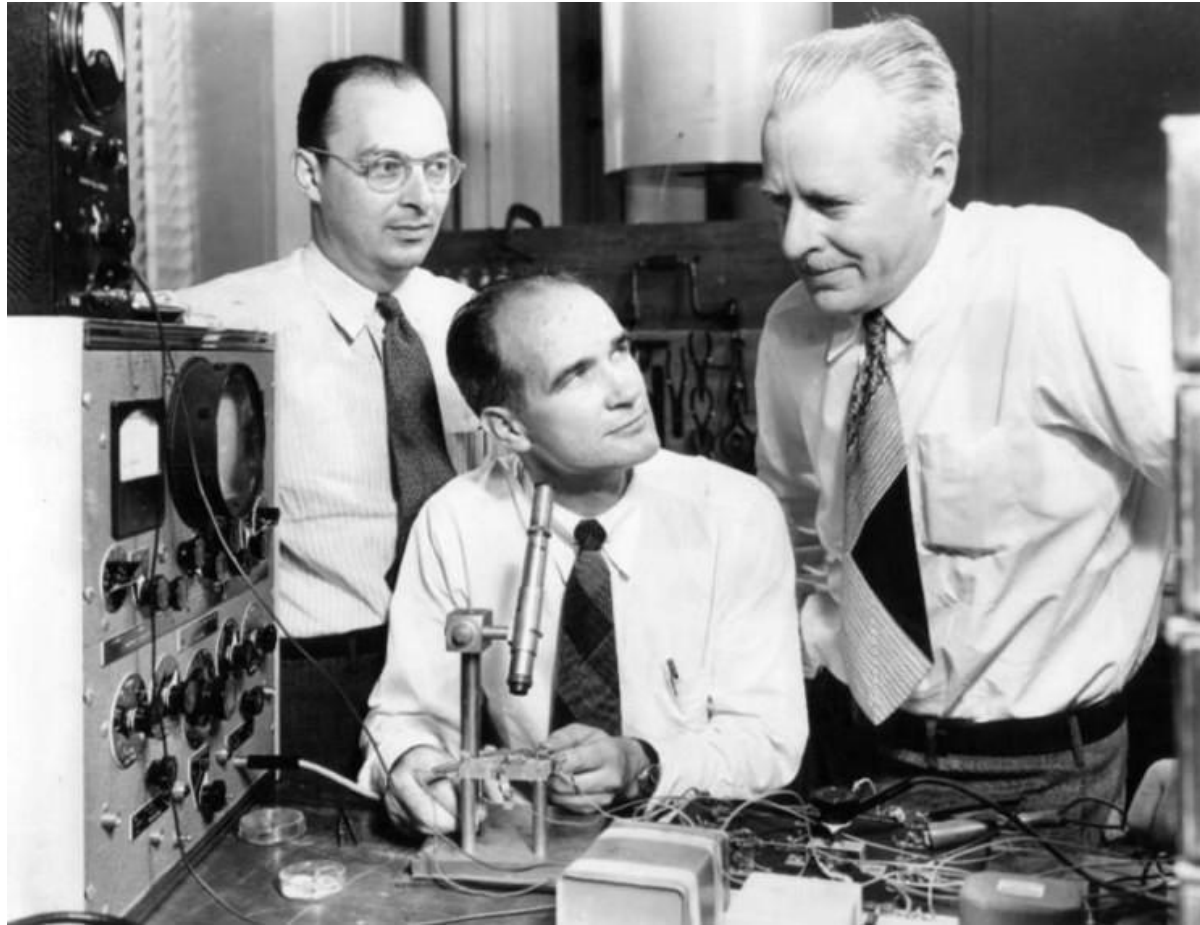


Твердотельная электроника

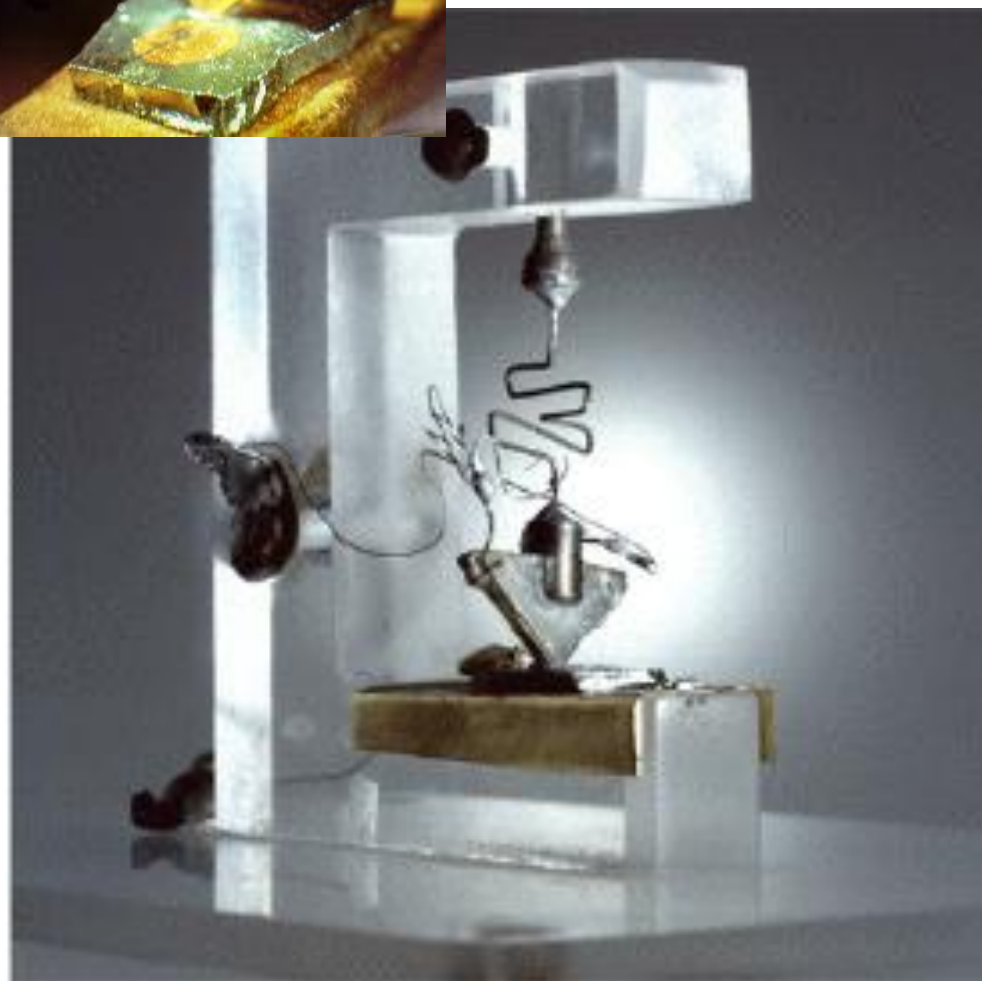
Презентации к лекционному курсу

Биполярные транзисторы

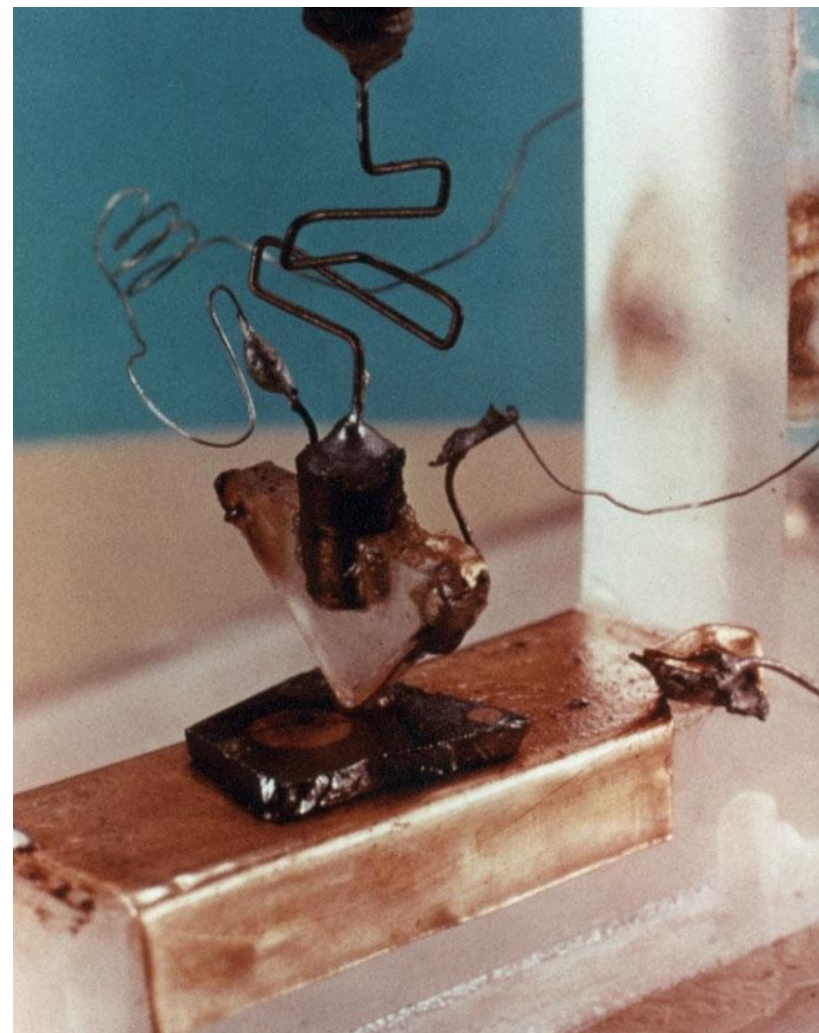
Биполярные транзисторы



В 1947 г. американские ученые Дж. Бардин и У. Браттейн создали п/п-ковый триод, или транзистор (от англ. transit – пропускать и resistor – резистор) (Нобелевская премия В. Шокли, Дж. Бардина, У. Браттейна. 1956 г.).



"The first transistor ever assembled, invented in Bell Labs in 1947." Photo and text from Porticus.org, www.porticus.org/bell/belllabs_transistor.html. (Follow that link to see more historical documents and images about Bell Labs and the transistor.)



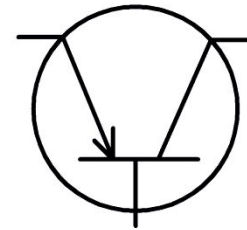
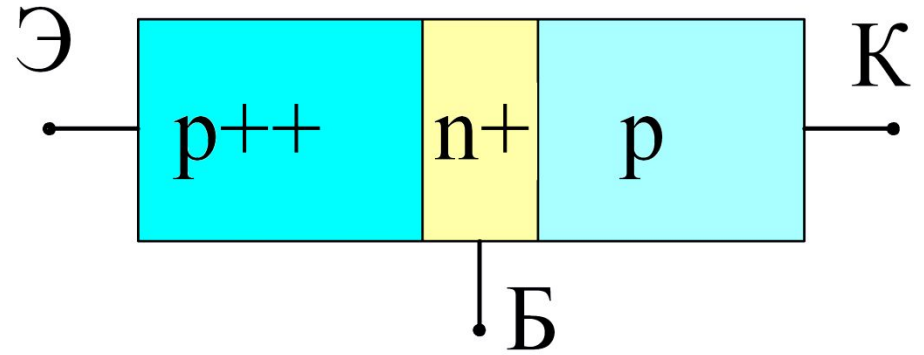
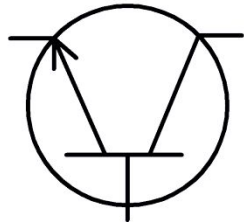
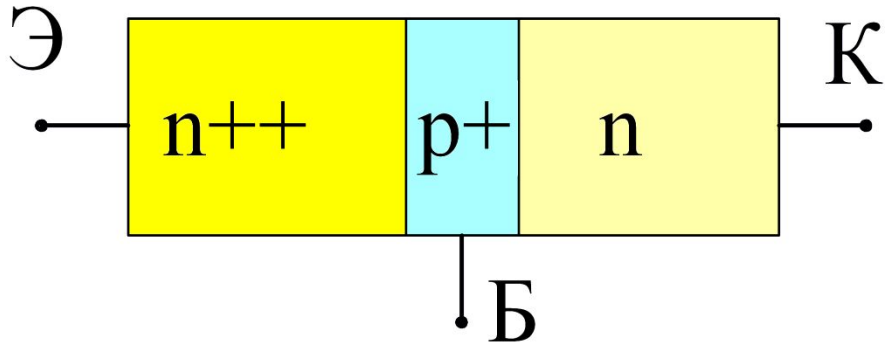
**На фото - первый в мире
полупроводниковый
транзистор на прижимном
контакте**

Это событие имело громадное значение для развития п/п-ковой электроники. Транзисторная структура легла в основу обширного класса усилительных приборов – **биполярных транзисторов**.

Определение «**биполярный**» указывает на то, что работа транзистора связана с процессами, в которых принимают е-ны и дырки, то есть **основные** и **неосновные** НЗ.

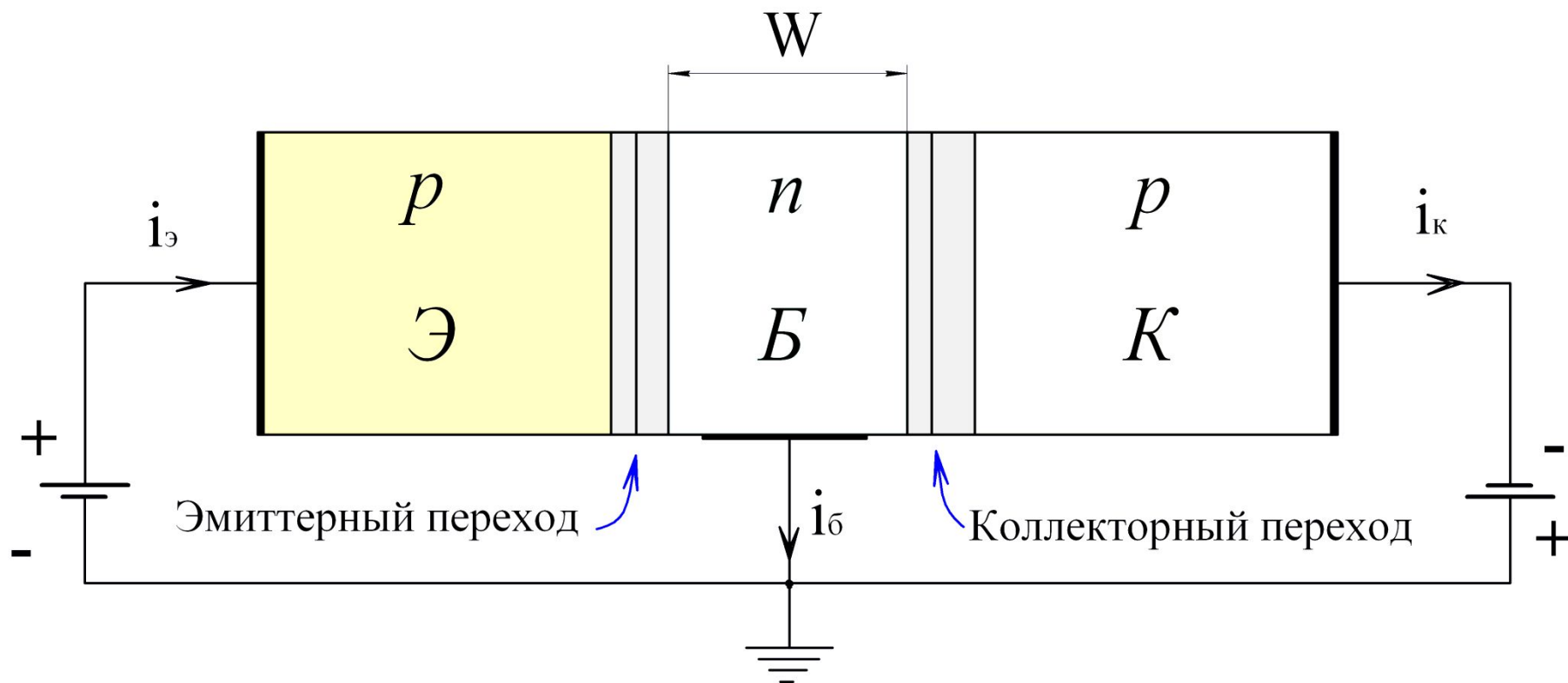
Транзистором называется *n/p-ковый прибор с двумя расположенными на близком расстоянии параллельными pn-переходами, предназначенный для усиления и генерирования электрических сигналов.*

Различают *npn*-транзисторы и *pnp*-транзисторы

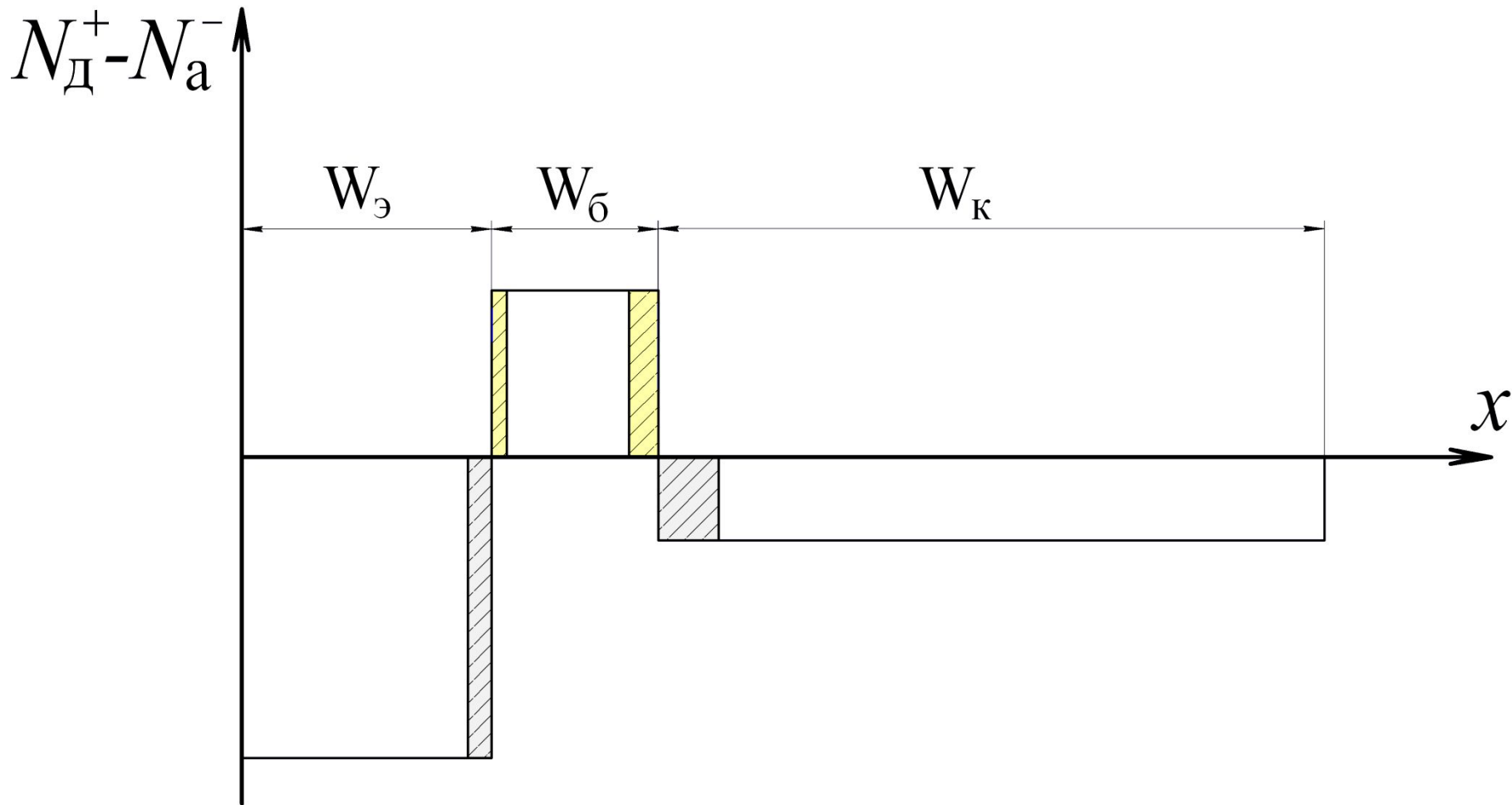


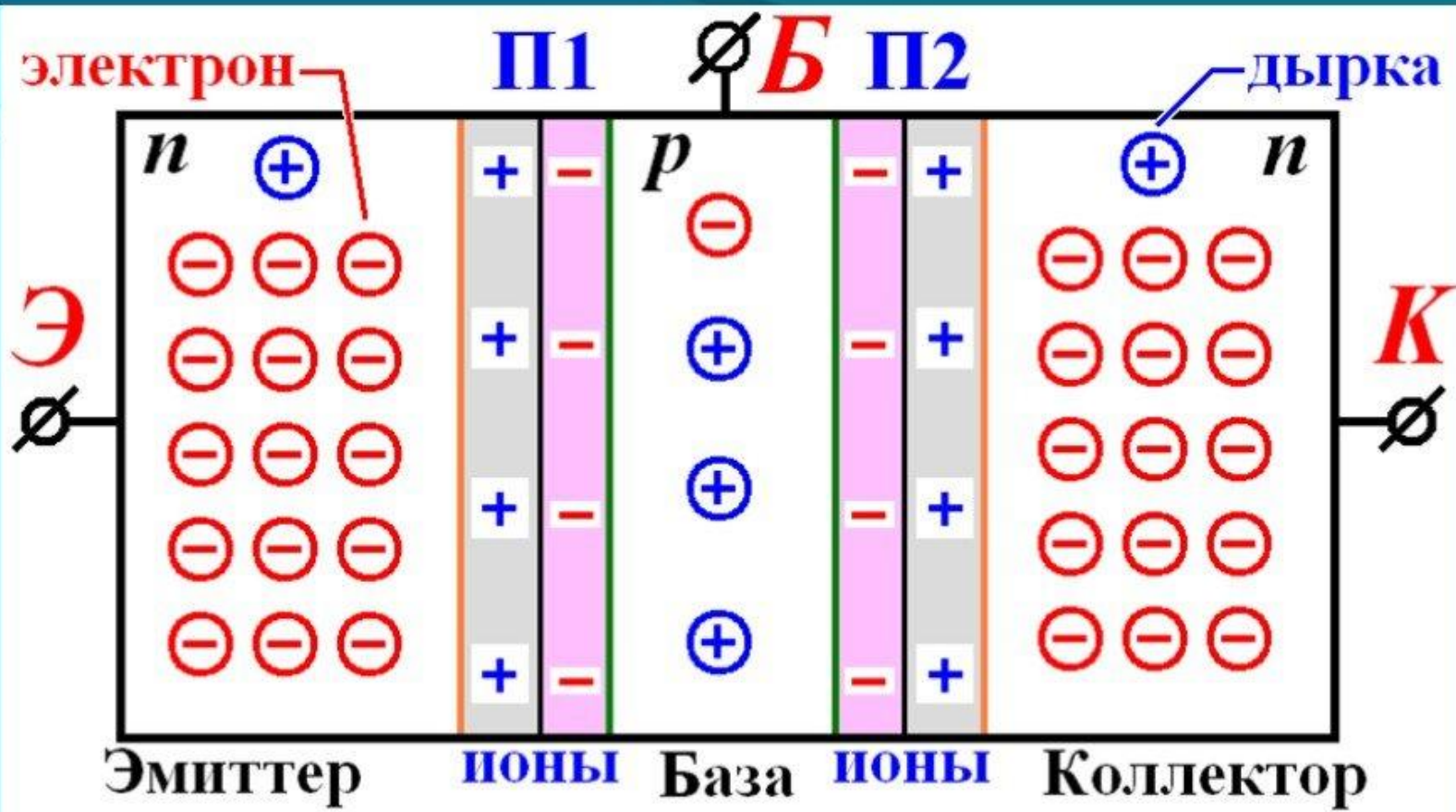
Стрелкой обозначен эмиттер, направление стрелки, как и в случае диода, от *p*-типа к *n*-типу

Центральную часть транзистора называется *базой* (**Б**), левая высоколегированная – *эмиттер* (**Э**), правая, низколегированная – *коллектор* (**К**). Переход, разделяющий эмиттер и базу, называется *эмиттерным переходом* (**ЭП**), а переход, разделяющий базу и коллектор, – *коллекторным переходом* (**КП**).



Распределение примеси в *pnp*-транзисторе





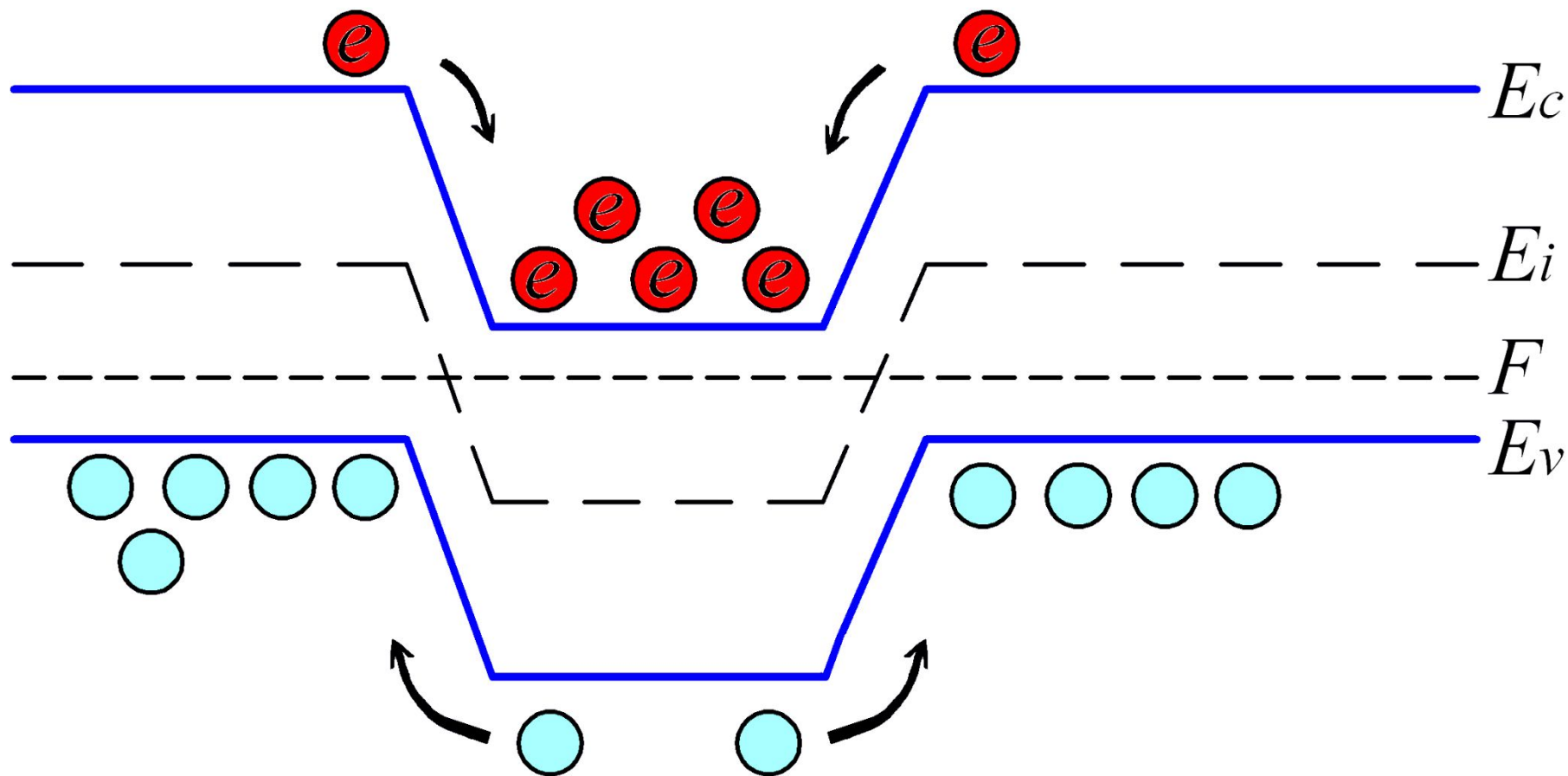
Эмиттер (Э), Коллектор (К): основные заряды электроны, не основные дырки;
База (Б): основные заряды дырки, не основные электроны;
p-n переходы **П1, П2** образованы ионами полупроводника.

Зонная диаграмма р-п-р транзистора при ТДР

Э

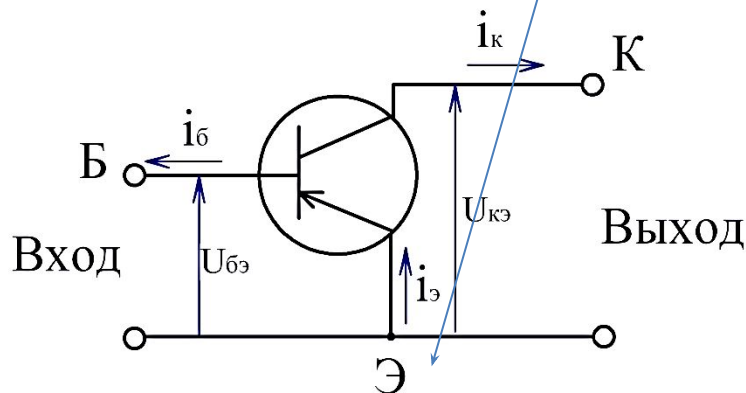
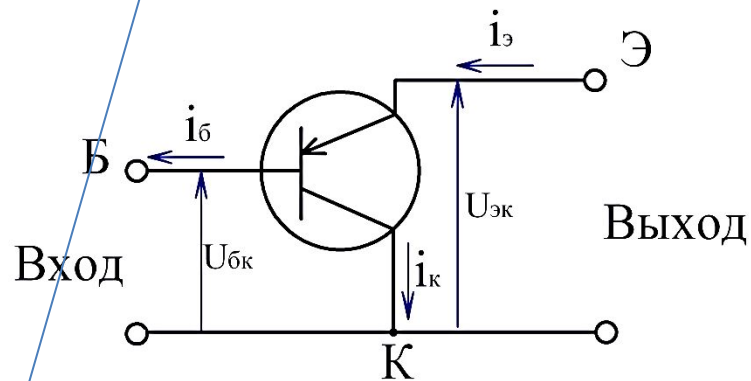
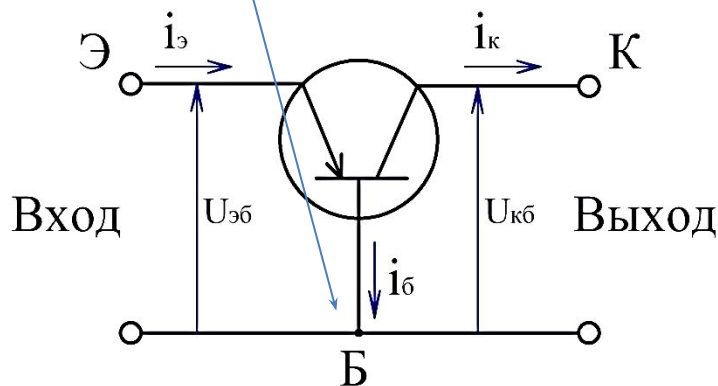
Б

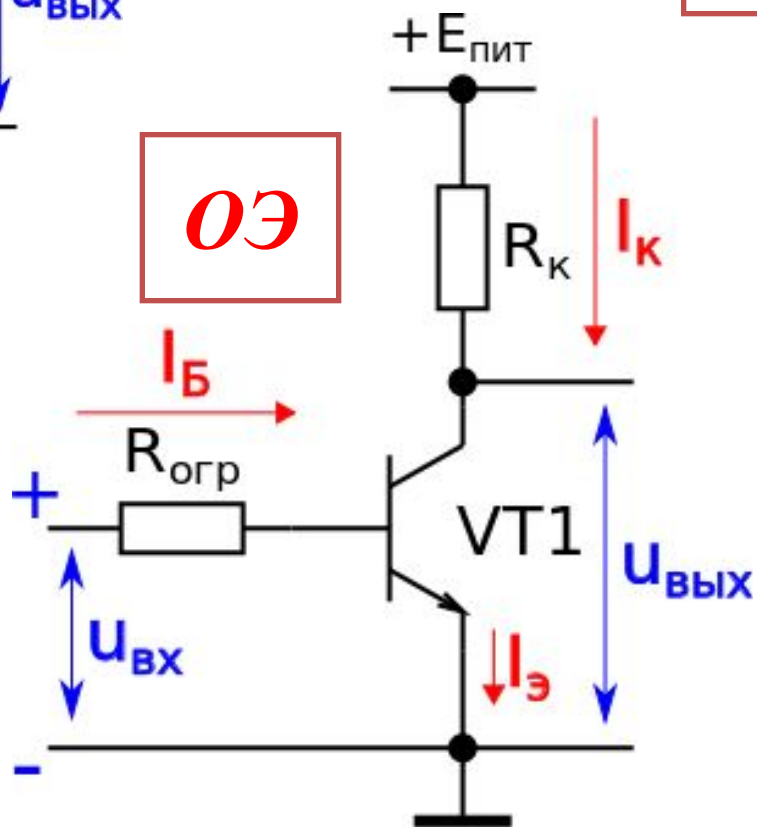
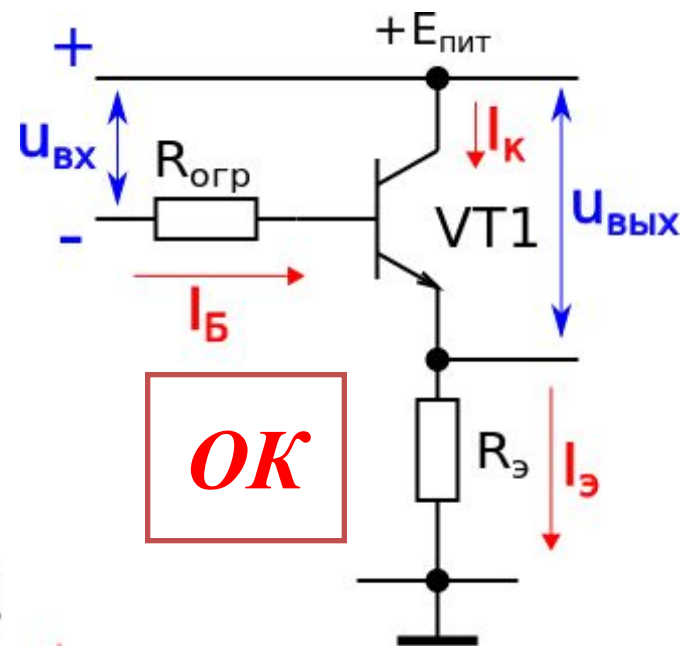
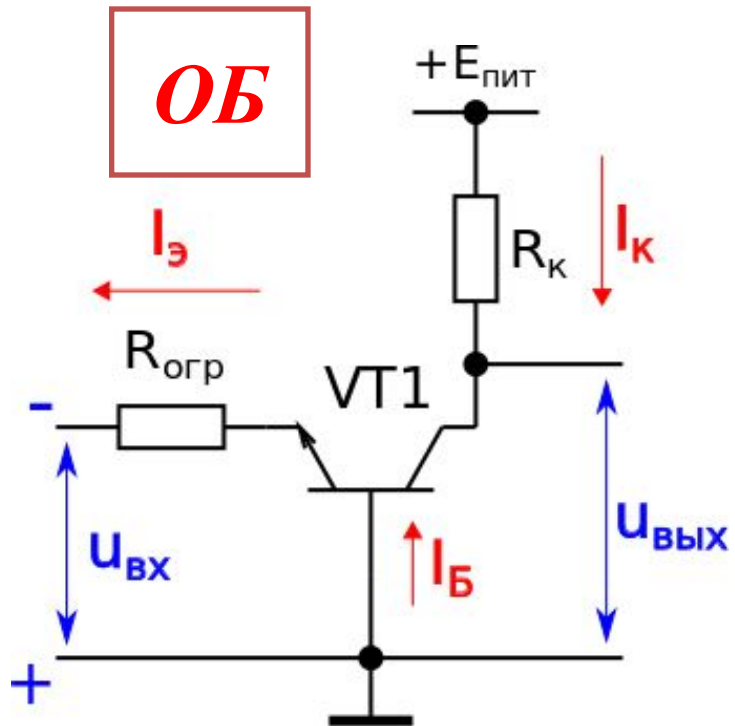
К



Включение транзисторов в схему

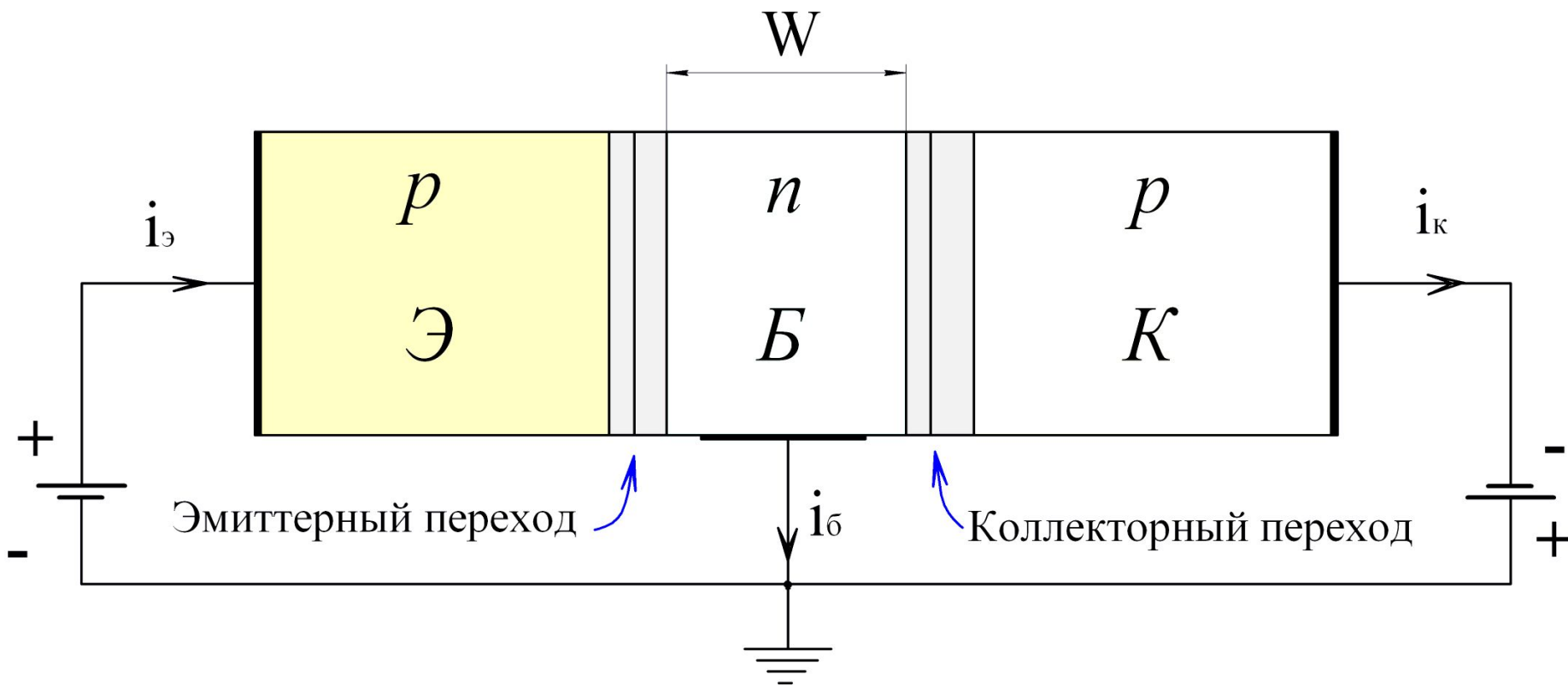
В электрическую схему транзистор можно включить тремя режимами (в зависимости от того, какой электрод является общим для входного и выходного напряжения): с **общей базой (ОБ)**, с **общим эмиттером (ОЭ)** и с общим коллектором (ОК).

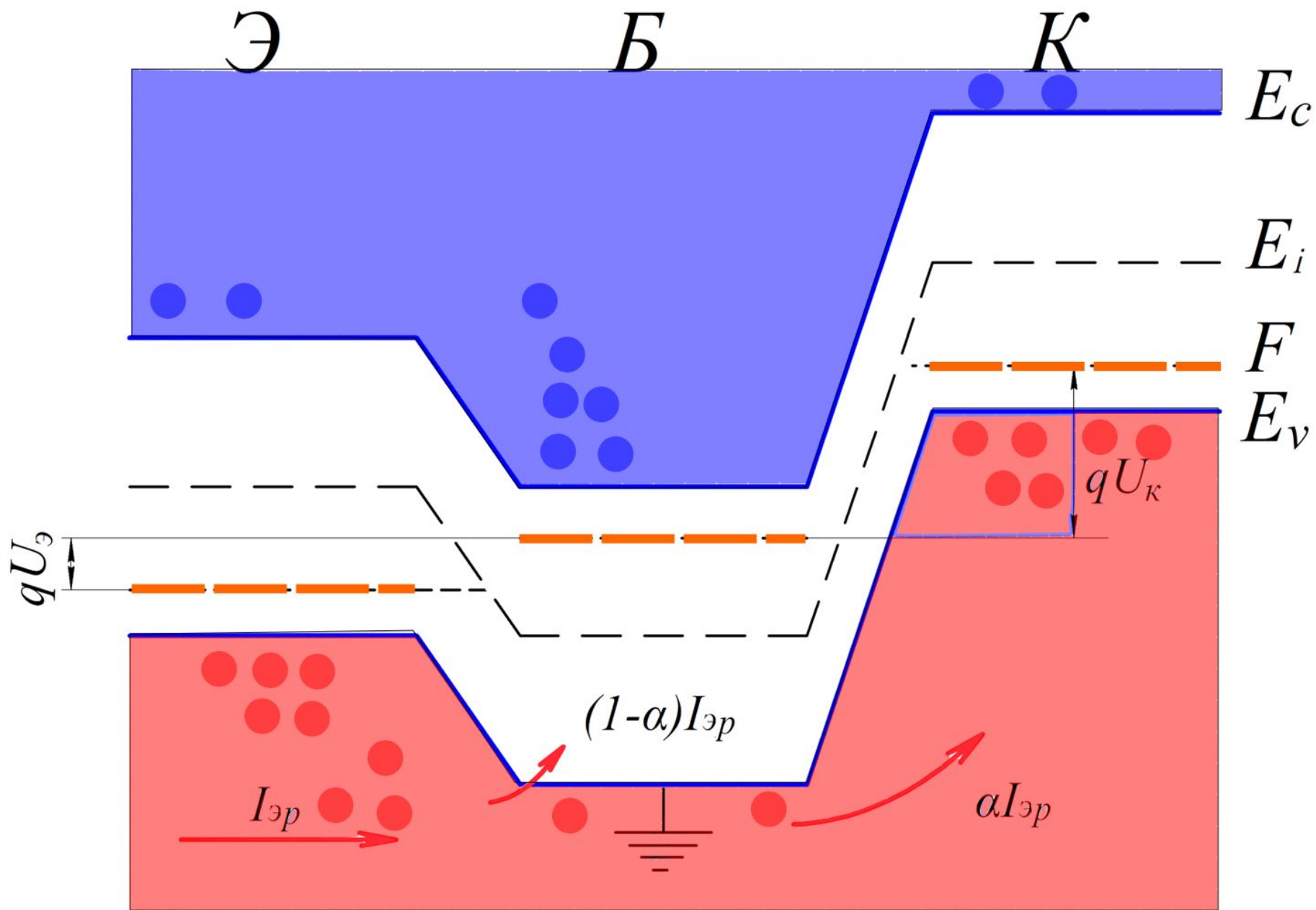




Включение транзистора по схеме с общей базой

Пусть ЭП включен в прямом направлении, КП – в обратном.





Такая полярность напряжения обеспечивает **открытое состояние ЭП** и **закрытое состояние КП**, что соответствует **активному режиму** работы транзистора, когда выходной (коллекторный) ток изменяется в соответствии с входным напряжением или током. Другие режимы – **инверсный, насыщения и отсечки** – будут рассмотрены ниже.

Напряжение, приложенное к ЭП, уменьшает потенциальный барьер, и из Э в Б инжектируются ОНЗ (дырки в *pnp*-транзисторе или электроны в *npr*-транзисторе), становясь в базе ННЗ (избыточными, неравновесными). Этот поток очень сильно зависит от напряжения на эмиттерном переходе $V_{ЭБ}$, экспоненциально возрастая с $\uparrow V_{ЭБ}$.

Поток дырок и, соответственно, ток коллектора I_K , являющийся выходным током транзистора, очень эффективно управляется входным напряжением $V_{ЭБ}$ и не зависят от выходного напряжения $V_{КБ}$.

Вследствие диффузии инжектированные НЗ движутся через базу к КП, частично рекомбинируя с ОНЗ – дырками в *pnp*-транзисторе и электронами в *npn*-транзисторе.

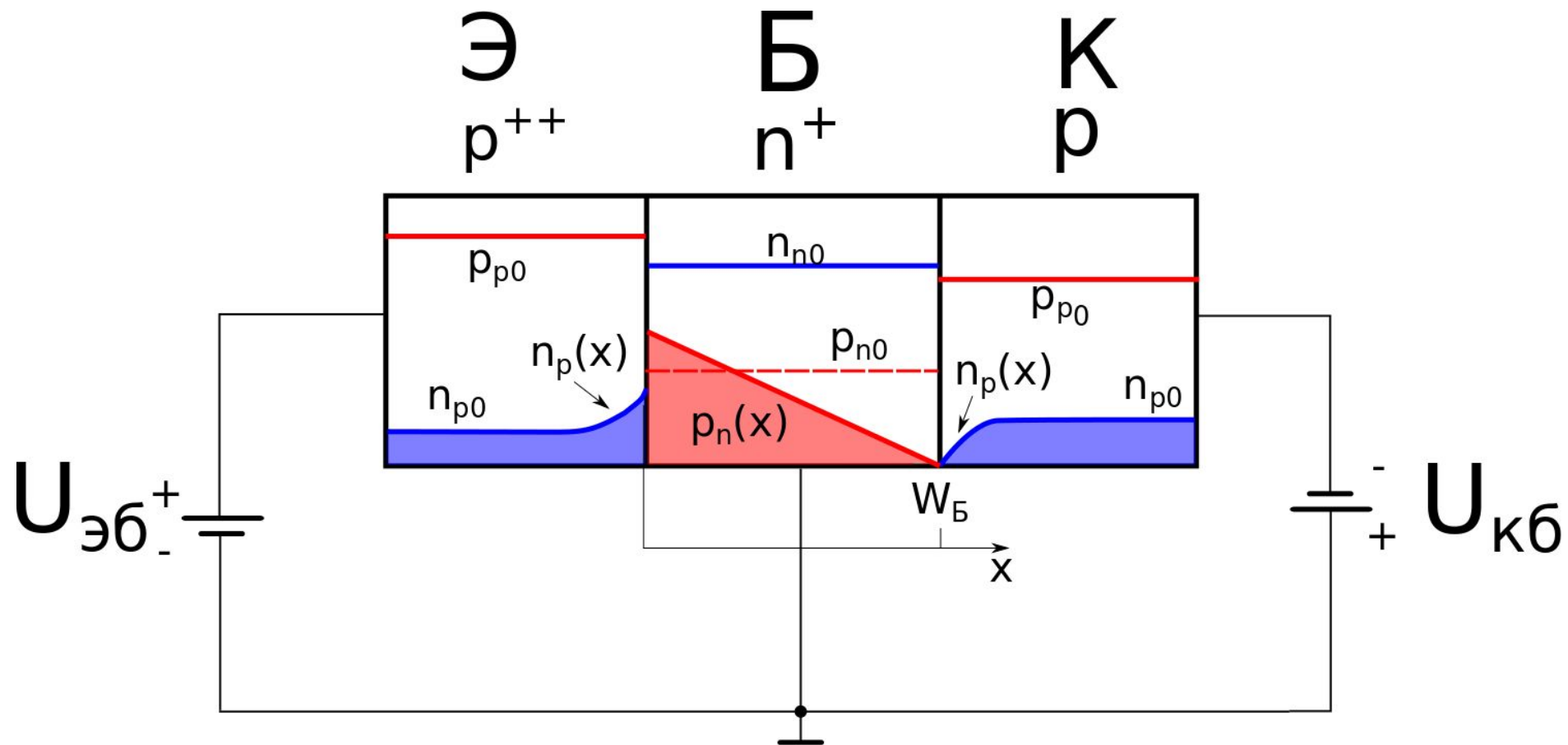
Между Б и К для ННЗ барьера нет, поэтому все дошедшие до К НЗ проходят через КП и создают I_K .

Говорят, что достигнувшие КП НЗ *экстрагируются* полем закрытого КП в коллектор.

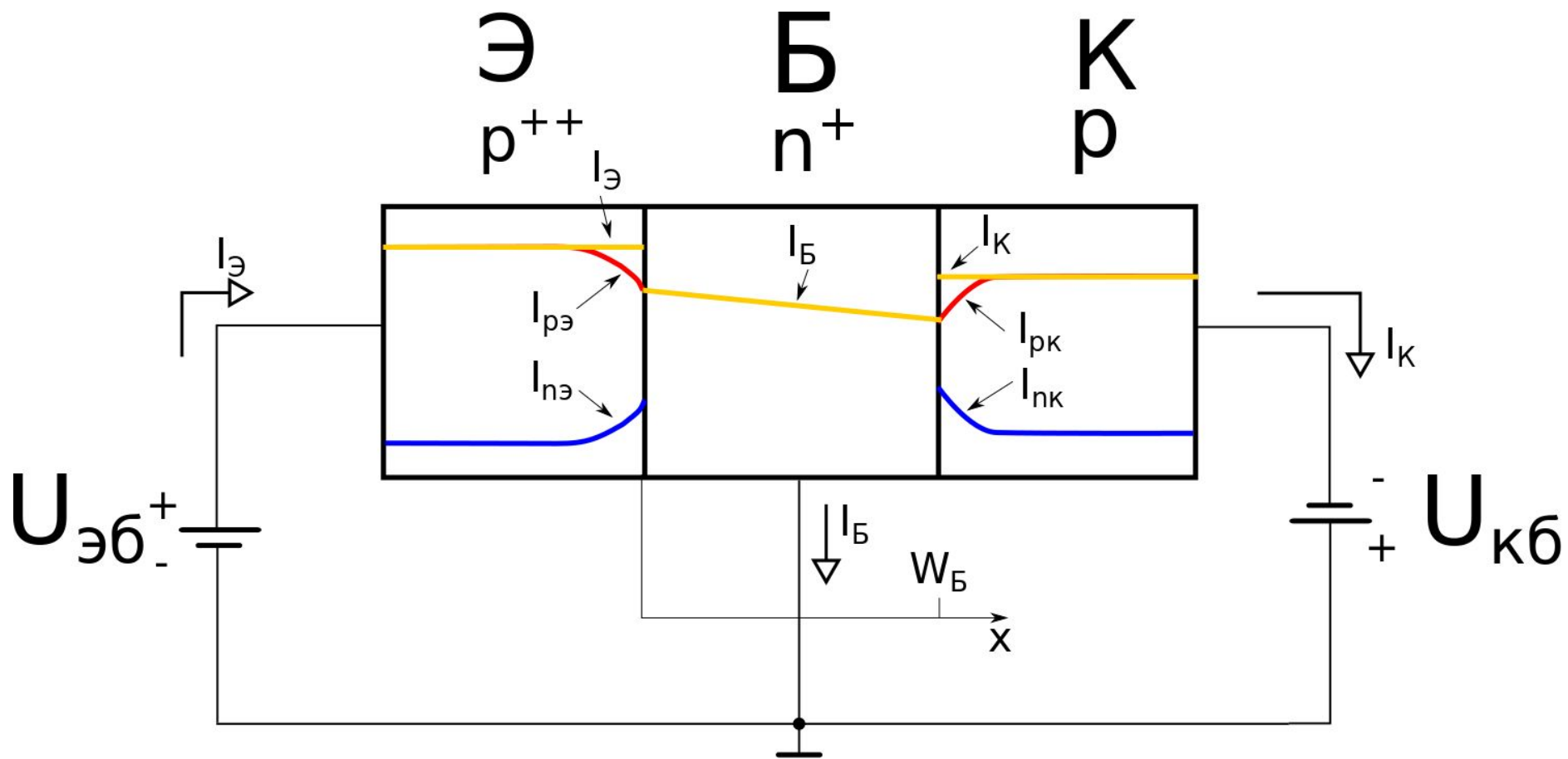
Эффективное управление выходным током с помощью входного напряжения составляет основу принципа работы биполярного транзистора и позволяет использовать транзистор для усиления электрических сигналов.

Определим характер распределения ННЗ и токов в областях базы, эмиттера и коллектора транзистора.

Распределение ННЗ в базе



Распределение токов



Отношение приращения I_K к вызвавшему его приращению I_ε при постоянном напряжении на коллекторе называют *коэффициентом передачи тока эмиттера*

$$\alpha \Big|_{U_K = \text{const}} = \frac{dI_K}{dI_\varepsilon}$$

Коллекторный ток транзистора обусловлен не всем эмиттерным током, а только его дырочной составляющей. Поэтому коэффициент передачи зависит от того, какую часть тока эмиттера составляет именно его *дырочная компонента*.

Для характеристики эмиттерного перехода вводят *коэффициент инжекции*

$$\gamma = \frac{dI_{p\varepsilon}}{dI_\varepsilon} = \frac{dI_{p\varepsilon}}{d(I_{p\varepsilon} + I_{n\varepsilon})}$$

$$\gamma_{pnp} = \frac{dI_{p\ominus}}{dI_{\ominus}} = \frac{dI_{p\ominus}}{d(I_{p\ominus} + I_{n\ominus})}$$

$$\gamma_{npn} = \frac{dI_{n\ominus}}{dI_{\ominus}} = \frac{dI_{n\ominus}}{d(I_{p\ominus} + I_{n\ominus})}$$

$$N_{\ominus} \gg N_{\text{B}}$$

Не все инжектированные Э-м дырки доходят до К-ра, некоторая их часть рекомбинирует в базе, поэтому плотность дырочного тока коллектора $j_{pK} < j_{pЭ}$, а $I_{pK} < I_{pЭ}$.

Для отражения этого вводят понятие *коэффициента переноса* или *коэффициента рекомбинации* α , который показывает, какая часть инжектированных НЗ достигла коллектора. По определению

$$\alpha = \frac{dI_{pK}}{dI_{pЭ}}$$

Коэффициент переноса зависит от ширины базы W_B и диффузионной длины ННЗ в базе L_p . Именно необходимость обеспечить перенос инжектированных НЗ через базу транзистора выдвигает требование, чтобы их диффузионная длина L_p была больше ширины базы транзистора $L_p \gg W$.

Выполнение этого условия позволяет обеспечить высокие значения коэффициента переноса (обычно $\alpha > 0.98$).

Преимущественное легирование одной из областей влечет за собой преимущественное инжектирование e -нов либо дырок.

Если считать I_K чисто дырочным, что справедливо для сильно легированного эмиттера, то коэффициент передачи:

$$\alpha = \gamma \cdot \alpha$$

Аналитические выражения, связывают коэф. передачи α с физическими свойствами p/p -ковых материалов p - и n -областей.

Допущения:

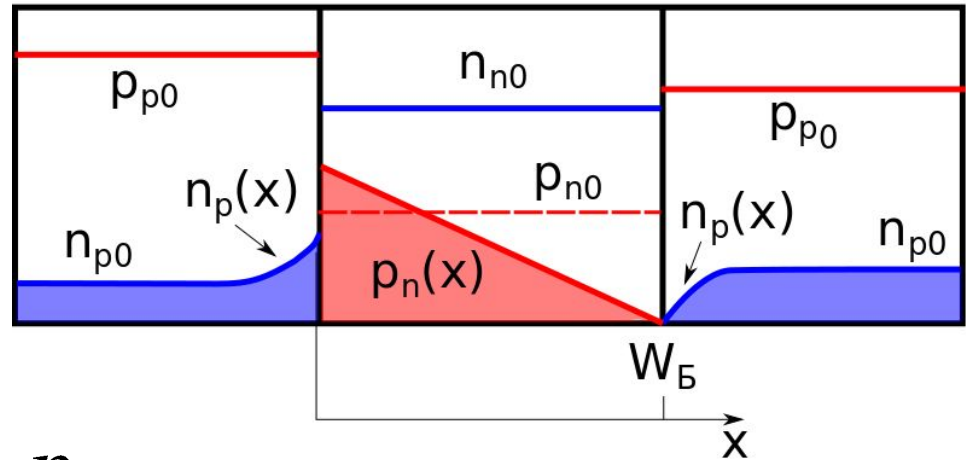
- модель тр-ра одномерная;
- эл. поля в базе нет ($E=0$);
- генерация и рекомбинация в pn -переходах отсутствуют;
- уровень инжекции \mathcal{E} мал (НУИ).

Э

Б

К

Уравнение диффузии дырок в области базы в стационарном режиме



$$D_p \cdot \frac{\partial^2 p_n(x)}{\partial x^2} - \frac{p_n(x) - p_{n0}}{\tau_p} = 0$$

Граничные условия:

$$\text{при } x = 0 : \quad p_{nБ} = p_{n0} \cdot \exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\varphi_T}\right)$$

$$\text{при } x = W_{\delta} : \quad p_{nБ} = p_{n0} \cdot \exp\left(-\frac{U_{КБ}}{\varphi_T}\right) = 0$$

Решение уравнения имеет вид:

$$\begin{aligned} p_{nB}(x) - p_{n0B} &= \frac{\Delta p_{\text{Э}} \cdot \operatorname{sh} \frac{W-x}{L_{pB}} + \Delta p_{\text{К}} \cdot \operatorname{sh} \frac{x}{L_{pB}}}{\operatorname{sh} \frac{W}{L_{pB}}} = \\ &= p_{n0B} \cdot \frac{\left[\exp\left(\frac{U_{\text{ЭБ}}}{\phi_T}\right) - 1 \right] \cdot \operatorname{sh} \frac{W-x}{L_{pB}} + \operatorname{sh} \frac{x}{L_{pB}}}{\operatorname{sh} \frac{W}{L_{pB}}} \end{aligned}$$

Плотность дырочного тока найдем, дифференцируя последнее выражение по x :

$$j_p(x) = -q \cdot D_{pB} \cdot \frac{dp_B(x)}{dx} = \frac{q \cdot D_{pB} \cdot p_{n0B}}{L_{pB}} \cdot \frac{\left[\exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\phi_T}\right) - 1 \right] \cdot ch \frac{W-x}{L_{pB}} + ch \frac{x}{L_{pB}}}{sh \frac{W}{L_{pB}}}$$

Полагая $x = 0$ и $x = W$, находим дырочные составляющие токов эмиттерного и коллекторного переходов:

$$j_{pЭ} = \frac{q \cdot D_{pB} \cdot p_{n0B}}{L_{pB}} \cdot \frac{\left[\exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\phi_T}\right) - 1 \right] \cdot ch \frac{W}{L_{pB}} + 1}{sh \frac{W}{L_{pB}}} \quad (1)$$

$$j_{pК} = \frac{q D_{pB} p_{n0B}}{L_{pB}} \cdot \frac{\left[\exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\phi_T}\right) - 1 \right] + ch \frac{W}{L_{pB}}}{sh \frac{W}{L_{pB}}} \quad (2)$$

Используя выражения (1) и (2), найдем коэффициент переноса:

$$\alpha = \frac{dI_{pK}}{dI_{pЭ}} = \left(ch \frac{W}{L_{pБ}} \right)^{-1} \quad (3)$$

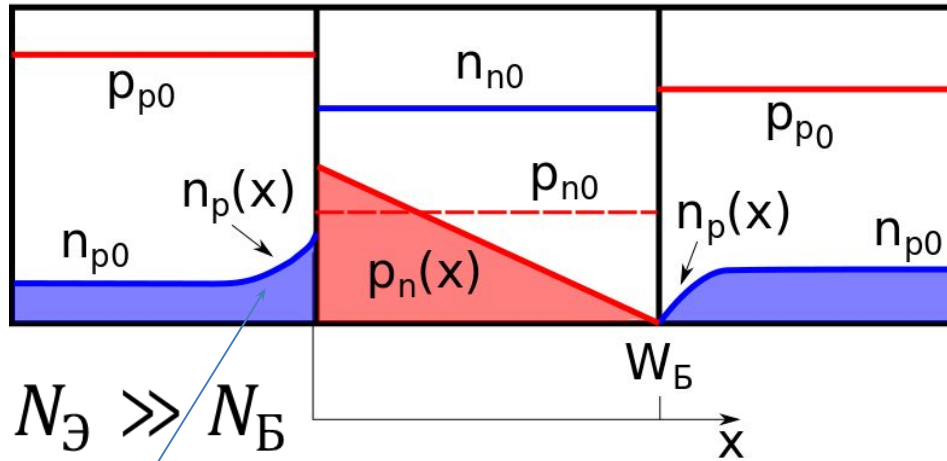
Для нахождения коэффициента инжекции γ необходимо знать полный ток эмиттера. Для нахождения **электронной составляющей тока эмиттера** решим уравнение диффузии электронов в p -области эмиттера:

$$D_{nЭ} \frac{\partial^2 n_{pЭ}(x)}{\partial x^2} - \frac{n_{pЭ}(x) - n_{p0Э}}{\tau_{nЭ}} = 0$$

Э

Б

К



при $x = 0$:

$$n_{pЭ} \Big|_{x=0} = n_{p0Э} \cdot \exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\varphi_T}\right)$$

при $x = -\infty$:

$$n_{pЭ} \Big|_{x \rightarrow -\infty} = n_{p0Э}$$

$$\Delta n_{pЭ}(x) = n_{pЭ}(x) - n_{p0Э} = n_{p0Э} \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\varphi_T}\right) - 1 \right] \cdot \exp\left(\frac{x}{L_{nЭ}}\right)$$

$$j_{nЭ}(x) = q \cdot D_{nЭ} \cdot \frac{dn_{pЭ}}{dx} = q \cdot \frac{D_{nЭ} \cdot n_{p0Э}}{L_{nЭ}} \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\phi_T}\right) - 1 \right] \cdot \exp\left(\frac{x}{L_{nЭ}}\right)$$

Электронную компоненту тока ЭП на границе с базой получим из этого выражения при $x=0$:

$$j_{nЭ} = q \frac{D_{nЭ} n_{p0Э}}{L_{nЭ}} \left[\exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\phi_T}\right) - 1 \right]$$

Эмиттерный ток имеет две компоненты: $j_{Э} = j_{pЭ} + j_{nЭ}$

$$j_{Э} = \frac{q \cdot D_{pБ} \cdot p_{n0Б}}{L_{pБ}} \cdot \frac{\left[\exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\phi_T}\right) - 1 \right] \cdot ch \frac{W}{L_{pБ}} + 1}{sh \frac{W}{L_{pБ}}} + \frac{q \cdot D_{nЭ} \cdot n_{p0Э}}{L_{nЭ}} \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\phi_T}\right) - 1 \right]$$

$$\gamma = \frac{dj_{pЭ}}{d(j_{pЭ} + j_{nЭ})} = \left(1 + \frac{D_{nЭ} \cdot n_{p0Э} \cdot L_{pБ}}{D_{pБ} \cdot p_{n0Б} \cdot L_{nЭ}} \cdot th \frac{W}{L_{pБ}} \right)^{-1} \quad (4)$$

Если бы эмиттерный ток целиком состоял из ННЗ ($\gamma = 1$) и все они доходили до коллектора ($\alpha = 1$), то коллекторный ток был бы равен току эмиттера, а коэффициент передачи $\alpha = 1$.

Для нахождения коэффициента передачи тока эмиттера найдем **электронную составляющую тока коллектора**, для этого решим уравнение диффузии для е-нов в р-области коллектора:

$$D_{nK} \frac{\partial^2 n_{pK}}{\partial x^2} - \frac{n_{pK} - n_{p0K}}{\tau_{nK}} = 0$$

с граничными условиями:

$$\text{при } x = W: \quad n_{pK} \Big|_{x=W} = n_{p0K} \cdot \exp\left(-\frac{U_{KB}}{\phi_T}\right) = 0$$

$$\text{при } x = \infty: \quad n_{pK} \Big|_{x=\infty} = n_{p0K}$$

Решение имеет вид:

$$\Delta n_{pK}(x) = n_{pK}(x) - n_{p0K} = -n_{p0K} \cdot \exp\left(\frac{x - W}{L_{nK}}\right)$$

$$j_{nK}(x) = -q \cdot D_{nK} \cdot \frac{dn_K}{dx} = \frac{q \cdot D_{nK} \cdot n_{p0K}}{L_{nK}} \cdot \exp\left(\frac{x - W}{L_{nK}}\right)$$

Зная электронную и дырочную составляющие тока коллектора, получаем **полный ток через коллекторный переход** при $x = W$:

$$j_K(x) = \left(\frac{q \cdot D_{nK} \cdot n_{p0K}}{L_{nK}} + \frac{q \cdot D_{pK} \cdot p_{n0K}}{L_{pK}} \right) \cdot \frac{\left[\exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\phi_T}\right) - 1 \right] + ch \frac{x}{L_{pБ}}}{sh \frac{W}{L_{pБ}}}$$

$$\alpha = \frac{dI_K}{dI_\Theta} = \left(1 + \frac{D_{n\Theta} \cdot n_{p0\Theta} \cdot L_{pB}}{D_{pB} \cdot p_{n0B} \cdot L_{n\Theta}} \cdot th \frac{W}{L_{pB}} \right)^{-1} \cdot \left(ch \frac{W}{L_{pB}} \right)^{-1} \quad (7)$$

Уравнения (3), (4) и (7) примут более простой вид, если гиперболические функции, входящие в них, разложить в ряд Тейлора. Учитывая, что $W/L_p \ll 1$:

$$sh \frac{W}{L_p} \approx th \frac{W}{L_{pB}} \approx \frac{W}{L_{pB}}; \quad ch \frac{W}{L_{pB}} \approx 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{W}{L_{pB}} \right)^2$$

$$\gamma = \left(1 + \frac{D_{n\mathcal{E}} \cdot n_{p0\mathcal{E}}}{D_{p\mathcal{B}} \cdot p_{n0\mathcal{B}}} \cdot \frac{W}{L_{n\mathcal{E}}} \right)^{-1} \cong 1 - \frac{D_{n\mathcal{E}} \cdot n_{p0\mathcal{E}}}{D_{p\mathcal{B}} \cdot p_{n0\mathcal{B}}} \cdot \frac{W}{L_{n\mathcal{E}}}$$

$$\alpha = \left(ch \frac{W}{L_{p\mathcal{B}}} \right)^{-1} \approx \left[1 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{W}{L_{p\mathcal{B}}} \right)^2 \right]^{-1} \cong 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{W}{L_{p\mathcal{B}}} \right)^2$$

$$\alpha = \left(1 + \frac{D_{n\mathcal{E}} \cdot n_{p0\mathcal{E}}}{D_{p\mathcal{B}} \cdot p_{n0\mathcal{B}}} \cdot \frac{W}{L_{n\mathcal{E}}} \right)^{-1}$$

Учитывая связь ОНЗ и ННЗ

$$n_i^2 = N_d \cdot p_{n0}; n_i^2 = N_a \cdot n_{p0}$$

МОЖНО ЗАПИСАТЬ:

$$\gamma = 1 - \frac{D_{nЭ} \cdot N_{dB} \cdot W}{D_{pБ} \cdot N_{aЭ} \cdot L_{nЭ}}$$

$$\alpha = \left(1 + \frac{D_{nЭ} \cdot N_{dB} \cdot W}{D_{pБ} \cdot N_{aЭ} \cdot L_{nЭ}} \right)^{-1}$$

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{Б}} + I_{\text{К}}; I_{\text{К}} = \alpha \cdot I_{\text{Э}} + I_{\text{КБ0}}$$

Ток **базы** $I_{\text{Б}}$ тр-ра будет состоять из трех компонент, включающих электронный ток в ЭП

$$I_{n\text{Э}} = (1 - \gamma) \cdot I_{\text{Э}}$$

рекомбинационный ток в базе

$$(1 - \alpha) \cdot \gamma \cdot I_{\text{Э}}$$

и тепловой ток коллектора $I_{\text{КБ0}}$.

Тепловой ток коллектора при включении по схеме ОБ I_{KB0} имеет две составляющие:

$$I_{KB0} = I_s + I_g$$

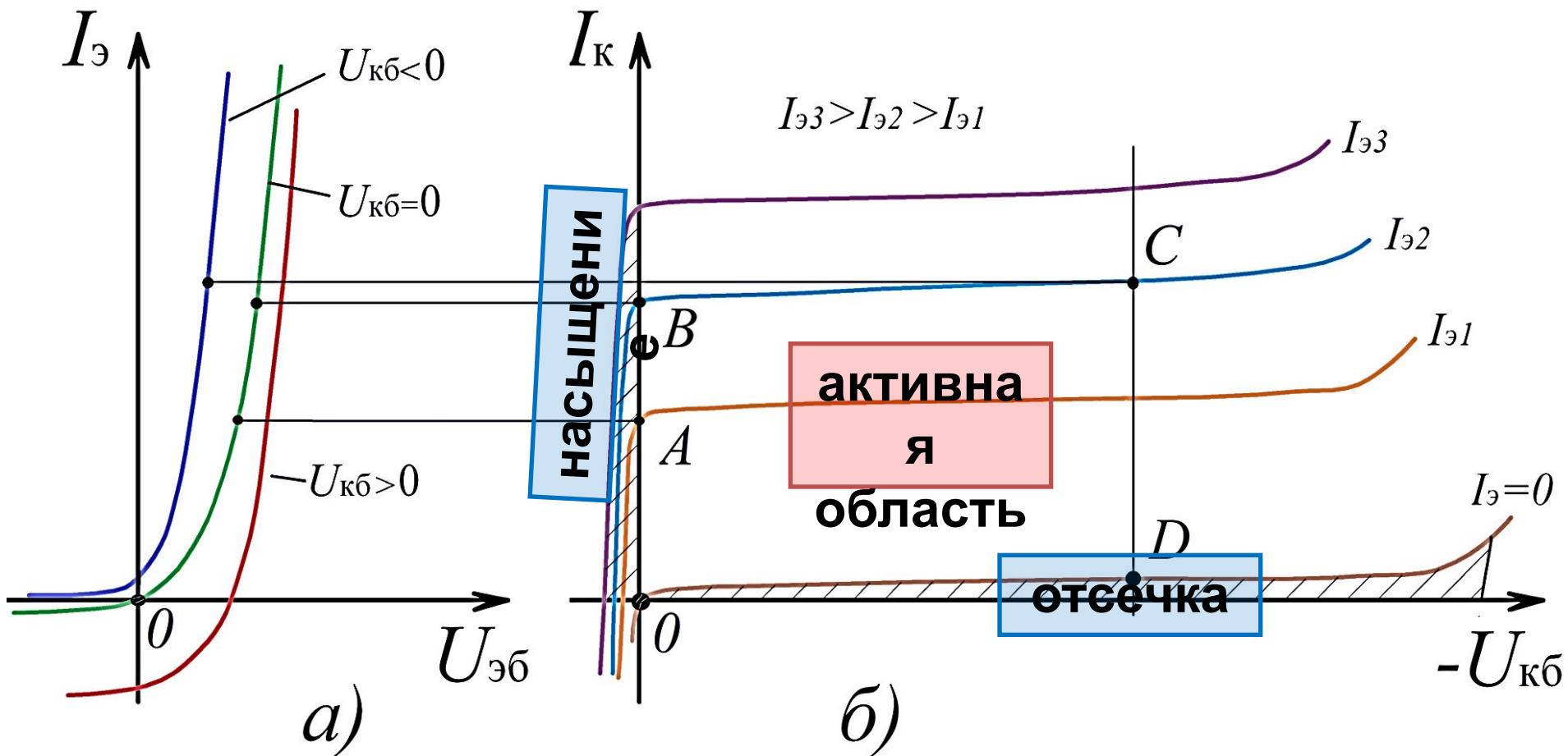
где I_s – тепловой ток насыщения, I_g – ток генерации коллекторного pn -перехода. Ток I_{KB0} – ток обратно смещенного КП.

Т.о., в биполярном тр-ре реализуются четыре физических процесса:

- инжекция из Э в Б;
- диффузия через базу;
- рекомбинация в базе;
- экстракция из Б в К.

Входная и выходная ВАХ

р-п-р транзистора в схеме ОБ



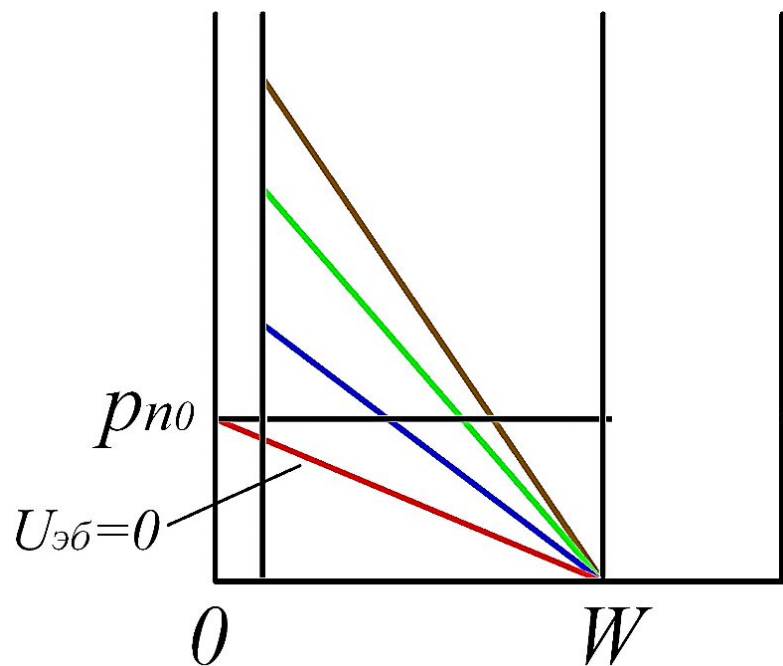
Уравнения транзистора в схеме ОБ

$$\alpha_N = \frac{dI_K}{dI_{\mathcal{E}}} = \left(1 + \frac{D_{n\mathcal{E}} \cdot n_{p0\mathcal{E}} \cdot L_{p\mathcal{B}}}{D_{p\mathcal{B}} \cdot p_{n0\mathcal{B}} \cdot L_{n\mathcal{E}}} \cdot th \frac{W}{L_{p\mathcal{B}}} \right)^{-1} \cdot \left(ch \frac{W}{L_{p\mathcal{B}}} \right)^{-1} \approx \left(1 + \frac{D_{n\mathcal{E}} \cdot n_{p0\mathcal{E}} \cdot W}{D_{p\mathcal{B}} \cdot p_{n0\mathcal{B}} \cdot L_{n\mathcal{E}}} \right)^{-1}$$
$$\alpha_N = \left(1 + \frac{D_{n\mathcal{E}} \cdot N_{a\mathcal{B}} \cdot W}{D_{p\mathcal{B}} \cdot N_{d\mathcal{E}} \cdot L_{n\mathcal{E}}} \right)^{-1}$$

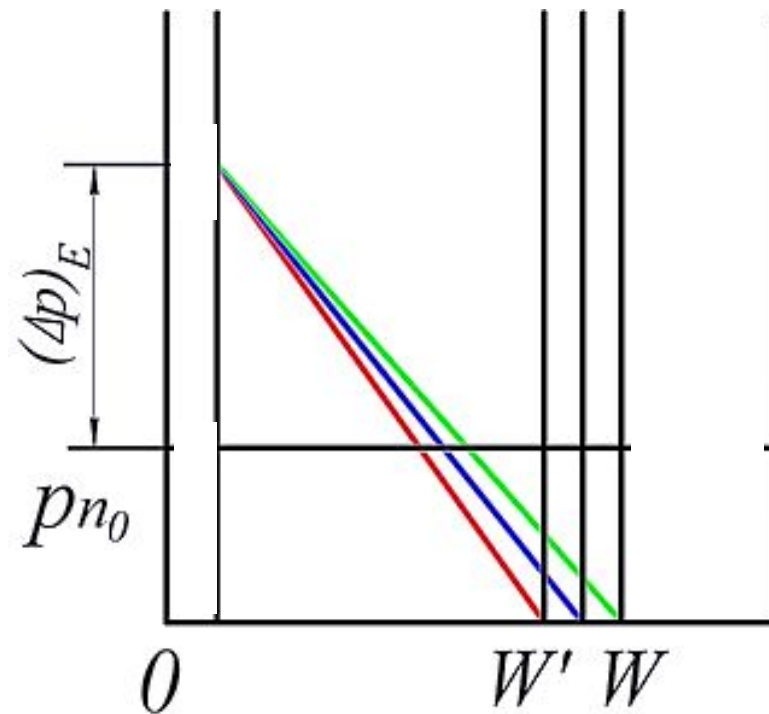
$$\alpha_I = \frac{dI_{\mathcal{E}}}{dI_K} = \left(1 + \frac{D_{nK} \cdot n_{p0K} \cdot L_{p\mathcal{B}}}{D_{p\mathcal{B}} \cdot p_{n0\mathcal{B}} \cdot L_{nK}} \cdot th \frac{W}{L_{p\mathcal{B}}} \right)^{-1} \cdot \left(ch \frac{W}{L_{p\mathcal{B}}} \right)^{-1} \approx \left(1 + \frac{D_{nK} \cdot n_{p0K} \cdot W}{D_{p\mathcal{B}} \cdot p_{n0\mathcal{B}} \cdot L_{nK}} \right)^{-1}$$
$$\alpha_I = \left(1 + \frac{D_K \cdot N_{d\mathcal{B}} \cdot W}{D_{\mathcal{B}} \cdot N_{aK} \cdot L_{nK}} \right)^{-1}$$

$$I_K = I_{K0} \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{KB}}{\phi_T}\right) - 1 \right]$$

Распределение ННЗ в базе pnp -транзистора в нормальном режиме

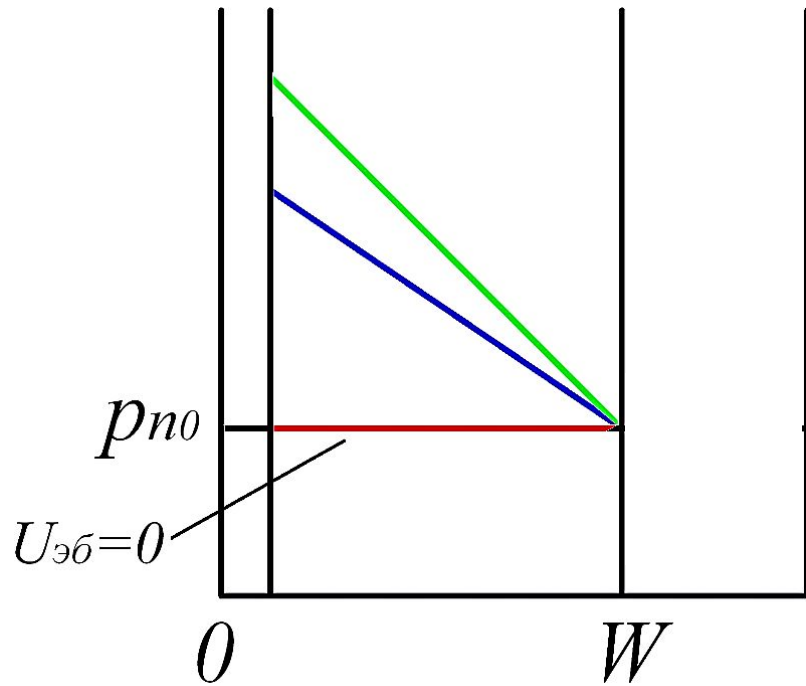


$$U_{KB} = const, U_{эБ} = var$$

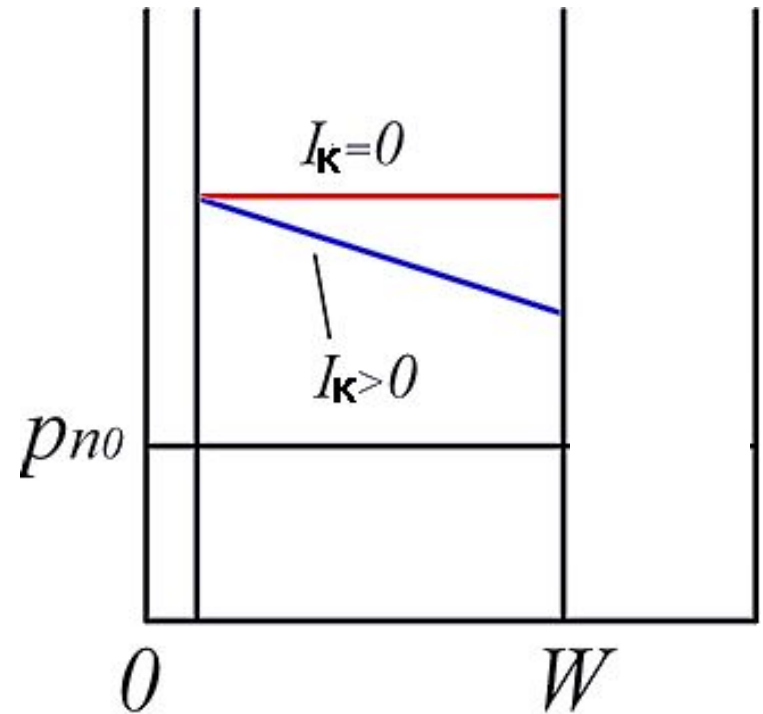


$$U_{KB} = var, U_{эБ} = const$$

Распределение ННЗ в базе *pnp*-транзистора в режиме насыщения

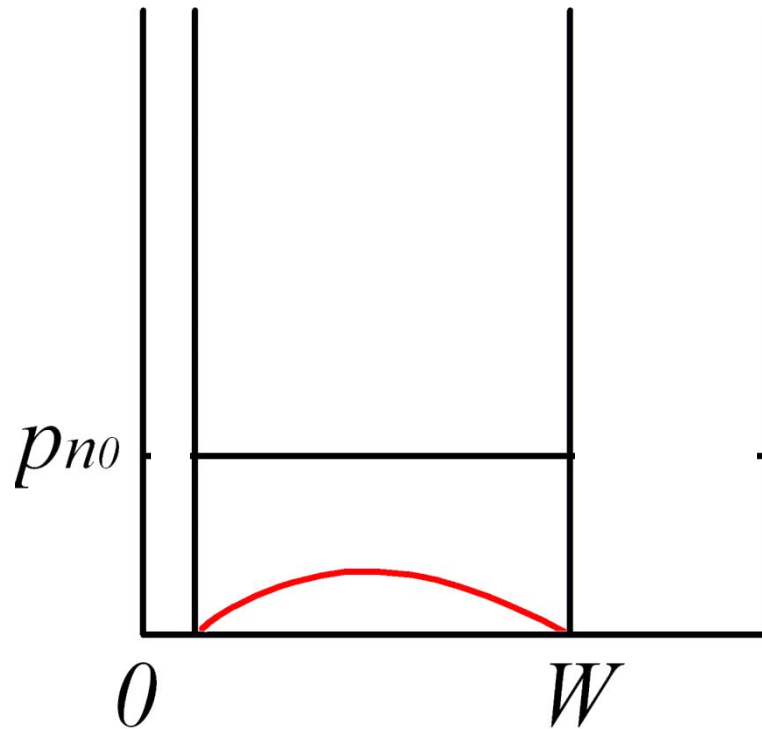


$$U_{KB} = 0, U_{ЭБ} > 0$$



$$U_{KB} > 0, U_{ЭБ} > 0$$

Распределение ННЗ в базе pnp -транзистора в режиме отсечки



$$I_B = I_{\ominus} - I_K = I_{\ominus} - \alpha I_{\ominus} = I_{\ominus}(1 - \alpha)$$

Из-за высокого выходного сопротивления r_K в цепи коллектора может быть включено достаточно большое сопротивление нагрузки (R_K) – до 1 МОм.

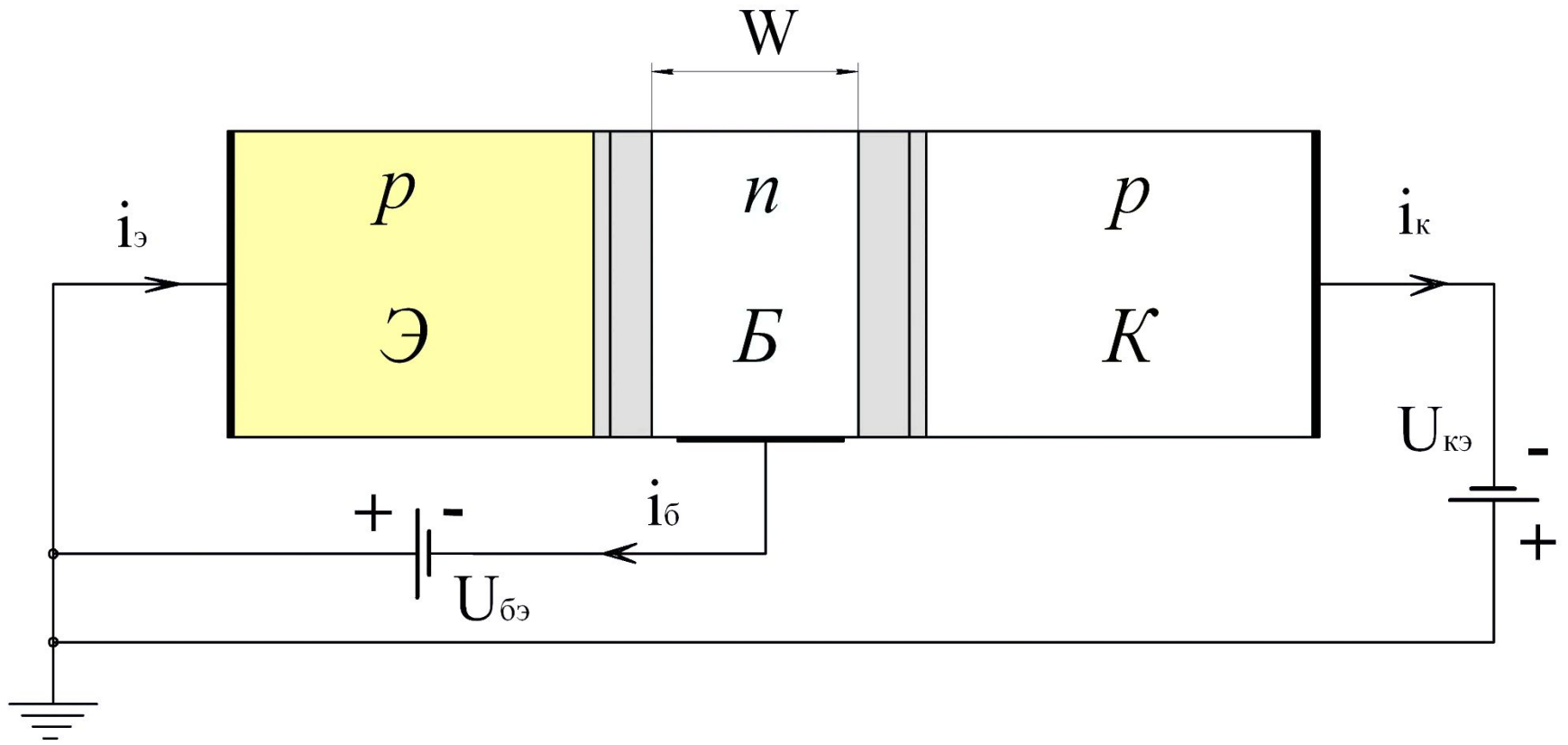
$$r_{K\downarrow} = \left. \frac{dU_{KB\uparrow}}{dI_K} \right|_{I_{\ominus} = const}$$

С $\uparrow U_K$ ширина базы \downarrow , $\rightarrow \downarrow$ вероятность рекомбинации дырок в базе, и при постоянном I_{\ominus} ток дырок, доходящих до коллектора, должен **возрастать**. Поэтому r_K должно уменьшаться.

Относительно малое изменение напряжения на эмиттере будет вызывать большое изменение напряжения на сопротивлении нагрузки.

В результате различия входного и выходного сопротивлений **транзистор дает усиление по мощности**.

Включение транзистора по схеме с общим эмиттером



Расчет ВАХ в схеме ОЭ

Входные:

$$I_B = I_{\text{Э}} - I_K = (1 - \alpha) \cdot I_{\text{Э}} = \frac{I_{\text{Э}}}{1 + \beta}$$

Выходные:

$$I_K = \alpha \cdot I_{\text{Э}} + I_{KB0}$$

$$I_K = \alpha \cdot (I_B + I_K) + I_{KB0}$$

$$(1 - \alpha) \cdot I_K = \alpha \cdot I_B + I_{KB0}$$

$$I_K = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot I_B + \frac{1}{1 - \alpha} \cdot I_{KB0}, \quad \text{т.к. } \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \beta$$

$$I_K = \beta \cdot I_B + (1 + \beta) \cdot I_{KB0} = \beta \cdot I_B + I_{KЭ0}^*$$

$$\text{где } I_{KЭ0}^* = (1 + \beta) \cdot I_{KB0} \approx \beta \cdot I_{KB0}$$

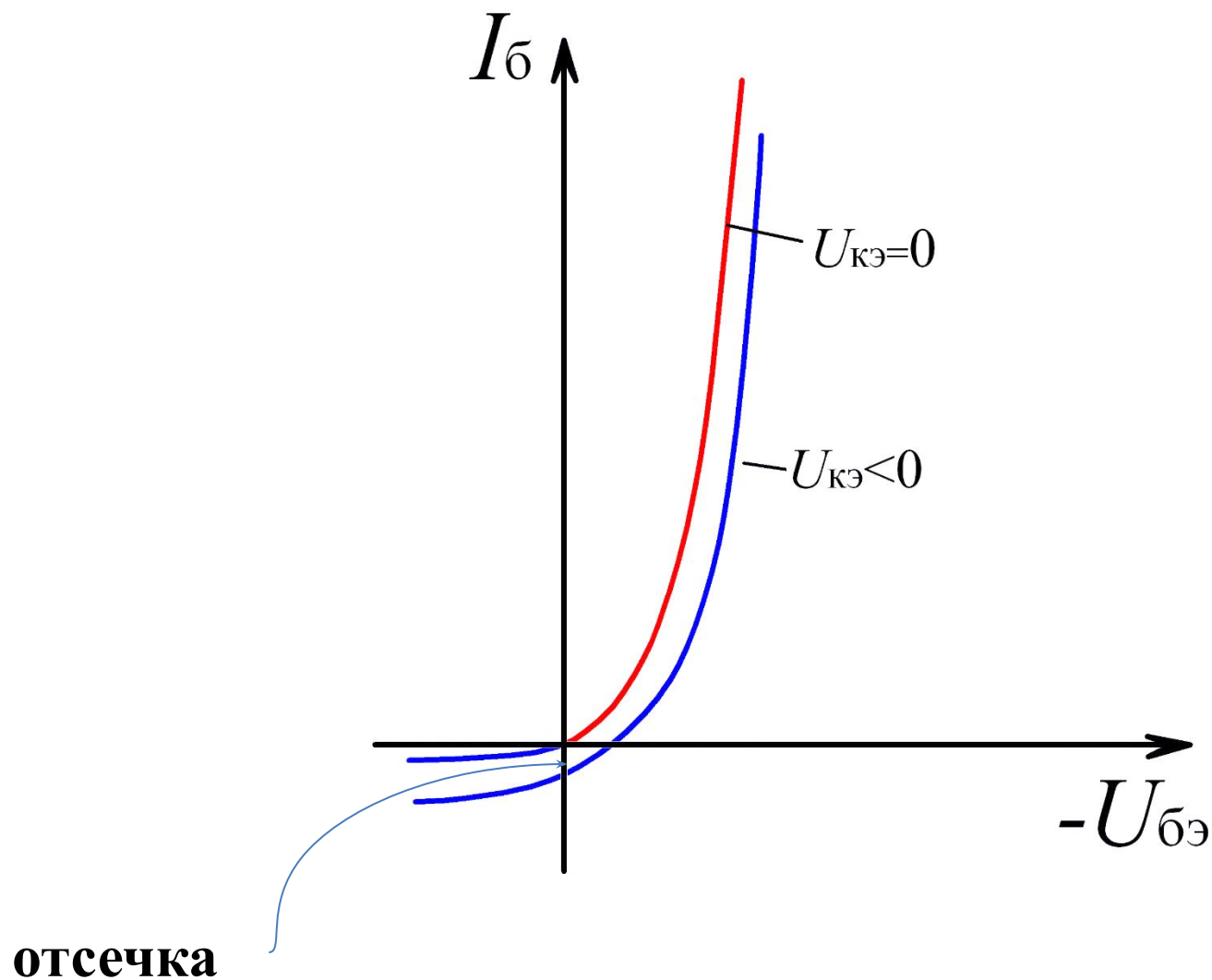
$$I_{\text{Э}} = I_B + I_K$$

$$\frac{I_K}{\alpha} = I_B + I_K$$

$$I_K = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot I_B = \beta I_B$$

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

Входные ВАХ транзистора в схеме ОЭ



При обратных напряжениях на КП и фиксированном напряжении на ЭП $|U_{БЭ}|$ постоянной будет концентрация дырок в базе вблизи ЭП.

$\uparrow U_{КЭ}$ будет сопровождаться расширением ОПЗ КП и $\downarrow W$ (эффект Эрли) и, следовательно, уменьшением общего количества дырок, находящихся в базе.

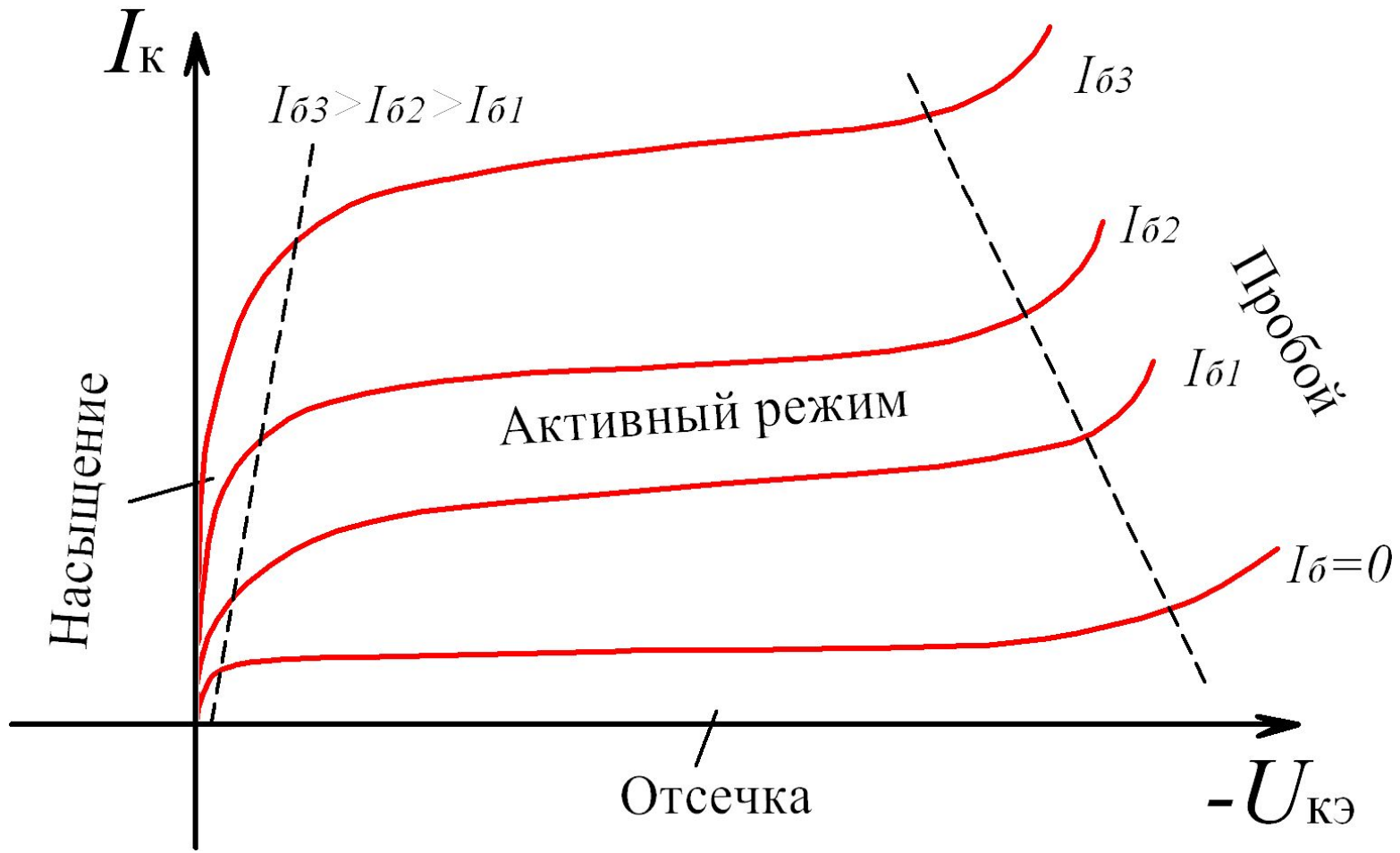
При этом $\partial p_n / \partial x$ в базе будут расти, что приводит к дальнейшему уменьшению их концентрации. Как отмечалось, при ТДР: $G_0 = R_0 = \gamma \cdot n_0 \cdot p_{n0}$

При $p_n > p_{n0}$ число рекомбинаций е-нов и дырок в базе в единицу времени уменьшается (возрастает коэффициент переноса). Так как е-ны для рекомбинации приходят через базовый вывод, ток базы уменьшается и **входные ВАХ смещаются вниз.**

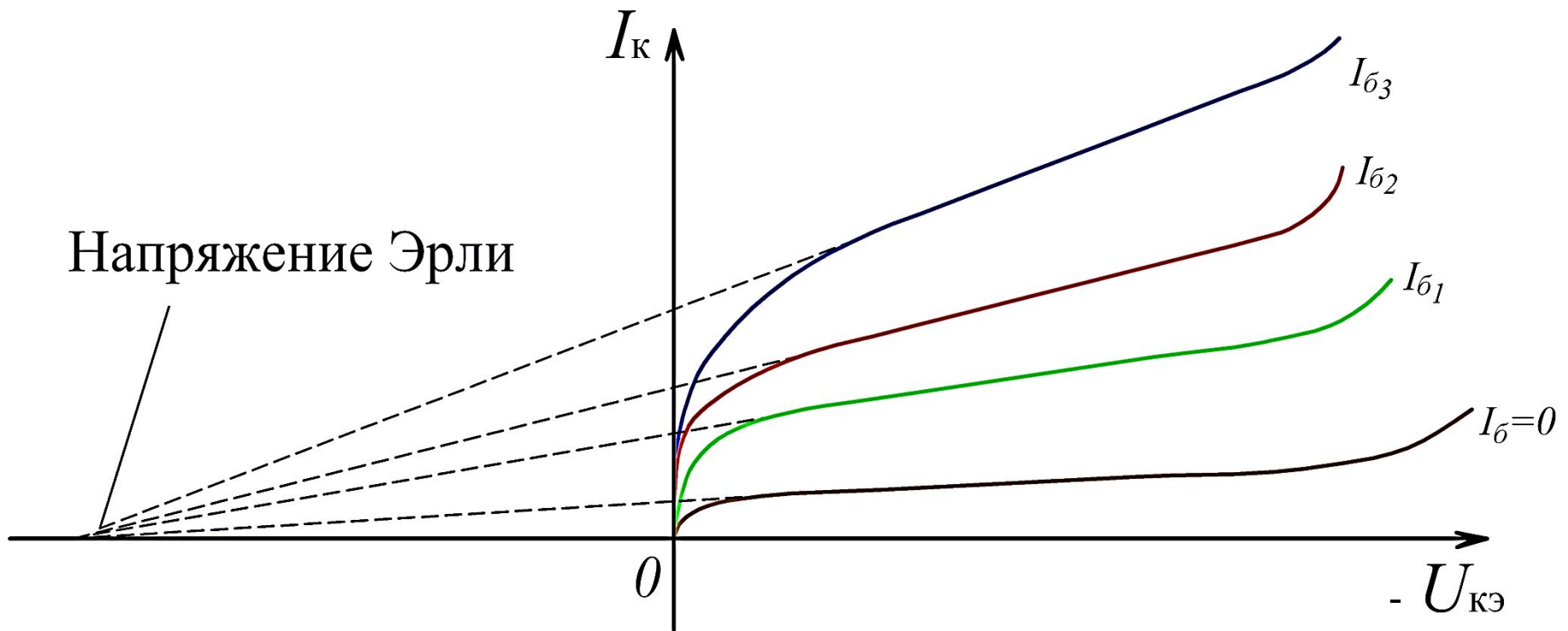
При обратном смещении, процесс тепловой генерации будет преобладать над процессом рекомбинации .

Генерированные e-ны уходят из базы через базовый вывод, что означает наличие электрического тока, направленного в базу транзистора. Это – **режим отсечки**, он характеризуется сменой направления тока базы.

Выходные ВАХ транзистора в схеме ОЭ



Влияние напряжения Эрли на выходные ВАХ транзистора



Включение транзистора по схеме с общим коллектором

Если входная и выходная цепи имеют общим электродом коллектор (ОК) и **выходным током** является **ток эмиттера**, а **входным ток** **базы**, то для коэффициента передачи тока справедливо:

$$K_{ик} = \frac{dI_{\text{Э}}}{dI_{\text{Б}}} = \frac{dI_{\text{Э}}}{d[I_{\text{Э}} \cdot (1 - \alpha)]} = \frac{1}{1 - \alpha} = \beta + 1$$

В таком включении коэффициент передачи тока несколько выше, чем во включении ОЭ, а коэффициент усиления по напряжению незначительно **меньше единицы**, так как разность потенциалов между базой и эмиттером практически не зависит от тока базы. Потенциал эмиттера практически повторяет потенциал базы, поэтому каскад, построенный на основе транзистора с ОК, называют **эмиттерным повторителем**. Однако этот тип включения используется сравнительно редко.

Выводы

1. Схема с ОЭ обладает **высоким усилением как по напряжению, так и по току**. У нее самое большое усиление по мощности. Это самая распространенная усилительная схема.

2. Схема с ОБ **усиливает напряжение** (примерно, как и схема с ОЭ), но **не усиливает ток**. Схема находит применение в усилителях высоких и сверхвысоких частот.

3. Схема с ОК (эмиттерный повторитель) **не усиливает напряжение, но усиливает ток**. Основное применение данной схемы – согласование сопротивлений источника сигнала и низкоомной нагрузки.