

## БИПОЛЯРНЫЕ СТРУКТУРЫ

## Общие сведения

**Биполярным транзистором** (БТ) называется трехэлектродный полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими р-п переходами, предназначенный для усиления электрических колебаний по току, напряжению или мощности. Слово “биполярный” означает, что физические процессы в БТ определяются движением носителей заряда обоих знаков (электронов и дырок). Взаимодействие переходов обеспечивается тем, что они располагаются достаточно близко - на расстоянии, меньшем диффузионной длины. Два р-п-перехода образуются в результате чередования областей с разным типом электропроводности. В зависимости от порядка чередования различают БТ типа  $n-p-n$  (или со структурой  $n-p-n$ ) и типа  $p-n-p$  (или со структурой  $p-n-p$ ), условные изображения которых показаны на рисунке 1.

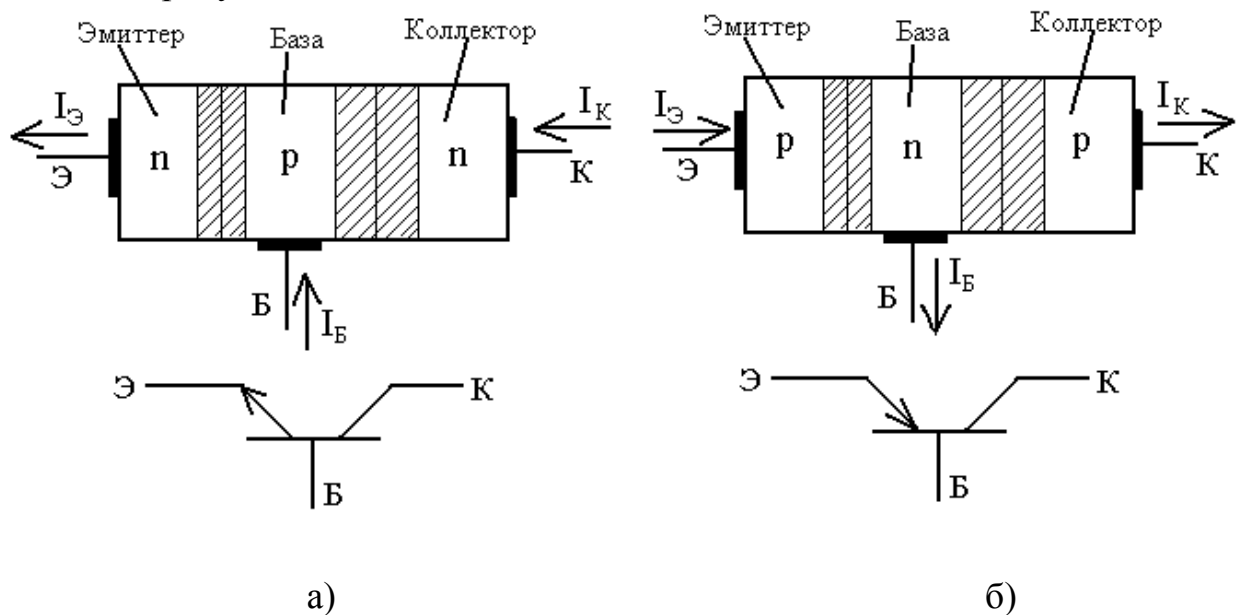


Рис.7.1 — Структуры БТ

Структура реального транзистора типа  $n-p-n$  изображена на рисунке 7.2. В этой структуре существуют два перехода с неодинаковой площадью: площадь левого перехода  $n_1^+-p$  меньше, чем у перехода  $n_2-p$ . Кроме того, у большинства БТ одна из крайних областей ( $n_1$  с меньшей площадью) сечения легирована гораздо сильнее, чем другая крайняя область ( $n_2$ ).

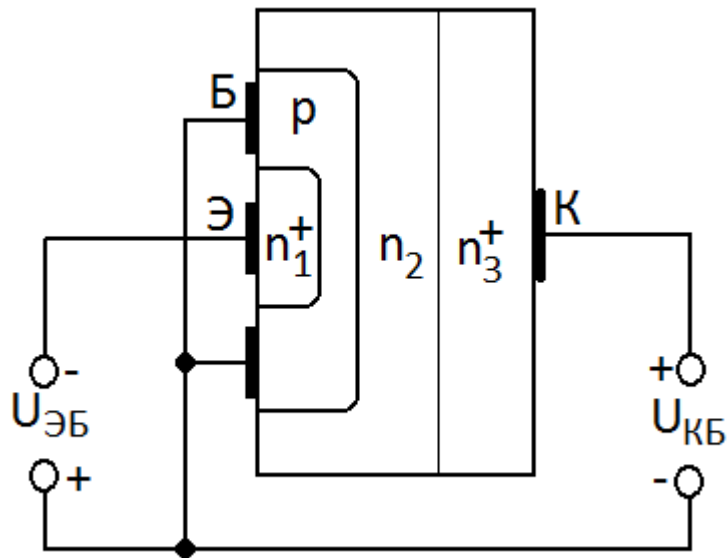


Рис.7.2 – Структура реального БТ типа n-p-n

Сильнолегированная область обозначена верхним индексом “+” ( $n^+$ ). Поэтому БТ является асимметричным прибором. Асимметрия отражается и в названиях крайних областей: сильнолегированная область с меньшей площадью ( $n_1^+$ ) называется **эмиттером**, а область  $n_2$  - **коллектором**. Соответственно область (р) называется **базовой** (или базой). Правая область  $n_3^+$  служит для снижения сопротивления коллектора. Переход  $n_1^+$ -р называют **эмиттерным**, а  $n_2$ -р **коллекторным**. Контакты с областями БТ обозначены на рисунках 1 и 2 буквами: Э - эмиттер; Б - база; К- коллектор.

Основные свойства БТ определяются процессами в базовой области, которая обеспечивает взаимодействие эмиттерного и коллекторного переходов. Поэтому ширина базовой области должна быть малой (обычно меньше 1 мкм). Если распределение примеси в базе от эмиттера к коллектору равномерное, то в ней отсутствует электрическое поле, и носители совершают в базе только диффузионное движение. В случае неравномерного распределения примеси (неоднородная база) в базе существует **внутреннее электрическое поле**, вызывающее появление дрейфового движения носителей: результирующее движение определяется как диффузией, так и дрейфом. БТ с однородной базой называют **бездрейфовыми**, а с неоднородной базой - **дрейфовыми**.

Биполярный транзистор, являющийся трехполюсным прибором, можно использовать в трех схемах включения: с общей базой (ОБ) (рисунок 3,а), общим эмиттером (ОЭ) (рисунок 7.3,б), и общим коллектором (ОК) (рисунок 7.3,в). Стрелки на условных изображениях БТ указывают (как и на рисунке 7.1) направление прямого тока эмиттерного перехода. В обозначениях напряжений вторая буква индекса обозначает общий электрод для двух источников питания.

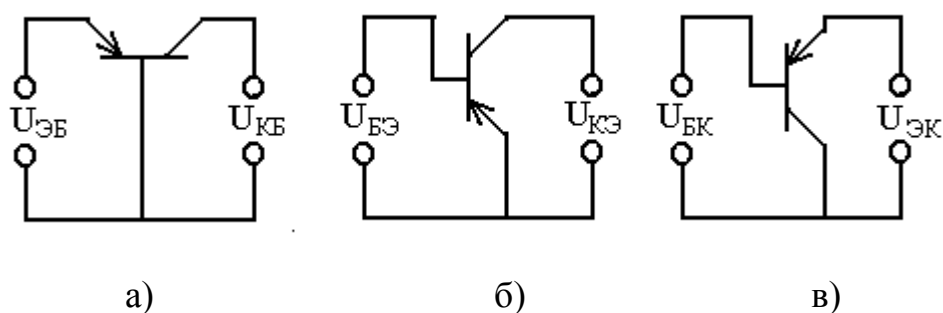


Рис. 7.3 – Схемы включения БТ

В общем случае возможно четыре варианта полярностей напряжения переходов, определяющих четыре режима работы транзистора. Они получили названия: нормальный активный режим (или просто активный), инверсный активный режим (или инверсный), режим насыщения (или режим двухсторонней инжекции) и режим отсечки. В **нормальном активном режиме** (НАР) на эмиттерном переходе действует прямое напряжение (напряжение эмиттер - база  $U_{ЭБ}$ ), а на коллекторном переходе - обратное (напряжение коллектор - база  $U_{КБ}$ ). Этому режиму соответствуют полярности источников питания на рисунке 7.4 и направления токов для р-п-р транзистора. В случае п-р-п транзистора полярности напряжения и направления токов изменяются на противоположные.

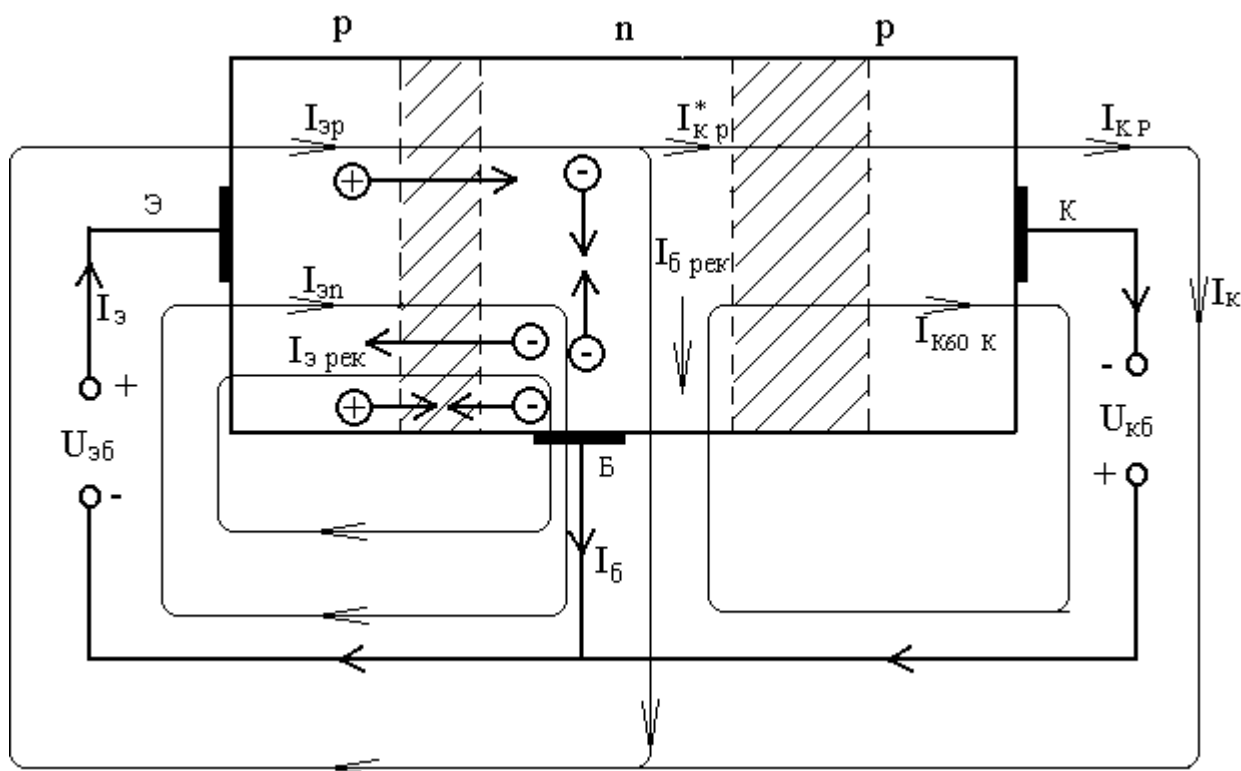


Рис.7.4 – Физические процессы в БТ

Этот режим работы (НАР) является основным и определяет назначение и название элементов транзистора. Эмиттерный переход осуществляет инжекцию носителей в узкую базовую область, которая обеспечивает

практически без потерь перемещение инжектированных носителей до коллекторного перехода. Коллекторный переход не создает потенциального барьера для подошедших носителей, ставших неосновными носителями заряда в базовой области, а, наоборот, ускоряет их и поэтому переводит эти носители в коллекторную область. “Собираательная” способность этого перехода и обусловила название “коллектор”. Коллектор и эмиттер могут поменяться ролями, если на коллекторный переход подать прямое напряжение  $U_{КБ}$ , а на эмиттерный - обратное  $U_{ЭБ}$ . Такой режим работы называется **инверсным активным режимом** (ИАР). В этом случае транзистор “работает” в обратном направлении: из коллектора идет инжекция дырок, которые проходят через базу и собираются эмиттерным переходом, но при этом его параметры отличаются от первоначальных.

Режим работы, когда напряжения на эмиттерном и коллекторном переходах являются прямыми одновременно, называют **режимом двухсторонней инжекции** (РДИ) или менее удачно **режимом насыщения** (РН). В этом случае и эмиттер, и коллектор инжектируют носители заряда в базу навстречу друг другу, и одновременно каждый из переходов собирает носители, приходящие к нему от другого перехода.

Наконец, режим, когда на обоих переходах одновременно действуют обратные напряжения, называют **режимом отсечки** (РО), так как в этом случае через переходы протекают малые обратные токи.

Следует подчеркнуть, что классификация режимов производится по комбинации напряжений переходов. В схеме включения с общей базой (ОБ) они равны напряжениям источников питания  $U_{ЭБ}$  и  $U_{КБ}$ . В схеме включения с общим эмиттером (ОЭ) напряжение на эмиттерном переходе определяется напряжением первого источника ( $U_{ЭБ} = -U_{БЭ}$ ), а напряжение коллекторного перехода зависит от напряжений обоих источников и по общему правилу определения разности потенциалов  $U_{КБ} = U_{КЭ} + U_{ЭБ}$ . Так как  $U_{ЭБ} = -U_{БЭ}$ , то  $U_{КБ} = U_{КЭ} - U_{БЭ}$ ; при этом напряжение источников питания надо брать со своим знаком: положительным, если к электроду присоединен положительный полюс источника, и отрицательным - в другом случае. В схеме включения с общим коллектором (ОК) напряжение на коллекторном переходе определяется одним источником:  $U_{КБ} = -U_{БК}$ . Напряжение на эмиттерном переходе зависит от обоих источников:  $U_{ЭБ} = U_{ЭК} + U_{КБ} = U_{ЭК} - U_{БК}$ , при этом правило знаков прежнее.

### **Физические процессы в бездрейфовом биполярном транзисторе при работе в активном режиме**

Основные физические процессы в идеализированном БТ удобно рассматривать на примере схемы с общей базой (рисунок 7.4), так как напряжения на переходах совпадают с напряжениями источников питания. Выбор р-п-р транзистора связан с тем, что направление движения инжектируемых из эмиттера носителей (дырок) совпадает с направлением тока.

В нормальном активном режиме (НАР) на эмиттерном переходе действует прямое напряжение  $U_{ЭБ}$ . Поэтому прямой ток перехода

$$I_{Э} = I_{Эр} + I_{Эн} + I_{Эрек}, \quad (7.1)$$

где  $I_{Эр}$ ,  $I_{Эн}$  - инжекционные токи дырок (из эмиттера в базу) и электронов (из базы в эмиттер), а  $I_{Эрек}$  - составляющая тока, вызванная рекомбинацией в переходе тех дырок и электронов, энергия которых недостаточна для преодоления потенциального барьера. Относительный вклад этой составляющей в ток перехода  $I_{Э}$  в (1) тем заметнее, чем меньше инжекционные составляющие  $I_{Эр}$  и  $I_{Эн}$ , определяющие прямой ток в случае идеализированного р-п перехода. Если вклад  $I_{Эрек}$  незначителен, то вместо (7.1) можно записать

$$I_{Э} = I_{Эр} + I_{Эн}. \quad (7.2)$$

Полезным в сумме токов выражения (7.1) является только ток  $I_{Эр}$ , так как он будет участвовать в создании тока коллекторного перехода. “Вредные” составляющие тока эмиттера  $I_{Эн}$  и  $I_{Эрек}$  протекают через вывод базы и являются составляющими тока базы, а не коллектора. Поэтому вредные компоненты  $I_{Эн}$ ,  $I_{Эрек}$  должны быть уменьшены.

Эффективность работы эмиттерного перехода учитывается коэффициентом инжекции эмиттера

$$\gamma_{Э} = I_{Эр} / I_{Э} = I_{Эр} / (I_{Эр} + I_{Эн} + I_{Эрек}), \quad (7.3)$$

который показывает, какую долю в полном токе эмиттера составляет полезный компонент. В случае пренебрежения током  $I_{Эрек}$

$$\gamma_{Э} = I_{Эр} / (I_{Эр} + I_{Эн}) = \frac{1}{1 + (I_{Эн} / I_{Эр})}. \quad (7.4)$$

Коэффициент инжекции  $\gamma_{Э}$  тем выше (ближе к единице), чем меньше отношение  $I_{Эн} / I_{Эр}$ . Величина  $I_{Эн} / I_{Эр} \ll 1$ , если концентрация акцепторов в эмиттерной области р-п-р транзистора  $N_{АЭ}$  на несколько порядков выше концентрации доноров  $N_{ДБ}$  в базе ( $N_{АЭ} \gg N_{ДБ}$ ). Это условие обычно и выполняется в транзисторах.

Какова же судьба дырок, инжектированных в базу из эмиттера, определяющих полезный ток  $I_{Эр}$ ? Очевидно, что инжектированные дырки повышают концентрацию дырок в базе около границы с эмиттерным переходом, т.е. вызывают появление градиента концентрации дырок - неосновных носителей базы. Этот градиент обуславливает диффузионное движение дырок через базу к коллекторному переходу. Очевидно, что это движение должно сопровождаться рекомбинацией части потока дырок. Потерю дырок в базе можно учесть введением тока рекомбинации дырок  $I_{Брек}$ , так что ток подходящих к коллекторному переходу дырок

$$I_{Кр}^* = I_{Эр} - I_{Брек}. \quad (7.5)$$

Относительные потери на рекомбинацию в базе учитывают коэффициентом переноса:

$$\nu = I_{Kp}^* / I_{\mathcal{E}p} = (1 - I_{Bрек} / I_{\mathcal{E}p}) < 1. \quad (7.6)$$

Коэффициент переноса показывает, какая часть потока дырок, инжектированных из эмиттера в базу, подходит к коллекторному переходу. Значение  $\chi_B$  тем ближе к единице, чем меньшее число инжектированных дырок рекомбинирует с электронами - основными носителями базовой области. Ток  $I_{Bрек}$  одновременно характеризует одинаковую потерю количества дырок и электронов. Так как убыль электронов в базе вследствие рекомбинации в конце концов покрывается за счет прихода электронов через вывод базы из внешней цепи, то ток  $I_{Bрек}$  следует рассматривать как составляющую тока базы наряду с инжекционной составляющей  $I_{\mathcal{E}n}$ .

Чтобы уменьшить потери на рекомбинацию, т.е. увеличить  $\chi_B$ , необходимо уменьшить концентрацию электронов в базе и ширину базовой области. Первое достигается снижением концентрации доноров  $N_{dB}$ . Это совпадает с требованием  $N_{A\mathcal{E}}/N_{dB}$ , необходимым для увеличения коэффициента инжекции. Потери на рекомбинацию будут тем меньше, чем меньше отношение ширины базы  $W_B$  и диффузионной длины дырок в базовой области  $L_{pB}$ .

Если при обратном напряжении в коллекторном переходе нет лавинного размножения проходящих через него носителей, то ток за коллекторным переходом с учетом (7.5)

$$I_{Kp} = I_{Kp}^* = I_{\mathcal{E}p} - I_{Bрек} \quad (7.7)$$

С учетом (7.6) и (7.3) получим

$$I_{Kp} = \nu I_{\mathcal{E}p} = \gamma I_{\mathcal{E}} = \alpha I_{\mathcal{E}}, \quad (7.8)$$

где

$$\alpha = \gamma \nu = I_{Kp} / I_{\mathcal{E}}. \quad (7.9)$$

Это отношение дырочной составляющей коллекторного тока к полному току эмиттера называют статическим коэффициентом передачи тока эмиттера.

Ток коллектора имеет еще составляющую  $I_{KBO}$ , которая протекает в цепи коллектор - база при  $I_{\mathcal{E}} = 0$  (холостой ход, “обрыв” цепи эмиттера), и не зависит от тока эмиттера. Это обратный ток перехода, создаваемый неосновными носителями областей базы и коллектора, как в обычном p-n переходе (диоде).

Таким образом, полный ток коллектора с учетом (7.7) и (7.9)

$$I_K = I_{Kp} + I_{KBO} = \alpha I_{\mathcal{E}} + I_{KBO}. \quad (7.10)$$

Из (7.10) получим обычно используемое выражение для статического коэффициента передачи тока:

$$\alpha = (I_K - I_{KBO}) / I_{\mathcal{E}}, \quad (7.11)$$

числитель которого  $(I_K - I_{KBO})$  представляет собой управляемую (зависимую от тока эмиттера) часть тока коллектора,  $I_{Kp}$ . Обычно рабочие токи коллектора  $I_K$  значительно больше  $I_{KBO}$ , поэтому

$$\alpha \approx I_K / I_{\mathcal{E}}. \quad (7.12)$$

### Связь между токами биполярного транзистора

С помощью рисунка 4 можно представить ток базы через компоненты:

$$I_B = I_{\mathcal{E}n} + I_{\mathcal{E}рек} + I_{Bрек} - I_{КБО}. \quad (7.13)$$

По первому закону Кирхгофа для общей точки

$$I_{\mathcal{E}} = I_K + I_B. \quad (7.14)$$

Как следует из предыдущего рассмотрения,  $I_K$  и  $I_B$  принципиально меньше тока  $I_{\mathcal{E}}$ ; при этом наименьшим является ток базы

$$I_B = I_{\mathcal{E}} - I_K. \quad (7.15)$$

Используя (7.15) и (7.10), получаем связь тока базы с током эмиттера

$$I_B = (1 - \alpha)I_{\mathcal{E}} - I_{КБО}. \quad (7.16)$$

Если в цепи эмиттера нет тока ( $I_{\mathcal{E}} = 0$ , холостой ход), то  $I_B = -I_{КБО}$ , т. е. ток базы отрицателен и по величине равен обратному току коллекторного перехода. При значении  $I_{\mathcal{E}}^* = I_{КБО} / (1 - \alpha)$  ток  $I_B = 0$ , а при дальнейшем увеличении  $I_{\mathcal{E}}$  ( $I_{\mathcal{E}} > I_{\mathcal{E}}^*$ ) ток базы оказывается положительным.

Подобно (7.10) можно установить связь  $I_K$  с  $I_B$ . Используя (7.10) и (7.14), получаем

$$I_K = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B + \frac{I_{КБО}}{1 - \alpha} = \beta I_B + (\beta + 1) I_{КБО}, \quad (7.17)$$

где

$$\beta = \alpha / (1 - \alpha) \quad (7.18)$$

- статический коэффициент передачи тока базы.

Так как значение  $\alpha$  обычно близко к единице, то  $\beta$  может быть очень большим ( $\beta \gg 1$ ). Например, при  $\alpha = 0,99$   $\beta = 99$ . Из (7.17) можно получить соотношение

$$\beta = (I_K - I_{КБО}) / (I_B + I_{КБО}). \quad (7.19)$$

Очевидно, что коэффициент  $\beta$  есть отношение управляемой (изменяемой) части коллекторного тока ( $I_K - I_{КБО}$ ) к управляемой части базового тока ( $I_B + I_{КБО}$ ).

Все составляющие последнего выражения зависят от  $I_{\mathcal{E}}$  и обращаются в нуль при  $I_{\mathcal{E}} = 0$ . Введя обозначение

$$I_{КЭО} = I_{КБО} / (1 - \alpha) = (\beta + 1) I_{КБО}, \quad (7.20)$$

можно вместо (7.17) записать

$$I_K = \beta I_B + I_{КЭО}. \quad (7.21)$$

Отсюда очевиден смысл введенного обозначения  $I_{КЭО}$ : это значение тока коллектора при нулевом токе базы ( $I_B = 0$ ) или при “обрыве” базы. При  $I_B = 0$   $I_K = I_{\mathcal{E}}$ , поэтому ток  $I_{КЭО}$  проходит через все области транзистора и является “сквозным” током, что и отражается индексами “К” и “Э” (индекс “О” указывает на условие  $I_B = 0$ ).

## Статические характеристики биполярных транзисторов

Обычно анализируют входные и выходные характеристики БТ в схемах с общей базой и общим эмиттером. Для определенности и преемственности изложения будем рассматривать р-п-р-транзистор.

### Схема с общей базой

**Семейство входных характеристик схемы с ОБ** представляет собой зависимость  $I_Э = f(U_{ЭБ})$  при фиксированных значениях параметра  $U_{КБ}$  - напряжения на коллекторном переходе (рис.7.5,а).

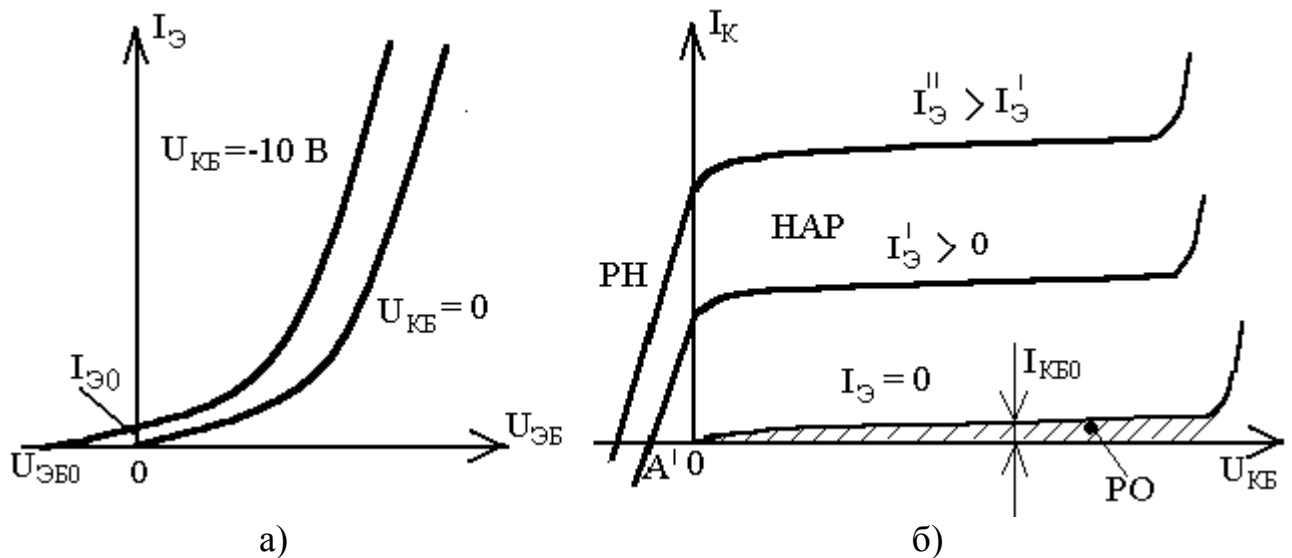


Рис.7.5 – Входные (а) и выходные (б) характеристики БТ в схеме включения с ОБ

При  $U_{КБ} = 0$  характеристика подобна ВАХ р-п-перехода. С ростом обратного напряжения  $U_{КБ}$  ( $U_{КБ} < 0$  для р-п-р-транзистора) вследствие уменьшения ширины базовой области (эффект Эрли) происходит смещение характеристики вверх:  $I_Э$  растет при выбранном значении  $U_{ЭБ}$ . Если поддерживается постоянным ток эмиттера ( $I_Э = \text{const}$ ), т.е. градиент концентрации дырок в базовой области остается прежним, то необходимо понизить напряжение  $U_{ЭБ}$ , (характеристика сдвигается влево). Следует заметить, что при  $U_{КБ} < 0$  и  $U_{ЭБ} = 0$  существует небольшой ток эмиттера  $I_{Э0}$ , который становится равным нулю только при некотором обратном напряжении  $U_{ЭБ0}$ .

**Семейство выходных характеристик схемы с ОБ** представляет собой зависимости  $I_К = f(U_{КБ})$  при заданных значениях параметра  $I_Э$  (рис. 7.5,б).

Выходная характеристика р-п-р-транзистора при  $I_Э = 0$  и обратном напряжении  $|U_{КБ} < 0|$  подобна обратной ветви р-п-перехода (диода). При этом

в соответствии с (7.10)  $I_K = I_{KB0}$ , т. е. характеристика представляет собой обратный ток коллекторного перехода, протекающий в цепи коллектор - база.

При  $I_Э > 0$  основная часть инжектированных в базу носителей (дырок в р-п-р транзисторе) доходит до границы коллекторного перехода и создает коллекторный ток при  $U_{KB} = 0$  в результате ускоряющего действия контактной разности потенциалов. Ток можно уменьшить до нуля путем подачи на коллекторный переход прямого напряжения определенной величины. Этот случай соответствует режиму насыщения, когда существуют встречные потоки инжектированных дырок из эмиттера в базу и из коллектора в базу. Результирующий ток станет равен нулю, когда оба тока одинаковы по величине (например, точка А' на рис.7.5,б). Чем больше заданный ток  $I_Э$ , тем большее прямое напряжение  $U_{KB}$  требуется для получения  $I_K = 0$ .

Область в первом квадранте на рис. 7.5,б, где  $U_{KB} < 0$  (обратное) и параметр  $I_Э > 0$  (что означает прямое напряжение  $U_{ЭБ}$ ) соответствует нормальному активному режиму (НАР). Значение коллекторного тока в НАР определяется формулой (7.10)  $I_K = \alpha I_Э + I_{KB0}$ . Выходные характеристики смещаются вверх при увеличении параметра  $I_Э$ . В идеализированном транзисторе не учитывается эффект Эрли, поэтому интегральный коэффициент передачи тока  $\alpha$  можно считать постоянным, не зависящим от значения  $|U_{KB}|$ . Следовательно, в идеализированном БТ выходные характеристики оказываются горизонтальными ( $I_K = \text{const}$ ). Реально же эффект Эрли при росте  $|U_{KB}|$  приводит к уменьшению потерь на рекомбинацию и росту  $\alpha$ . Так как значение  $\alpha$  близко к единице, то относительное увеличение  $\alpha$  очень мало и может быть обнаружено только измерениями. Поэтому отклонение выходных характеристик от горизонтальных линий вверх “на глаз” не заметно (на рис.7.5,б не соблюден масштаб).

### ***Схема с общим эмиттером***

***Семейство входных характеристик схемы с ОЭ*** представляет собой зависимости  $I_B = f(U_{БЭ})$ , причем фиксированным параметром является напряжение  $U_{КЭ}$  (рис.7.6,а). Для р-п-р транзистора отрицательное напряжение  $U_{БЭ}$  ( $U_{БЭ} < 0$ ) означает прямое включение эмиттерного перехода, так как  $U_{ЭБ} = -U_{БЭ} > 0$ . Если при этом  $U_{КЭ} = 0$  (потенциалы коллектора и эмиттера одинаковы), то и коллекторный переход будет включен в прямом направлении:  $U_{KB} = U_{КЭ} + U_{ЭБ} = U_{ЭБ} > 0$ . Поэтому входная характеристика при  $U_{КЭ} = 0$  будет соответствовать режиму насыщения (РН), а ток базы равным сумме базовых токов из-за одновременной инжекции дырок из эмиттера и коллектора. Этот ток, естественно, увеличивается с ростом прямого напряжения  $U_{ЭБ}$ , так как оно приводит к усилению инжекции в обоих переходах ( $U_{KB} = U_{ЭБ}$ ) и соответствующему возрастанию потерь на рекомбинацию, определяющих базовый ток.

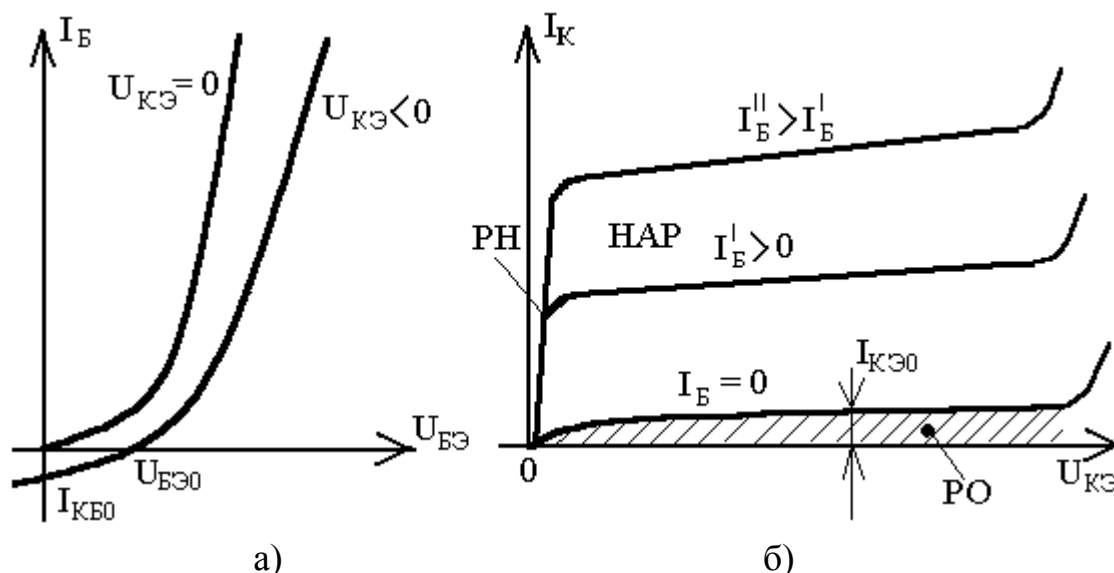


Рис.7.6 –Входные (а) и выходные (б) характеристики БТ в схеме включения с ОЭ

Вторая характеристика на рис.7.6,а ( $U_{КЭ} < 0$ ) относится к нормальному активному режиму, для получения которого напряжение  $U_{КЭ}$  должно быть в р-п-р транзисторе отрицательным и по модулю превышать напряжение  $U_{ЭБ}$ . В этом случае  $U_{КБ} = U_{КЭ} + U_{ЭБ} = U_{КЭ} - U_{БЭ} < 0$ . Формально ход входной характеристики в НАР можно объяснить с помощью выражения (7.13) или (7.16):

$$I_B = (1 - \alpha)I_{Э} - I_{KB0} \quad (7.22)$$

При малом напряжении  $U_{БЭ}$  инжекция носителей практически отсутствует ( $I_{Э} = 0$ ) и ток  $I_B = -I_{KB0}$ , т.е. отрицателен. Увеличение прямого напряжения на эмиттерном переходе  $U_{ЭБ} = -U_{БЭ}$  вызывает рост  $I_{Э}$  и величины  $(1 - \alpha)I_{Э}$ . Когда  $(1 - \alpha)I_{Э} = I_{KB0}$ , ток  $I_B = 0$ . При дальнейшем росте  $U_{БЭ}$   $(1 - \alpha)I_{Э} > I_{KB0}$  и  $I_B$  меняет направление и становится положительным ( $I_B > 0$ ) и сильно зависящим от напряжения перехода.

Влияние  $U_{КЭ}$  на  $I_B$  в НАР можно объяснить тем, что рост  $|U_{КЭ}|$  означает рост  $|U_{КБ}|$  и, следовательно, уменьшение ширины базовой области (эффект Эрли). Последнее будет сопровождаться снижением потерь на рекомбинацию, т.е. уменьшением тока базы (смещение характеристики незначительно вниз).

**Семейство выходных характеристик схемы с ОЭ** представляет собой зависимости  $I_K = f(U_{КЭ})$  при заданном параметре  $I_B$  (рис.7.6, б).

Крутые начальные участки характеристик относятся к режиму насыщения, а участки с малым наклоном - к нормальному активному режиму. Переход от первого режима ко второму, как уже отмечалось, происходит при значениях  $|U_{КЭ}|$ , превышающих  $|U_{БЭ}|$ . На характеристиках в качестве параметра берется не напряжение  $U_{БЭ}$ , а входной ток  $I_B$ . Поэтому о включении эмиттерного перехода приходится судить по значению тока  $I_B$ , который связан с входной характеристикой на рис.7.6,а. Для увеличения  $I_B$

необходимо увеличивать  $|U_{БЭ}|$ , следовательно, и граница между режимом насыщения и нормальным активным режимом должна сдвигаться в сторону больших значений.

Если параметр  $I_B = 0$  («обрыв» базы), то в соответствии с (7.21)  $I_K = I_{КЭ0} = (\beta + 1) I_{КБ0}$ . В схеме с ОЭ можно получить (как и в схеме с ОБ)  $I = I_{КБ0}$ , если задать отрицательный ток  $I_B = -I_{КБ0}$ . Выходная характеристика с параметром  $I_B = -I_{КБ0}$  может быть принята за границу между НАР и режимом отсечки (РО). Однако часто за эту границу условно принимают характеристику с параметром  $I_B = 0$ .

Наклон выходных характеристик в нормальном активном режиме в схеме с общим эмиттером во много раз больше, чем в схеме с общей базой ( $h_{22Э} \approx \beta h_{22Б}$ ). Объясняется это различным проявлением эффекта Эрли. В схеме с общим эмиттером увеличение  $U_{КЭ}$ , а следовательно и  $U_{КБ}$  сопровождается уменьшением тока базы, а он по определению выходной характеристики должен быть неизменным. Для восстановления тока базы приходится регулировкой напряжения  $U_{БЭ}$  увеличивать ток эмиттера, а это вызывает прирост тока коллектора  $\Delta I_K$ , т.е. увеличение выходной проводимости (в схеме с ОБ ток  $I_Э$  при снятии выходной характеристики поддерживается неизменным).