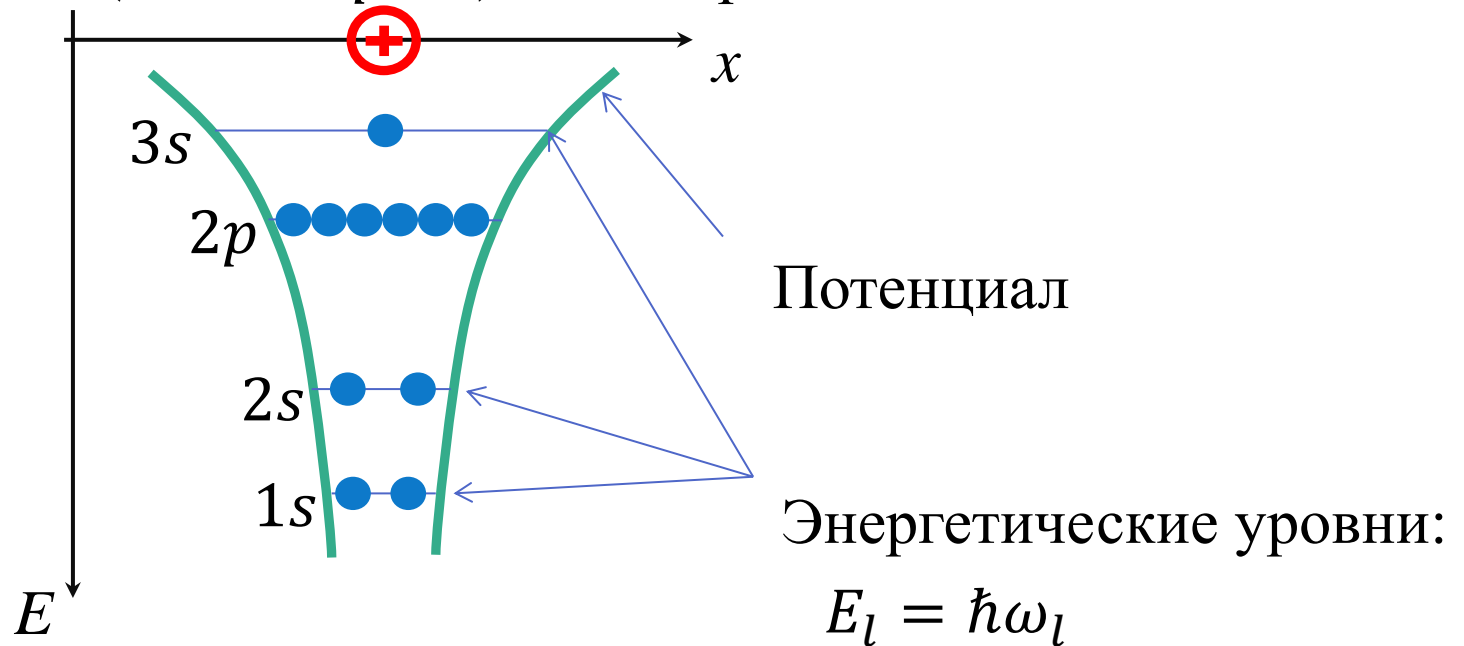




К электронным свойствам полупроводников: образование энергетических зон в кристаллах

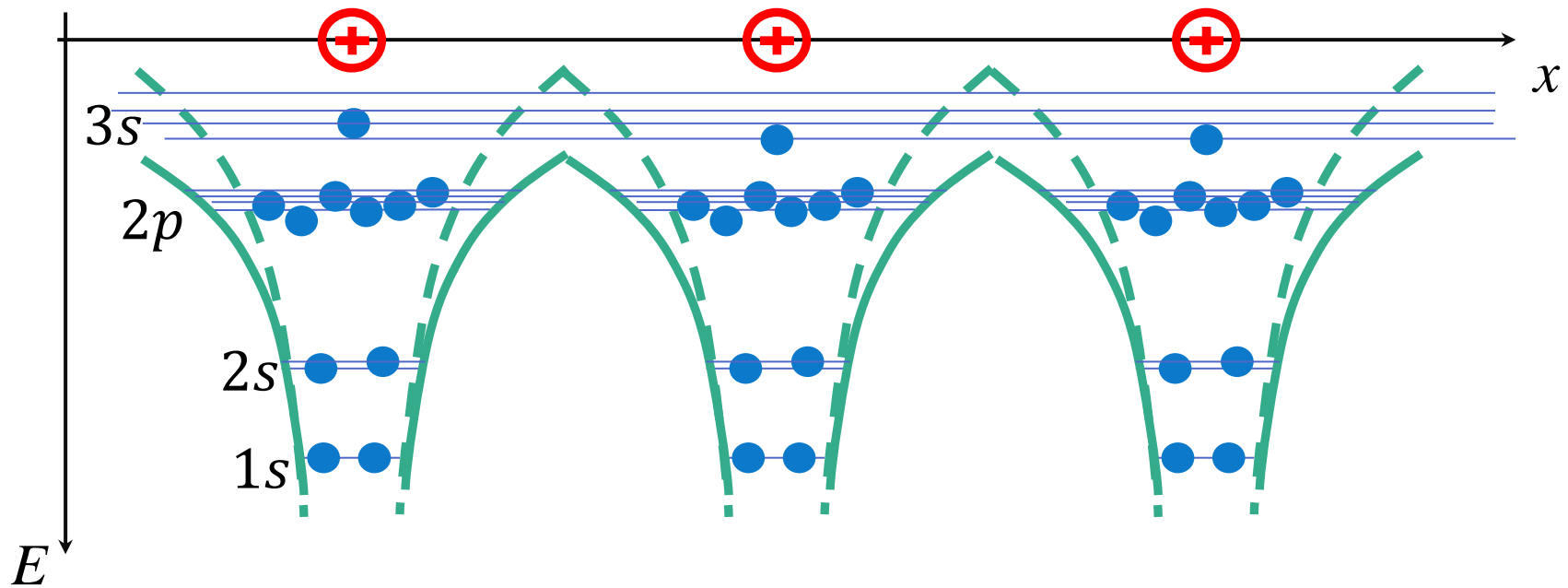
Пример: Na: $(1s^2 2s^2 2p^6 3s)$ – изолированный атом





К электронным свойствам полупроводников: образование энергетических зон в кристаллах

Атомы в решетке:

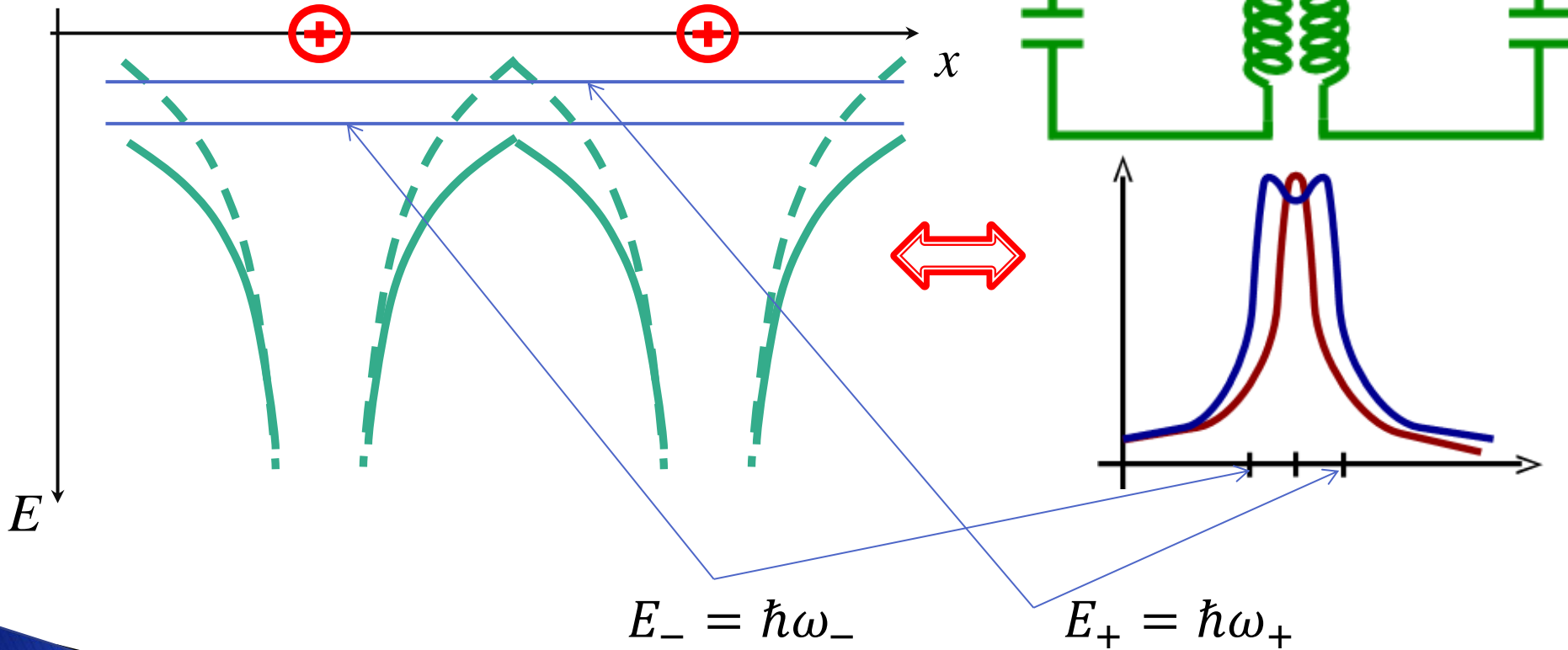


Электрическое поле «соседей» снимает вырождение по энергии



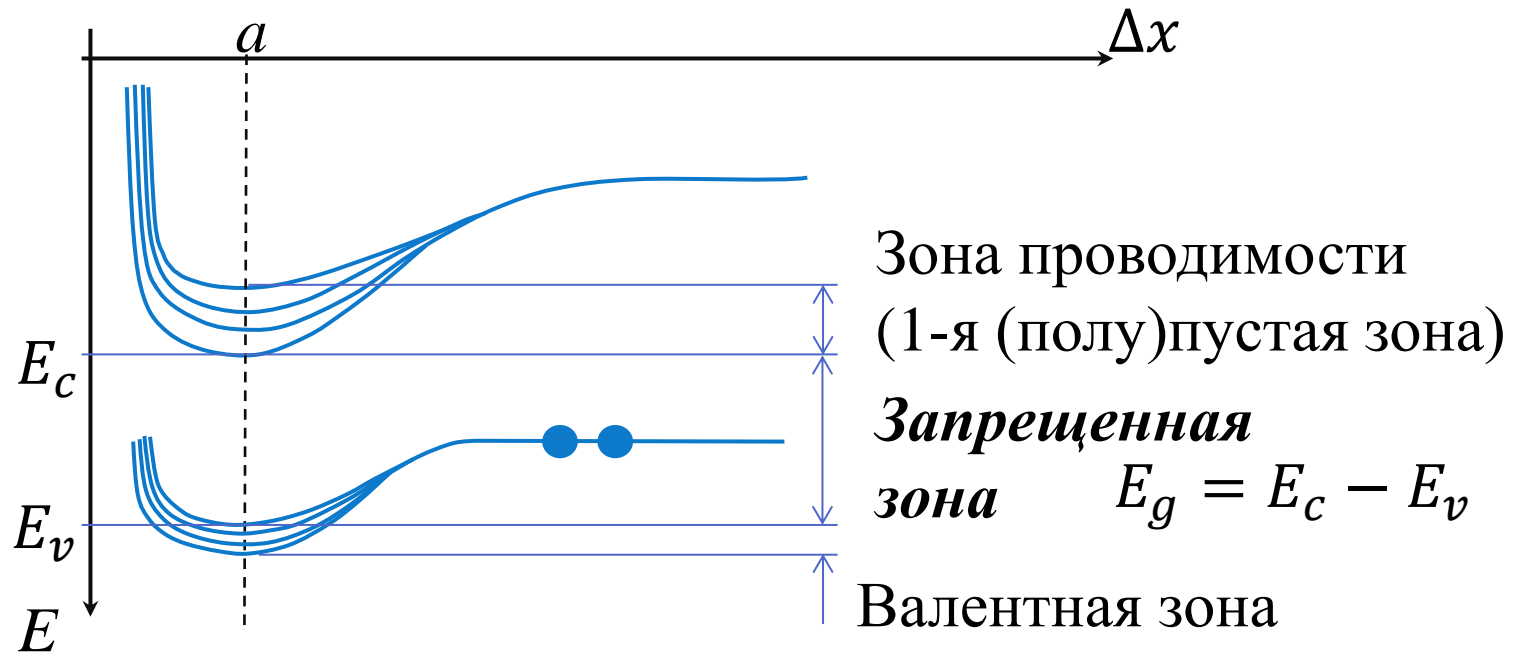
К электронным свойствам полупроводников: образование энергетических зон в кристаллах

Радиофизическая аналогия:





К электронным свойствам полупроводников: образование энергетических зон в кристаллах



В зоне порядка N_A уровней



Классификация твердых тел

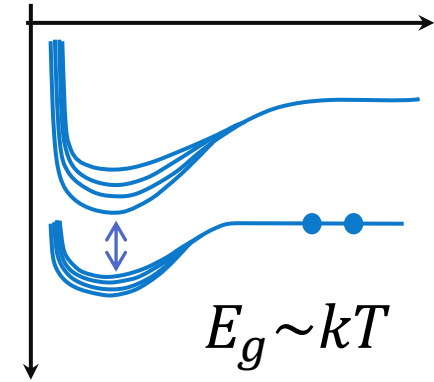
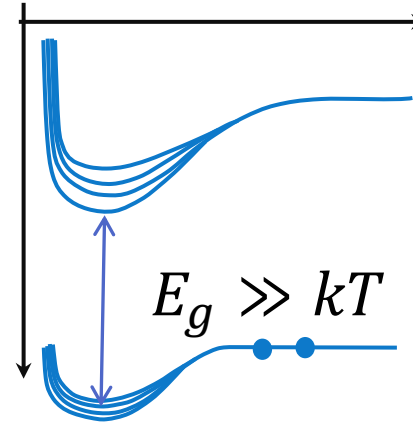
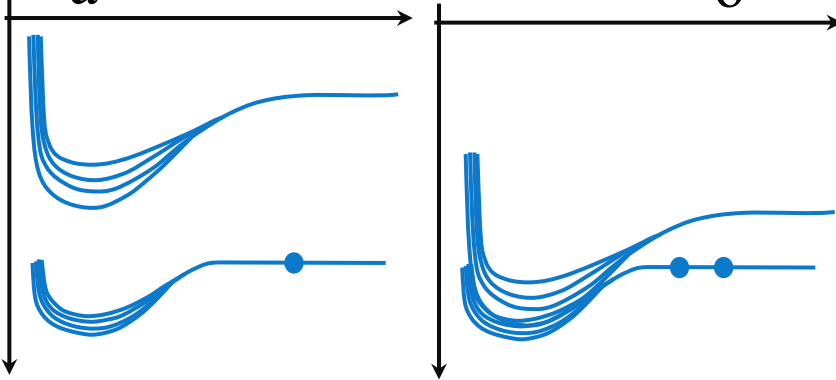
проводники

изоляторы

полупроводники

а

б



Валентная зона заполнена
не полностью (а)
(- она же зона проводимости),
либо есть перекрытие зон (б)

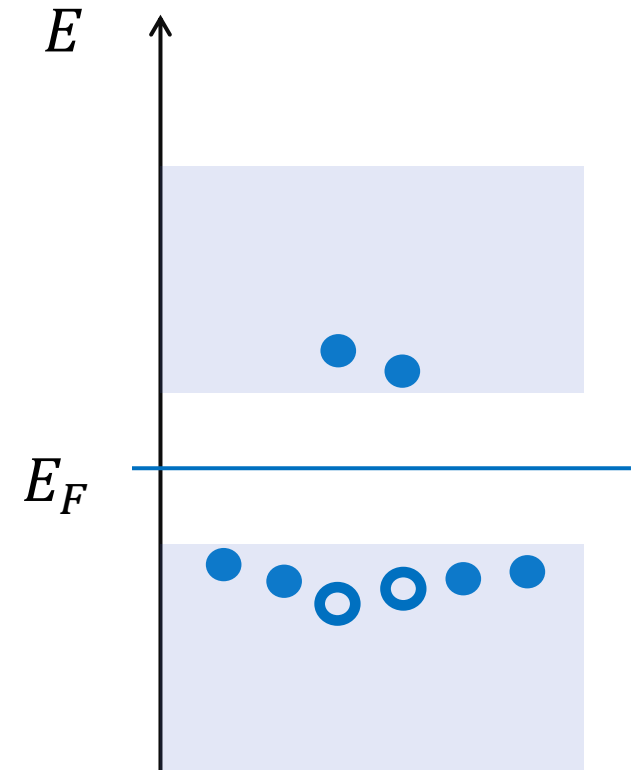
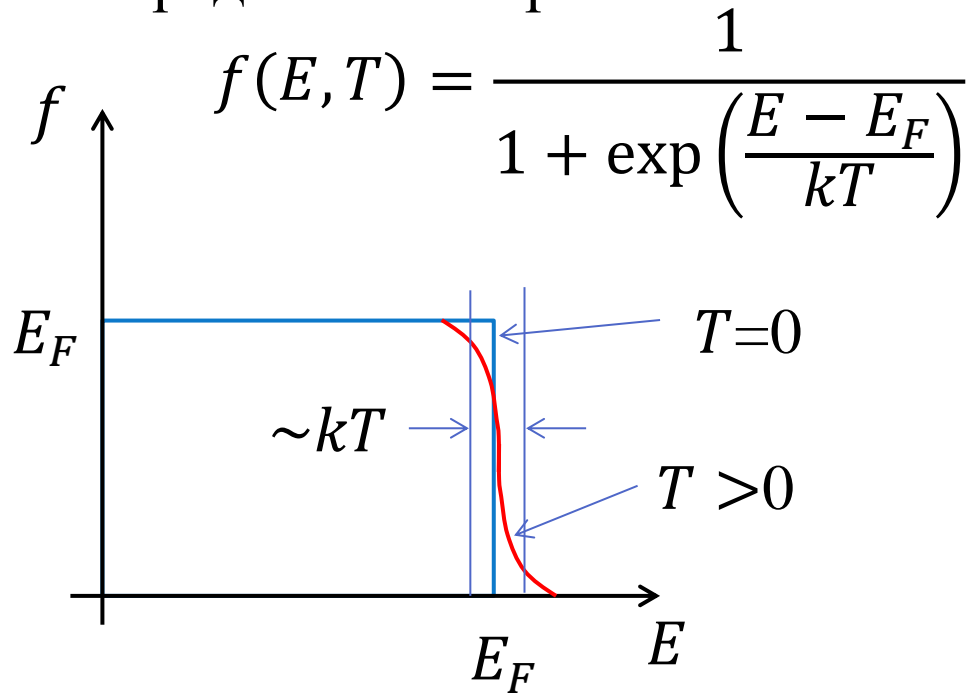
Валентная зона заполнена

Внутри зоны: $dE \cong \frac{\Delta E}{10^{23}}$ - очень мало!

Распределение электронов по энергиям



Распределение Ферми:



- Вырожденный электронный газ (металлы)

$$E_F \gg kT$$

При $E_g \gg kT$ для электронов и дырок у границы зоны:

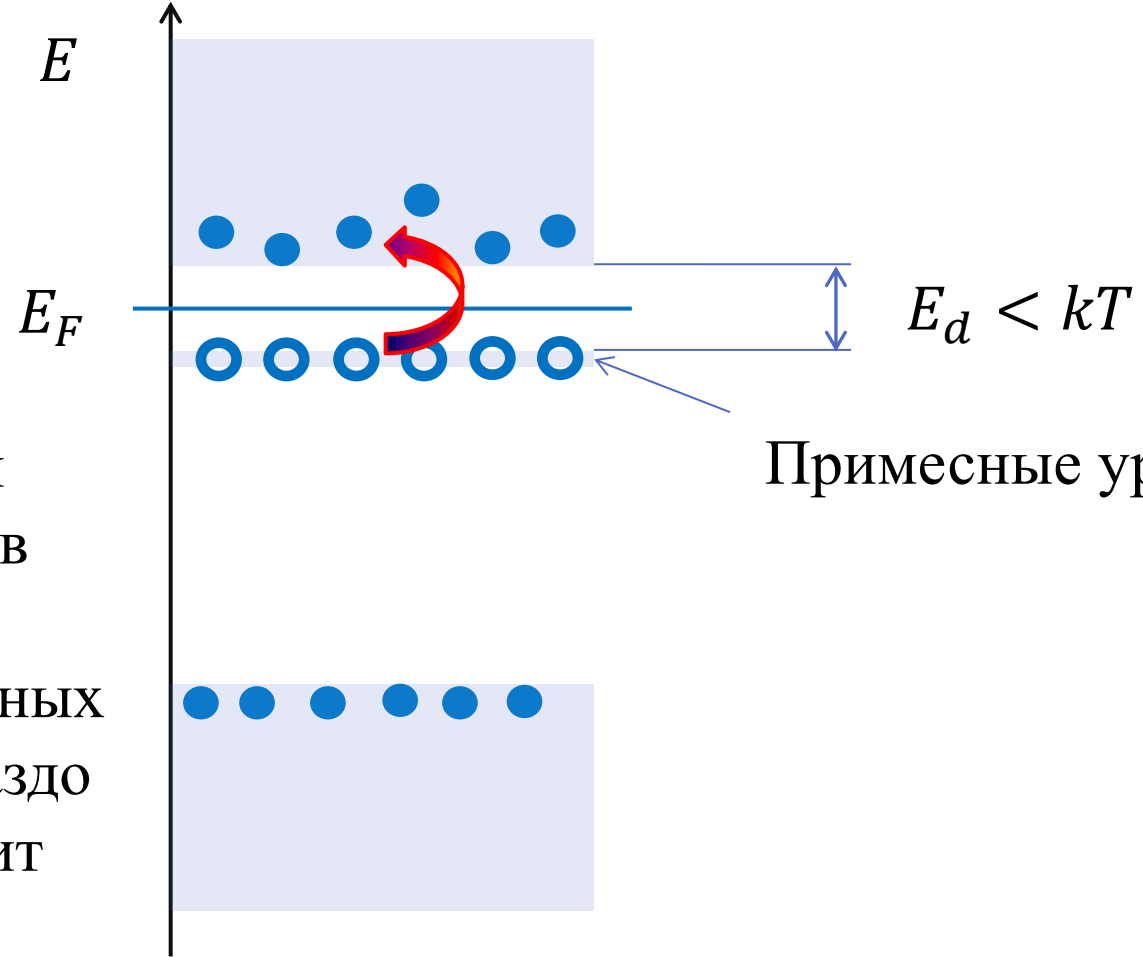
$$f(E, T) \cong -\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)$$

невырожденный (классический) газ



Допированные (примесные, несобственные)

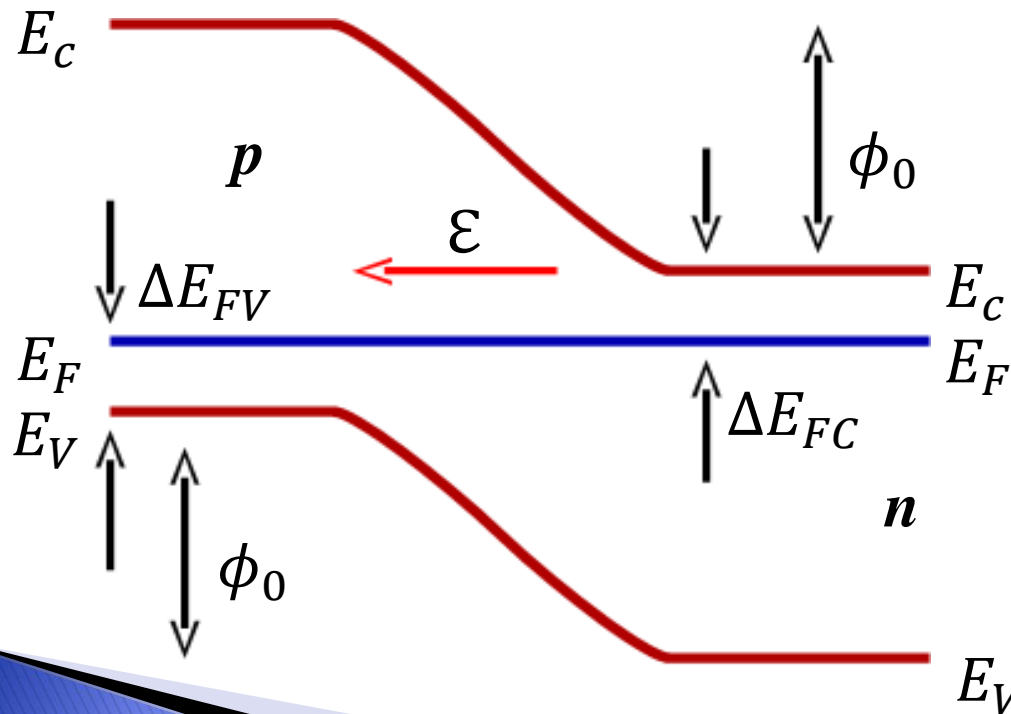
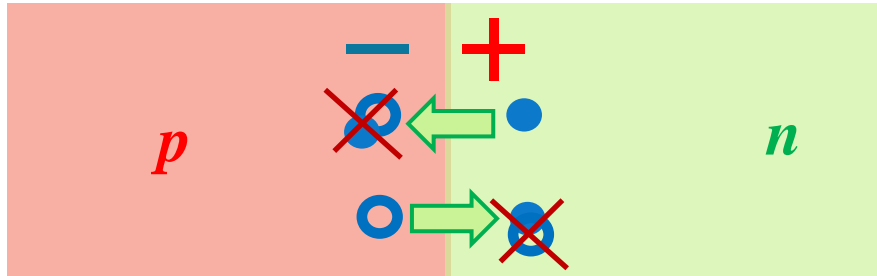
полупроводники



При наличии примеси (например, $\sim 0.01\%$ In в Ge) концентрация подвижных носителей заряда гораздо больше и слабо зависит от T



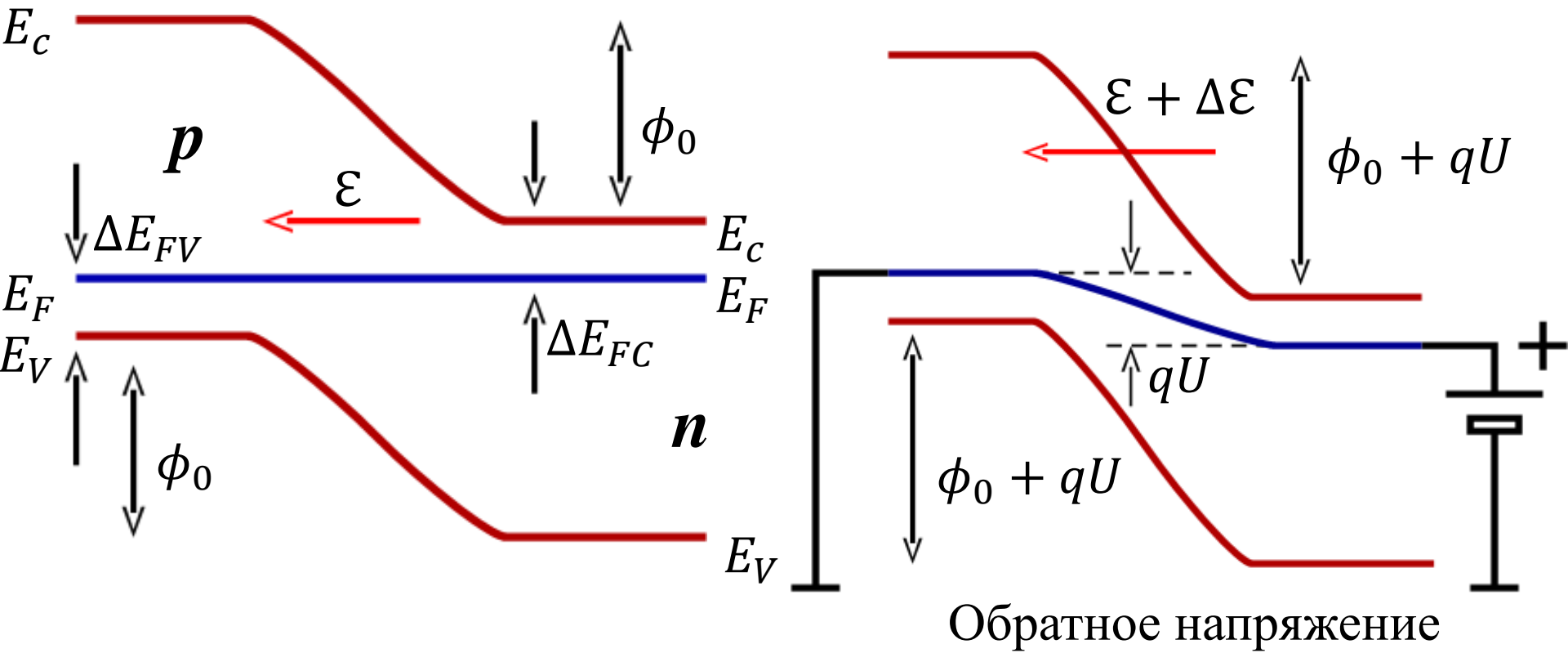
р-п переход: соединяем два несообственных полупроводника с разным типом допирования и одинаковой шириной запрещенной зоны



Установится термодинамическое равновесие – уровень Ферми одинаков с обеих сторон!

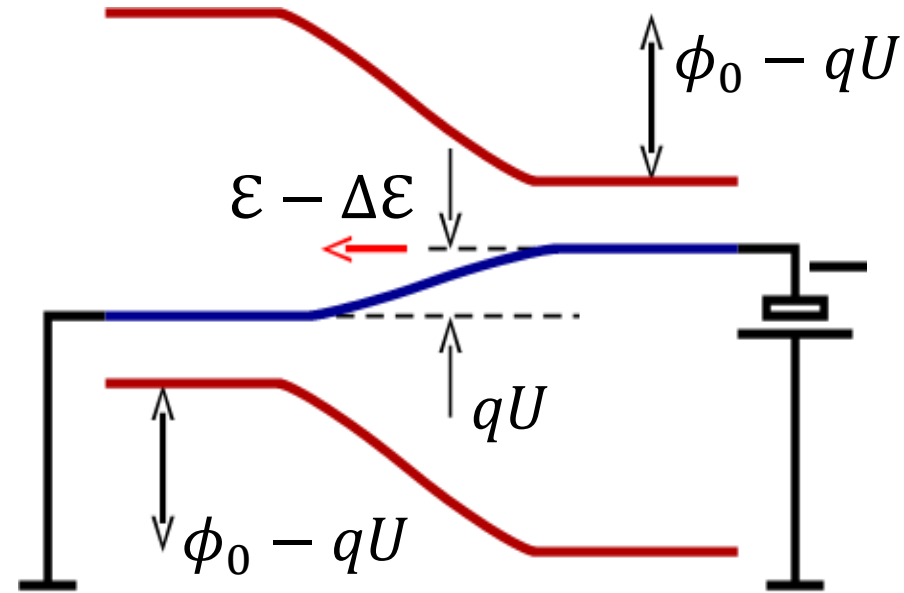
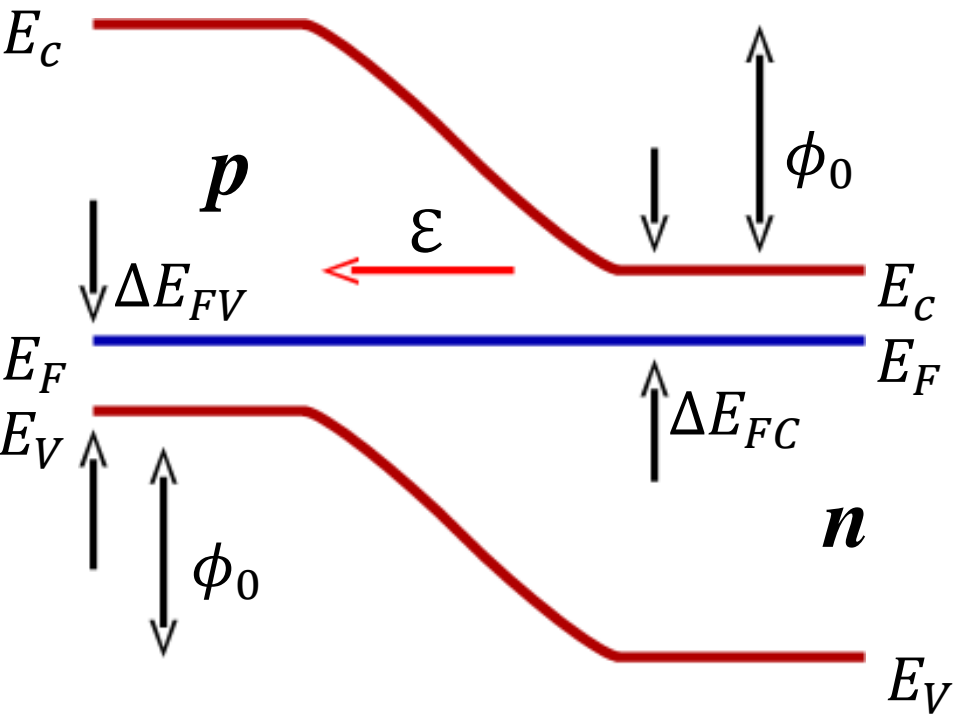


Энергетическая диаграмма р-п контакта





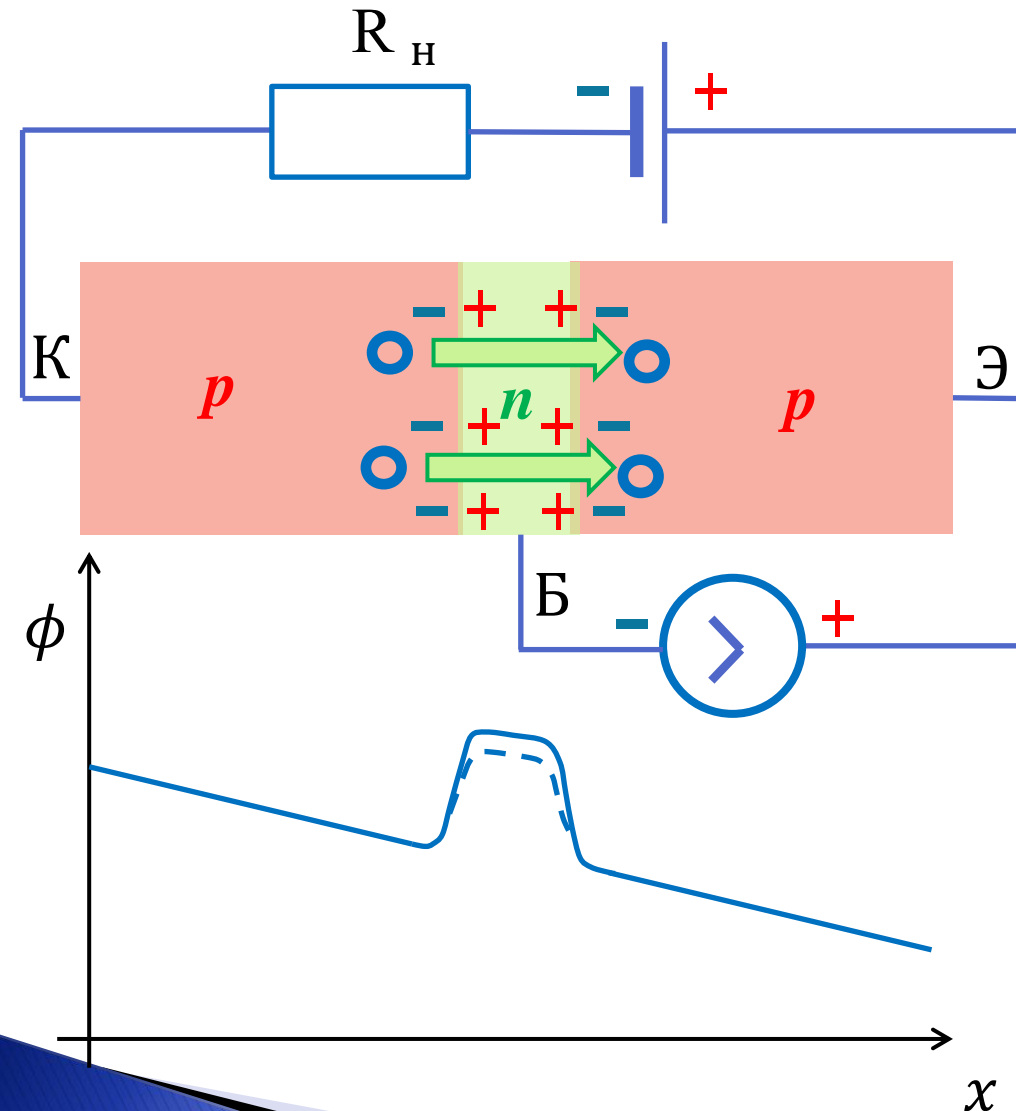
Энергетическая диаграмма р-п контакта



Прямое напряжение



Биполярный транзистор

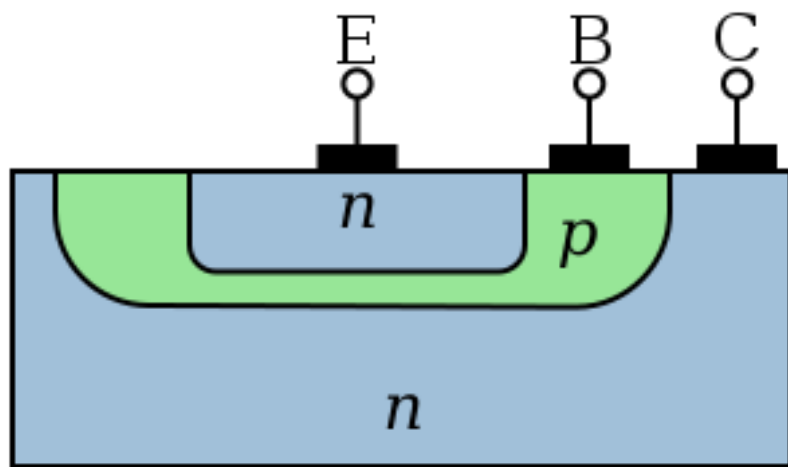


1). Толщина базы \ll диффузионной длины

2). $I_b \ll I_k \rightarrow I_{\text{Э}} \sim I_k$
большинство дырок
«промахиваясь»
(не рекомбинируя)
достигают коллектора.

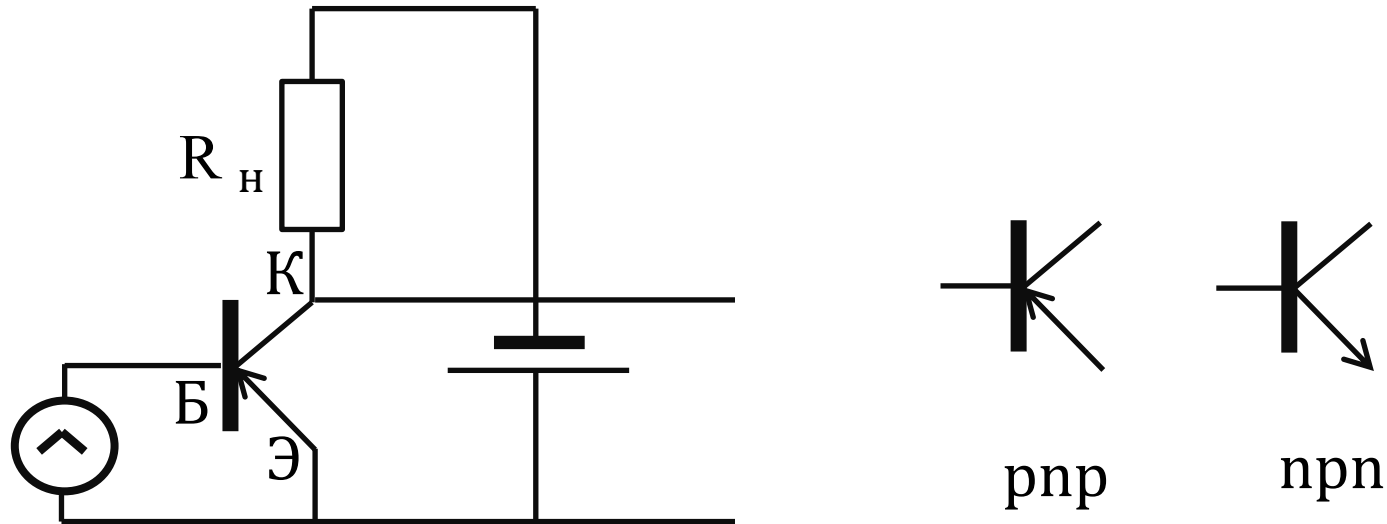
1). Изменение тока базы
меняет высоту
потенциального барьера

Биполярный транзистор

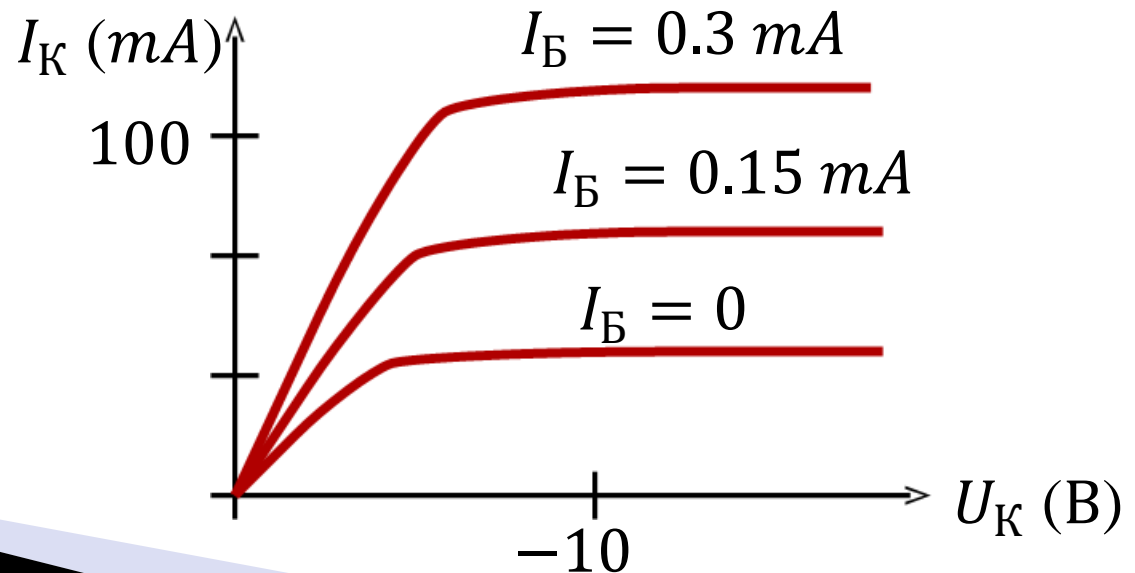




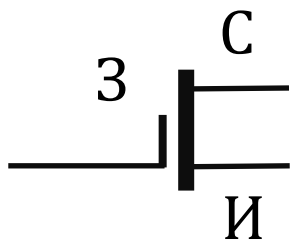
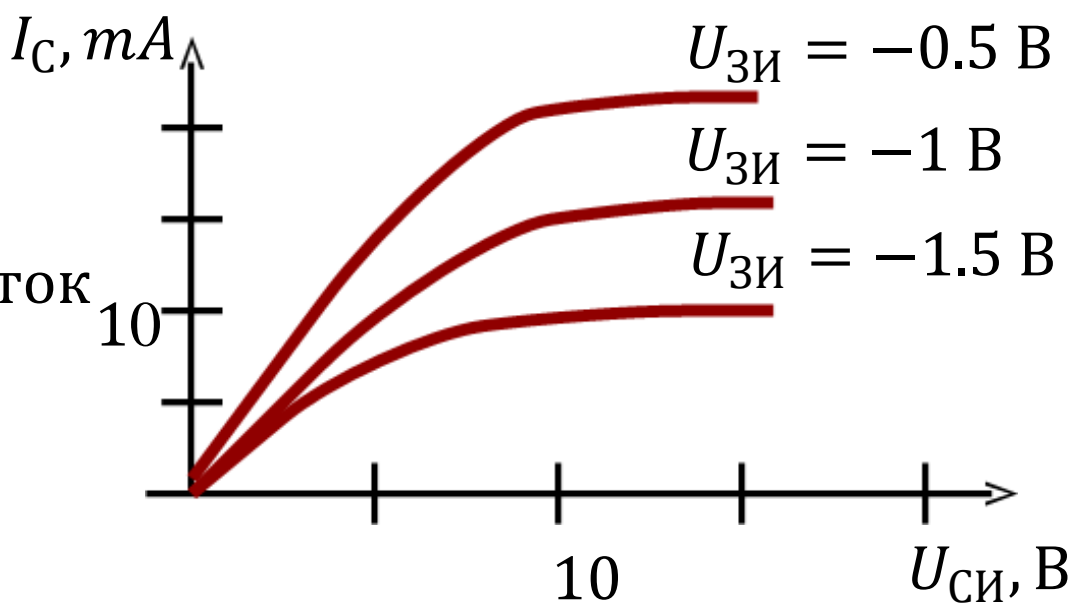
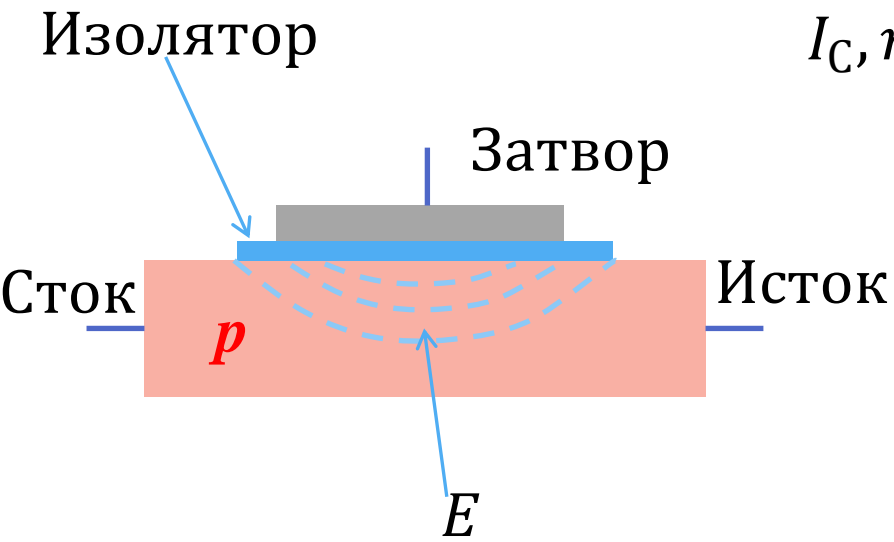
Биполярный транзистор



Типичные характеристики биполярного транзистора



Полевой транзистор (FET)



$$S_{\text{дифф}} = -\frac{\partial I_C}{\partial U_{ЗИ}} \sim 0,2 \frac{\text{mA}}{\text{V}},$$

$$R_{\text{вх}} = R_{ЗИ} = \frac{\partial U_{ЗИ}}{\partial I_3} = 10^8 \dots 10^{12} \text{ Ом},$$

$$R_{СИ} \sim 10^4 \text{ Ом}, \quad f = 0 \dots 10^{11} \text{ Гц}$$



Основные параметры полевого транзистора

Входное сопротивление

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{\partial U_3}{\partial I_3} \approx 10^8 \dots 10^{12} \text{ Ом} \quad (1)$$

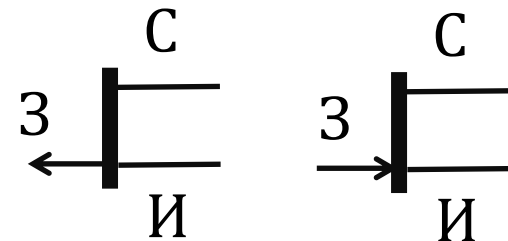
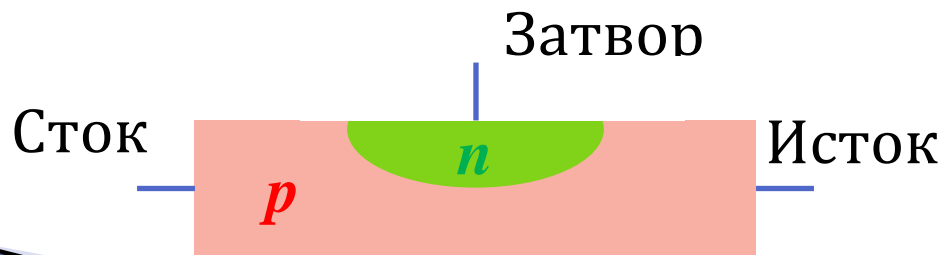
Крутизна

$$S = \frac{\partial I_C}{\partial U_3} \approx 10^{-3} \text{ 1/Ом} \quad (2)$$

Выходное сопротивление

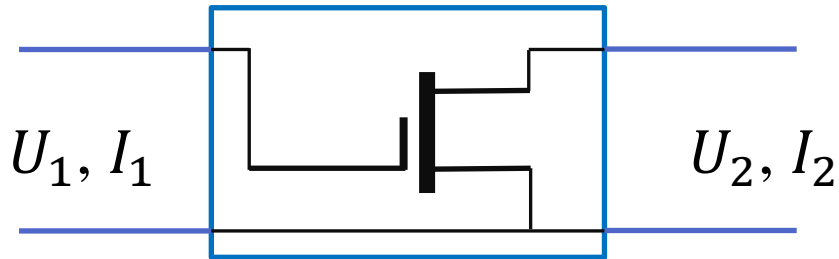
$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{\partial U_C}{\partial I_C} \approx 10^4 \text{ Ом} \quad (3)$$

Полевой транзистор с полупроводниковым затвором





Транзистор как четырехполюсник



Статические параметры:

$$U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2$$

$$I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2$$

Дифференциальные параметры:

$$\Delta U_1 = \left. \frac{\partial U_1}{\partial I_1} \right|_{\Delta U_2=0} \Delta I_1 + \left. \frac{\partial U_1}{\partial U_2} \right|_{\Delta I_1=0} \Delta U_2$$

$$\Delta I_2 = \left. \frac{\partial I_2}{\partial I_1} \right|_{\Delta U_2=0} \Delta I_1 + \left. \frac{\partial I_2}{\partial U_2} \right|_{\Delta I_1=0} \Delta U_2$$



Полевой транзистор:

$$\Delta U_3 = \left. \frac{\partial U_3}{\partial I_3} \right|_{\Delta U_C=0} \Delta I_3 + \left. \frac{\partial U_3}{\partial U_C} \right|_{\Delta I_3=0} \Delta U_C$$

$$\Delta I_C = \left. \frac{\partial I_C}{\partial I_3} \right|_{\Delta U_C=0} \Delta I_3 + \left. \frac{\partial I_C}{\partial U_C} \right|_{\Delta I_3=0} \Delta U_C$$

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{\partial U_3}{\partial I_3} \approx 10^8 \dots 10^{12} \text{ Ом}, \quad R_{\text{ВЫХ}} = \frac{\partial U_C}{\partial I_C} \approx 10^4 \text{ Ом},$$

$$S = \frac{\partial I_C}{\partial U_3} \approx 10^{-3} \text{ 1/Ом},$$



Полевой транзистор:

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{\partial U_3}{\partial I_3} \approx 10^8 \dots 10^{12} \text{ Ом}, \quad R_{\text{ВЫХ}} = \frac{\partial U_C}{\partial I_C} \approx 10^4 \text{ Ом},$$

$$S = \frac{\partial I_C}{\partial U_3} \approx 10^{-3} \text{ 1/Ом},$$

Усиление по току:

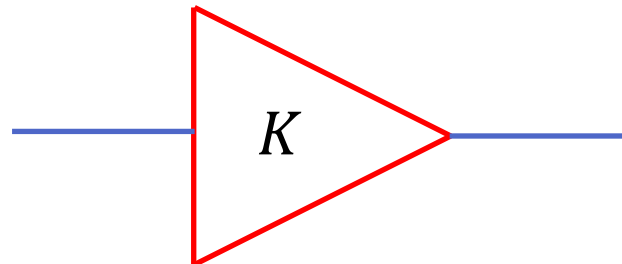
$$\frac{\partial I_C}{\partial I_3} = \frac{\partial I_C}{\partial U_3} \times \frac{\partial U_3}{\partial I_3} = SR_{\text{ЗИ}} \approx 10^{-3} \times 10^{12} = \mathbf{10^9} \text{ (!)}$$

Усиление по напряжению:

$$\frac{\partial U_C}{\partial U_3} = \frac{\Delta I_C R_{\text{СИ}}}{\Delta I_3 R_{\text{ЗИ}}} \approx 10^9 \times \frac{10^4}{10^8 \dots 10^{12}} \approx \mathbf{10 \dots 10^5}$$



Усилители электрических сигналов



K - коэффициент усиления (= передачи)

$$\tilde{K}(\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(\omega)}{U_{\text{ВХ}}(\omega)} \quad \text{— частотная зависимость}$$

$|\tilde{K}(\omega)|$ — амплитудно — частотная характеристика,

$\arg(\tilde{K}(\omega))$ — фазово — частотная характеристика,

$K(U_{\text{ВХ}})$ — амплитудная характеристика (учет нелинейности)



Децибелы:

$$N[\text{dB}] = 10 \log \frac{W_{\text{ВЫХ}}}{W_{\text{ВХ}}} = 20 \log \frac{|U_{\text{ВЫХ}}|}{|U_{\text{ВХ}}|},$$
$$K = \frac{|U_{\text{ВЫХ}}|}{|U_{\text{ВХ}}|},$$

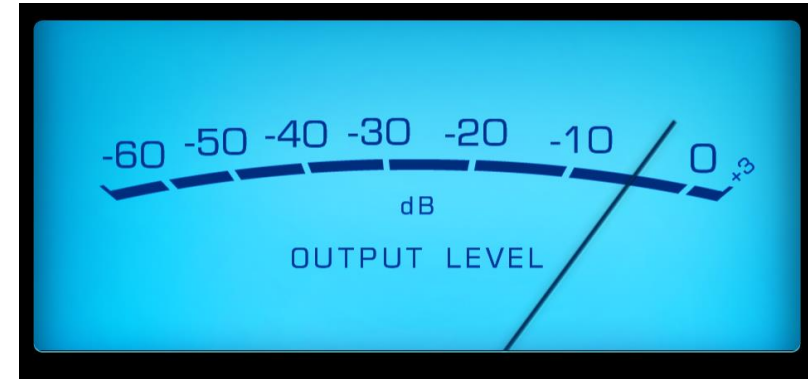
Примеры:

$$K = 100, \Rightarrow N = 40 \text{ Дб},$$

Каскад усилителей:

$$K_{\Sigma} = K_1 \times K_2 \times K_3,$$
$$N_{\Sigma} = N_1 + N_2 + N_3,$$

$$N[\text{dBm}] = 10 \log \frac{W}{1 \text{ мВт}}$$

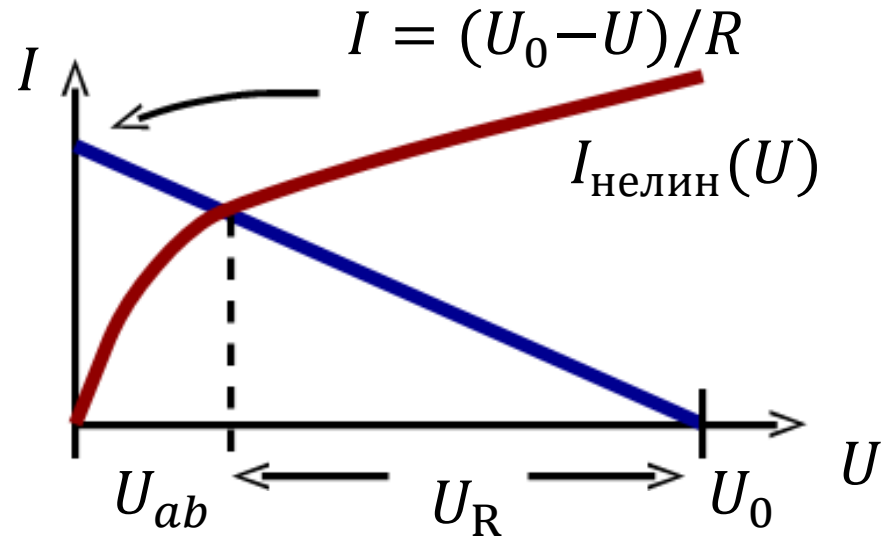
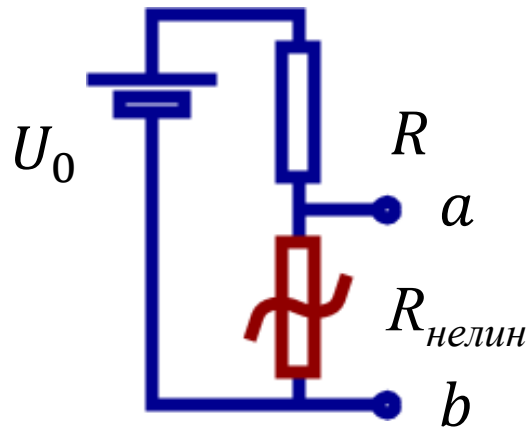




Расчет цепи с нелинейным сопротивлением

Пусть нелинейная характеристика
 $I_{\text{нелин}}(U)$ известна.

$$I_{\text{нелин}}(U_{ab}) = (U_0 - U_{ab})/R$$

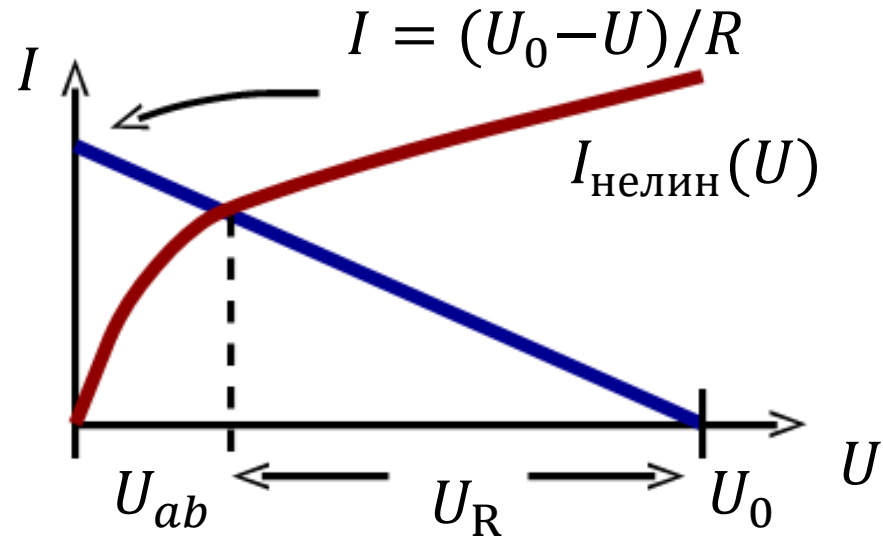
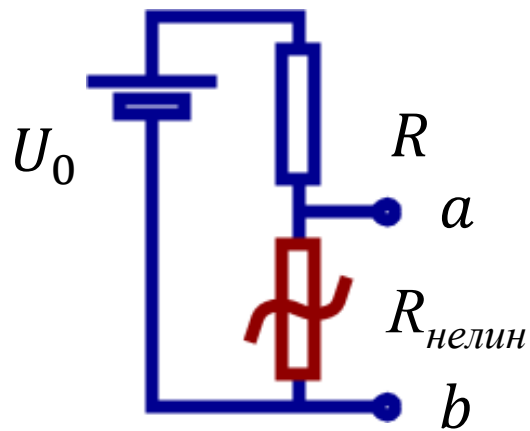




Расчет цепи с нелинейным сопротивлением

Пусть нелинейная характеристика $I_{\text{нелин}}(U)$ известна.

$$I_{\text{нелин}}(U_{ab}) = (U_0 - U_{ab})/R$$

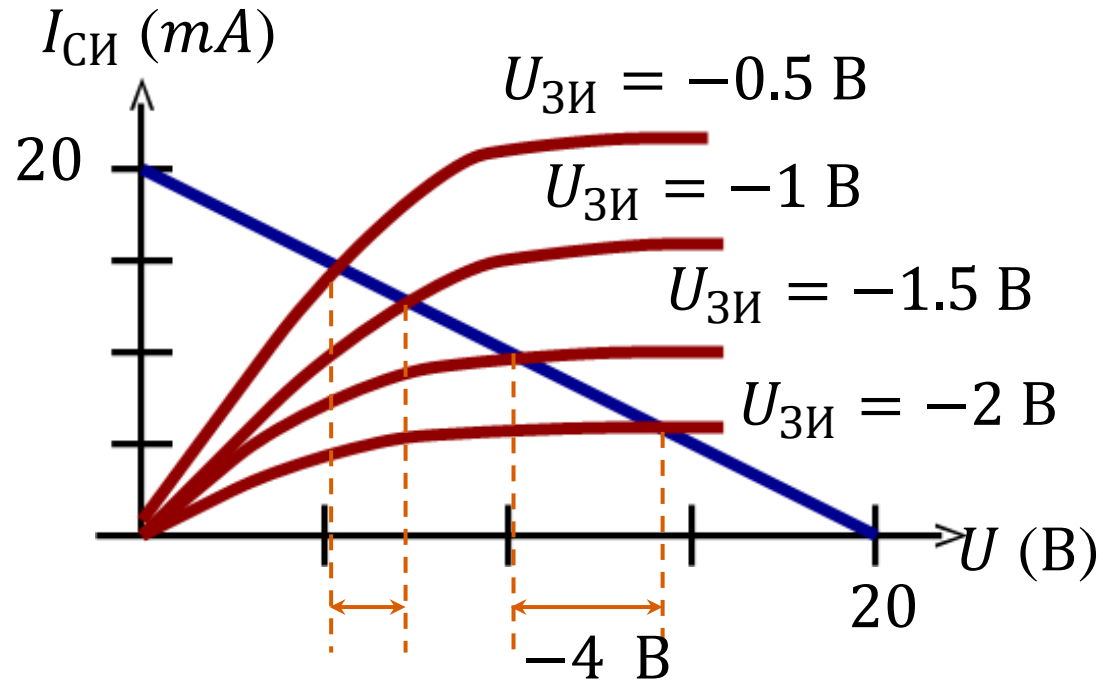
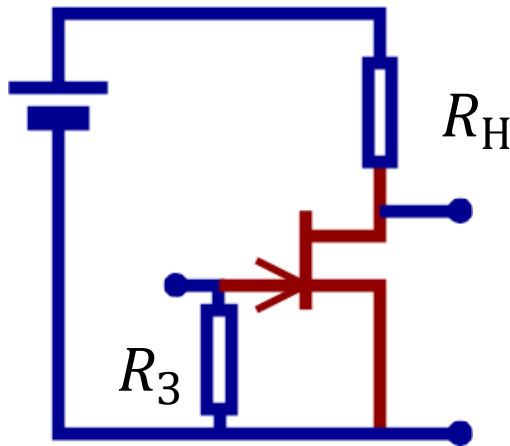


Полевой транзистор - нелинейное сопротивление, управляемое напряжением на затворе.



Пример: графический расчет статического K

$$U_0 = 20 \text{ В} \quad R_H = 1 \text{ кОм}$$



Рабочая точка:

$$U_{3_0} \cong -2 \text{ В}$$

$$K_U = \frac{\Delta U_{СИ}}{\Delta U_{ЗИ}} = \frac{-4 \text{ В}}{0,5 \text{ В}} = -8,$$

Инвертирующий усилитель \Rightarrow знак K_U **отрицательный.**

Из графика видны нелинейные искажения $\Rightarrow K_U(U_{ЗИ})$.

При $U_{3_0} = -1 \text{ В}$ коэффициент усиления **меньше:**

$$K_U \cong -4.$$



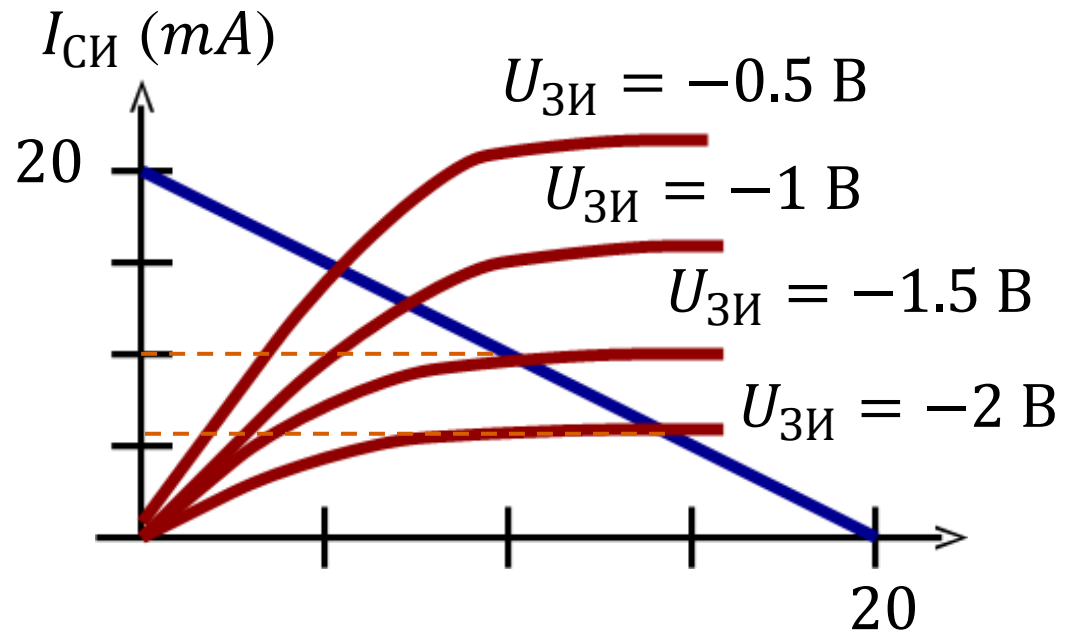
Расчет коэффициента усиления по току и по мощности

Примем $R_{\text{ВХ}} = 10^7 \text{ Ом}$,
тогда из графика получаем

$$\Delta I_{\text{ВХ}} \approx \frac{0,5 \text{ В}}{10^7 \text{ Ом}} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ А}$$

$\Delta I_{\text{СИ}} \approx 5 \text{ мА}$ (см. график).

Следовательно,



$$K_I = \frac{\Delta I_{\text{СИ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}} \approx 10^5.$$

$$K_W = \frac{\Delta I_{\text{СИ}}^2 R_{\text{Н}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}^2 R_{\text{ВХ}}} = K_I^2 \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{ВХ}}} \\ \approx 10^{10} \times \frac{10^3}{10^7} \approx 10^6.$$



Аналитический расчет

$$\Delta U_0 = 0 = R_H \Delta I_{\text{ВЫХ}} + \Delta U_{\text{ВЫХ}} \Rightarrow \Delta I_{\text{ВЫХ}} = -\frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{R_H} \quad (4)$$

$$\Delta I_{\text{ВЫХ}} = \underbrace{\frac{\partial I_{\text{ВЫХ}}}{\partial U_{\text{ВХ}}}}_S \Delta U_{\text{ВХ}} + \underbrace{\frac{\partial I_{\text{ВЫХ}}}{\partial U_{\text{ВЫХ}}}}_{1/R_{\text{СИ}}} \Delta U_{\text{ВЫХ}} \quad (5)$$

Крутизна $S = \frac{\Delta I_{\text{СИ}}}{\Delta U_{\text{ЗИ}}} \cdot R_{\text{СИ}} = \frac{\Delta U_{\text{СИ}}}{\Delta I_{\text{СИ}}}$. Подставляем (4) \rightarrow (5):

$$\frac{-\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{R_H} = S \Delta U_{\text{ВХ}} + \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{СИ}}},$$
$$K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}} = -S \cdot \frac{R_H R_{\text{СИ}}}{R_H + R_{\text{СИ}}} = -\underbrace{S R_{\text{СИ}}}_{\mu} \cdot \frac{R_H}{R_H + R_{\text{СИ}}}$$

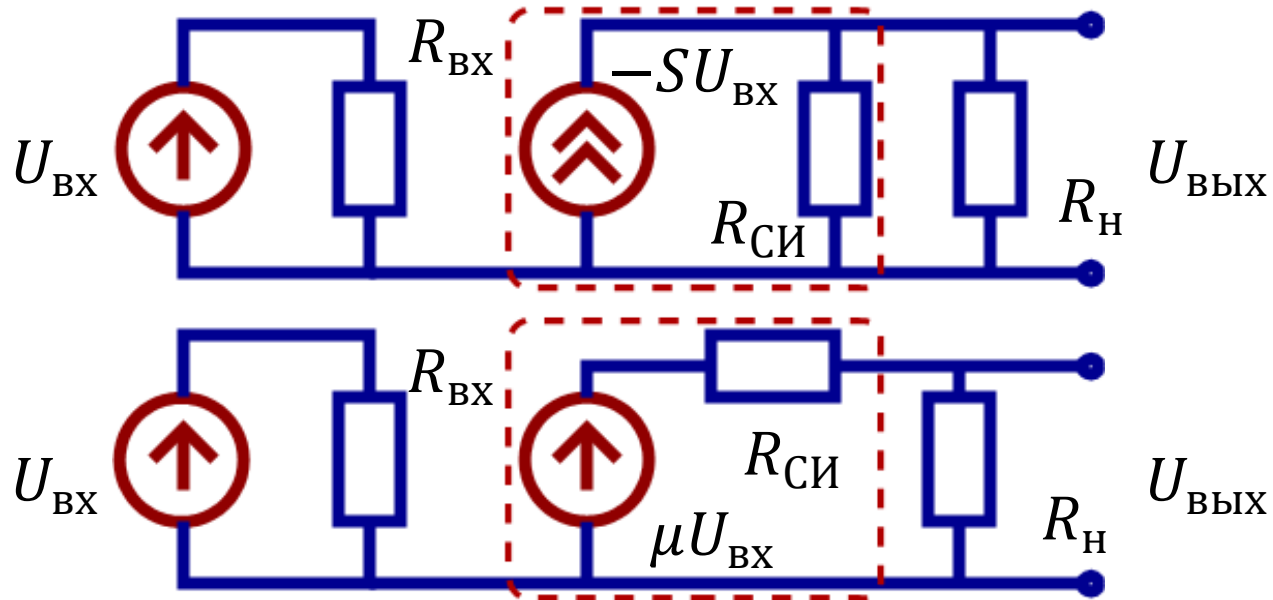
$\mu = S R_{\text{СИ}}$. При $R_{\text{СИ}} \gg R_H$ имеем $K_U \cong -S R_H \cong -S Z_H(\omega)$.

Величины S и $R_{\text{СИ}}$ не постоянны, а зависят от выбора рабочей точки.



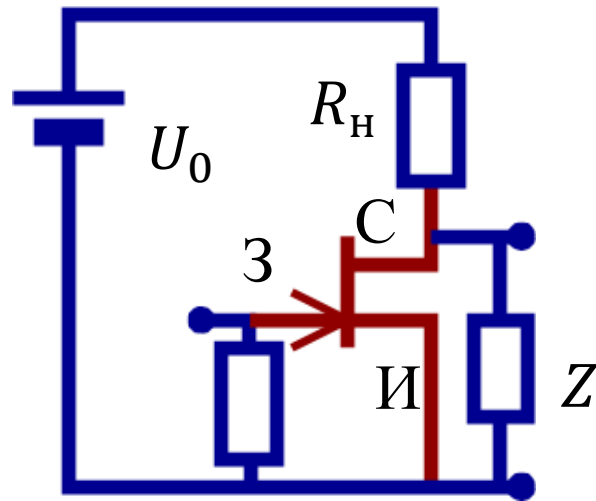
Эквивалентные схемы усилителя

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = -S \Delta U_{\text{ВХ}} \times \frac{R_{\text{Н}} R_{\text{СИ}}}{R_{\text{Н}} + R_{\text{СИ}}} = -\mu \Delta U_{\text{ВХ}} \times \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{Н}} + R_{\text{СИ}}}$$





Расчет простого усилителя



$$0 = R_H \Delta I_{\text{ВЫХ}} + \Delta U_{\text{ВЫХ}} \quad (6)$$

$$\Delta I_{\text{ВЫХ}} = S \Delta U_{\text{ВХ}} + \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{СИ}}} + \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{Z} \quad (7)$$

Подставляя (6) в (7) получаем:

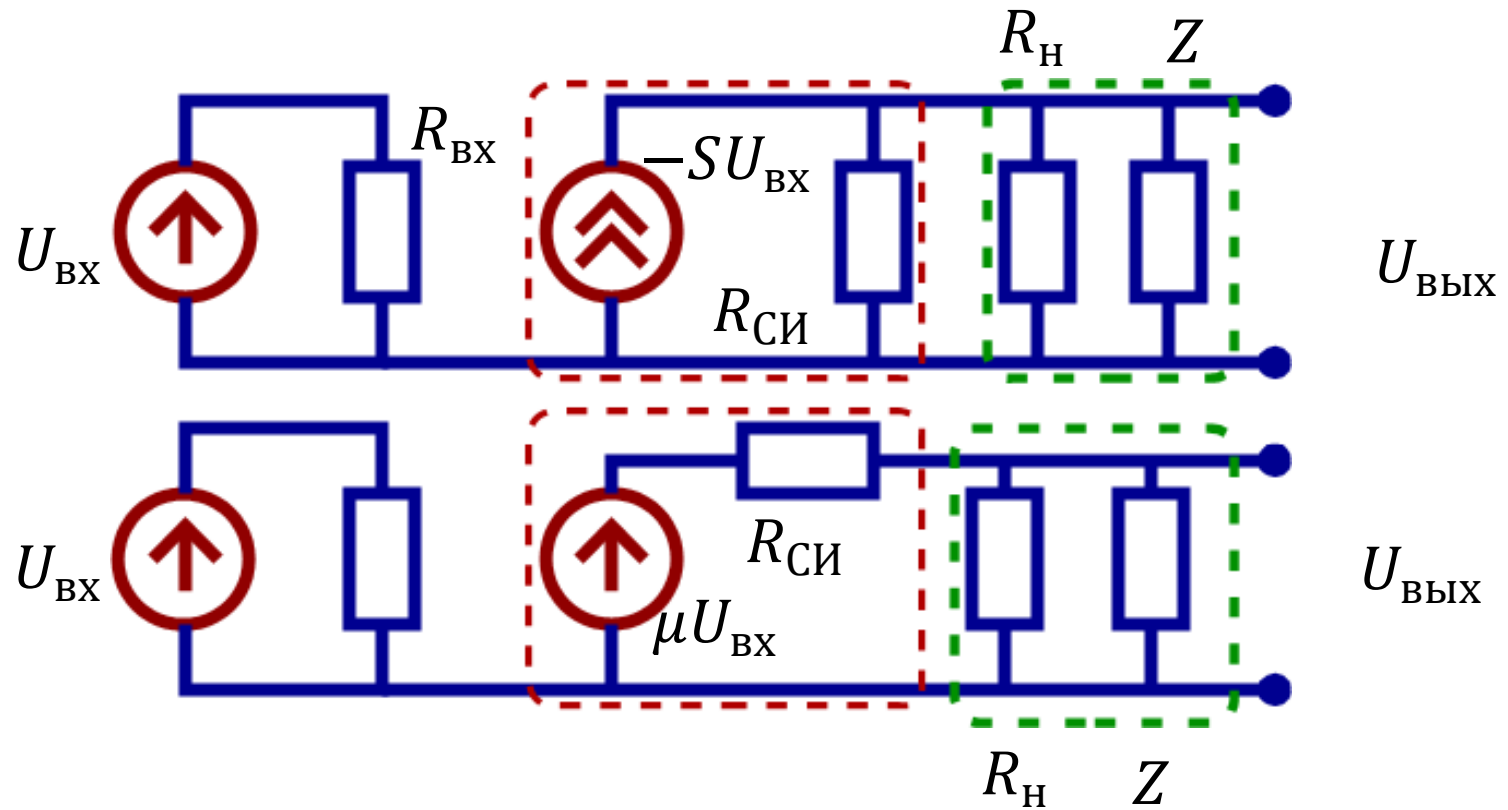
$$S \Delta U_{\text{ВХ}} = -\Delta U_{\text{ВЫХ}} \left(\frac{1}{R_H} + \frac{1}{R_{\text{СИ}}} + \frac{1}{Z} \right), \quad (8)$$

$$S R_{\text{СИ}} \Delta U_{\text{ВХ}} = \mu \Delta U_{\text{ВХ}} = -\Delta U_{\text{ВЫХ}} \times \frac{R_{\parallel} + R_{\text{СИ}}}{R_{\parallel}}, \quad (9)$$

$$\frac{1}{R_{\parallel}} = \frac{1}{R_H} + \frac{1}{Z}$$



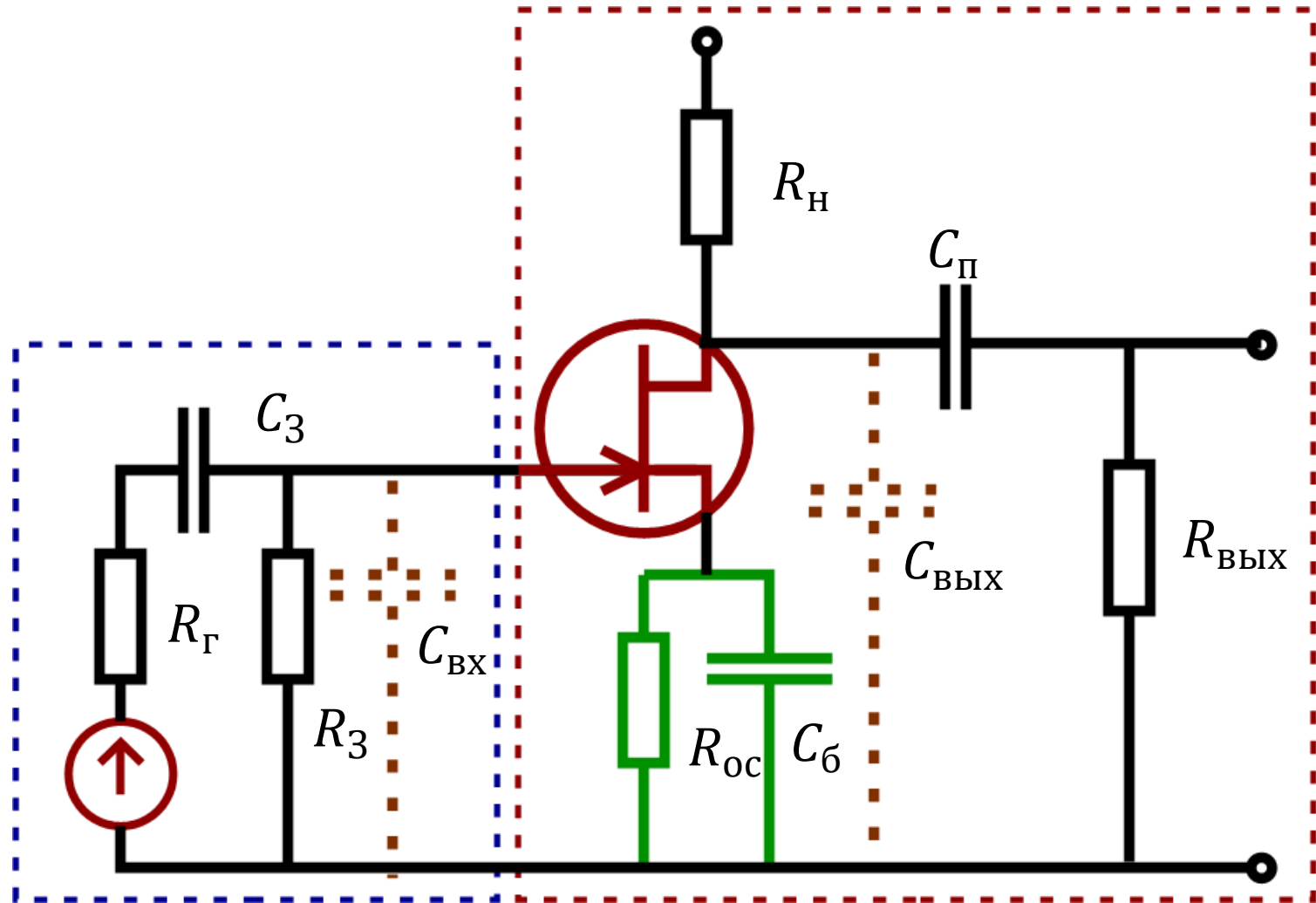
Это соответствует эквивалентным схемам:



Сопротивления $R_{\text{Н}}$ и Z включены параллельно (!)

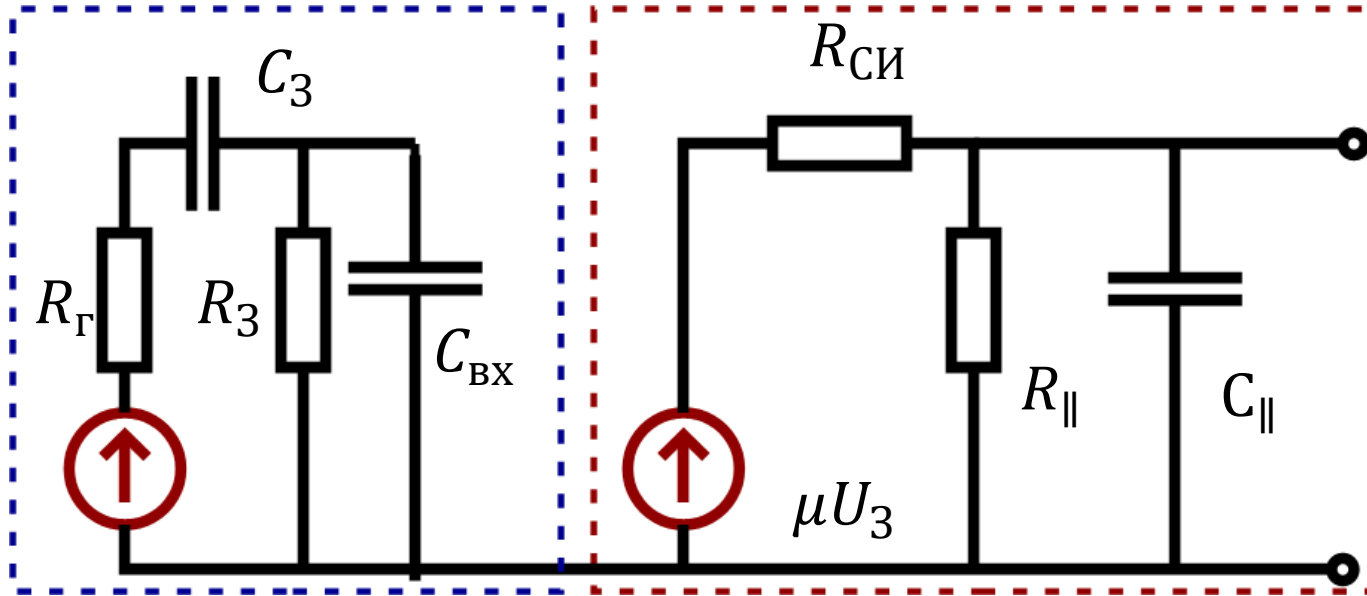


Усилитель переменного напряжения.

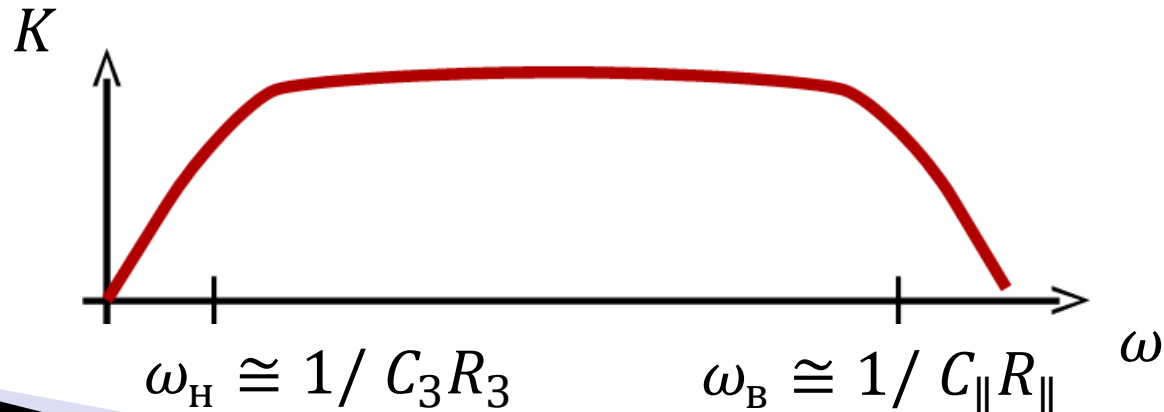


$C_{ВХ}$, $C_{ВЫХ}$ - паразитные емкости.

Эквивалентная схема усилителя переменного напряжения

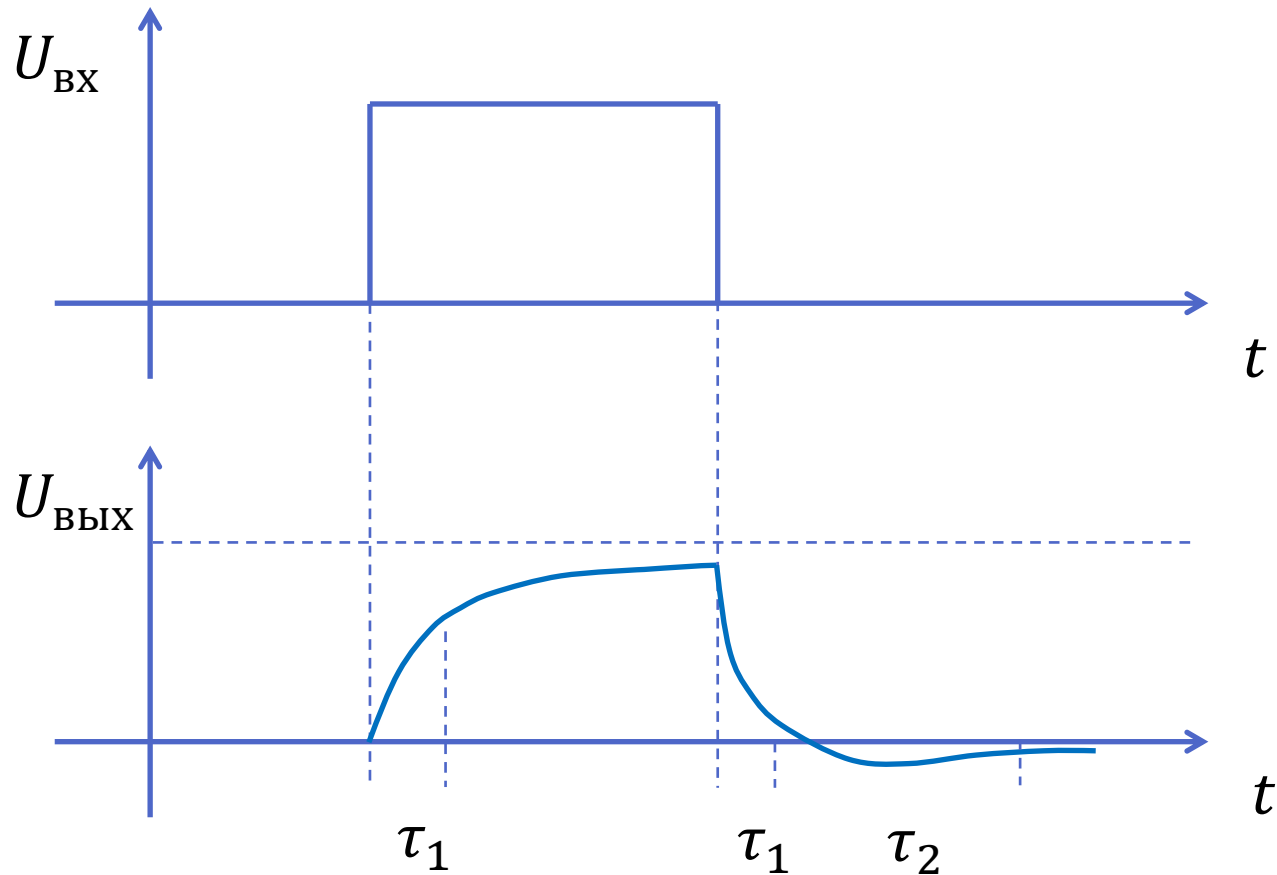


Форма АЧХ усилителя переменного напряжения





Переходная характеристика усилителя

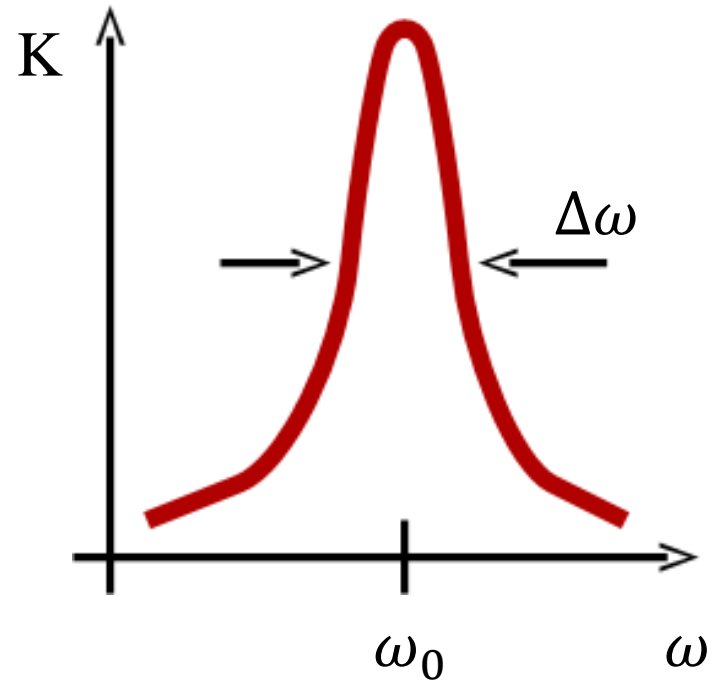
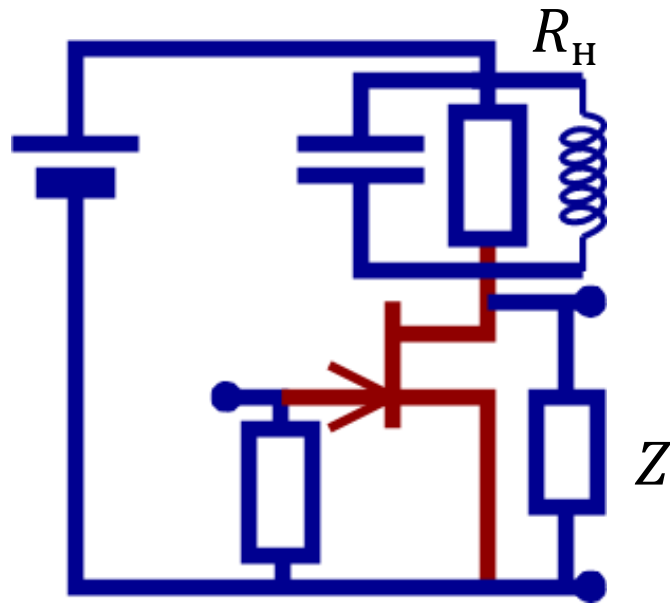


$$\tau_1 = \max(R_3 C_3, R_{\parallel} C_{\parallel}, \tau_{\text{заряд}})$$

$$\tau_2 = R_{\parallel} C_{\text{ВЫХ}}$$



Резонансный усилитель

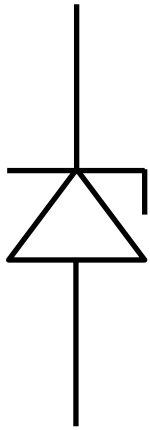


Если $R_H \ll R_{СИ}, Z$, то

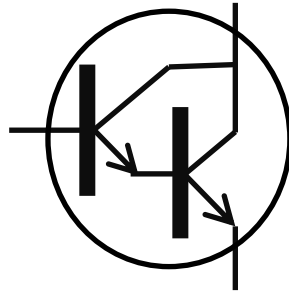
$$\Delta\omega \cong \frac{\omega_0}{Q}, \quad Q = R_H \sqrt{\frac{C}{L}}$$



Варианты полупроводниковых устройств:



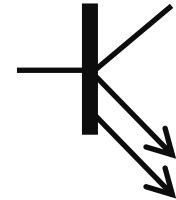
Стабилитрон:
Диод работающий
в режиме пробоя
($U_{\text{стаб}} = 3 \dots 150 \text{ В}$)
- Стабилизаторы
напряжения



Составной
транзистор:
Большой K



Двухзатворный
Транзистор

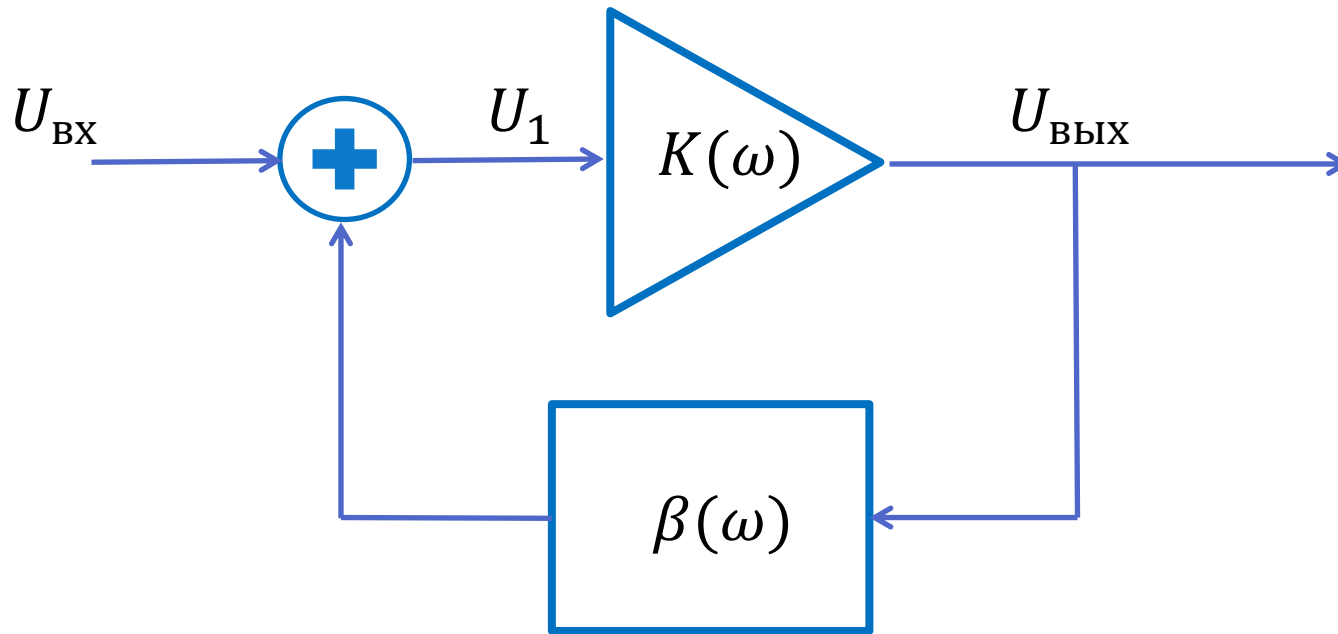


Много-
эмиттерный
транзистор:

удобно делать
смесители и
логические элементы



Обратные связи в усилителях



$$U_1 = U_{\text{ВХ}} + \beta(\omega)U_{\text{ВЫХ}},$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = K(\omega)U_1,$$



$$U_1 = U_{\text{ВХ}} + \beta U_{\text{ВЫХ}}, \quad U_{\text{ВЫХ}} = K U_1,$$

$$K_\beta = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_1 - \beta U_{\text{ВЫХ}}} = \frac{K(\omega)}{1 - \beta(\omega)K(\omega)}.$$

$$K(\omega) = K_0(\omega)e^{i\phi_k(\omega)}, \quad \beta(\omega) = \beta_0(\omega)e^{i\phi_\beta(\omega)},$$

$$a) \quad \phi_k + \phi_\beta = 0 \quad \Rightarrow \quad |K_\beta| = \frac{K_0}{1 - \beta_0 K_0},$$

$$b) \quad \phi_k + \phi_\beta = \pi \quad \Rightarrow \quad |K_\beta| = \frac{K_0}{1 + \beta_0 K_0}$$

(a) --- **положительная** обратная связь,

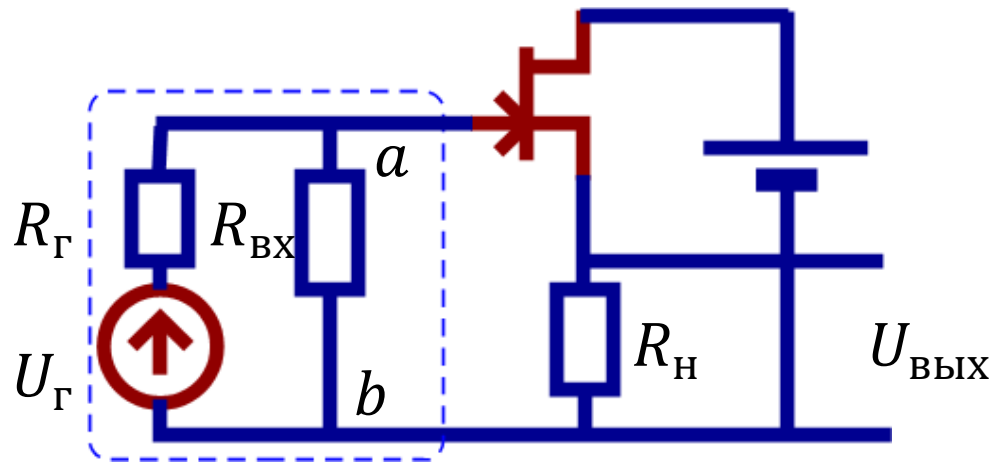
(b) --- **отрицательная** обратная связь.

Если $K_0\beta_0 \gg 1$, то $K_\beta \approx \frac{1}{\beta(\omega)}$

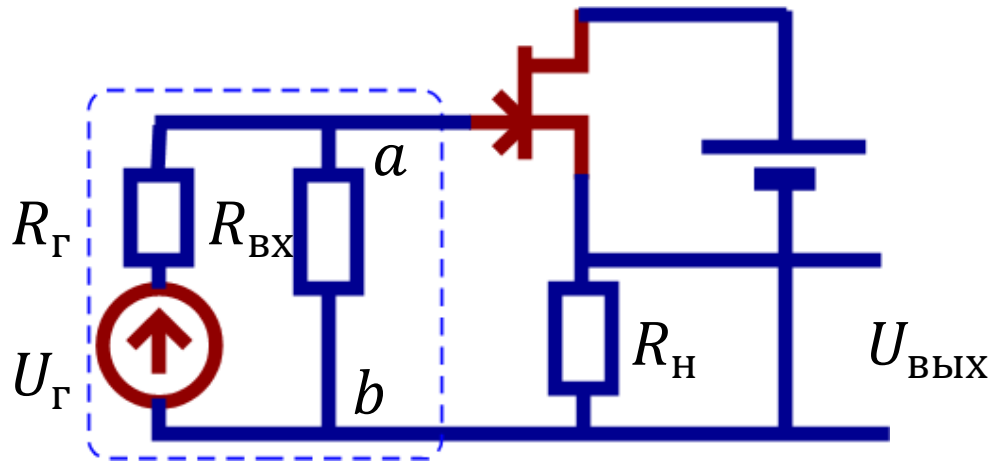


Истоковый (эмиттерный, катодный) повторитель

Пример устройства с обратной связью



$$R_{\Gamma} \ll R_{\text{ВХ}} \Rightarrow \Delta U_{ab} \approx U_{\Gamma}, \quad R_{\text{ВХ}} \gg R_{\text{Н}},$$
$$\Delta U_{\text{ЗИ}} = \Delta U_{ab} - R_{\text{Н}} \Delta I_{\text{СИ}} = \Delta U_{ab} - R_{\text{Н}} S \Delta U_{\text{ЗИ}}$$



$$R_{\Gamma} \ll R_{\text{ВХ}} \Rightarrow \Delta U_{ab} \cong U_{\Gamma}, \quad R_{\text{ВХ}} \gg R_{\text{Н}},$$

$$\Delta U_{\text{ЗИ}} = \Delta U_{ab} - R_{\text{Н}} \Delta I_{\text{СИ}} = \Delta U_{ab} - R_{\text{Н}} S \Delta U_{\text{ЗИ}},$$

$$\Delta U_{\text{ЗИ}} = \frac{\Delta U_{ab}}{1 + R_{\text{Н}} S},$$

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = R_{\text{Н}} I_{\text{СИ}} = R_{\text{Н}} S \Delta U_{\text{ЗИ}} = \Delta U_{ab} \frac{R_{\text{Н}} S}{1 + R_{\text{Н}} S} \cong \Delta U_{ab},$$

$$K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}} \approx \frac{R_{\text{Н}} S}{1 + R_{\text{Н}} S} \leq 1,$$

$$K_I = \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}} = K_U \frac{R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{Н}}} \gg 1$$

- устройство для согласования сопротивлений.