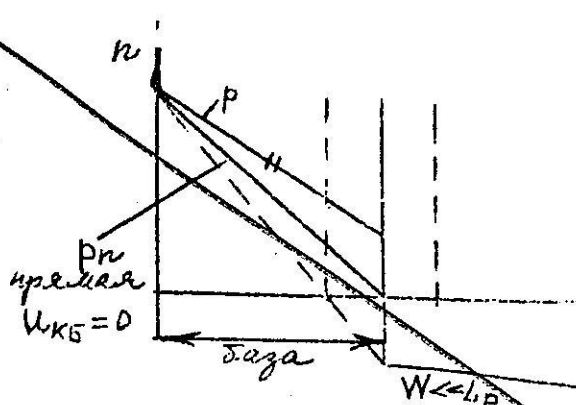


Рис. 2.51. Распределение концентрации дырок в базе транзистора, включенного по схеме ОБ, при изменении $U_{кб}$:
1 — $U_{кб}^0$; 2 — $U_{кб} > U_{кб}^0$



$U_{кб} < 0$ за счет экстракции уменьшается концентрация на границе коллекторного перехода, увеличивается *град* концентрации, ток инжекции, ток эмиттера увеличивается.

С ростом отрицательного коллекторного напряжения коллекторный переход расширяется за счет базы, т.к. концентрация ее много меньше. Ток эмиттерный возрастает.

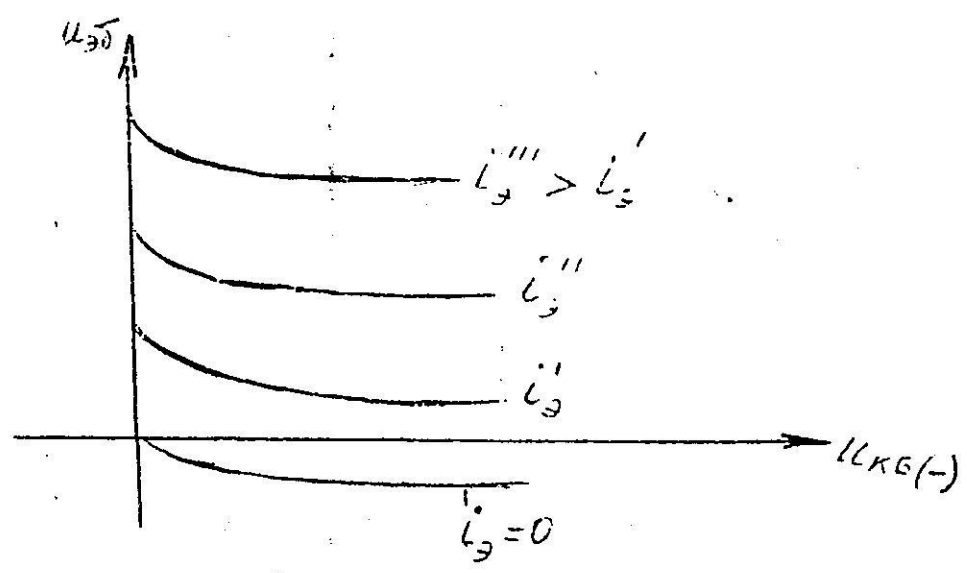
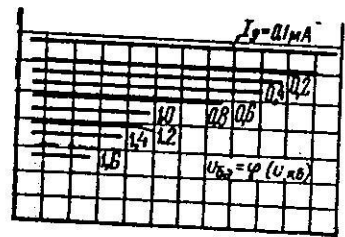
Изменение базы — эффект модуляции толщины базы.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

$$U_{эб} = f(U_{кб}) \Big|_{I_э = const}$$

Что касается остальных характеристик транзистора, то их легко построить по семействам входных ~~или выходных~~ характеристик.

Аналогичным образом строят семейство характеристик обратной связи $U_{эб} = f(U_{кб})$ при $I_э = const$ по графику с входными характеристиками $I_э = f(U_{бэ})$ при $U_{кб} = const$. В этом случае на последнем проводят ряд горизонтальных линий, соответствующих различным значениям $I_э$. По точкам пересечения каждой горизонтальной линии с характеристиками (по значениям $U_{эб}$ и $U_{кб}$) можно построить одну из характеристик обратной связи $U_{эб} = f(U_{кб})$ при $I_э = const$. Если задана лишь одна входная характеристика для $U_{кб} = 0$, можно получить лишь одну точку характеристики $U_{эб} = f(U_{кб})$. Характеристики обратной связи для различных значений $I_э$ представляют собой ряд горизонтальных параллельных линий.



Рассмотрим семейство выходных характеристик транзистора типа $p-n-p$ в схеме ОБ: $I_K = f(U_{KB})$ при $I_B = \text{const}$ (рис. 2.50). Усло-

вием обратные коллекторные напряжения откладывать вправо по оси абсцисс, а прямые — влево. Как видно из рисунка, ток I_K на значительном участке характеристик мало зависит от приложенного напряжения U_{KB} . При перемене полярности коллекторного напряжения (т. е. при подаче на коллектор прямого напряжения рис.

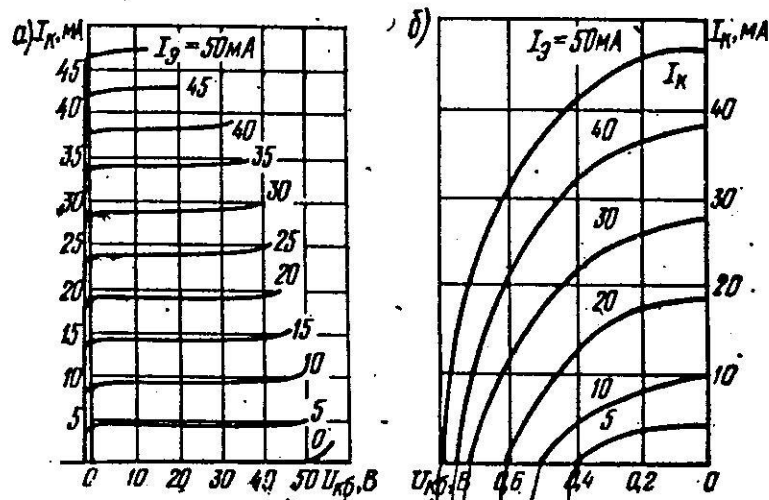


Рис. 2.50. Семейство выходных характеристик транзистора в схеме ОБ:
 а) при обратном напряжении на переходе; б) при прямом напряжении на переходе

2.50б) ток I_K резко падает до нуля, меняет свое направление и уже при нескольких десятых долях вольта быстро растет, что может привести к выходу транзистора из строя. Такой вид характеристик объясняется следующим образом. При $U_{KB} = 0$ (если пренебречь падением напряжения на сопротивлении базы r_b) в коллекторном переходе существует электрическое поле, созданное контактной разностью потенциалов U_K . Это поле является ускоряющим для дырок базовой области, которые полностью экстрагируются в область коллектора, создавая ток I_K . При подаче на коллекторный переход прямого напряжения U_{KB} снижается высота его энергетического барьера (ниже qU_K), в результате чего основные носители коллекторной области — дырки — получают возможность инжектироваться через переход в область базы, а основные носители области базы — электроны — начинают инжектироваться в область коллектора, что приводит к резкому спаду результирующего коллекторного тока до нуля, а затем — и к изменению его направления.

Равенство коллекторного тока нулю означает уравнивание тока из коллекторной области встречным током из базовой области. При уменьшении прямого коллекторного напряжения до нуля коллекторный ток I_K быстро возрастает, а затем (при постоянном значении I_B) с увеличением обратного напряжения U_{KB} ток I_K увеличивается мало. Это можно объяснить тем, что увеличение толщины коллекторного перехода с ростом U_{KB} и соответственно

уменьшение толщины базовой области w_b снижает вероятность рекомбинации дырок с электронами в базе и, следовательно, число дырок, экстрагируемых в коллекторную область (при постоянстве числа дырок, инжектируемых через эмиттерный переход), увеличивается. Другими словами, рост I_k объясняется увеличением коэффициента переноса ψ . Если обратиться к рис. 2.51, то можно заметить, что с увеличением $U_{кб}$ увеличивается толщина коллек-

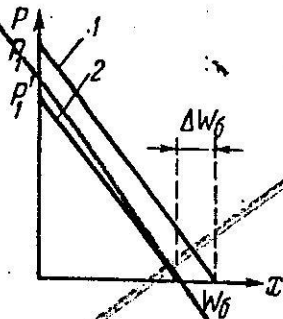


Рис. 2.51. Распределение концентрации дырок в базе транзистора, включенного по схеме ОБ, при изменении $U_{кб}$:
 1 — $U'_{кб}$; 2 — $U''_{кб} > U'_{кб}$

торного перехода и соответственно уменьшается толщина базы на Δw_b (эффект модуляции толщины базы). Поскольку $I_a = \text{const}$, то градиент dp/dx также должен оставаться постоянным и кривая концентрации (1) смещается параллельно самой себе вниз (2). При больших напряжениях $U_{кб}$ начинается лавинное размножение носителей в коллекторном переходе, в результате чего значительно возрастает I_k .

При переходе к следующей характеристике, соответствующей большему значению I_a , увеличивается приток дырок к коллекторному переходу и соответственно возрастает ток I_k . При $I_a = 0$ (обрыв цепи эмиттера) коллекторный ток снижается до значения $I_{к0}$. Величина $I_{к0}$ определяется неосновными носителями базовой (ток $I_{к0p}$) и коллекторной (ток $I_{к0n}$) областей; при $\sigma_b \gg \sigma_k$ дырочная составляющая $I_{к0p}$ значительно меньше электронной составляющей $I_{к0n}$, т. е. $I_{к0} \approx I_{к0n}$. Ток $I_{к0}$ сильно зависит от температуры коллектора; с повышением температуры он резко возрастает, смещая вверх семейство выходных характеристик, ибо $I_k = \alpha I_a + I_{к0}$. Это нарушает стабильность работы транзистора, повышает мощность, выделяемую в его коллекторном переходе, и уменьшает полезную мощность. Характеристика начального коллекторного тока $I_{к0}$ представляет собой обычную характеристику p-n-перехода при приложении обратного напряжения.

Крутой участок кривой связан с изменением концентрации носителей в коллекторном переходе, в дальнейшем небольшой отрицательный наклон кривой обусловлен эффектом модуляции толщины базы.

$$\mu = \frac{\Delta I_{КБ}}{\Delta U_{КБ}}$$

$$\beta = \text{const}$$

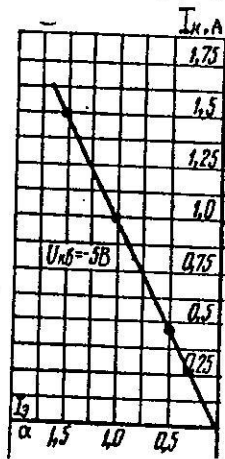
- статический коэффициент усиления в сх. ОБ.



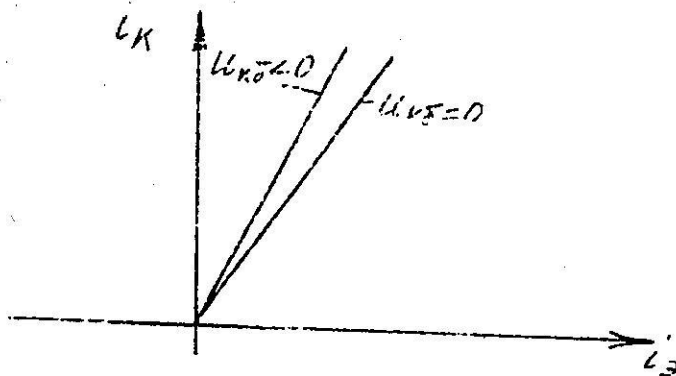
Во сколько раз эмиттерное напряжение воздействует сильнее, чем на эмиттерный ток.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЯМОЙ ПЕРЕДАЧИ

~~Пример~~ Для построения характеристик прямой передачи транзистора (в схеме ОБ) на графике с выходными характеристиками $I_{К} = f(U_{КБ})$ при $I_{Э} = \text{const}$ проводят ряд вертикальных линий для различных значений $U_{КБ}$, находят точки пересечения каждой из них со всеми характеристиками и соответствующие значения токов $I_{К}$ и $I_{Э}$ при заданном значении $U_{КБ}$ переносят на график для характеристик прямой передачи $I_{К} = f(I_{Э})$ при $U_{КБ} = \text{const}$ (рис. 2.56).



$$I_{К} = f(I_{Э}) \Big|_{U_{КБ} = \text{const}}$$



Зависимость - линейная, с увеличением коллекторного напряжения $I_{К}$ увеличивается за счет эффекта модуляции толщины базы.