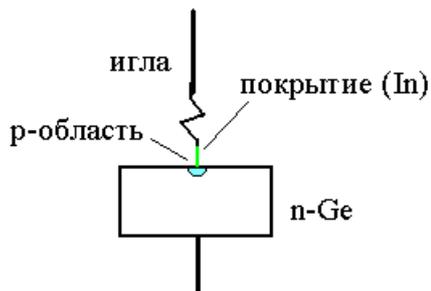


Полупроводниковые диоды - технологии изготовления

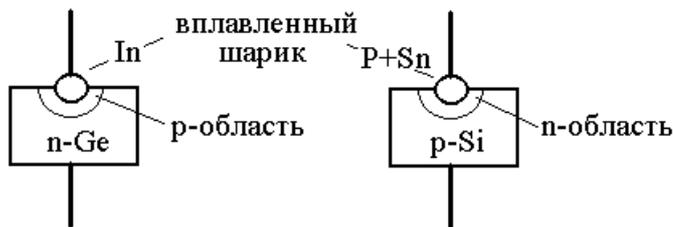
1. исторически первые полупроводниковые диоды - т.н. **кристаллический детектор** - поликристалл PbS (природный минерал галенит, далее такие образцы PbS научились делать искусственно) - с помощью перемещаемого контакта (иглы) выбирали микрокристалл, образующий с основной массой p-n-переход; эти диоды были относительно высокочастотными, но работали с малыми мощностями

Первые силовые полупроводниковые диоды - т.н. **купроксные и селеновые выпрямители**;
 В первых - медная пластина со слоем окиси меди с нанесенной поверх металлизацией (выпрямляющий контакт Cu-Cu₂O);
 Во вторых - металлическая пластина, покрытая слоем закристаллизованного селена, поверх которого нанесен слой легирующего металла (переход p-Se - n-Se)

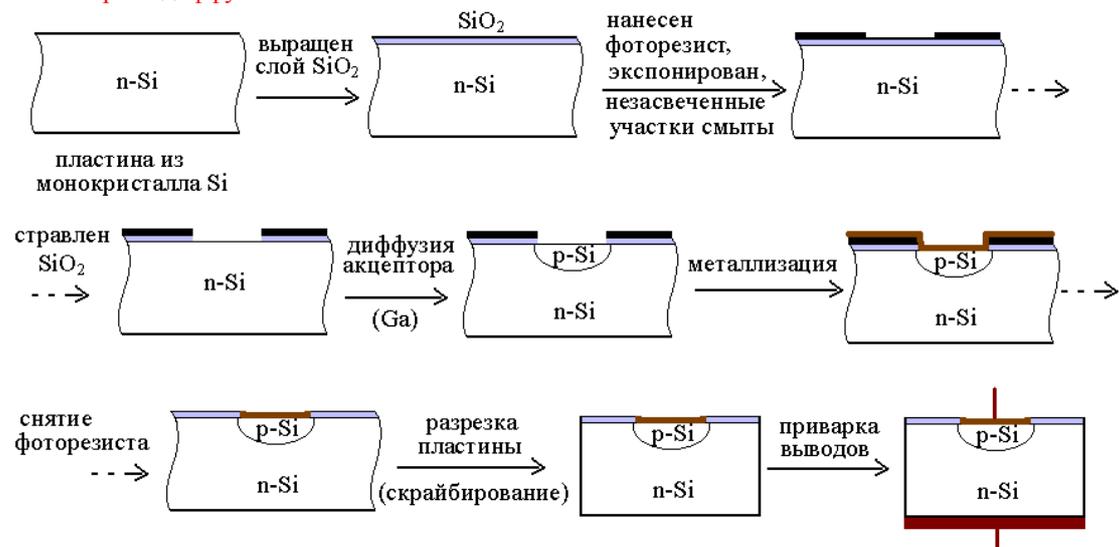
2. **точечные диоды** - малые емкости, высокие рабочие частоты, малые мощности



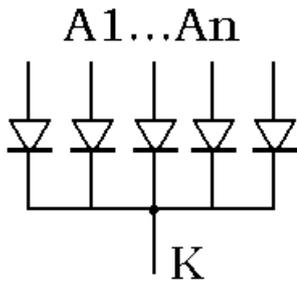
3. **сплавные (т.н. плоскостные) диоды** - высокие рабочие токи и напряжения, но значительные емкости и низкие рабочие частоты



4. **планарная диффузионная технология**

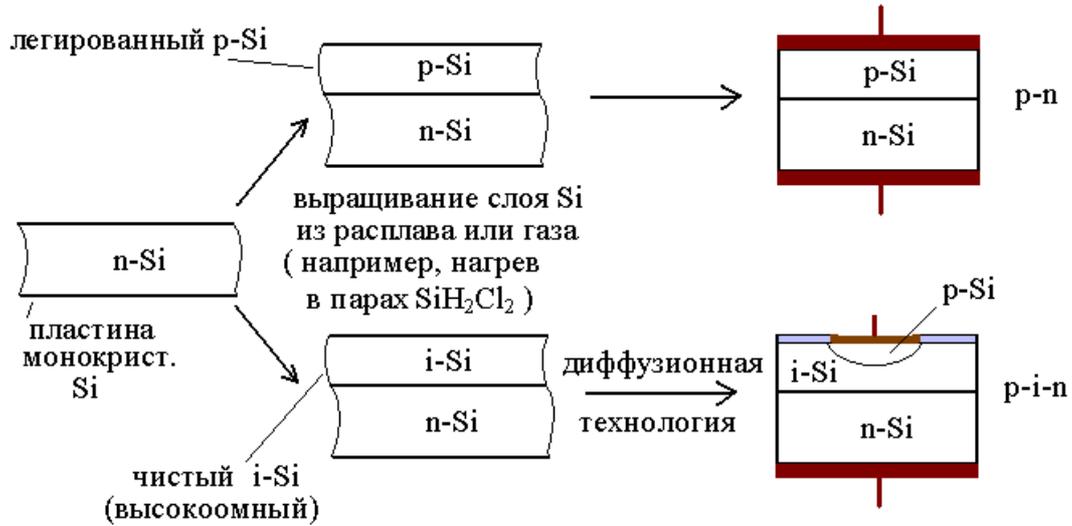


без резки - **сборка диодов** с общим катодом



аналогично - из p-Si при диффузии доноров (P, As)

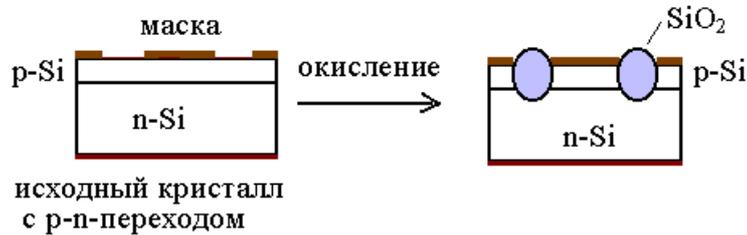
5. планарная **эпитаксиальная** и **эпитаксиально-диффузионная** технологии



6. **меза-диффузионная** и **меза-эпитаксиальная** технологии - уменьшение площади перехода (для уменьшения емкостей и увеличения рабочих частот) специальным травлением



7. **ЛОКОС**-технология - уменьшение площади перехода локальным объемным окислением

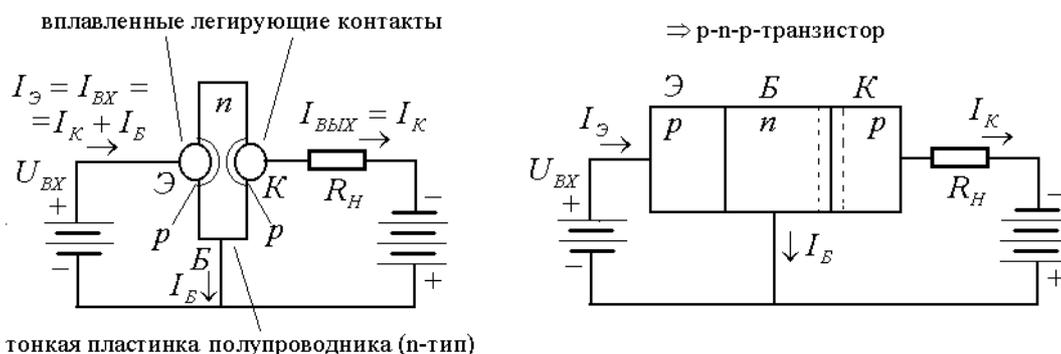


Биполярные транзисторы

1948г. - усиление сигнала в системе двух сближенных точечных диодов, выполненных на общем Ge кристалле - т.н. **точечный транзистор**

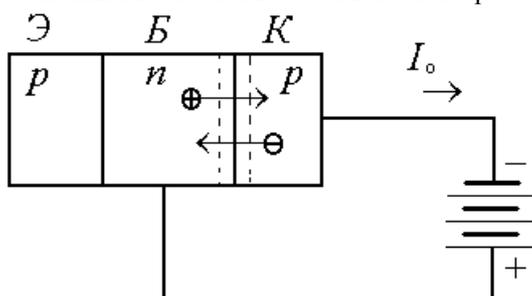
1949г. - аналогичное устройство на основе сплавной технологии - **сплавной** (иначе - **плоскостной**) **транзистор**
 - Нобелевская премия по физике за 1956г. - Джон Бардин, Уолтер Браттейн и Уильям Шокли

Структура и включение сплавного биполярного транзистора - две области одного типа проводимости (**эмиттер** и **коллектор**) и между ними область с противоположной проводимостью (**база**) :



при работе - к коллекторному переходу приложено обратное (запирающее) напряжение, к эмиттерному - прямое (отпирающее) напряжение

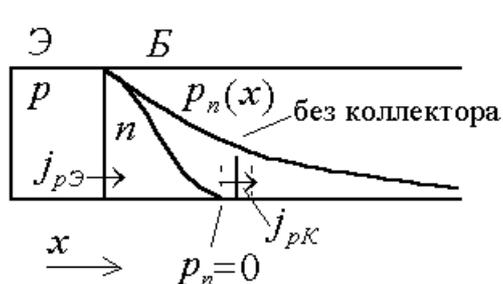
1. пусть ток эмиттера отсутствует \Rightarrow состояние базы - равновесное
 \Rightarrow ток коллектора - ток утечки коллекторного перехода и определяется концентрациями неосновных носителей в базе и в коллекторе :



2. если включить ток эмиттера - при толстой базе ($l_B \gg l_d$ в базе) ни как не повлияет на ток коллектора

При тонкой базе ($l_B < l_d$) - неравновесная концентрация неосновных носителей по всей толщине базы

Но : в обедненной области коллекторного перехода - сильное электрическое поле и на границе обедненная область - база концентрация неосновных носителей $=0 \Rightarrow$ в базе возникает градиент концентрации неосновных носителей и соответствующий **диффузионный ток** этих носителей от эмиттерного перехода к коллекторному (т.к. диффузионный ток $\propto grad(p_n)$)



$$p_n \propto j_{pЭ} \cdot e^{-\frac{x}{l_d}}$$

$$j_p = -D_p \frac{dp_n}{dx}$$

⇒ при тонкой базе появление тока эмиттера приводит к росту обратного тока коллекторного перехода

Полный ток эмиттера - сумма электронной и дырочной компонент :

$i_{\text{Э}} = i_n + i_p = i_s \cdot (e^{\frac{u_{\text{БЭ}}}{\varphi_T}} - 1)$ - полезная составляющая (для р-п-р-транзистора)- только дырочный ток ⇒ эффективностью эмиттера называется отношение

$$\gamma = \frac{i_p}{i_p + i_n} = \frac{i_p}{i_{\text{Э}}} < 1$$

Для сильно легированного эмиттера ($N_{\text{аЭ}} \gg N_{\text{дБ}}$) $i_p \gg i_n$ и $\gamma \approx 1$

Кроме того : часть неосновных носителей (в примере - дырок) рекомбинирует в базе ⇒ для компенсации их заряда в базу через ее вывод должен поступать некоторый ток электронов - т.е. есть $i_B \neq 0$, причем обычно $i_B \ll i_{\text{Э}} \sim i_K$

Характеризуют усилительные свойства дифференциальным коэффициентом передачи тока эмиттера

$$\alpha = \left. \frac{\partial i_K}{\partial i_{\text{Э}}} \right|_{u_{\text{КБ}} = \text{const}}$$

и дифференциальным коэффициентом передачи тока базы

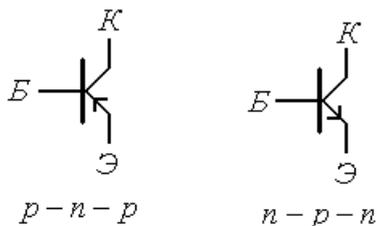
$$\beta = \frac{\partial i_K}{\partial i_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Так же вводят статический коэффициент передачи тока базы

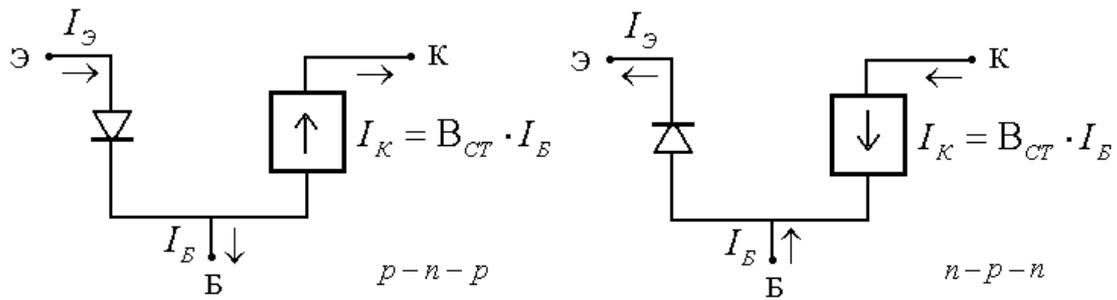
$$B_{\text{СТ}} = \frac{I_K}{I_B}$$

Поскольку $i_B \ll i_{\text{Э}}$, то $\alpha \sim 1$ и для типовых транзисторов $\beta \approx B_{\text{СТ}} \sim 10 - 300$

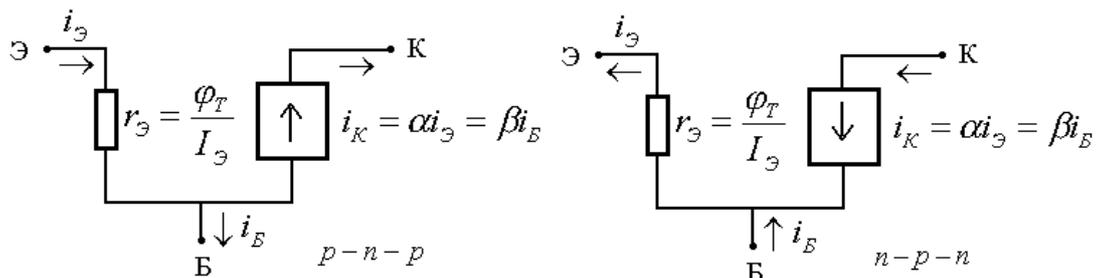
Схематически биполярный транзистор изображают :



Поскольку ток коллектора зависит прежде всего от тока эмиттера, и сравнительно слабо зависит от напряжения коллектор-база, то в простейшей эквивалентной схеме коллекторный переход заменяется управляемым генератором тока, эмиттерный - диодом ($I_{\text{Э}}$, I_B , I_K - величины постоянных токов) :

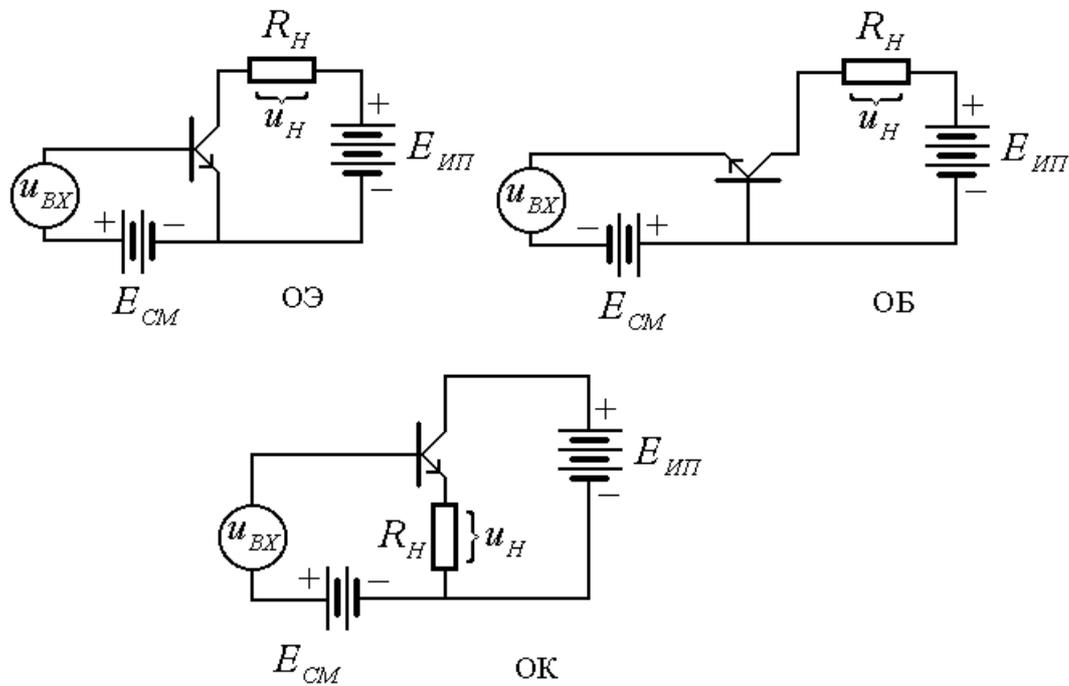


Или, при линеаризации ($i_Э$, $i_Б$, $i_К$ - малые приращения токов) :

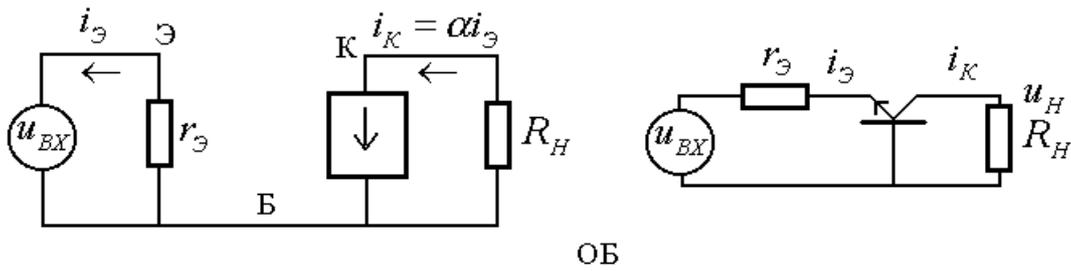


$r_Э = \frac{\varphi_T}{I_Э}$ - дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода

Основные схемы включения биполярных транзисторов - **общая база (ОБ)**, **общий эмиттер (ОЭ)**, **общий коллектор (ОК)** :



1. ОБ - в простейшем приближении имеем для малых приращений токов и напряжений :



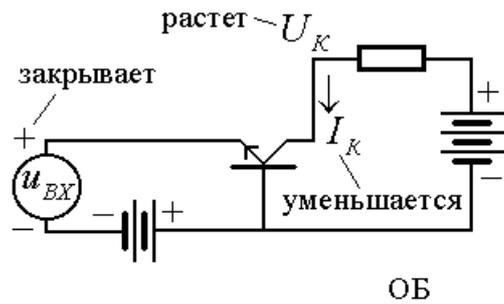
$$\Rightarrow r_{BX} \approx r_{\vartheta}, \quad K_u = \frac{u_H}{u_{BX}} = \frac{R_H \cdot i_K}{u_{BX}} = \frac{\alpha R_H}{r_{\vartheta}} \approx \frac{R_H}{r_{\vartheta}}$$

Если внутреннее сопротивление источника сигнала $R_i \neq 0$, то

$$i_{\vartheta} = \frac{u_{BX}}{r_{\vartheta} + R_i} \Rightarrow K'_u = \frac{\alpha R_H}{r_{\vartheta} + R_i} \approx \frac{R_H}{r_{\vartheta} + R_i}$$

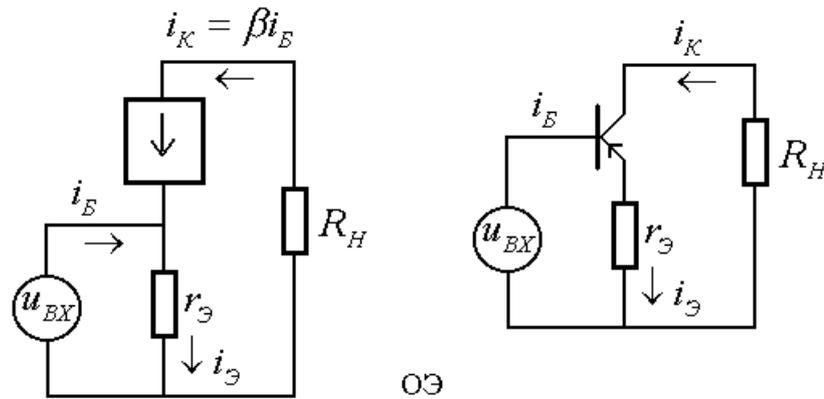
Особенность ОБ - низкое входное сопротивление ($r_{BX} = r_{\vartheta}$) и отсутствие усиления по току ($i_H = i_K \sim i_{\vartheta}$)

Кроме того, эта схема не инвертирует сигнал :



- т.е. положительное приращение напряжения на эмиттере вызывает положительное приращение напряжения коллектора

2. ОЭ - в приближении для малых приращений токов и напряжений :



$$\text{здесь } i_{\vartheta} = \frac{u_{BX}}{r_{\vartheta}} = \frac{1}{\alpha} i_K = i_K + i_B = (\beta + 1) i_B$$

$$i_K = \alpha i_{\text{Э}} = \frac{\alpha \cdot u_{\text{BX}}}{r_{\text{Э}}}$$

$$K_u = \frac{u_H}{u_{\text{BX}}} = - \frac{\alpha R_H}{r_{\text{Э}}} = - \frac{\beta R_H}{(\beta + 1)r_{\text{Э}}} \approx - \frac{R_H}{r_{\text{Э}}}$$

- схема ОЭ инвертирует сигнал - при положительном приращении напряжения на базе ("+" на входе) ток коллектора растет и напряжение на коллекторе снижается (отрицательное приращение напряжения, или "-" на выходе)

Существенно $r_{\text{BX}} = \frac{u_{\text{BX}}}{i_{\text{BX}}} = \frac{u_{\text{BX}}}{i_{\text{Э}}/(\beta + 1)} = (\beta + 1)r_{\text{Э}}$

⇒ т.е. $r_{\text{BX_ОЭ}} = (10 \div 300)r_{\text{BX_ОБ}}$ при близком токе нагрузки - схема ОЭ имеет значительное

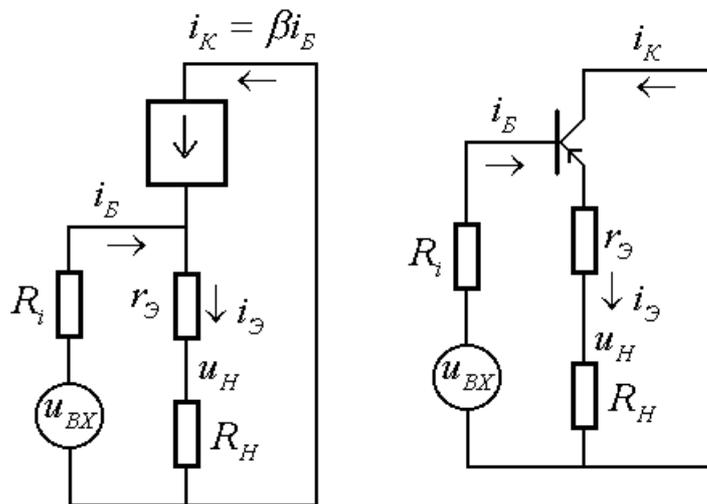
усиление по току : $|K_i| = \left| \frac{i_H}{i_{\text{BX}}} \right| = \beta$

При конечном сопротивлении источника сигнала R_i

$$K'_u = \frac{r_{\text{BX}}}{R_i + r_{\text{BX}}} \cdot K_u = - \frac{\beta \cdot R_H}{(\beta + 1)r_{\text{Э}} + R_i}$$

3. ОК - в приближении для малых приращений токов и напряжений :

ОК - в приближении для малых приращений токов и напряжений :



$$\begin{cases} i_{\text{Э}} = \frac{u_{\text{Б}}}{r_{\text{Э}} + R_H} \\ u_{\text{Б}} = u_{\text{BX}} - R_i i_{\text{Б}} \\ i_{\text{Э}} = (\beta + 1)i_{\text{Б}} \end{cases} \Rightarrow i_{\text{Э}} = \frac{u_{\text{BX}}}{r_{\text{Э}} + R_H + \frac{R_i}{\beta + 1}}$$

$u_H = R_H i_{\text{Э}} \Rightarrow K_u = \frac{u_H}{u_{\text{BX}}} = + \frac{R_H}{r_{\text{Э}} + R_H + \frac{R_i}{\beta + 1}} < 1$ - не инвертирует сигнал -

"+" приращения напряжения на базе увеличивает ток эмиттера и приводит к "+" приращения напряжения эмиттера

Если $r_{\text{Э}} + \frac{R_i}{\beta + 1} \ll R_H$, то $K_u \approx 1$ - т.н. **эмиттерный повторитель**

Входное сопротивление эмиттерного повторителя :

$$r_{BX} = \left. \frac{u_{BX}}{i_B} \right|_{R_i=0} = \frac{u_E}{i_B} = (\beta + 1)(r_{\text{Э}} + R_H) \gg r_{BX_OЭ}$$

Выходное сопротивление эмиттерного повторителя :

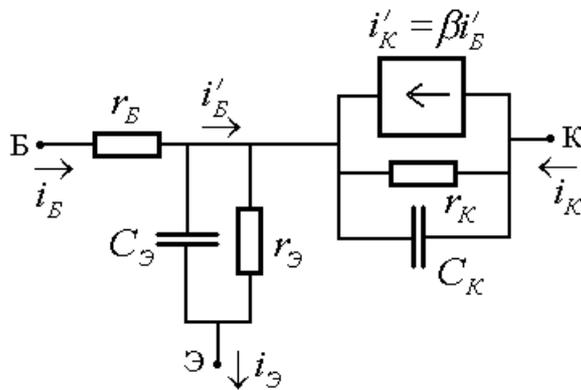
$$r_{BЫX} = \frac{u_{BЫX_XX}}{i_{BЫX_KЗ}} = \frac{u_{BЫX}(R_H \rightarrow \infty)}{i_{\text{Э}}(R_H = 0)} = r_{\text{Э}} + \frac{R_i}{\beta + 1}$$

- в $(\beta + 1)$ -раз уменьшает вклад

сопротивления источника сигнала - т.е. при отсутствии усиления по напряжению ($K_u < 1$) есть усиление по току $K_i = \beta + 1$

В рассмотренных моделях при $R_H \rightarrow \infty$ усиление схем ОБ и ОЭ $\rightarrow \infty$ - что реально не происходит, т.к. предельное усиление ограничено внутренним выходным сопротивлением транзистора r_K (связанным с зависимостью α и β от U_K)

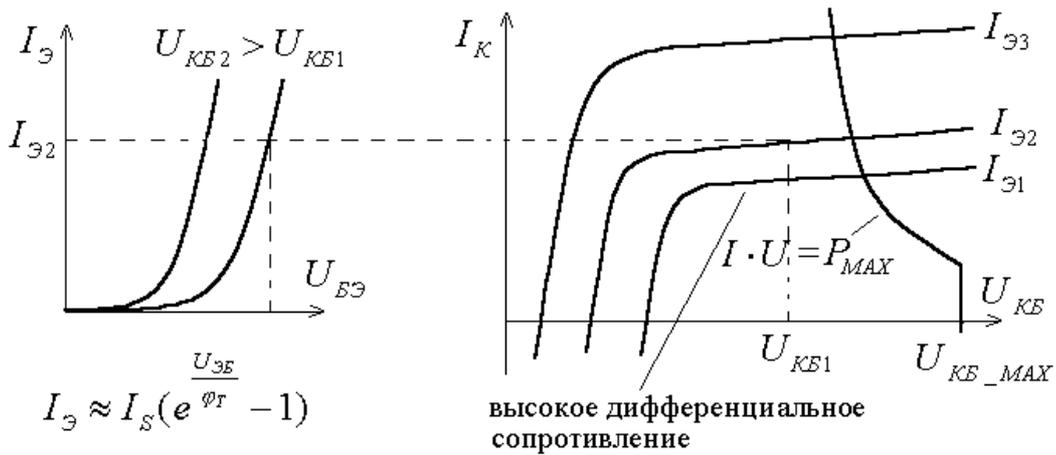
Для более точного описания каскадов применяют уточненные модели, например :



Сопротивление r_B описывает омическое сопротивление тела базы (и базового вывода), C_K и $C_{\text{Э}}$ - емкости коллекторного и эмиттерного p-n-переходов

Еще более точное описание работы на низких частотах дают ВА-характеристики

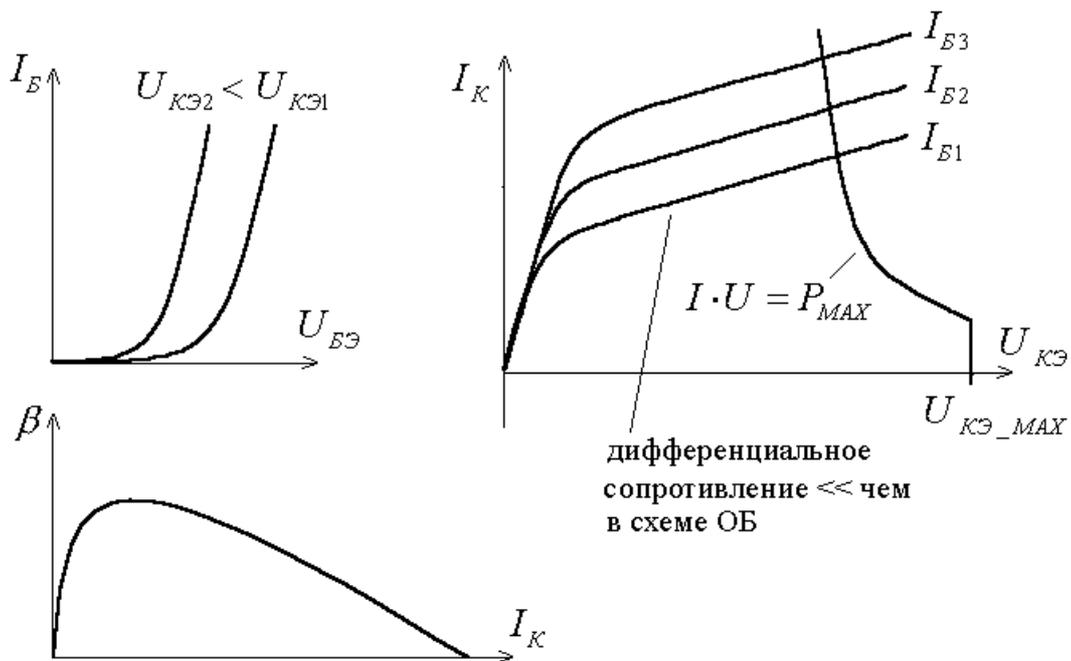
Для схемы ОБ обычны две характеристики - входные и выходные



Входная характеристика $I_{\text{Э}}(U_{\text{БЭ}})$ - при условии $U_{\text{КБ}} = \text{const}$

Выходная характеристика $I_{\text{К}}(U_{\text{КБ}})$ - при условии $I_{\text{Э}} = \text{const}$

Для схемы ОЭ так же вводятся входная $I_{\text{Б}}(U_{\text{БЭ}})$ и выходная $I_{\text{К}}(U_{\text{КЭ}})$ характеристики :



- но из-за заметной зависимости усиления от тока коллектора добавляется график $\beta(I_{\text{К}})$ - характеризует линейность транзистора как усилителя тока