

Радиофизика и ЧЭЭлектроника электроника

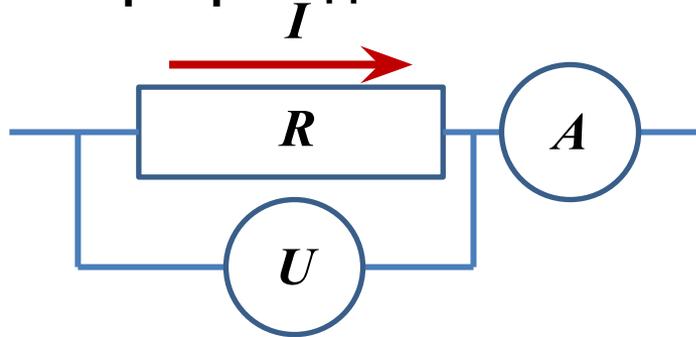
Введени

Электроника – область науки, охватывающая исследование, разработку и применение различных электронных приборов и устройств. Электронику принято разделять в соответствии с физическими основами работы электронных приборов на вакуумную, твердотельную и квантовую.



1. Физические основы полупроводниковых устройств

1.1 Классификация материалов по свойствам электропроводности



Закон
Ома $\mathcal{U}_{\text{ма}} = RI$

Сопротивлени
е $R = \rho \frac{L}{S}$

Проводимост
ь $G = \frac{1}{R}$

Удельная проводимость

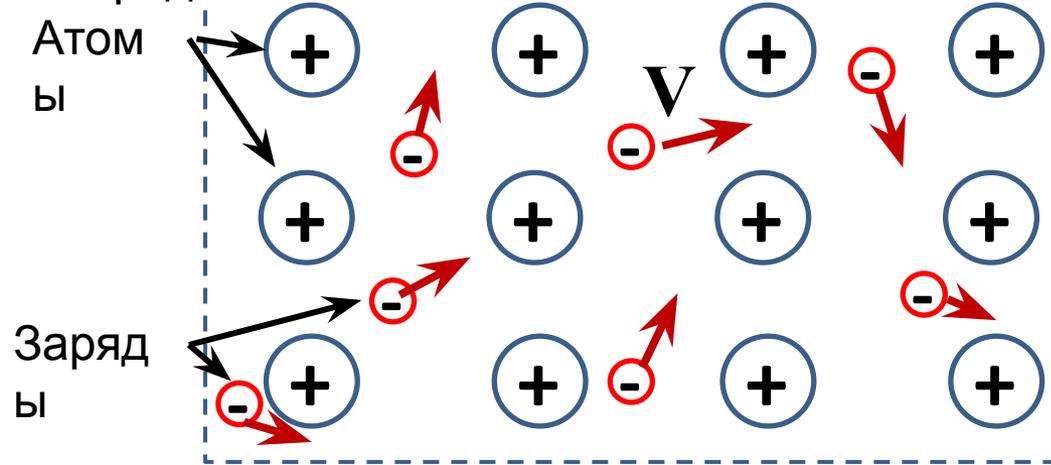
$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad [1/(\text{Ом} \cdot \text{м})]$$

$\mathbf{j} = \gamma \mathbf{E}$ 3-н Ома в дифф. форме

Материал	Проводимость, γ 1/[Ом*м]	Влияние температуры T на проводимость (T растет)
Диэлектрики	$<10^{-8}$	Постоянная
Полупроводники	$10^{-8} \div 10^5$	Растет
Металлы	$>10^5$	Уменьшается

1.2 Электронная теория проводимости Друде-Лоренца

Модель твердого тела. Атомы решетки и носители заряда.



Идеальный газ электронов
 Движение = Хаотическое (тепловое) + Направленное (эл. поле)

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_T + \mathbf{V}_E$$

$$\langle \mathbf{V} \rangle = \langle \mathbf{V}_T \rangle + \langle \mathbf{V}_E \rangle$$

$$\langle \mathbf{V}_T \rangle = 0, \quad \langle \mathbf{V}_E \rangle \neq 0$$

$$T \neq 0$$

$$\mathbf{E}$$

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

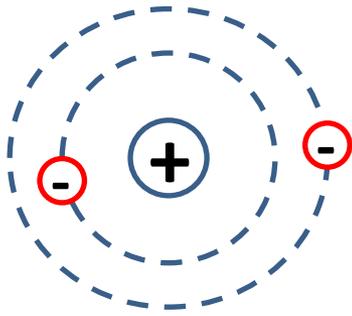
$$\mathbf{j} = \gamma\mathbf{E}$$

Условия для существования тока носителей

1. Наличие носителей заряда
2. Свободное движение

Когда эти условия выполняются?

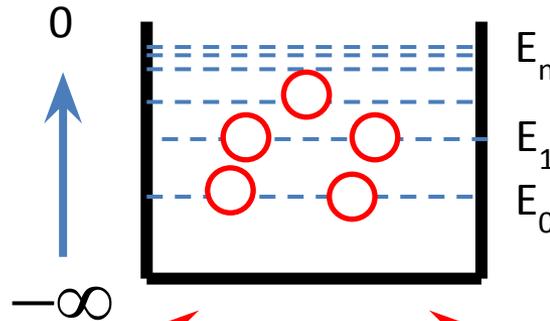
Модель атома Резерфорда



$2r$

Атом электрически нейтрален

Потенциальная яма

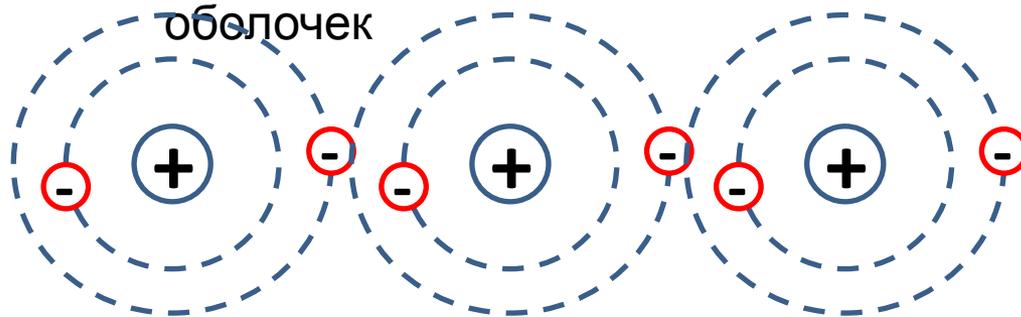


$2r$

Свойства уровней энергии

1. Уровни энергии дискретны
2. Число уровней бесконечно
3. На каждом уровне не более 2 электронов

Твердое тело. Образование связей и перекрытие электронных оболочек



Кристаллическая решетка из N атомов

(N порядка числа Авогадро $\approx 10^{23}$)

Возникновение связей между атомами



Запрещенные зоны

1. Расщепление отдельных уровней на N подуровней
2. Образование запрещенных энергетических зон

1.3 Энергетические диаграммы

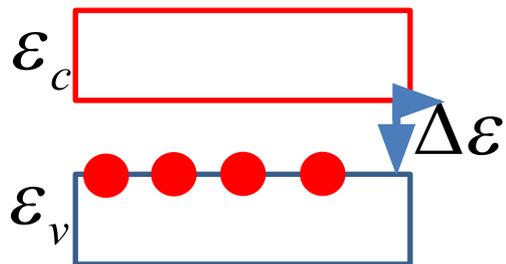
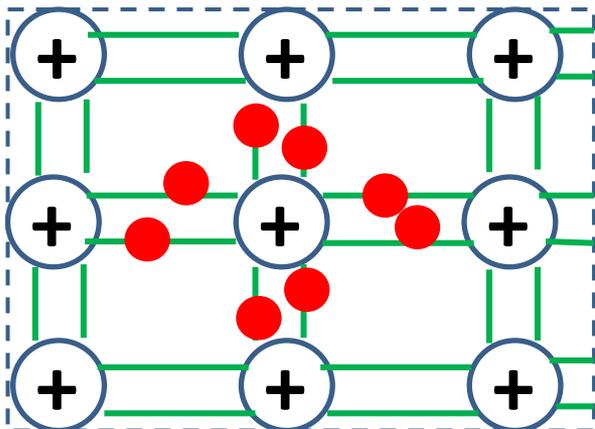


п/п	$\Delta\epsilon$, эВ
Ge (IV группа)	0.65
Si (IV группа)	1.1
GaAs (Ga-III гр., As-V гр.)	1.42

1.4 Полупроводники с собственным типом проводимости (химически чистые п/п, i-тип проводимости)

Si, Ge

$T=0$

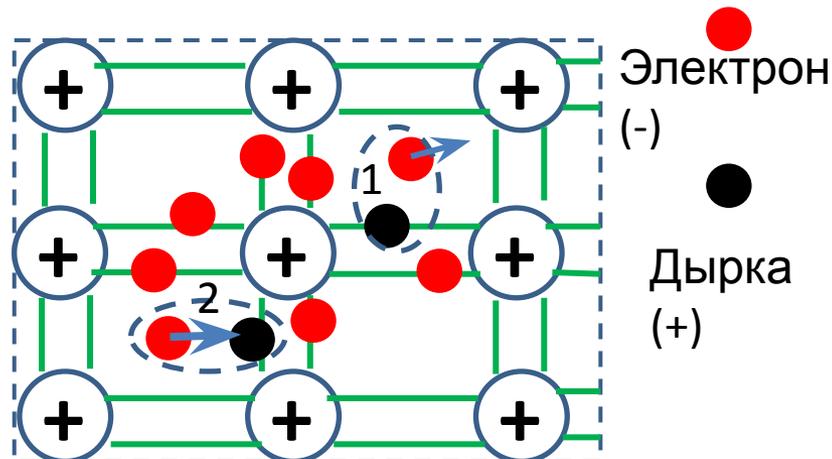


Все ϵ_c свободны

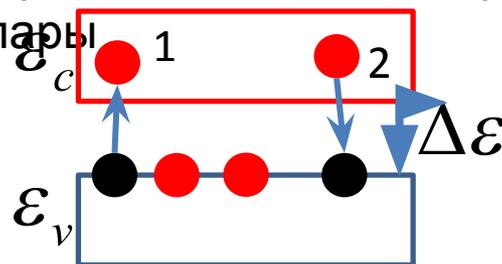
Все ϵ_v заняты

Диэлектрик

$T>0$



1-генерация электр.-дырочной пары
2-рекомбинация электр.-дырочной пары



ϵ_c Частично заняты

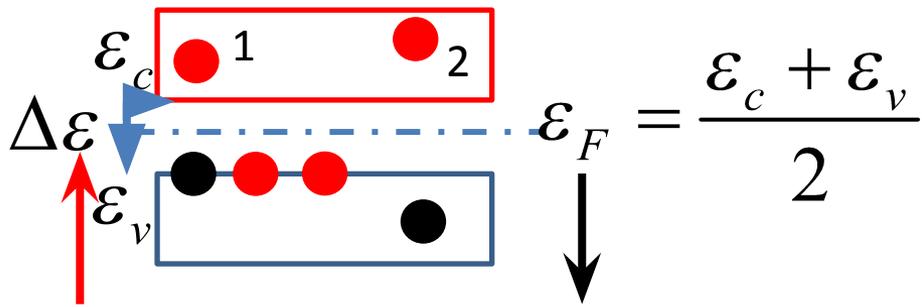
ϵ_v частично свободны

Полупроводник i-типа

Выводы

- 1. При $T=0$ п/п является диэлектриком**
- 2. При $T>0$ п/п является проводником**
- 3. Разрыв связи между атомами можно трактовать как рождение квазичастицы -«дырки», обладающей массой и положительным зарядом (+e). Дырки могут «свободно» двигаться в валентной зоне.**
- 4. При $T>0$ непрерывно происходит генерация и рекомбинация эл.-дыр. пар**
- 5. Генерация и рекомбинация – вероятностные процессы**
- 6. Скорости генерации и рекомбинации одинаковы в равновесном термодинамическом состоянии п/п.**
- 7. В любой момент времени число электронов в зоне проводимости равно числу дырок в валентной зоне.**

1.5 Концентрация носителей заряда



Направление возрастания энергии для электронов

Направление возрастания энергии для дырок

Какова вероятность занятия электроном конкретного уровня с энергией ϵ при данной температуре T ?

$$f(\epsilon, T) = \frac{1}{1 + e^{\frac{\epsilon - \epsilon_F}{kT}}}$$

Статистика Ферми-Дирака

$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град – постоянная Больцмана
 $kT = 0.025$ эВ

При условии $(\epsilon - \epsilon_F) \gg kT$

Распределение Максвелла-Больцмана по энергиям

$$f_n = e^{\frac{-(\epsilon - \epsilon_F)}{kT}}, \text{ электроны}$$

$$f_p = e^{\frac{-(\epsilon_F - \epsilon)}{kT}}, \text{ дырки}$$

Концентрация носителей в единице объема $n/p_{\Delta\epsilon}$

$$n = p = n_i \approx e^{\frac{-\Delta\epsilon}{2kT}}$$

Зависит только от температуры и ширины запрещенной зоны

Выводы

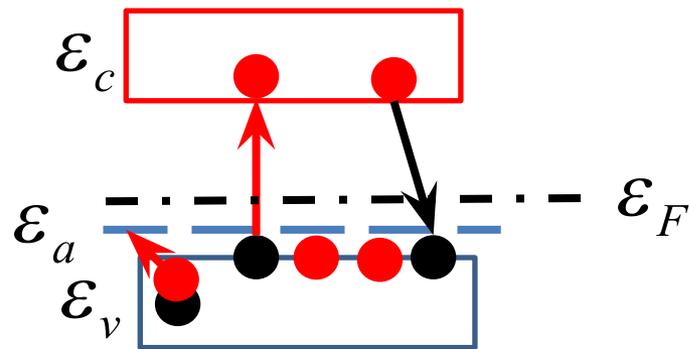
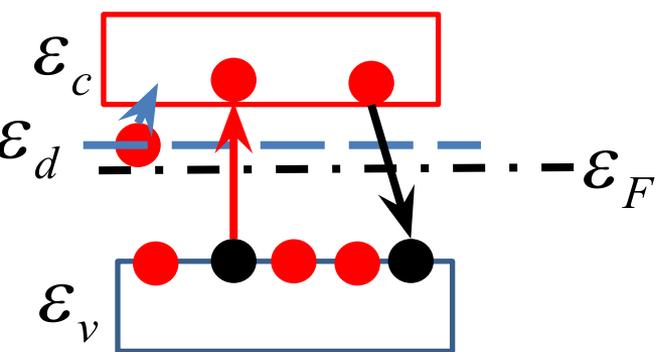
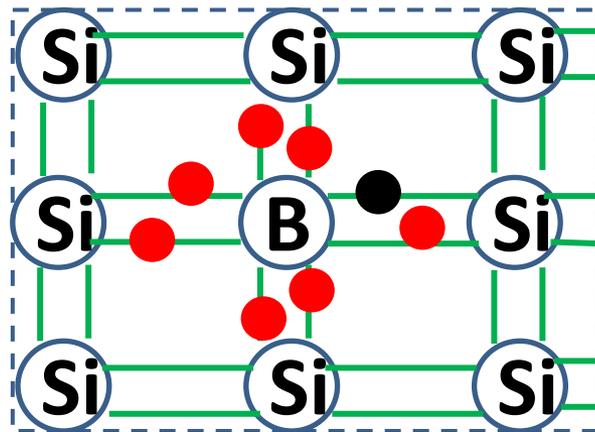
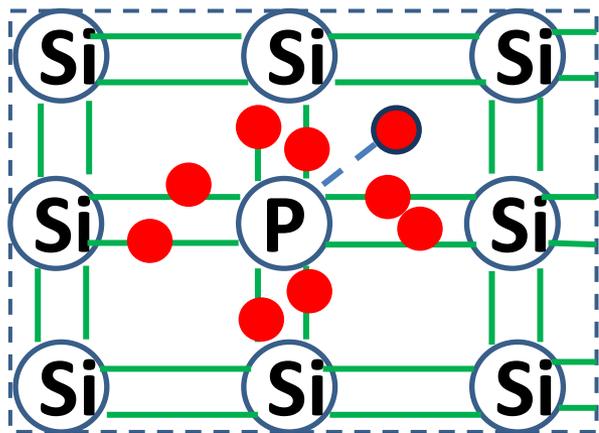
1. По определению-уровень Ферми это уровень энергии который может занять электрон с вероятностью 50% при любой температуре T
2. В химически чистых п/п уровень Ферми находится посередине запрещенной зоны.
3. Уровень Ферми в различных частях неоднородного п/п в равновесном состоянии одинаков.
4. Концентрация электронов и дырок в п/п с i -типом проводимости зависит только от ширины запрещенной зоны и температуры. При фиксированной ширине запрещенной зоны увеличение температуры приводит к увеличению концентрации носителей заряда (аналогично при фиксированной T и уменьшении ширины запрещенной зоны).

Примесные полупроводники (группа),

концентрация атомов п/п $N \approx 5 \cdot 10^{22}$
 Концентрация атомов доноров и акцепторов $N_d, N_a \approx 10^{18} \div 10^{20} \text{ см}^{-3}$

п/п n-типа + Донор P, Sb, As (V-группа)

п/п p-типа + Акцептор B, Ga, In (III-группа)



Основные носители заряда-электроны
 При $T \approx 200-400$ К

Основные носители заряда-дырки
 При $T \approx 200-400$ К

$n \approx N_d \gg p$

$p \approx N_a \gg n$

$$\epsilon_c - \epsilon_d \approx 0.01 \div 0.04 \text{ эВ}$$

Вывод

ы

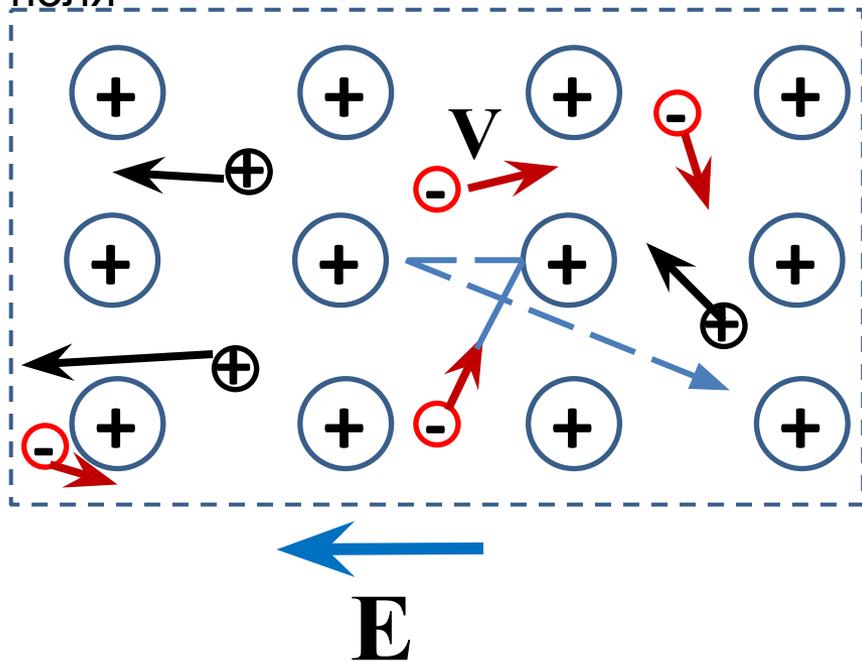
1. Добавление атомов примесей к химически чистому п/п меняет тип проводимости (тип основных носителей заряда). Донорные примеси обеспечивают проводимость n-типа (основные носители электроны), акцепторные проводимость p-типа (основные носители дырки).
2. В рабочей области температур (200-400 К) концентрация носителей заряда в примесных п/п определяется концентрацией атомов примесей.
3. Для п/п с n-типом проводимости уровень Ферми смещается к зоне проводимости, для п/п с p-типом проводимости уровень Ферми смещается к валентной зоне

2. Электрические токи в полупроводниках

2.1 Дрейфовый

ТОК

Ток зарядов под действием приложенного электрического поля



Второй з-н
Ньютона
 $ma = qE$

$q = +e, -e$ (для дырок и электронов)

Средняя скорость $\langle v \rangle = \mu E$

$$v = \frac{q\tau}{m} E,$$

$\mu = \frac{q\tau_0}{m}$ Подвижность носителей зарядов (электронов [$\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$] дырок).

$\mu, [\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})]$	Ge	Si	GaAs
μ_n	0.39	0.13	1
μ_p	0.19	0.05	0.04

Малые поля $\mu = \text{const}$
 E
 Большие поля $\mu = 1/E$
 E

Плотность дрейфового тока (по определению)

$$j_E = qn \langle v \rangle = qn\mu E = \gamma E \quad \begin{array}{l} \text{3-н Ома в дифф.} \\ \text{форме} \end{array}$$

Плотность полного (электронного и дырочного) дрейфового ток в п/п

$$j_E = |q|(n\mu_n + p\mu_p)E$$

Плотность дрейфового тока в п/п i-типа

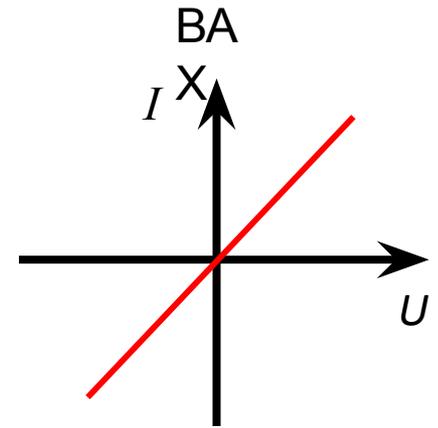
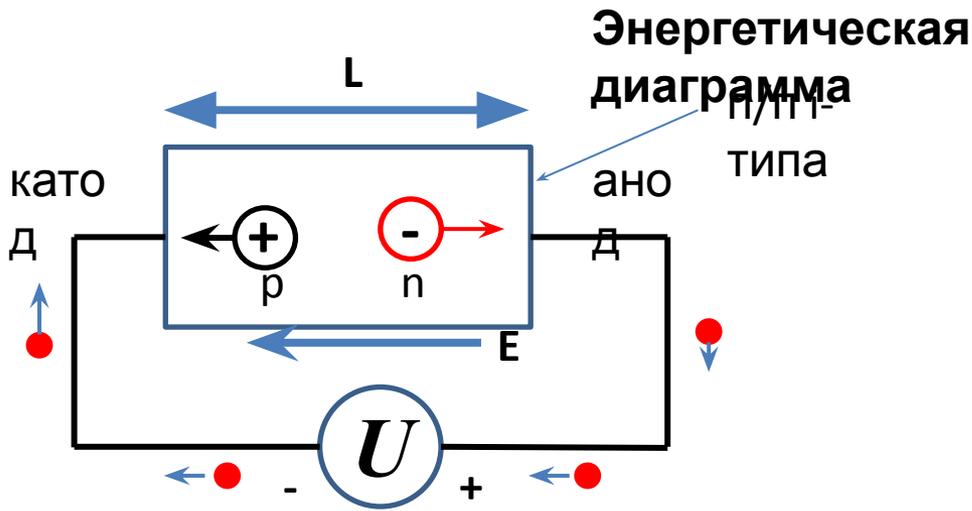
$$j_E = |q|n_i(\mu_n + \mu_p)E \approx e^{-\frac{\Delta\varepsilon}{2kT}} E$$

Плотность дрейфового тока в п/п n-типа

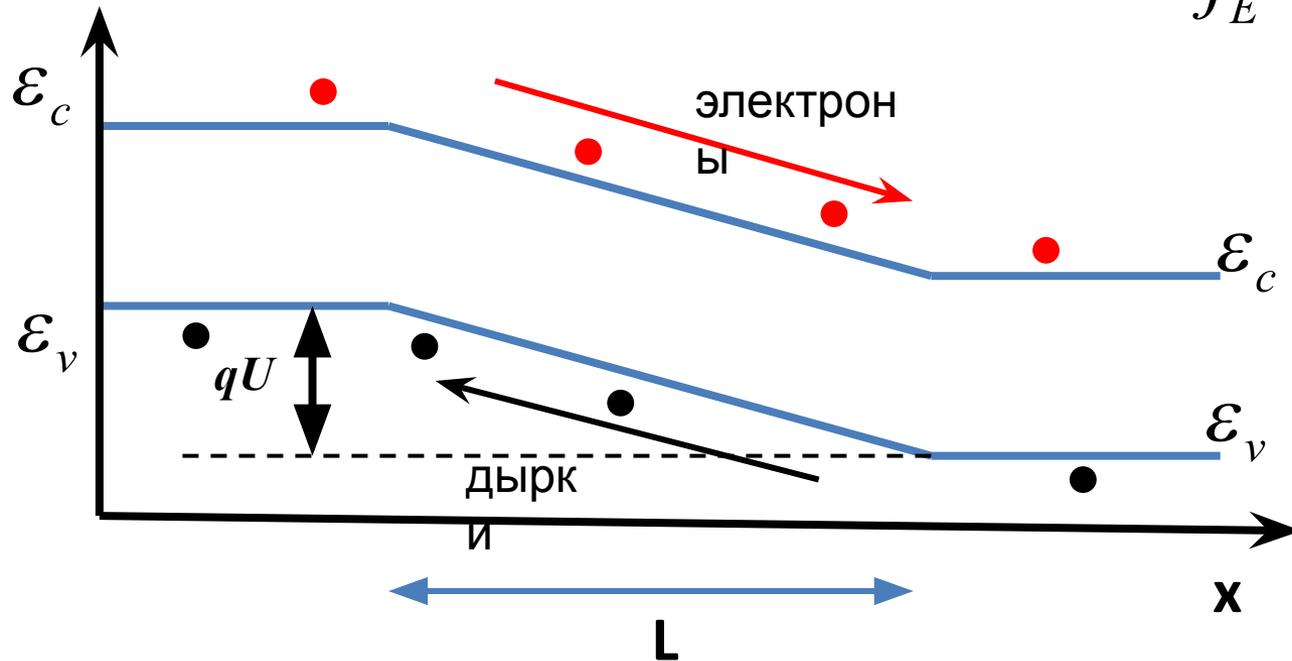
$$j_{En} = |q|n_n\mu_n E \approx N_d E$$

Плотность дрейфового тока в п/п p-типа

$$j_{Ep} = |q|n_p\mu_p E \approx N_a E$$



$$j_E = |q|(n\mu_n + p\mu_p)E$$



Куда исчезают дырки?

Вывод

ы

1. Дрейфовый ток-ток носителей зарядов в п/п под действием приложенного электрического поля.
2. В п/п с собственным типом проводимости (i-типа) полный дрейфовый ток включает в себя электронную и дырочную компоненты. Концентрация носителей зарядов (n и p , следовательно, ток) экспоненциально зависят от температуры.
3. Важной характеристикой п/п является подвижность зарядов определяющая, в частности, быстродействие п/п устройств.
4. В примесных п/п дрейфовый ток содержит только одну компоненту (электронную (n-тип) или дырочную (p-тип)). Концентрация носителей определяется концентрацией атомов примесей.

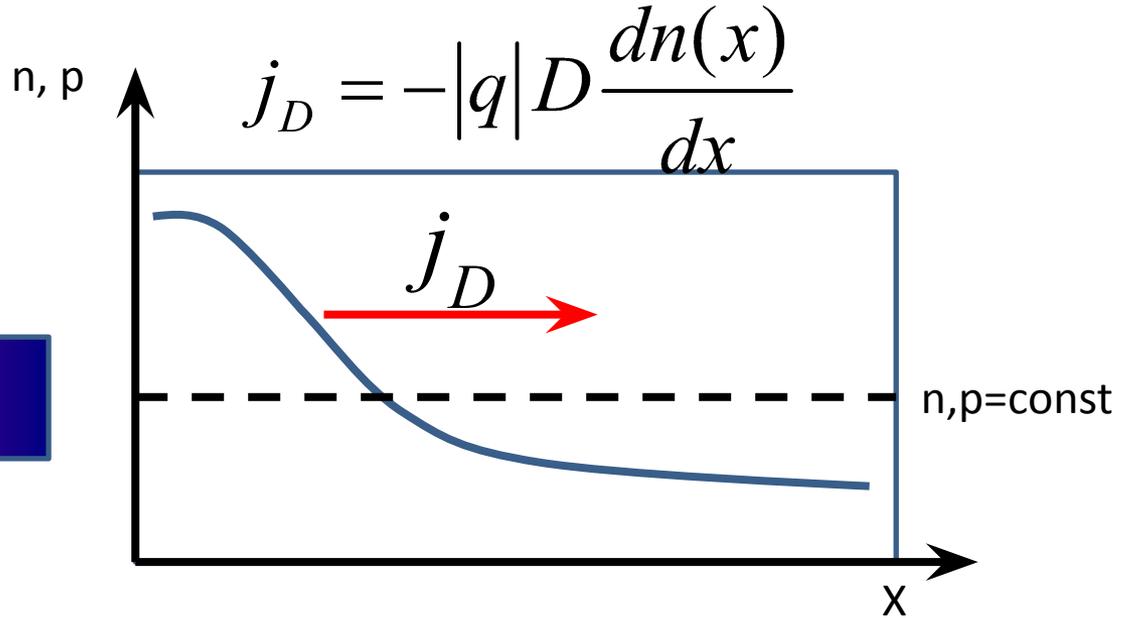
2.2 Диффузионный ток в п/п

Равновесное состояние носителей

$$n, p = \text{const}$$

Неравновесное состояние

$$n(x, y, z), p(x, y, z)$$



$$D = \frac{kT}{|q|} \mu$$

Коэффициент диффузии (ф-ла Эйнштейна)

$$[D] = \text{m}^2/\text{c}$$

Какое расстояние пройдет частица за время t в результате диффузии?

$$L = \sqrt{Dt}$$

За время жизни

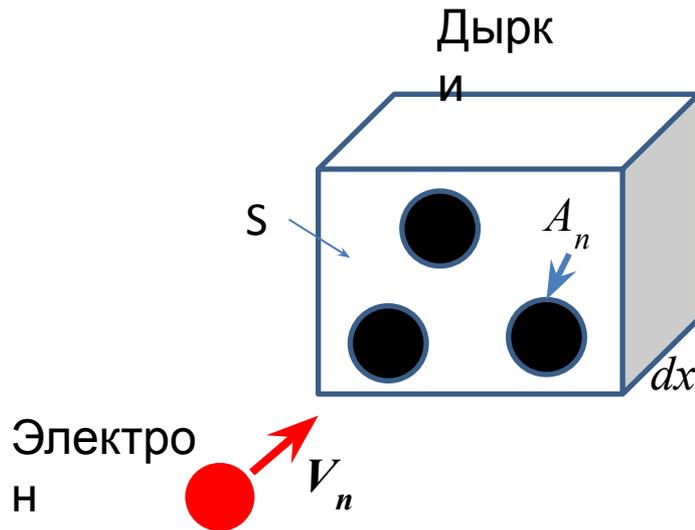
$$L_D = \sqrt{D\tau}$$

Диффузионная длина

$$j_D = -|q| \left(D_n \frac{dn(x)}{dx} + D_p \frac{dp(x)}{dx} \right)$$

Полный диффузионный ток

2.3 Генерация и рекомбинация носителей заряда. Время жизни носителей.



A_n - сечение захвата электрона дыркой

Вероятность захвата при прохождении слоя толщиной

$$dW = \frac{S_{\Sigma} dx}{S} = \frac{A_n p S dx}{S} = A_n p dx$$

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{A_n p V dt}{dt} = A_n p V$$

Вероятность захвата за ед. времени

$$\tau_n = \frac{1}{P_n} = \frac{1}{A_n p V_n}$$

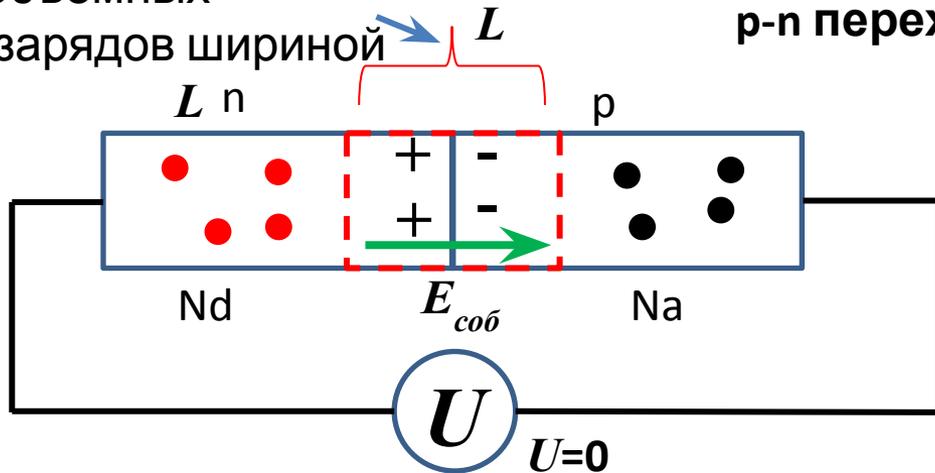
Среднее время жизни электрона

$$\tau_p = \frac{1}{P_p} = \frac{1}{A_p n V_p}$$

Среднее время жизни дырки

3. Полупроводниковый диод. р-n переход

Область объемных зарядов шириной



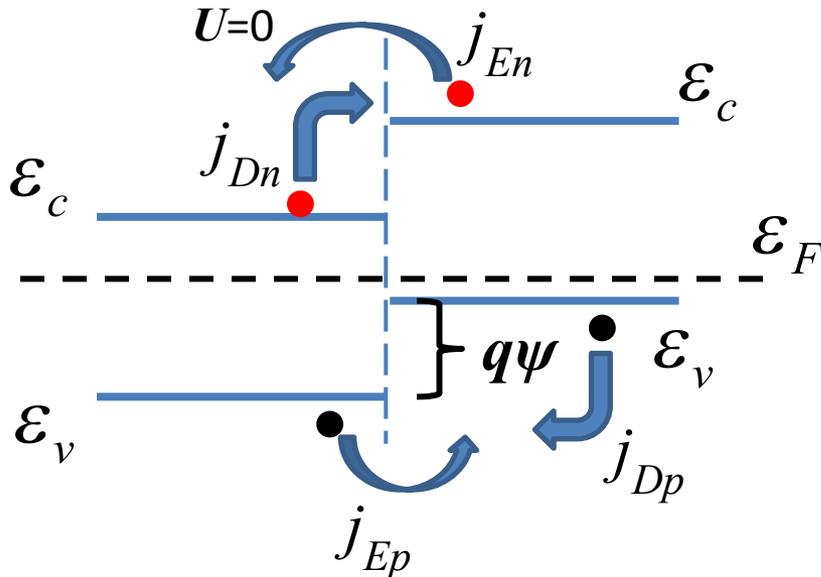
\mathcal{E}_F Уровень Ферми одинаков во всех частях системы !!
Ширина перехода

L

Внутреннее электрическое

$$E_{поле} = E_{cob}$$

Энергетическая диаграмма для $U=0$



$\Psi = \begin{cases} 0.35 \text{ В (Ge)} \\ 0.7 \text{ В (Si)} \end{cases}$ Контактная разность потенциалов

$q\psi$ - Высота потенциального барьера

$$j_{Dn} + j_{En} = 0$$

$$j_{Dp} + j_{Ep} = 0$$

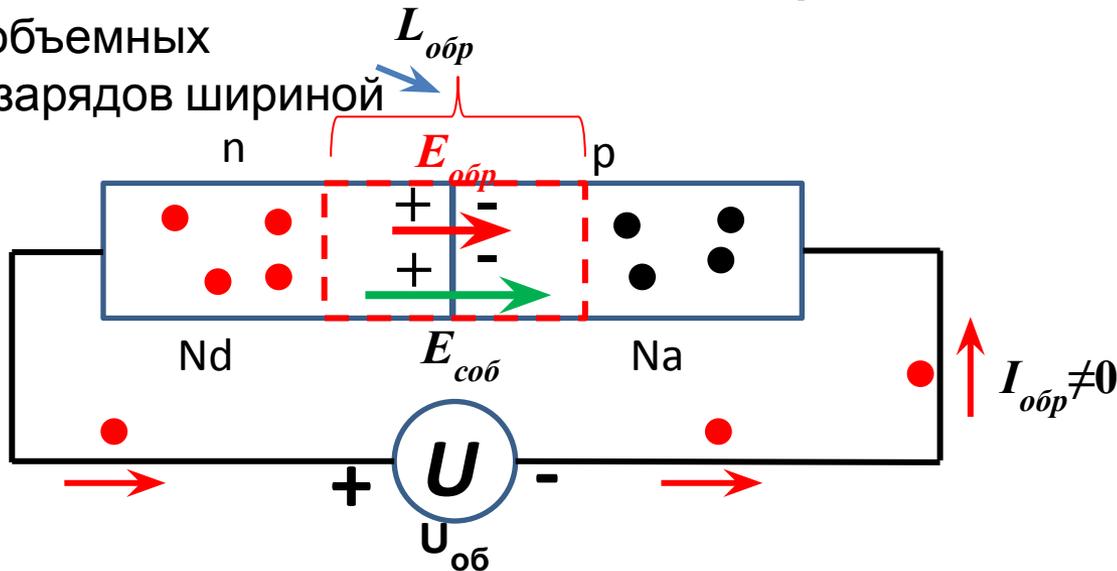
Полный ток равен нулю

Выводы

1. При соединении двух п/п с разным типом проводимости (р- и n-типов) уровень Ферми одинаковый во всех частях структуры
2. Между энергетическими уровнями носителей зарядов в n- и p-полупроводниках возникает потенциальный барьер.
3. Вблизи перехода образуются области объемных зарядов и, следовательно, возникает внутреннее электрическое поле.
4. В отсутствии внешнего источника напряжения полный ток (сумма дрейфового и диффузного тока дырок и электронов) равен нулю.

3.1 Обрато-смещенный рп- переход

Область
объемных
зарядов шириной



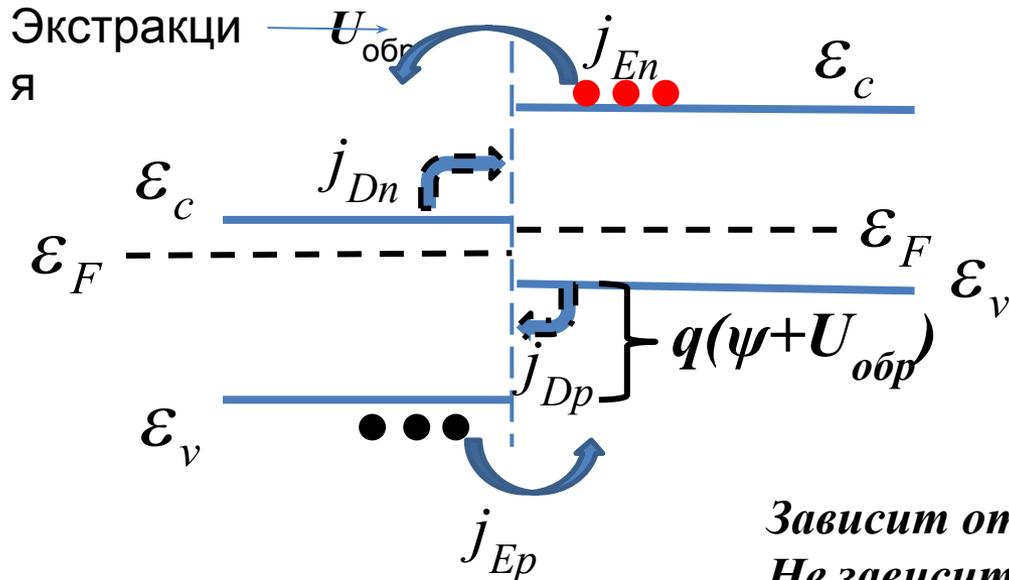
Ширина
перехода
увеличивается

$$L_{обр} > L$$

Внутреннее
электрическое
поле возрастает

$$E = E_{собр} + E_{обр}$$

Энергетическая диаграмма при



Высота
потенциального
барьера увеличилась

$$q(\psi + U_{обр})$$

$$j_{En} \gg j_{Dn} \quad j_{Ep} \gg j_{Dp}$$

$$I_{обр} = I_{En} + I_{Ep}$$

Дрейфовый ток
неосновных носителей (ток
насыщения)

Зависит от T , концентрации N_d и N_a , ширины $\Delta\varepsilon$
Не зависит от U
Имеет малую величину.

Вывод

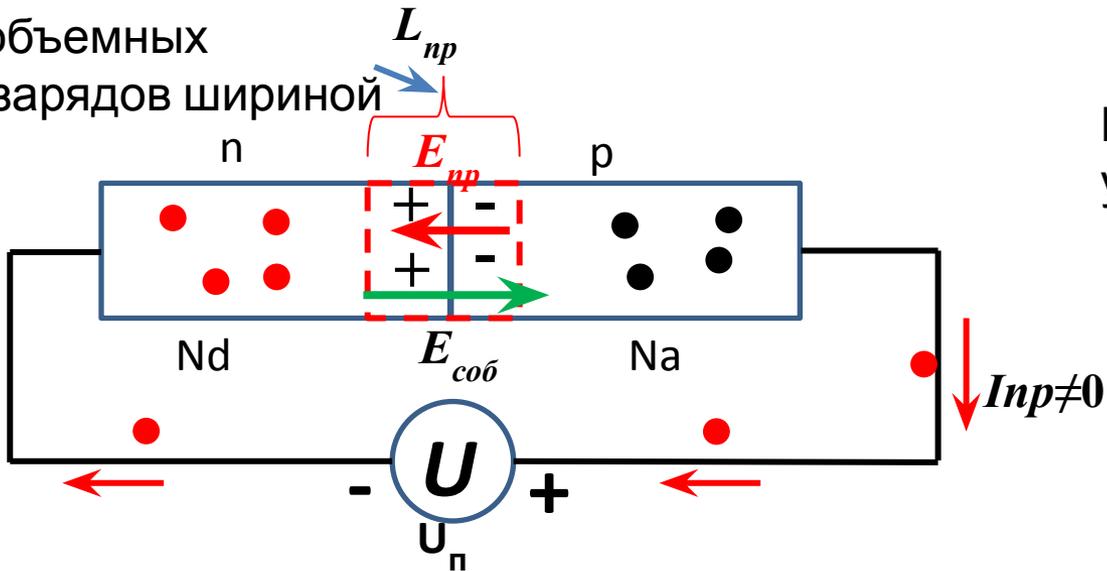
ы

1. Обратное смещение от источника напряжения увеличивает высоту потенциального барьера, увеличивает ширину области объемных зарядов, внутреннее электрическое поле в области перехода увеличивается.
2. При обратном смещении происходит экстракция носителей зарядов (из области p – *экстракция* электронов, из области n- *экстракция* дырок)
3. Ток обратно-смещенного перехода в основном определяется величинами дрейфовых токов электронов и дырок. Величина тока практически не зависит от величины приложенного напряжения.

Процесс удаления носителей заряда из область полупроводника, для которой они являются неосновными, называется *экстракцией*.

3.2 Прямо-смещенный pn-переход

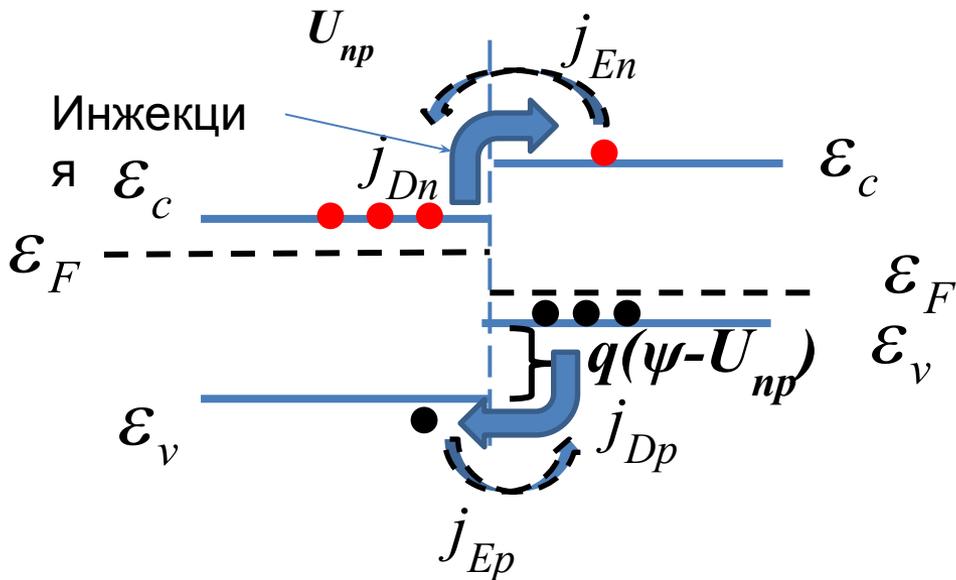
Область
объемных
зарядов шириной



Ширина перехода
уменьшается
 $L_{np} < L$

Внутреннее
электрическое
поле уменьшается
 $E = E_{cob} - E_{np}$

Энергетическая диаграмма при



$q(\psi - U_{np})$ Высота
потенциального
барьера
 $j_{Dn} \gg j_{En}$ уменьшилась
 $j_{Dp} \gg j_{Ep}$

$$I_{np} = I_{Dn} + I_{Dp} - (I_{En} + I_{Ep})$$

Полный ток носителей (ток
прямо-смещенного pn-
перехода)

Экспоненциально зависит от U_{np}
и T

Вывод

1. Прямое смещение от источника напряжения уменьшает высоту потенциального барьера, уменьшает ширину области объемных зарядов, внутреннее электрическое поле в области перехода уменьшается.
2. При прямом смещении происходит инжекция носителей зарядов (в область p – инжекция электронов, в область n- инжекция дырок)
3. Ток прямо-смещенного перехода в основном определяется величинами диффузионных токов электронов и дырок. Величина тока

процесс внедрения носителей заряда в какую-либо область полупроводника, для которой они являются неосновными, называется *инжекцией*.

Коэффициент инжекции:
$$\gamma = I_p / (I_p + I_n)$$

где I_p и I_n – токи инжекции дырок и электронов соответственно.

В большинстве случаев $I_p \gg I_n$ и $\gamma = 1$.

3.3 Формула Шокли для тока через идеальный pn-переход .

Зависимость тока через pn-переход от приложенного к нему напряжения

U

$$I = I_0 \cdot \left(e^{\frac{U}{\phi_T}} - 1 \right)$$

$\phi_T = \frac{kT}{q}$ - тепловой потенциал.

k – постоянная

Больцмана,

q – заряд электрона,

T – температура,

$I_0 = I_{обр}$ – обратный ток.

Прямое

включение

и $U_{пр} > 0,1\text{В}$

Обратное включение

и $U_{обр} > (0,1-0,2)\text{В}$

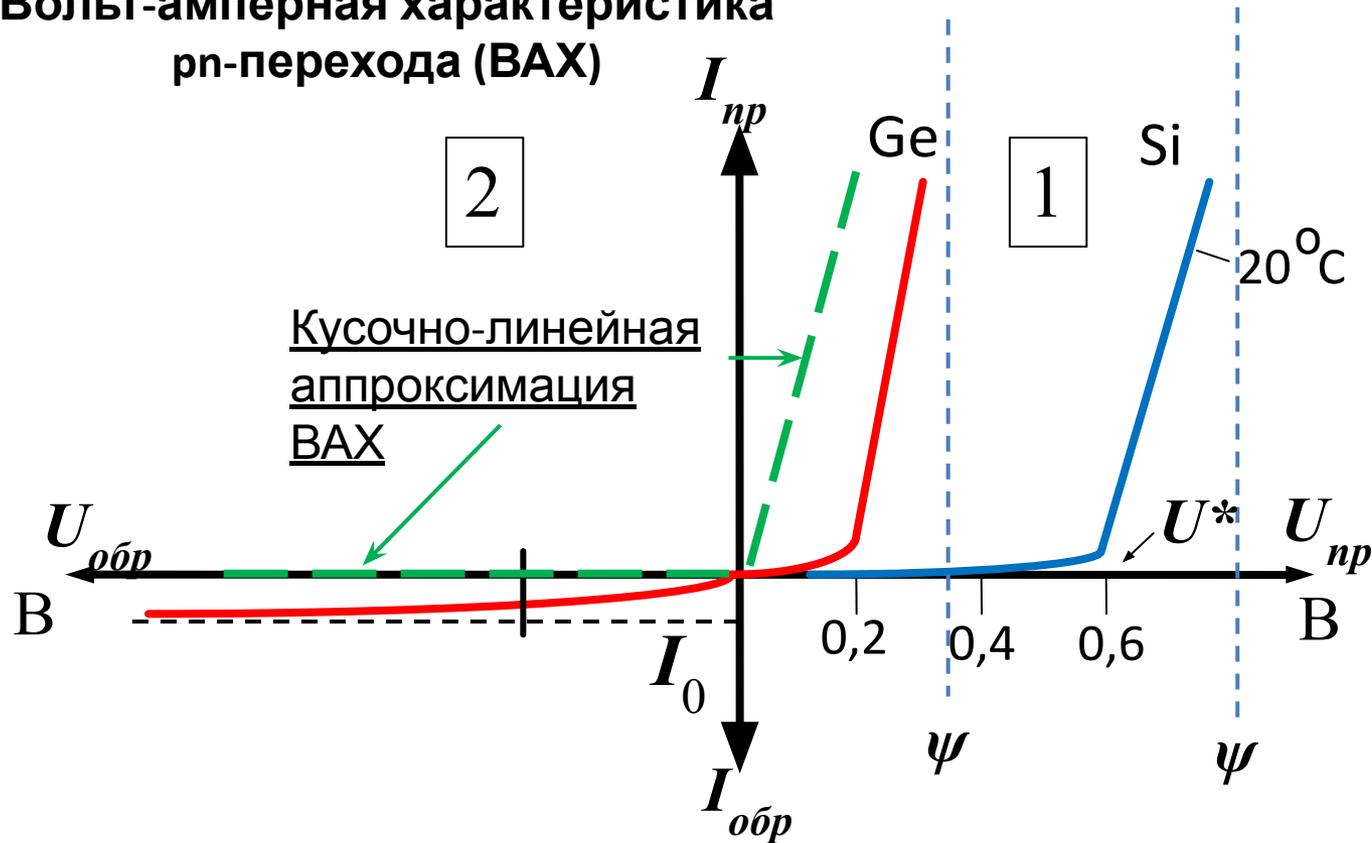
При $T = 293^\circ\text{К} = 20^\circ\text{С}$

$$\phi_T = 0.025\text{В} = 25\text{мВ}$$

$$e^{\frac{U}{\phi_T}} \gg 1 \rightarrow I_{пр} \approx I_0 \cdot e^{\frac{U}{\phi_T}}$$

$$e^{\frac{-U}{\phi_T}} \ll 1 \rightarrow I_{обр} \approx -I_0$$

Вольт-амперная характеристика рп-перехода (ВАХ)



U^* - режим отпираания рп-перехода

Кусочно-линейная аппроксимация ВАХ

- 1 Область (прямое смещение), где сопротивление перехода мало R_{pn} - единицы Ом
- 2 Область (обратное смещение), где сопротивление перехода велико R_{pn} - десятки кОм и более

Возможно ли достигнуть контактную разность потенциалов ψ ? (т.е.

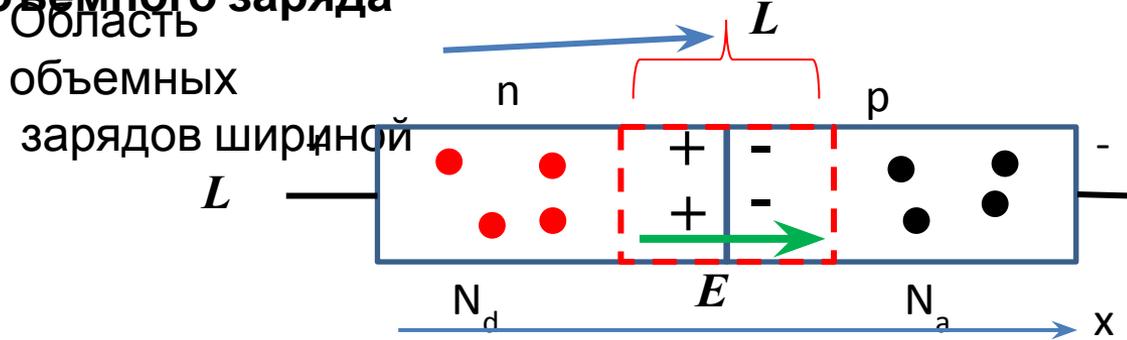
$U_{np} = \psi$) Ответ: эН

Т:

Вывод ы

1. Идеализированный pn-переход обладает свойством изменять сопротивление при подключении внешнего напряжения разной полярности.
2. При $U > 0$ переход включен в прямом направлении и ток возрастает. Прямое падение напряжения составляет доли вольта,
(для $S_i \approx 0.64-0.69$ В), прямой ток – десятки-сотни миллиампер.
3. При $U < 0$ переход включен в обратном направлении и течёт незначительный ток, слабо зависящий от U , но сильно зависящий от температуры. Обратное напряжение – сотни вольт,
обратный ток – единицы-десятки микроампер.

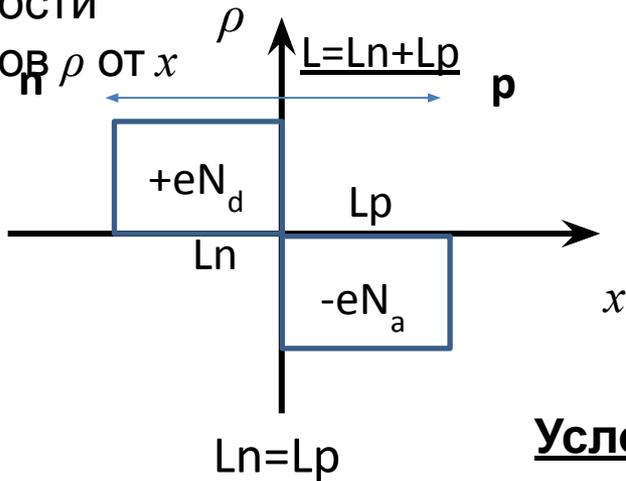
3.4 Объемный заряд, барьерная емкость и ширина области объемного заряда



Симметричный pn-переход

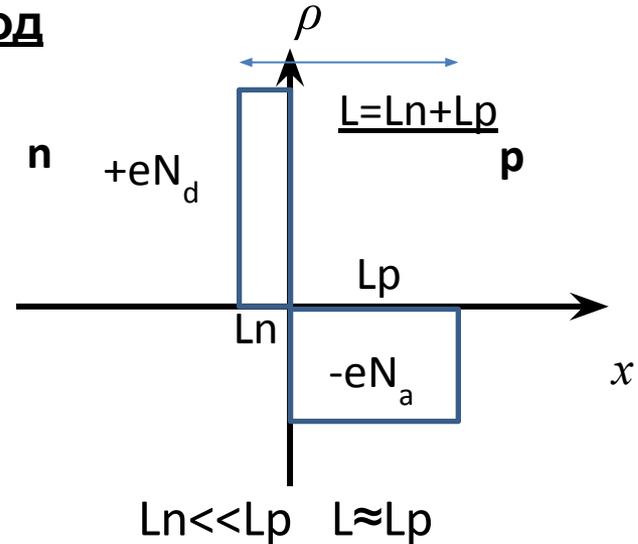
$N_d = N_a$

Зависимость объемной плотности зарядов ρ от x



Несимметричный pn-переход

$N_d \gg N_a$

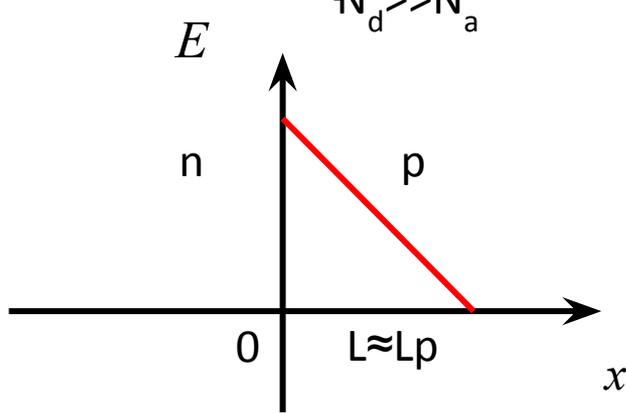


Условие электрической нейтральности перехода

$$+eN_d \cdot L_n - eN_a \cdot L_p = 0$$

$$Q_d + Q_a = 0$$

Электрическое поле в несимметричном pn-переходе



Ширина области pn-перехода L – функция

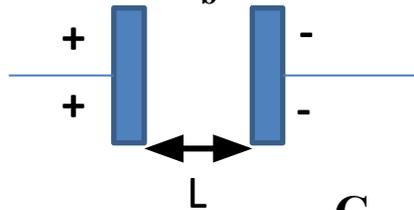
приложенного напряжения

$$L(U) = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(\Psi \pm U)}{|e|N_a}}$$

+ - обратное смещение, увеличение L

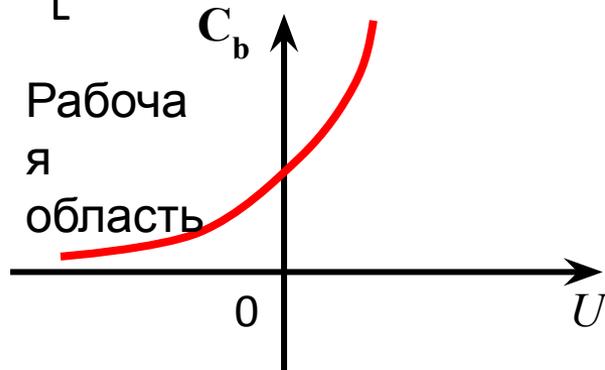
- - прямое смещение, уменьшение L

Барьерная емкость pn-перехода



$$C_b = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{L} = \sqrt{\frac{|e|N_a\epsilon\epsilon_0}{2(\Psi \pm U)}} S$$

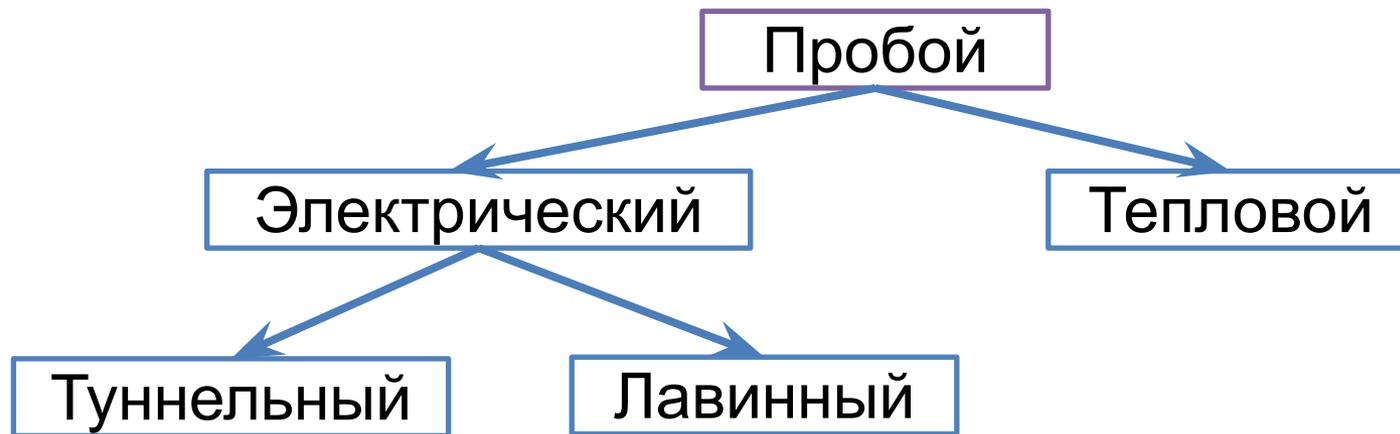
+ обратное смещение, уменьшение C_b
 - прямое смещение, увеличение C_b



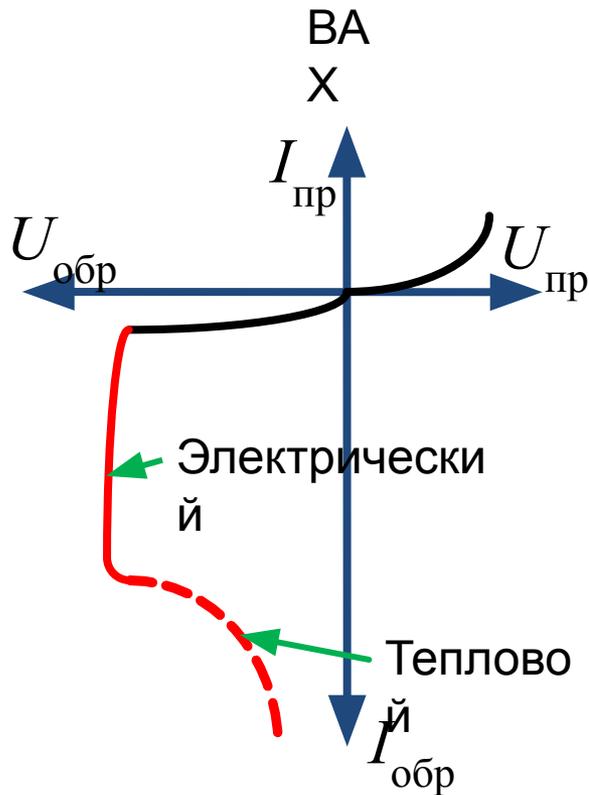
Емкость перехода зависит от приложенного напряжения

3.5 Явление пробоя рп-перехода

Пробой р-п-перехода – это явление резкого увеличения обратного тока $I_{обр}$ при увеличении обратного напряжения $U_{обр}$

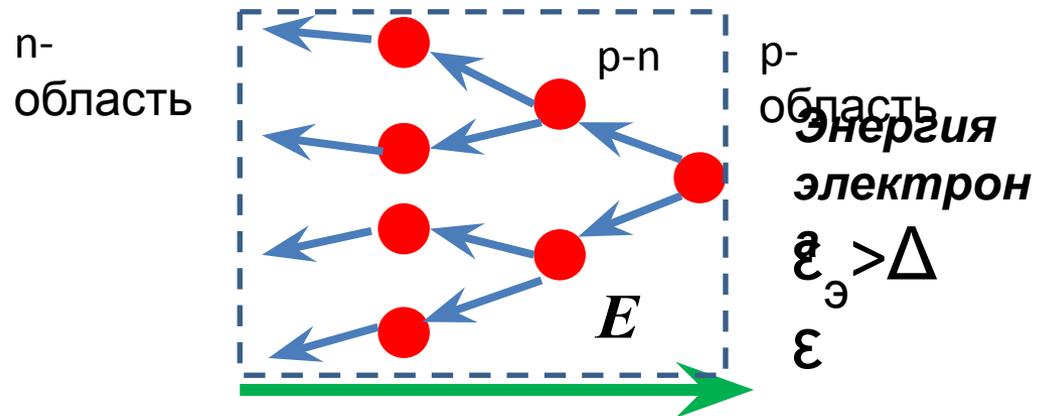


Электрические пробойи связаны с увеличением напряжённости электрического поля в запирающем слое, а тепловые – с увеличением рассеиваемой мощности и соответственно температуры.



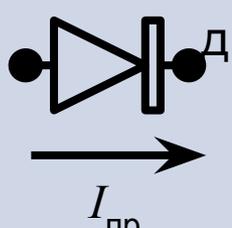
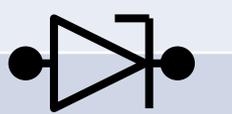
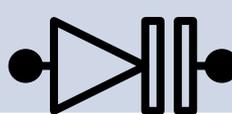
В узких p-n-переходах при относительно небольших обратных напряжениях обычно возникает полевой пробой на основе **туннельного эффекта**.

В относительно широких pn-переходах при $U_{обр}$ более 15 В возникает лавинный пробой. Механизм **лавинного пробоя** заключается в лавинном размножении носителей заряда в сильном электрическом поле под действием ударной ионизации.



При **лавинном пробое** сопротивление R pn-перехода уменьшается, а ток резко возрастает.

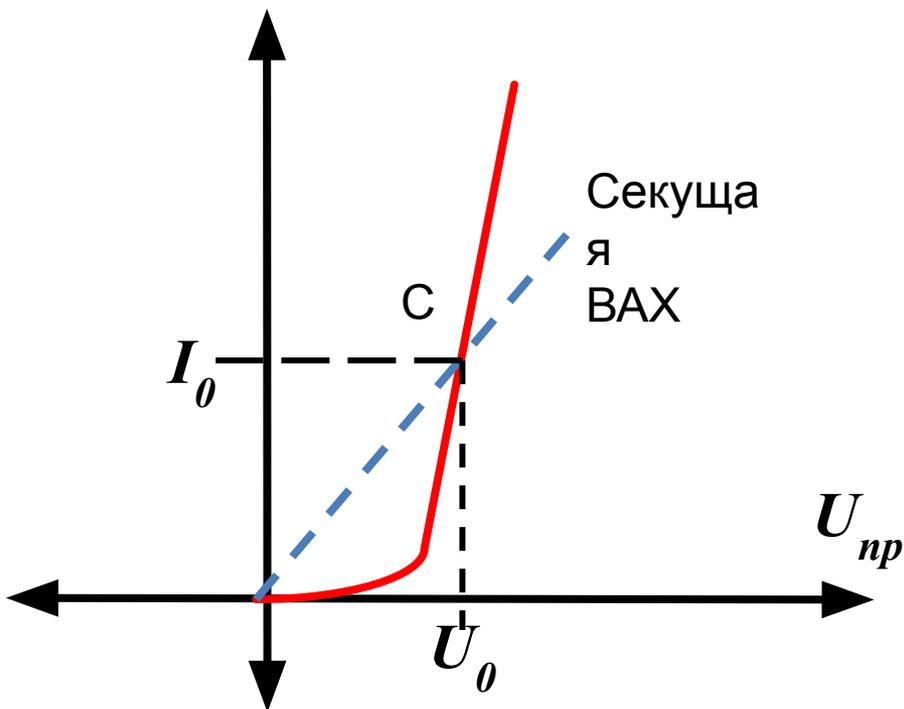
4. Классификация и применение полупроводниковых диодов

Класс диодов	Назначение	Обозначение	Примечание
Выпрямительные	Преобразование переменного напряжения в постоянное	<p>Анод Като</p> 	Слабо и сильноточные
Детектирующие	Детектирование сигналов		Квадратичная нелинейность ВАХ
Стабилитроны	Стабилизация параметров эл. схем	 	
Варикапы	Управляемые напряжением генераторы сигналов		
Генераторные	Генерация сигналов в различных диапазонах		

4.1 Сопротивление перехода. Рабочий режим работы диода на постоянном токе

Сопротивление на постоянном токе

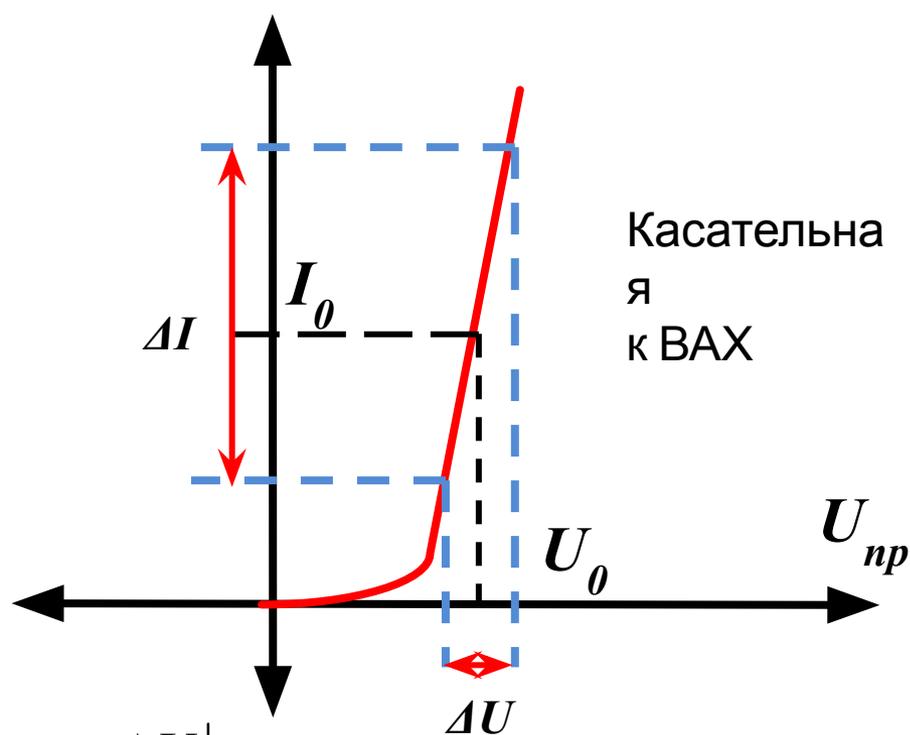
(статическое сопротивление)



$$R = \frac{U_0}{I_0}$$

Дифференциальное сопротивление

(динамическое сопротивление)

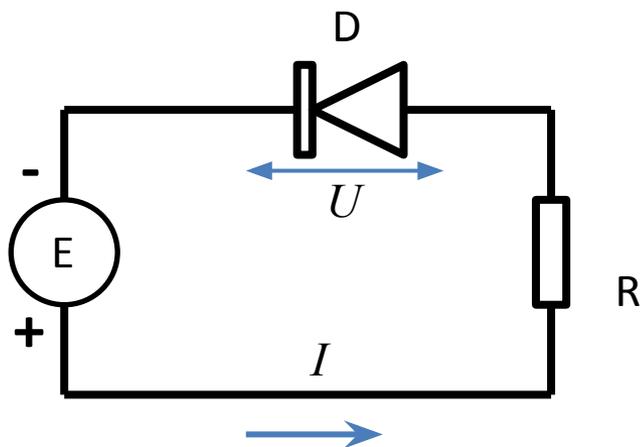


$$r = \left. \frac{\Delta U}{\Delta I} \right|_{U_0}$$

$$g = \frac{1}{r}$$

$$S = g$$

Дифф. проводимость
Крутизна ВАХ



ВАХ диода нелинейна.

Как найти ток в цепи и падение напряжения на диоде?

$$E = U + IR \quad (1)$$

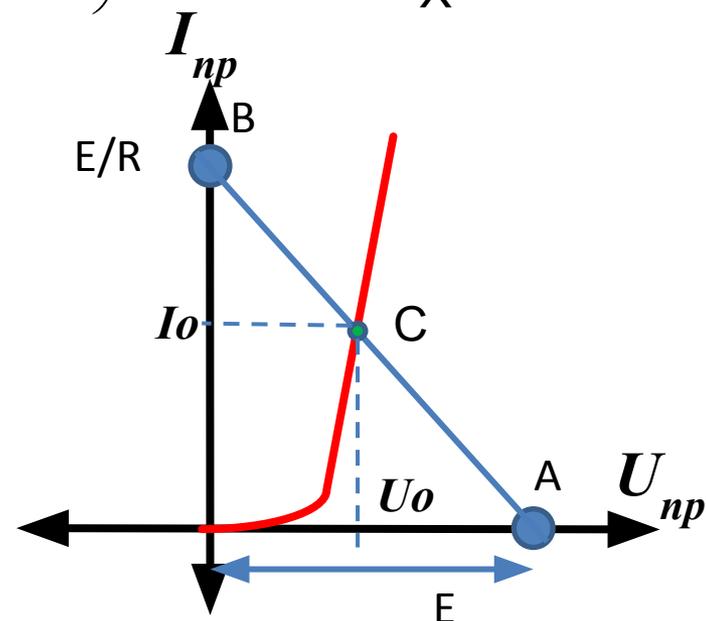
$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right) \quad (2)$$

2 з-н
Кирхгофа
ВА
Х

Из ур.
(1,2)

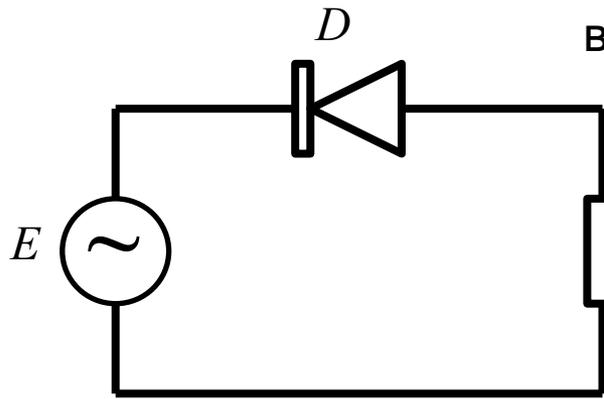
Точка А (I=0) U=E

Точка В (U=0) I=E/R

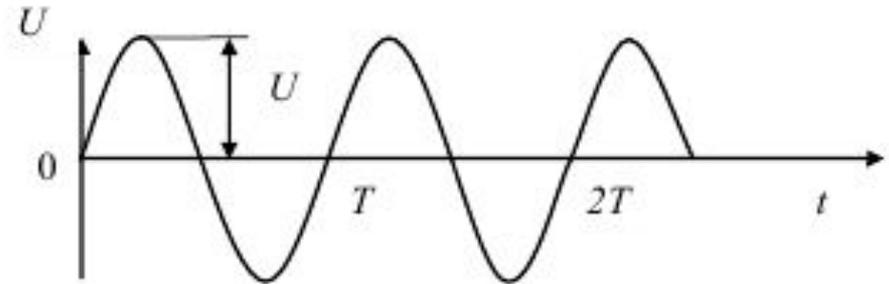


Точка С (рабочая точка) определяет режим работы диода по постоянному току

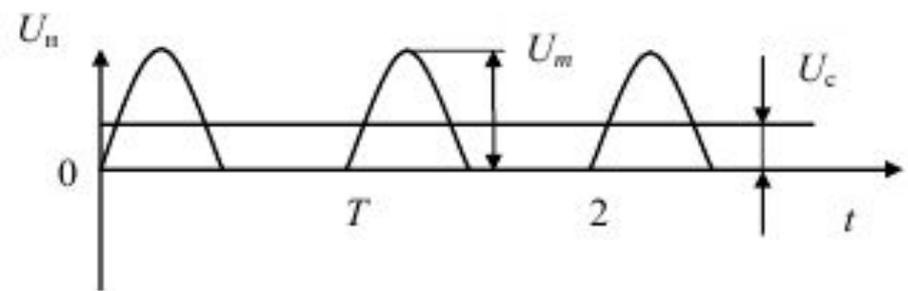
4.2 Однополупериодный выпрямитель



Напряжение
источника
 $E(t)$



Напряжени
е
на R_n ,
 $U_n(t) = R_n I(t)$



$$E(t) = U \sin(\omega t)$$

Среднее значение
периодической
функции

$$\langle s(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt$$

Э.Д.С. источника
переменного
напряжения

$$\langle E(t) \rangle = 0$$

Среднее значение
напряжения на
нагрузке

$$U_c = \langle U(t) \rangle = \frac{U_{m1}}{\pi} \approx 0.318 U_{m1}$$

Коэффициент
г
пульсации

$$k_n = \frac{U_{m1}}{U_c} = \frac{0.5 U_{m1}}{0.318 U_{m1}} = 1.57$$

Слишком большой коэфф. k_n
для
практического применения!

U_{m1} Амплитуда 1 гармоника напряжения, т.е на

Однополупериодный выпрямитель с сглаживающим фильтром

Выпрямитель

ФНЧ

Задача ФНЧ- сгладить пульсации, удалив гармоники тока с частотами $\geq \omega$

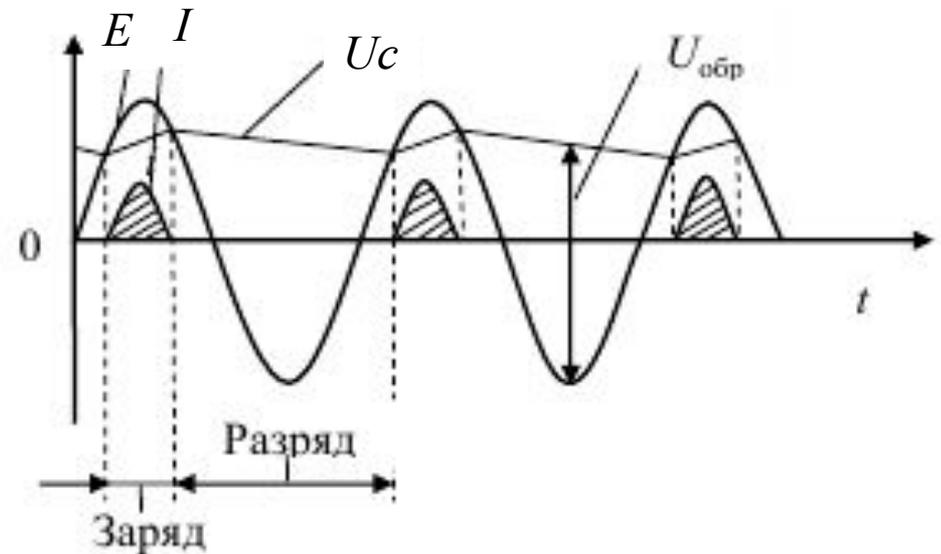
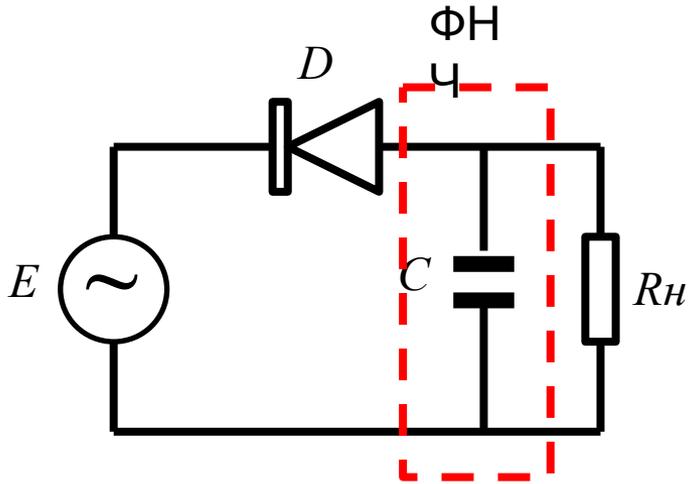
и выделить постоянную составляющую тока.

Условие для эффективного сглаживания

$$\frac{1}{\omega C} \ll R$$

Коэфф. пульсации

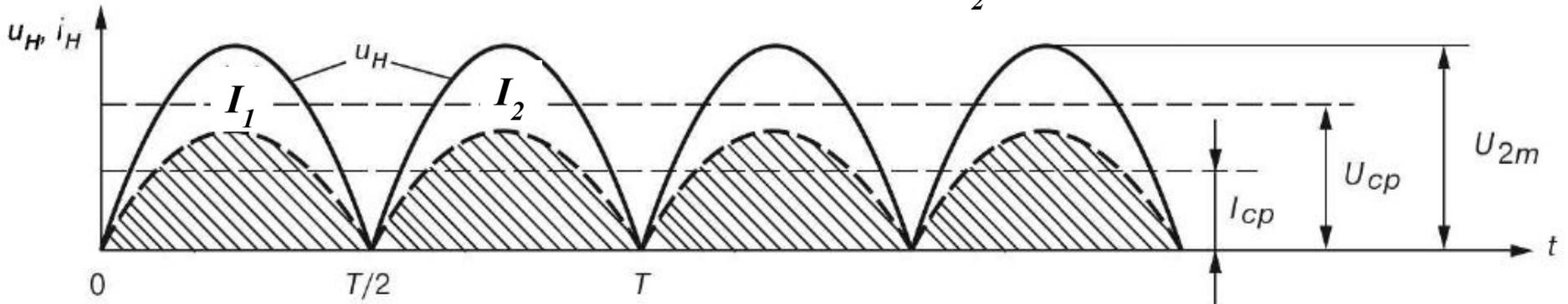
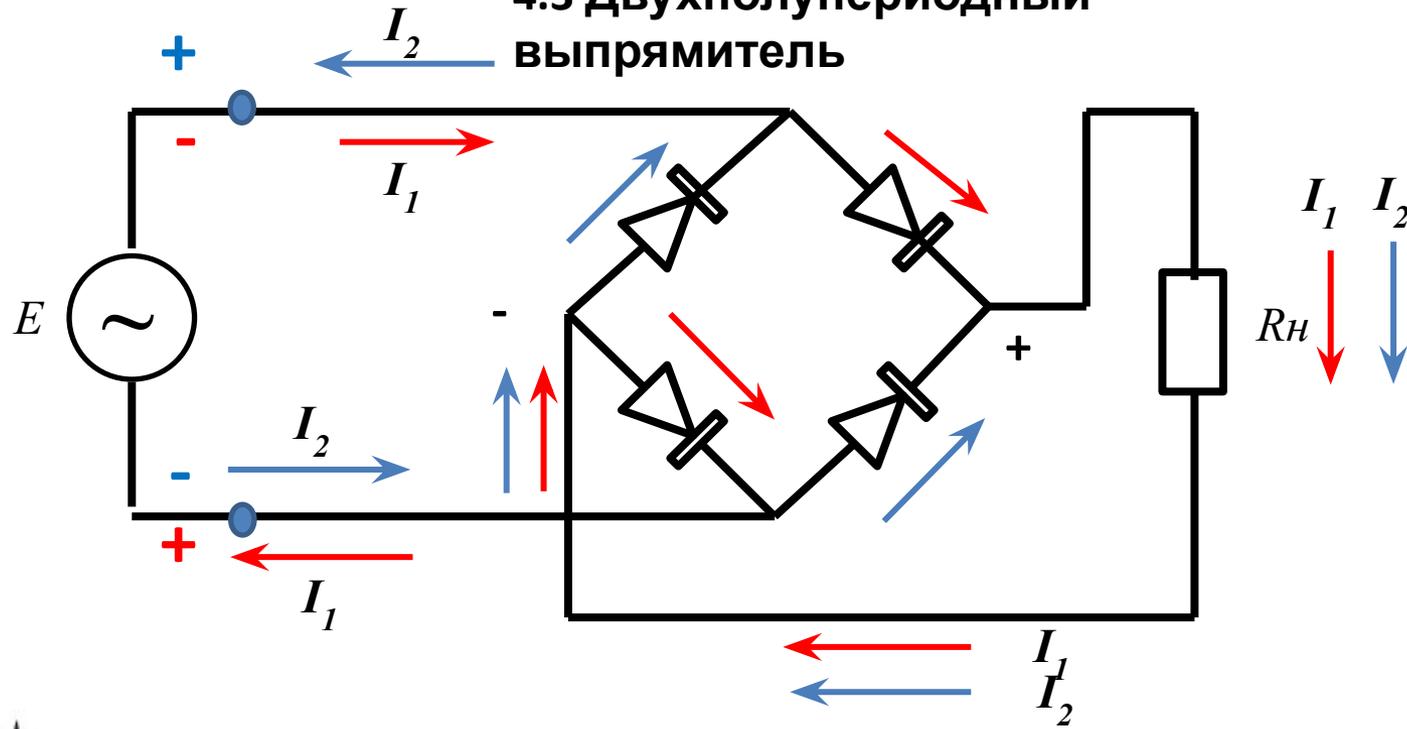
$$k_n \approx 1$$



Область применения: устройства с малыми токами и высокими напряжениями.

недостатки: низкий к.п.д. и высокий уровень пульсаций

4.3 Двухполупериодный выпрямитель



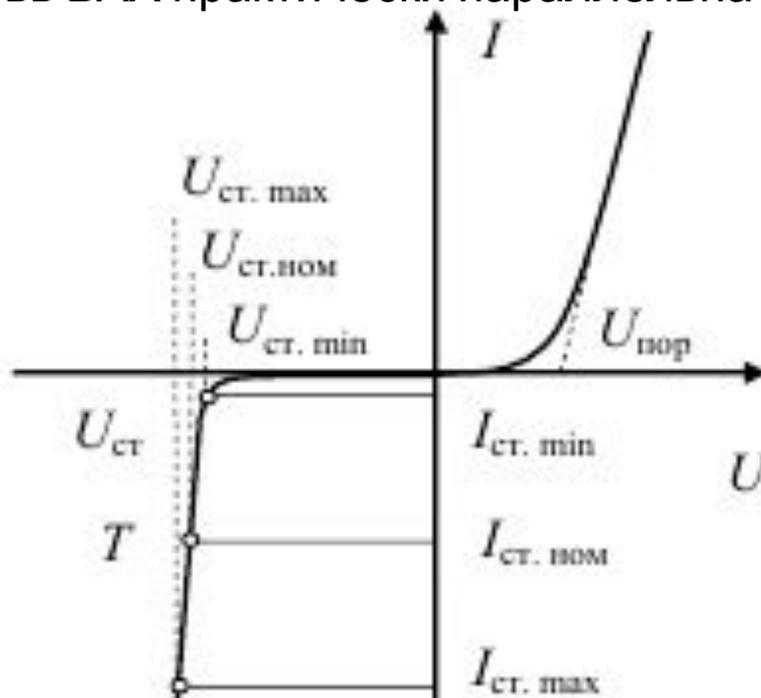
$$U_c = 0.636U_{2m}$$

$$k_n = \frac{0.424U_{2m}}{U_c} = 0.667$$

4.4

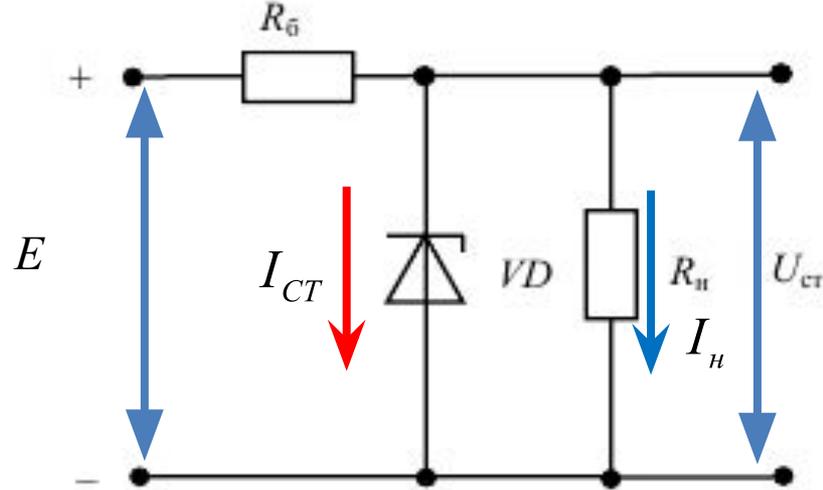
Стабилитроны

Стабилитрон предназначен для уменьшения изменения напряжения на нагрузке, вызванные изменениями напряжения сети и изменениями тока, потребляемого нагрузкой. Стабилитроны используются также в качестве фиксаторов и ограничителей напряжения. В стабилитроне используются свойства *электрического пробоя* рп-перехода. В режиме электрического пробоя обратная ветвь ВАХ практически параллельна оси тока.



При достижении на стабилитроне напряжения, называемого напряжением стабилизации $U_{ст}$, ток, проходящий через стабилитрон, резко возрастает и изменяется в широких пределах, а напряжение на стабилитроне остается почти постоянным. Эта особенность полупроводниковых стабилитронов широко используется для стабилизации напряжения.

Схема включения стабилитрона



Источник
напряжени
я

Напряжение
на
нагрузке

$$E \pm \Delta E = \pm U_{\delta} + U_{CT}$$

$$\pm U_{\delta} = R_{\delta} (I_{н} + I_{CT})$$

Основные параметры стабилитрона

Напряжение
стабилизации
минимальные

и максимальные токи
стабилизации
номинальный ток
стабилизации

Динамическое
сопротивление

U_{CT} (3-180
В)

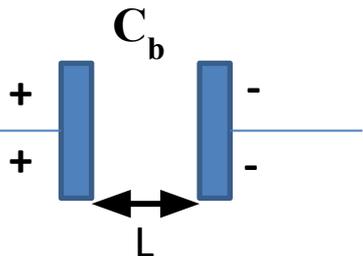
$I_{CT\min}$, $I_{CT\max}$

$$(I_{CT\min} + I_{CT\max}) / 2 \quad (5 \text{ mA}-5\text{A})$$

$$R_d = \frac{\Delta U_{CT}}{\Delta I_{CT}}$$

4.5 Варикапы

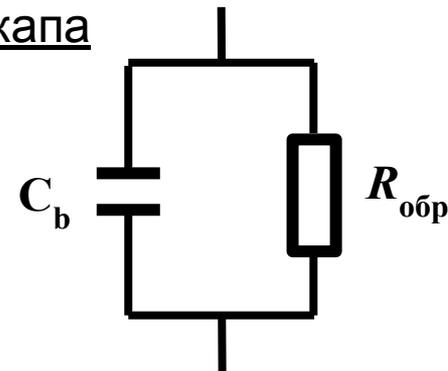
Барьерная емкость рn- перехода зависит от приложенного напряжения



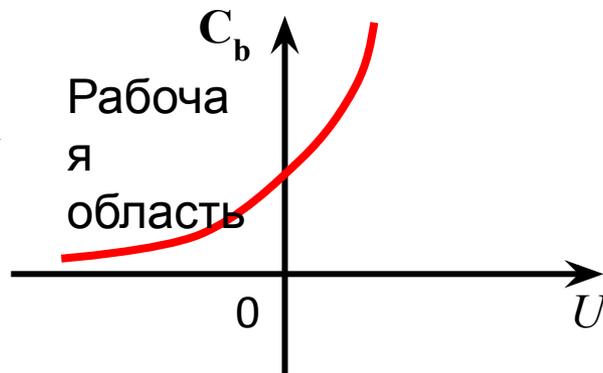
$$C_b = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{L} = \sqrt{\frac{|e| N_a \varepsilon\varepsilon_0}{2(\Psi \pm U)}} S$$

- + обратное смещение, уменьшение C_b
- прямое смещение, увеличение C_b

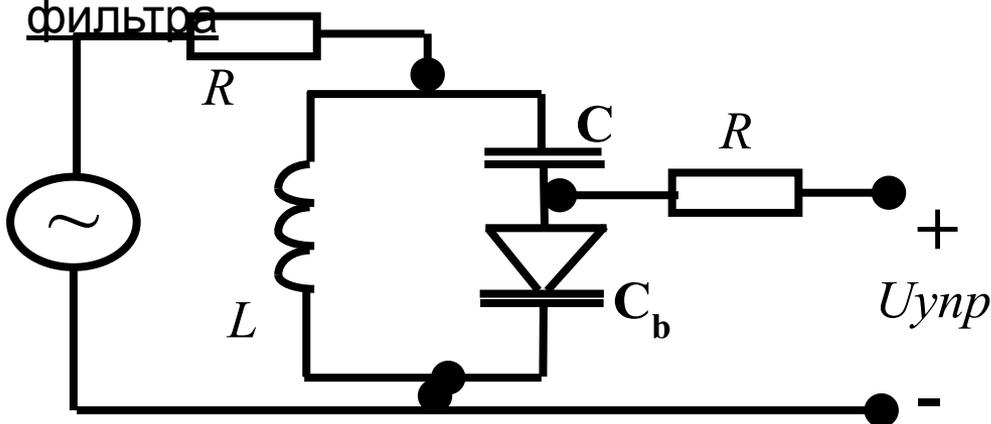
Эквивалентная схема
варикапа



Вольт-фарадная характеристика



а
Пример управляемого
фильтра



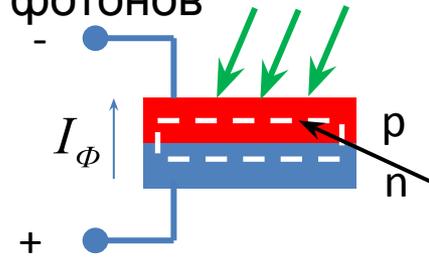
Для эффективного
управления
необходимо условие:
 $C \gg C_b$

Резонансная частота

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_\Sigma(U)}}$$

Фотодиод

Свет с энергией фотонов



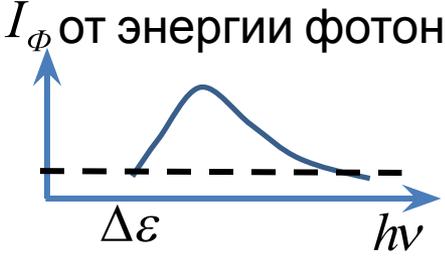
Область генерации носителей заряда

4.6 Фото - и светодиоды

$$E_{\phi} = h\nu \geq \Delta\varepsilon$$

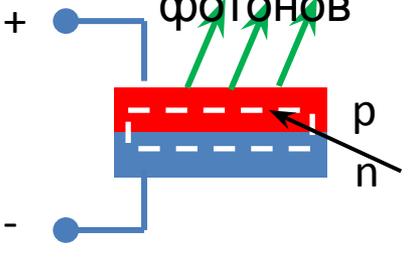


Фототок в зависимости от энергии фотонов



Светодиод

Свет с энергией фотонов

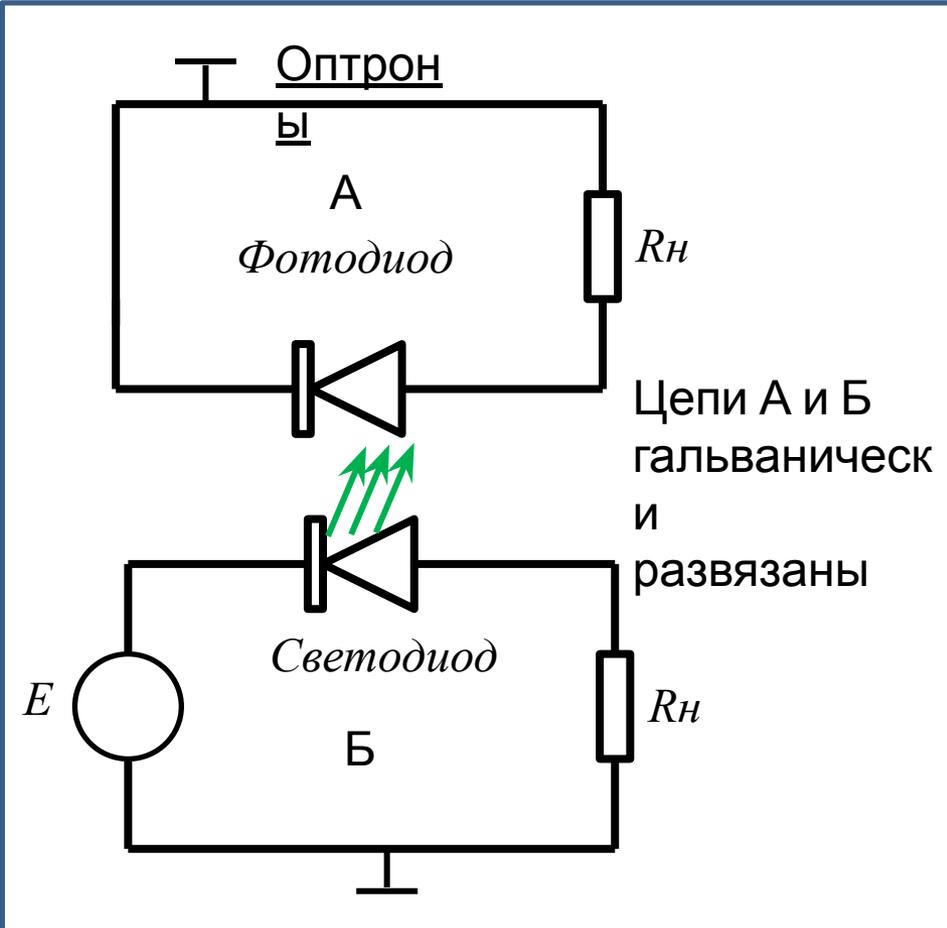


Область рекомбинации носителей заряда

$$E_{\phi} = h\nu \approx \Delta\varepsilon$$

Прямо смещенный переход GaAs

$$\Delta\varepsilon \approx 1.41 \text{ эВ}, \lambda = 0.89 \text{ мкм}$$



5.

Транзисторы

Транзистор - трех электродный полупроводниковый прибор, позволяющий усиливать мощность электрических сигналов.

Классификац

Транзисторы

```
graph TD; A[Транзисторы] --> B[Биполярные]; A --> C[Полевые]; B --> D[n-p-n]; B --> E[p-n-p];
```

Биполярные

Полевые

n-p-n

p-n-p

Биполярные транзисторы были разработаны в 1947 г. (Д. Бардин, У. Браттейн).
Полевые разработаны – в 1952 г. (У. Шокли и др.).

Основными материалами для изготовления транзисторов служат Si, Ge и GaAs.
По технологии изготовления они делятся на сплавные, диффузионные и эпитаксиальные.

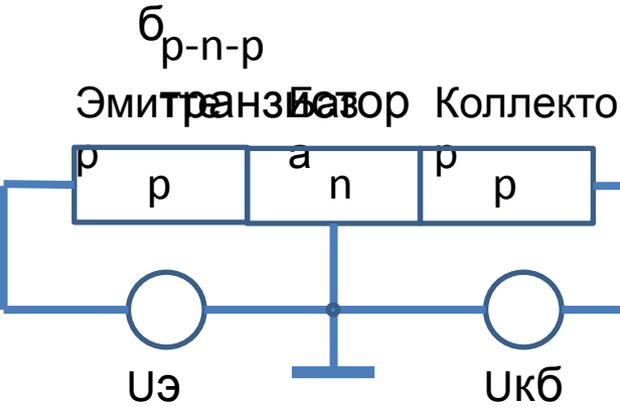
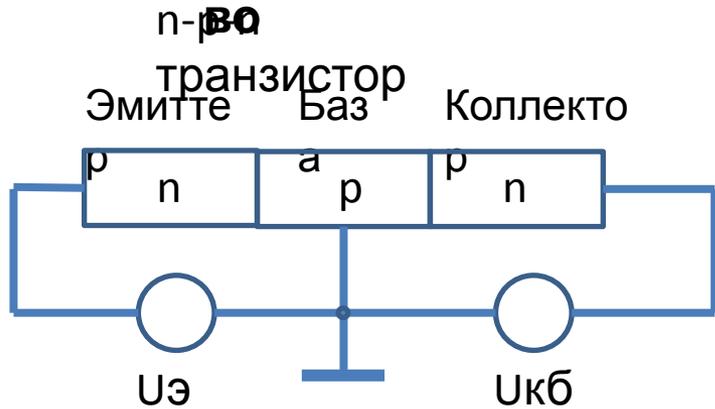
По области применения делятся на низкочастотные (до 3 МГц), среднечастотные (3–30 МГц), высокочастотные (30–300 МГц), сверхвысокочастотные (более 300 МГц).

По мощности делятся на маломощные (не более 0,3 Вт), средней мощности (0,3–1,5 Вт) и большой мощности (более 1,5 Вт).

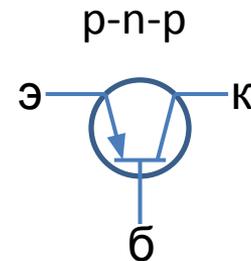
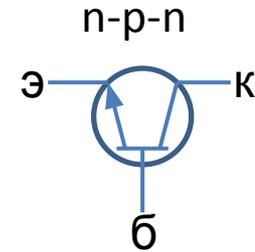
5.1 Биполярные транзисторы

В биполярном транзисторе используются носители заряда двух видов: электроны и дырки.

Устройство



Обозначения на схемах



Ширина базы \ll Диффузионной длины носителей зарядов

Транзистор содержит два pn-перехода. Смещение переходов (прямое или обратное) задается источниками $U_{эб}$ и $U_{кб}$. Физические процессы в транзисторах различных типов одинаковы, различаются по преобладающим компонентам (электронная или дырочная) в протекающих токах.

Режимы работы

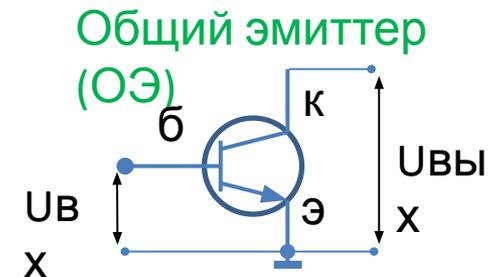
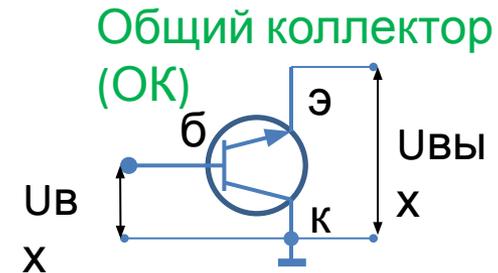
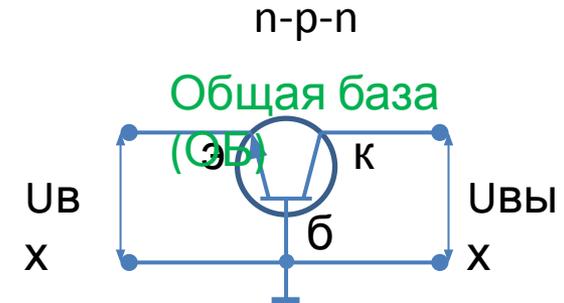
Определяются полярностью подключенных источников $U_{эб}$ и $U_{кб}$, т.е. смещением рп-переходов

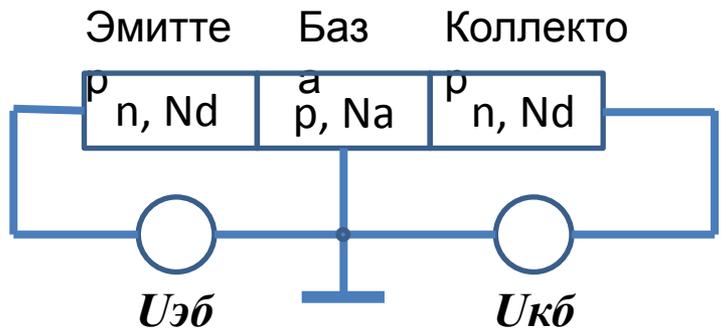
Режим	$U_{эб}$, смещение	$U_{кб}$, смещение
Нормальный линейный (активный)	Прямое	Обратное
Инверсный линейный (активный)	Обратное	Прямое
Насыщения	Прямое	Прямое
Отсечки	Обратное	Обратное

Активные режимы – режимы усиления транзистора

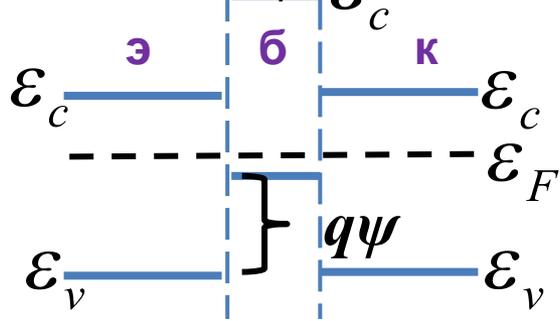
Схемы

включения
Определяются общим электродом транзистора для входных и выходных сигналов



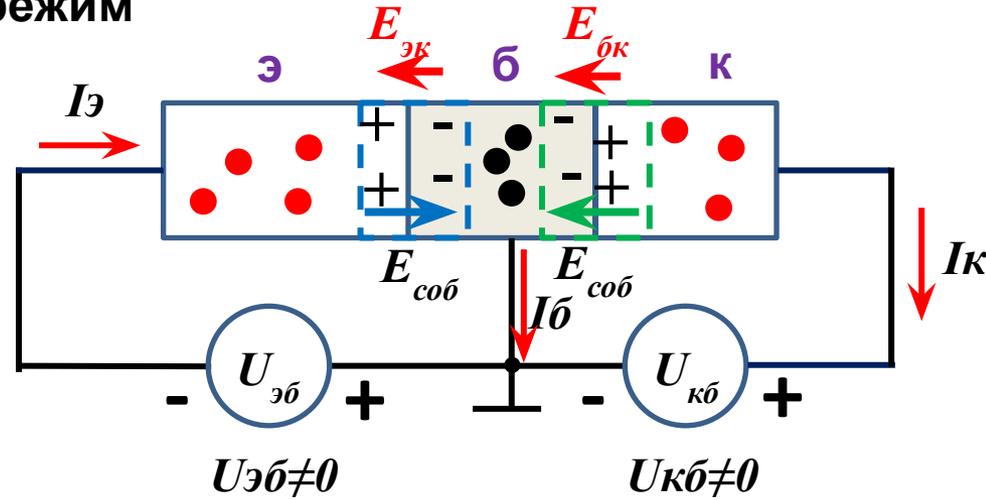


Энергетическая диаграмма без смещений



Полный ток в цепи равен

n-p-n транзистор. Активный режим

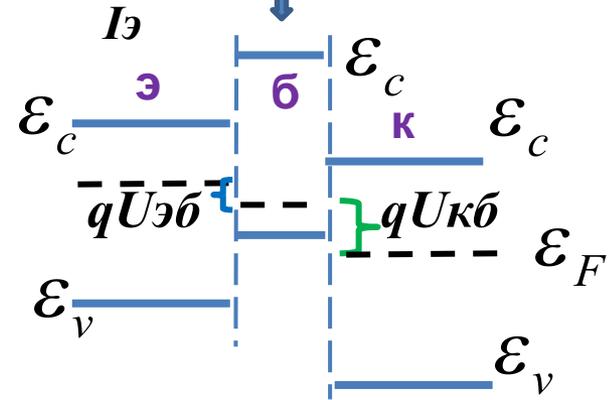


$I_э = I_б + I_к$

$I_э = I_б + I_к$ $I_к = \alpha I_э$ α -коэфф. передачи
 $\alpha = 0.95 \div 0.99 \rightarrow I_к < I_э$ Эмиттерного тока

$I_к = \beta I_б$ β -коэфф. передачи

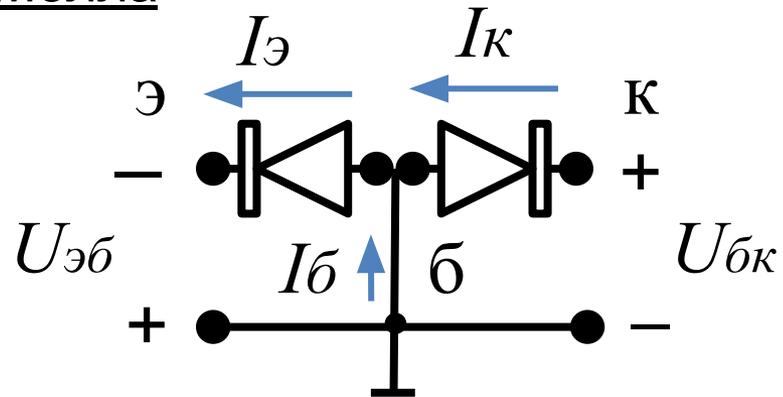
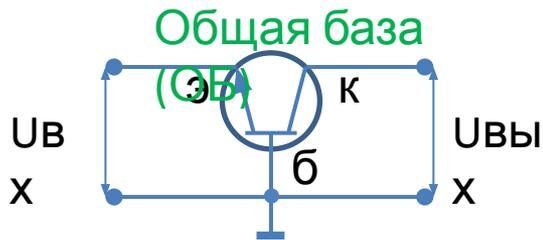
$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \approx 100 \rightarrow I_к \gg I_б$ базового тока $\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$



5.2 Вольт-амперные характеристики транзистора (ВАХ)

Свойства транзистора описывают с помощью входных и выходных характеристик. Используется модель транзистора на постоянном токе - модель Эберса-Молла. рп- переходы представляются в виде двух диодов, подключенных к источникам напряжения. Транзистор можно представить в виде 4-х полюсника, имеющего входные и выходные контакты. В соответствии с этим рассматривают входные и выходные ВАХ транзистора. В этом случае можно говорить о входном управляющем и о выходном управляемом токах.

Модель Эберса-Молла



$U_{эб}$ -

$U_{бк}$ - прямое

$I_{э} = I_{к} + I_{б}$ обратное

$I_{к} = \alpha \cdot I_{э} + I_{кб0}$

$\alpha < 1$

Модель позволяет получить ВАХ:

- входную $I_{э} = f(U_{эб}, U_{бк})$,

- выходную (коллекторную) $I_{к} = f(U_{бк}, I_{э})$,

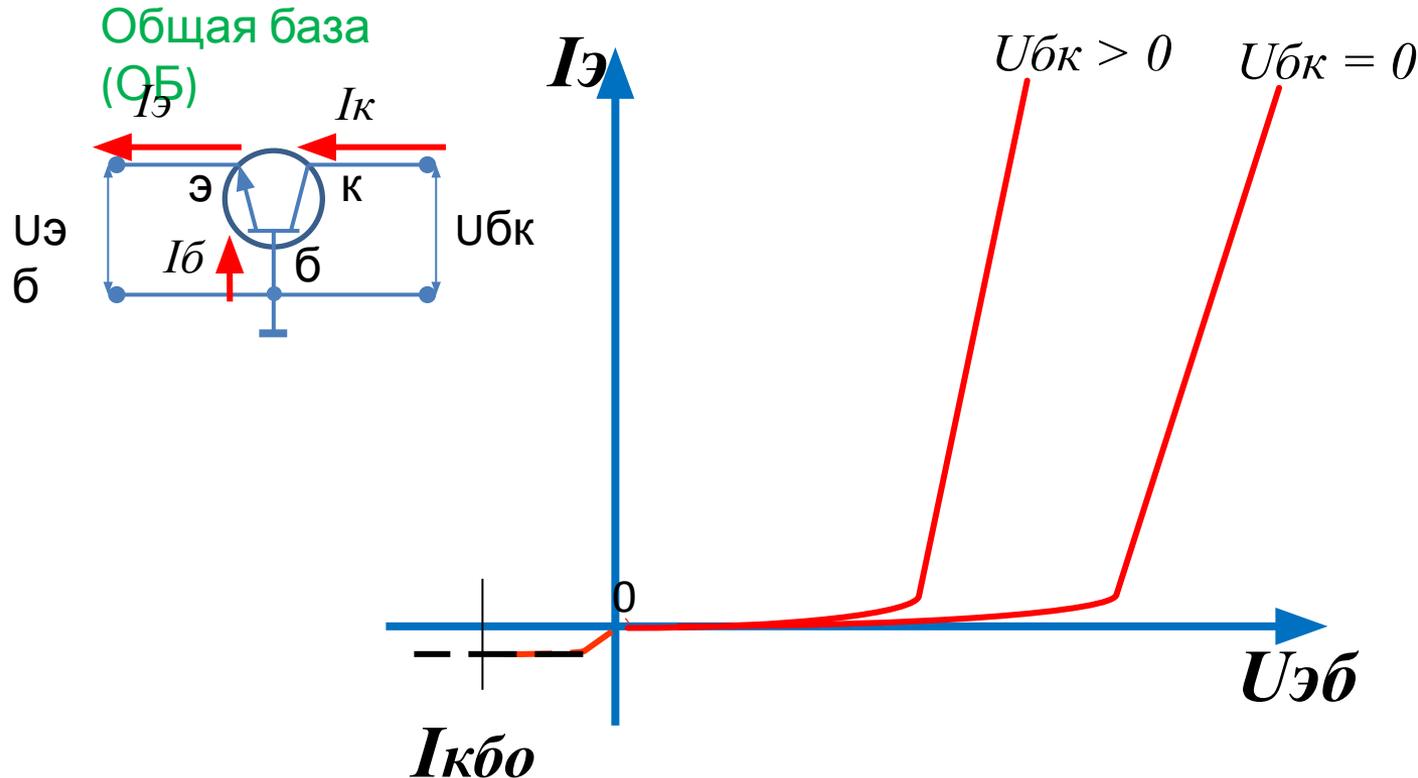
f - некоторая функция.

Схема включения с общей базой Входная (эмиттерная) характеристика

$$I_{\text{э}} = f(U_{\text{эб}}, U_{\text{бк}}), (U_{\text{бк}} - \text{задаваемый параметр})$$

Переход ЭБ включен в прямом направлении (*прямая ветвь рп-перехода*).

$U_{\text{бк}}$ - определяет семейство характеристик $I_{\text{э}} = f(U_{\text{эб}})$ при $U_{\text{бк}} = \text{const}$.



Выходная (коллекторная) характеристика

$$I_k = f(U_{бк}, I_{\text{э}}), (I_{\text{э}} - \text{задаваемый параметр})$$

Переход БК включен в обратном направлении (обратная ветвь рп-перехода).

$I_{\text{э}}$ - определяет семейство характеристик $I_k = f(U_{бк})$ при $I_{\text{э}} = \text{const}$.

$$I_k = \alpha \cdot I_{\text{э}}, \alpha < 1$$

Наряду с этим

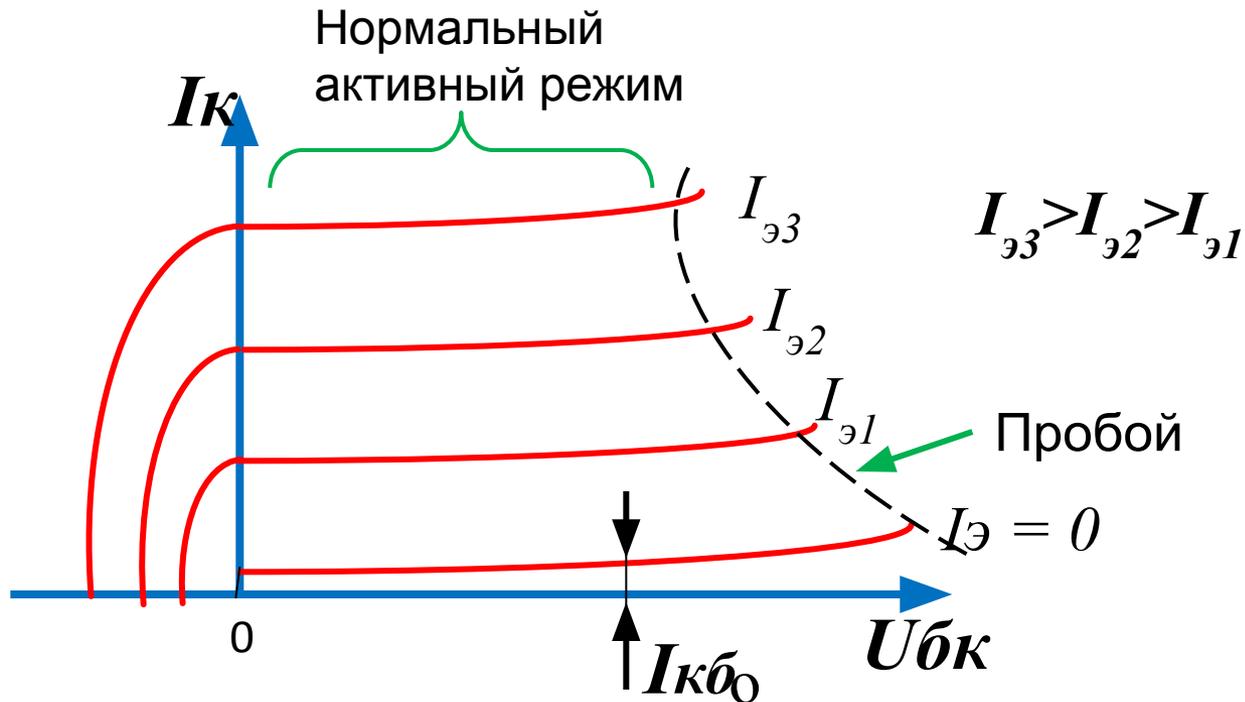
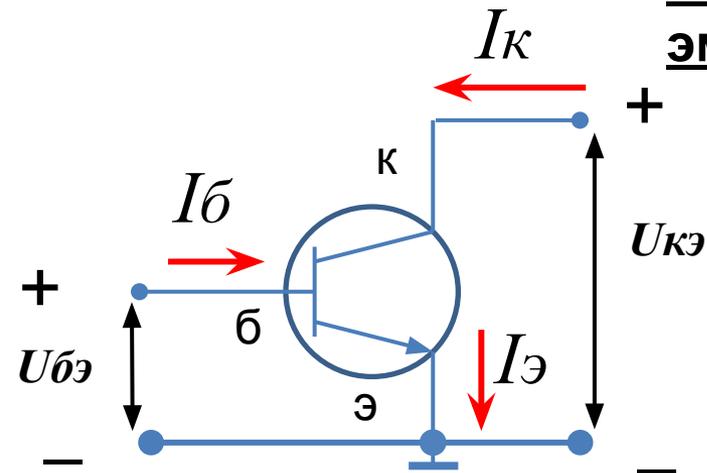


Схема включения с общим

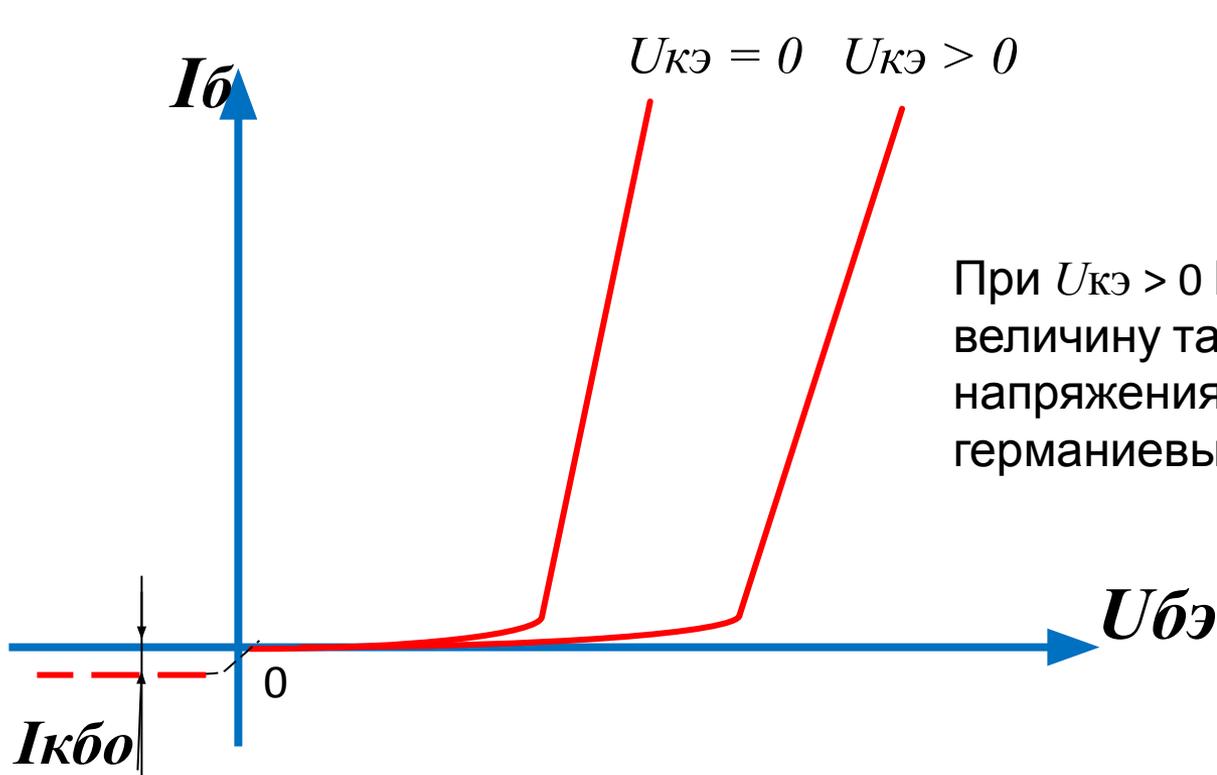
ЭМИТТЕРОМ

Входная характеристика



$$I_{\text{б}} = f(U_{\text{бэ}}, U_{\text{кэ}}), U_{\text{кэ}} \text{ - параметр}$$

Переход БЭ включен в прямом направлении
(прямая ветвь рп-перехода)



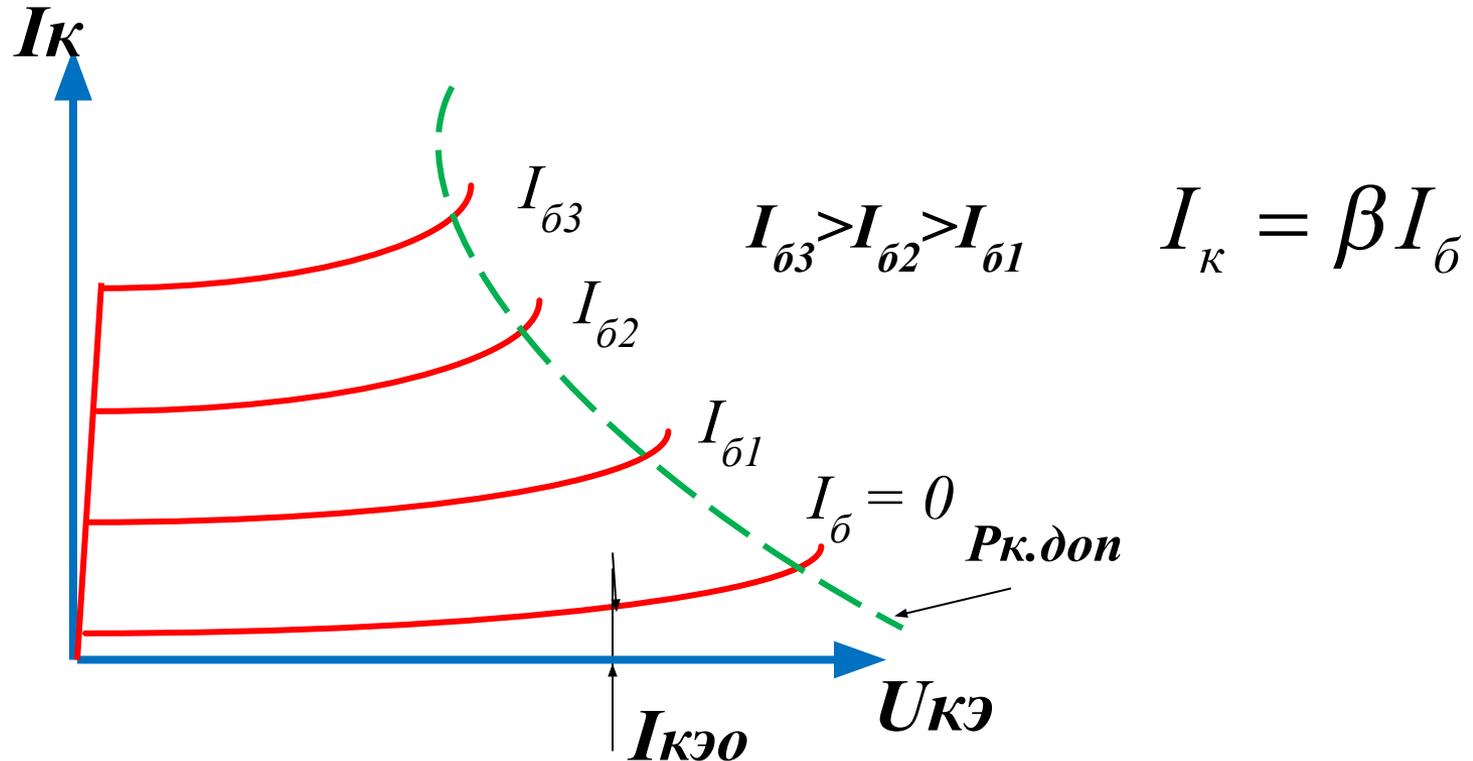
$$I_{\text{э}} = I_{\text{к}} + I_{\text{б}}$$

$$I_{\text{к}} = \beta I_{\text{б}}$$

При $U_{\text{кэ}} > 0$ ВАХ сдвигается вправо на величину так называемого порогового напряжения $U_{\text{бэ.пор}}$, различающегося у германиевых и кремниевых транзисторов

Коллекторная характеристика

$$I_k = f(U_{кэ}, I_{\sigma}), (I_{\sigma} - \text{параметр})$$



Мощность рассеяния $P_k = U_k I_k < P_k$.

$P_{к.дон}$ – допустимая мощность рассеяния коллекторной цепи.

Эта мощность выделяется в виде тепла.

$I_{кэ0}$ - сквозной ток транзистора в схеме

ОЭ

5.3 Эквивалентные схемы замещения транзисторов

Различают:

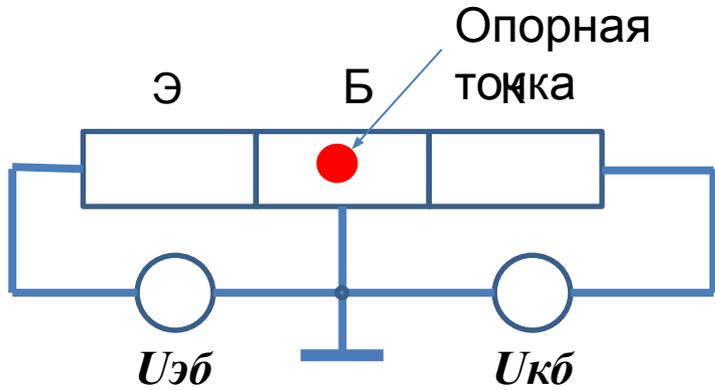
1. Физическую T-образную эквивалентную схему,
2. формальные модели в h-параметрах, Y-параметрах, Z-параметрах.

Эквивалентные схемы необходимы для проведения анализа и синтеза электро- и радиотехнических схем

Рассматриваемые далее эквивалентные схемы можно использовать при условии, что:

- транзистор работает в линейном режиме,
- изменения токов и напряжений малы по амплитуде,
- нелинейные ВАХ можно заменить линейными,
- параметры транзистора в общем случае являются дифференциальными.

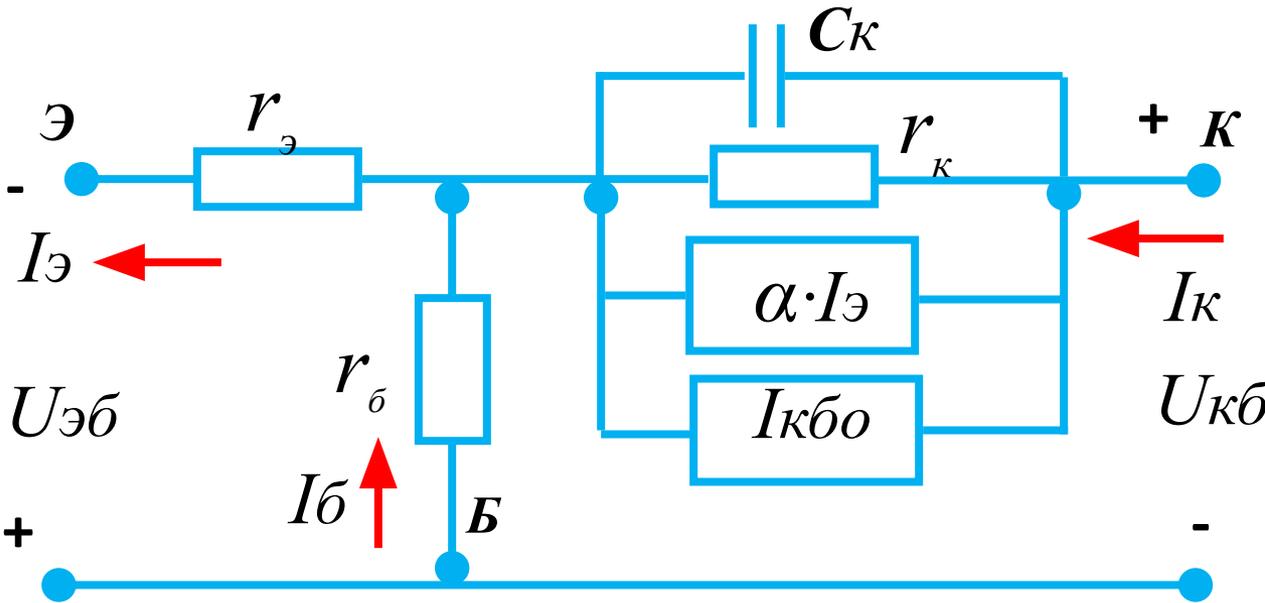
Физическая Т-образная эквивалентная схема с ОБ



Ток эмиттера является управляющим, ток коллектора – управляемым.

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{К}} + I_{\text{Б}}$$

$$k = \alpha I_{\text{Э}} + I_{\text{КБ0}} + \frac{k_{\text{Б}}}{r_{\text{К}}}$$



$r_{\text{Б}}$ – объемное сопротивление базы

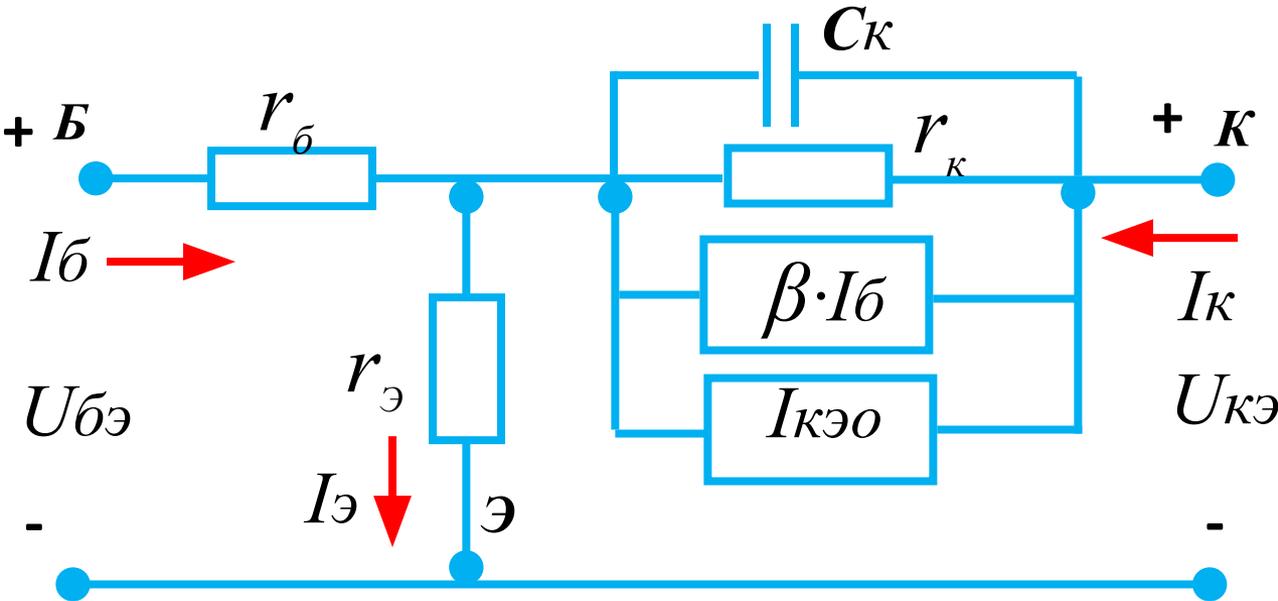
$r_{\text{К}}$ – дифф. сопротивление перехода КБ (обр. вкл)

$r_{\text{Э}}$ – дифф. сопротивление перехода ЭБ (прямое вкл.)

Для эквивалентной схемы по постоянному току необходимо в исходной схеме заменить дифференциальные сопротивления на соответствующие статические и удалить конденсатор.

Физическая Т-образная эквивалентная схема с ОЭ

Ток базы является управляющим, ток коллектора – управляемым.



$$I_{\text{э}} = I_{\text{к}} + I_{\text{б}}$$

$$k = \beta I_{\text{б}} + I_{\text{кэ0}} + \frac{k_{\text{б}}}{r_{\text{к}}}$$

$r_{\text{б}}$ – объемное сопротивление базы

$r_{\text{к}}$ – дифф. сопротивление перехода КБ (обр. вкл.)

$r_{\text{э}}$ – дифф. сопротивление перехода ЭБ (прямое вкл.)

$$r_{\text{э}} = \frac{\varphi_{\text{T}}}{I_{\text{э}}}$$

$(\varphi_{\text{Б}} = 0.025\text{В}, I = 1\text{мА}) \longrightarrow Q_{\text{э}} \approx 25$

Для эквивалентной схемы по постоянному току необходимо в исходной схеме заменить дифференциальные сопротивления на соответствующие статические и удалить конденсатор.

Вывод

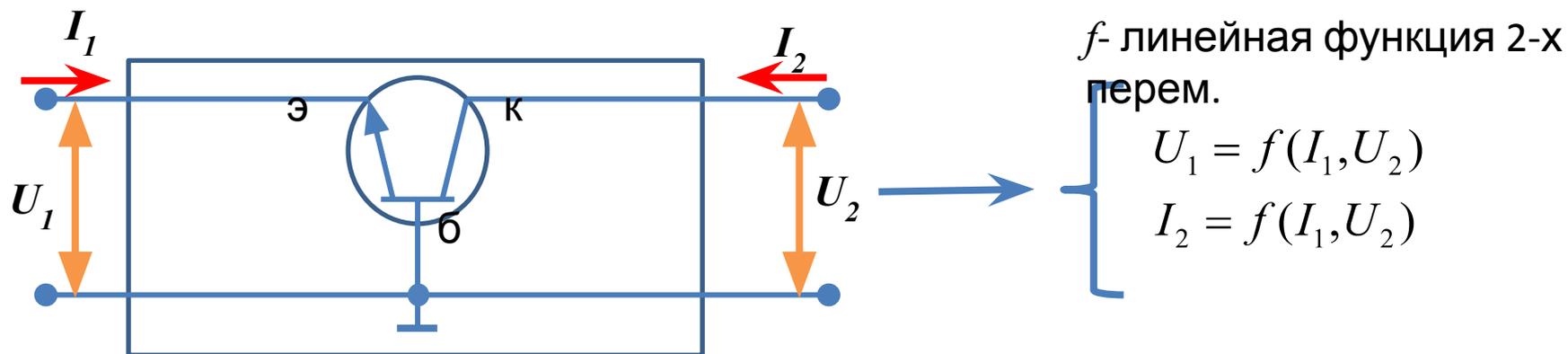
ы

1. Физические Т-образные эквивалентные схемы транзистора представляют собой электротехнические цепи, состоящие из пассивных элементов и источников тока. К ней применимы все законы электротехники для анализа и синтеза цепей.
2. Наличие в эквивалентных схемах конденсаторов указывает на то, что характеристики транзистора являются *частотно-зависимыми*.
3. Во многих случаях сквозными токами коллектор-база и коллектора эмиттер можно пренебречь.
4. Недостаток эквивалентных схем заключается в том, что сопротивления (r -параметры) можно получить только теоретическим путем.

5.4 Транзистор как линейный четырехполюсник. Формальная модель

Модель применима при условии

- транзистор работает в линейном режиме,
- изменения токов и напряжений малы по амплитуде,
- нелинейные ВАХ можно заменить линейными.



$$dU_1 = \frac{\partial U_1}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial U_1}{\partial U_2} dU_2$$

$$dI_2 = \frac{\partial I_2}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial I_2}{\partial U_2} dU_2$$

Замен

$$\frac{\partial U_1}{\partial I_1} \rightarrow \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \right|_{U_2 = \text{const}} = h_{11}$$

h -параметры транзистора

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

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

Смысл и значения h-параметров зависит от конкретной схемы включения транзистора (ОБ, ОЭ, ОК)

$$\frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} = h_{11}$$

Входное сопротивление
[Ом].

$$\frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} = h_{12}$$

Коэффициент внутренней обратной связи по напряжению, безразмерный.

$$\frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} = h_{21}$$

Коэффициент передачи по току,
безразмерный

$$\frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} = h_{22}$$

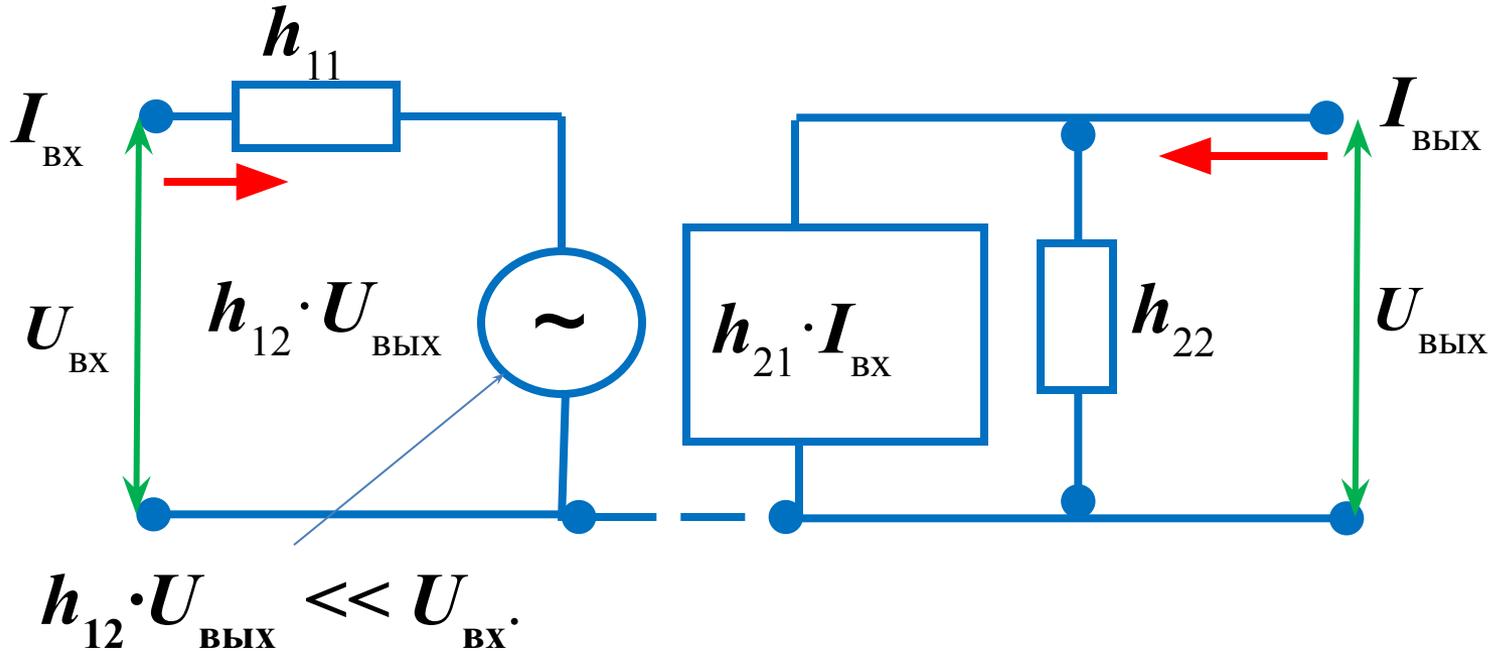
Выходная проводимость [Сименс],
 $1/h_{22}$ – Выходное сопротивление [Ом]

Эквивалентная электрическая схема транзистора для h-параметров

Замена
а

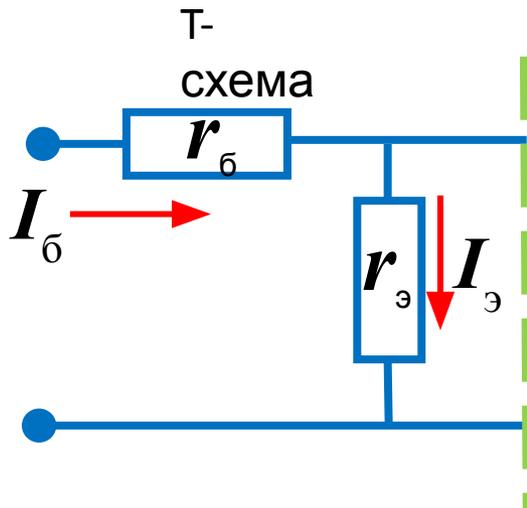
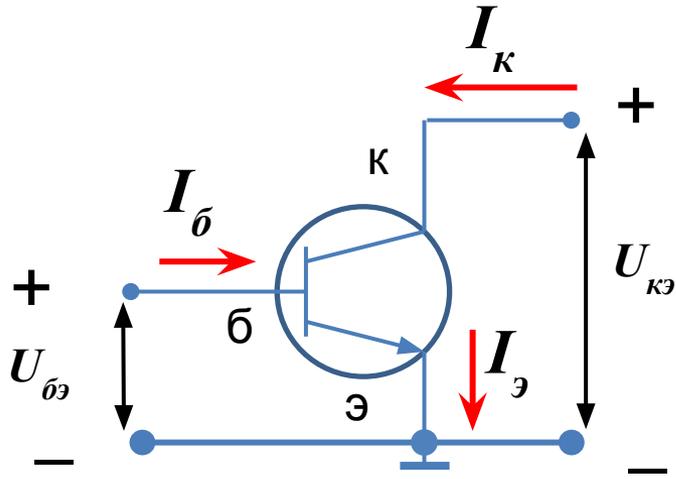
$$I_1, U_1 \rightarrow I_{вх}, U_{вх}$$

$$I_2, U_2 \rightarrow I_{вых}, U_{вых}$$



Можно удалить источник
напряжения

Связь h-параметров с параметрами T-схемы на примере включения с ОЭ



Входные токи и напряжения

$$I_{\text{б}} \quad U_{\text{бэ}}$$

Выходные токи и напряжения

$$I_{\text{к}} \quad U_{\text{кэ}}$$

$$I_{\text{к}} = \beta I_{\text{б}}$$

$$I_{\text{э}} = I_{\text{к}} + I_{\text{б}} = (\beta + 1)I_{\text{б}}$$

$$h_{11} \Big|_{U_{\text{кэ}}} = R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{бэ}}}{I_{\text{б}}} = r_{\text{б}} + (\beta + 1)r_{\text{э}}$$

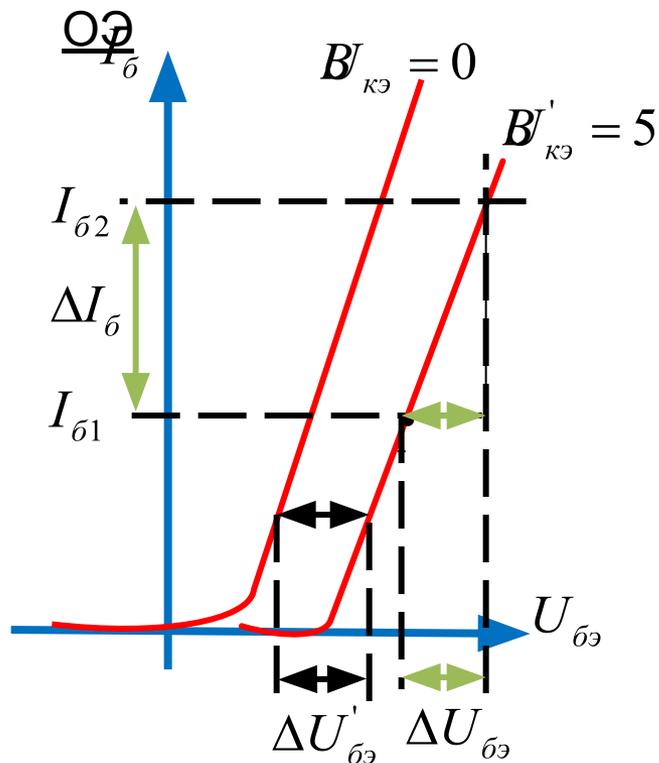
$$h_{21} \Big|_{U_{\text{кэ}}} = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{б}}} \approx \beta$$

$$h_{22} \Big|_{I_{\text{б}}} = \frac{I_{\text{к}}}{U_{\text{кэ}}} = \frac{1}{r_{\text{к}}^*}$$

Способы получения h - параметров

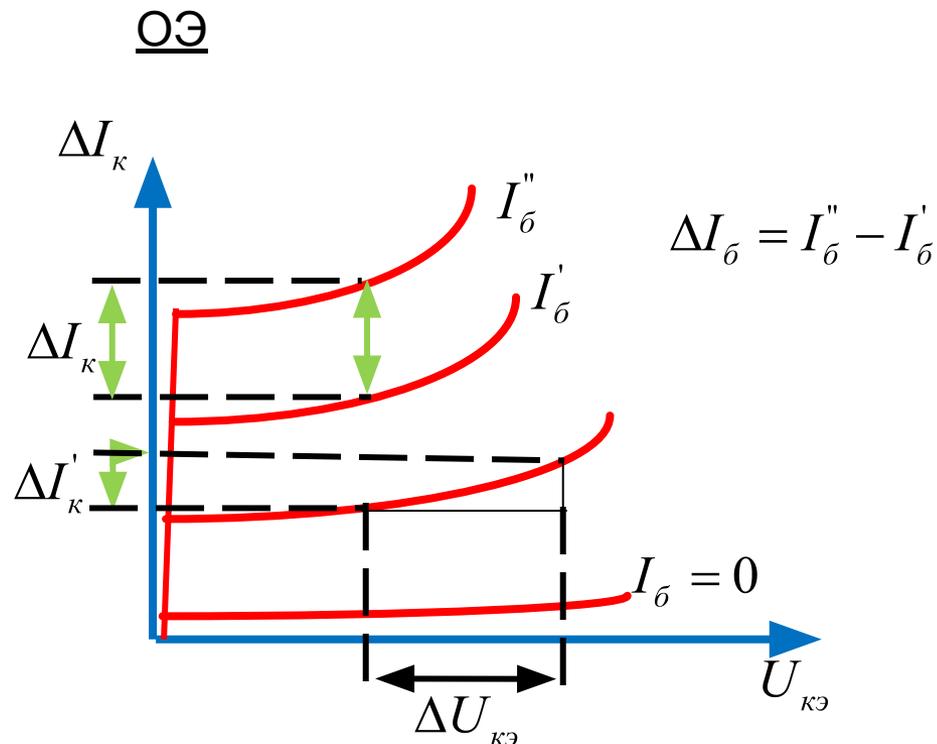
Основное достоинство h -параметров состоит в том, что их можно получить экспериментально: прямым измерением на основе вольт-амперных характеристик.

Входные характеристики



$$h_{11} = \frac{\Delta U_{\text{бэ}}}{\Delta I_{\text{б}}} \quad h_{12} = \frac{\Delta U'_{\text{бэ}}}{\Delta U_{\text{кэ}}}$$

Выходные характеристики



$$h_{21} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{б}}} = \beta \quad h_{22} = \frac{\Delta I'_{\text{к}}}{\Delta U_{\text{кэ}}} = \frac{1}{r_{\text{к}}^*} \quad r_{\text{э}} = \frac{\Phi_{\text{T}}}{I_{\text{э}}}$$

Вывод

ы

1. ВАХ транзистора существенно нелинейны. Значение h -параметров зависит от точки ВАХ, в которой они определяются.
2. Значения h -параметров зависят от температуры и приводятся в справочной литературе.
3. Значение h -параметров зависит от схемы включения транзистора. В справочной литературе приводятся таблицы переводов из одной системы параметров h - в другие системы (Z -, Y -) и для схем включения транзистора ОБ и ОЭ.

Сводные значения h -параметров для различных схем

включения Параметр	ОБ	ОЭ	ОК
h_{11}	1-10 Ом	100-1000 Ом	10кОм-100кОм
h_{12}	10^{-3} - 10^{-4}	10^{-3} - 10^{-4}	10^{-3} - 10^{-4}
h_{21}	0.95-0.98	10-500	10-100
$1/h_{22}$	100кОм-1мОм	1кОм-10кОм	100-1000 Ом

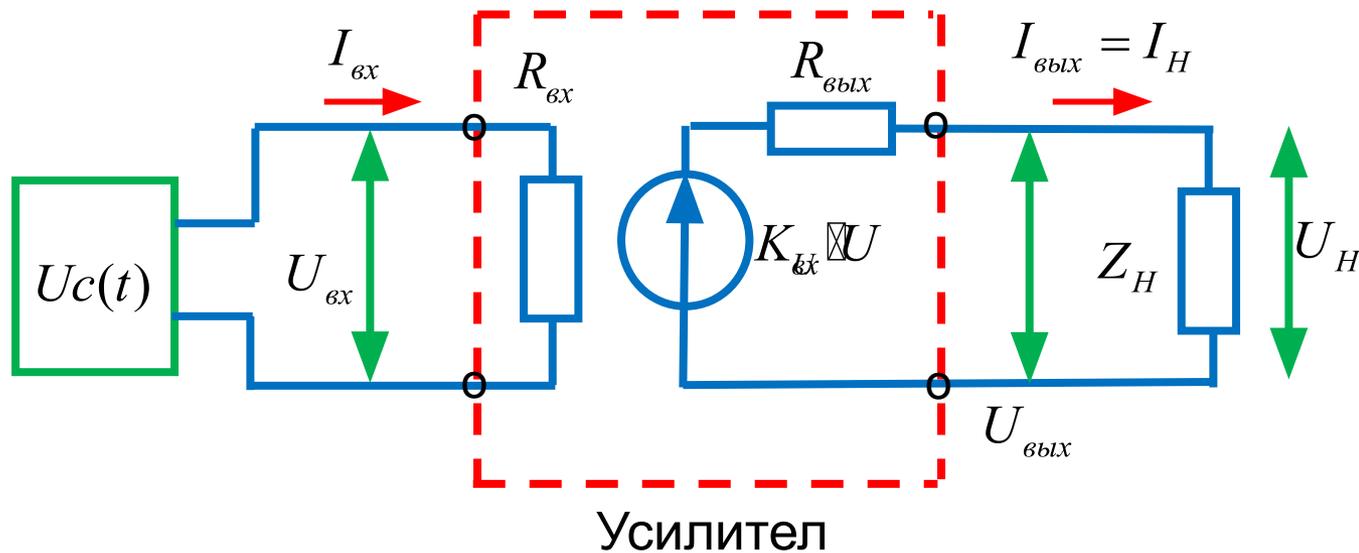
6. Транзисторный усилитель

Общая структурная схема с усилителем



- **Источник сигнала** – например, микрофон,
- **Нагрузка усилителя** – например, динамики
- **Источник питания** – батарея, аккумулятор
- **Помехи** – воздействие температуры, ЭМ-наводки

Общая структурная схема с усилителем



Требования к усилителю: процесс усиления должен быть непрерывным, линейным, однозначным.

Параметры усилителя

Коэффициенты усиления:

$$K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \quad \text{- по напряжению}$$

$$K_I = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} \quad \text{- по току}$$

$$K_P = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = K_U \cdot K_I \quad \text{- по мощности}$$

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}}$$

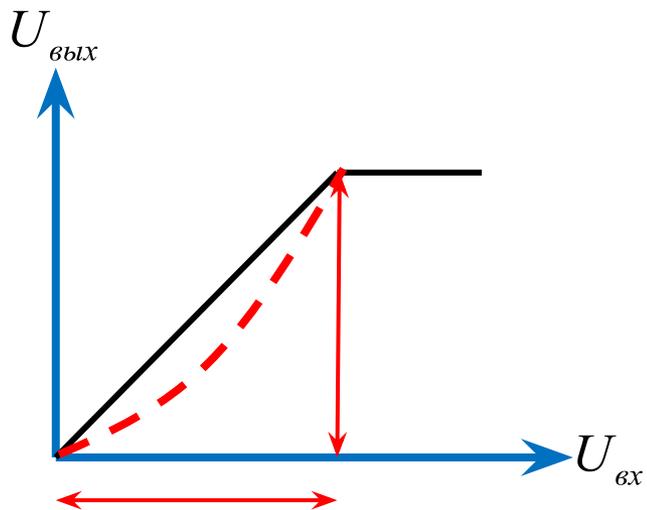
$$R_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}}{I_{\text{вых}}}$$

Частотный коэфф.

усиления $K(j\omega) = |K(j\omega)| e^{i\varphi}$

$$K[\text{дБ}] = 20 \lg \left(\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \right)$$

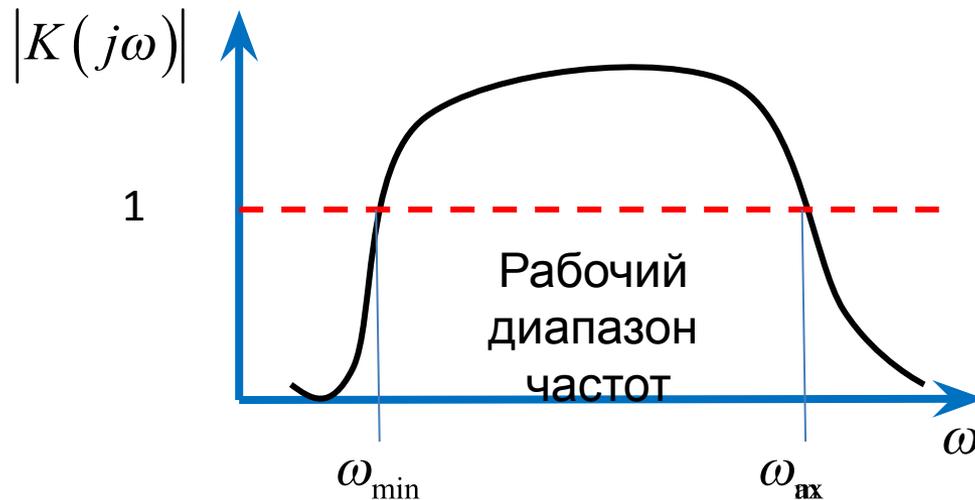
Амплитудная характеристика



Линейная
(рабочая)
область усилителя

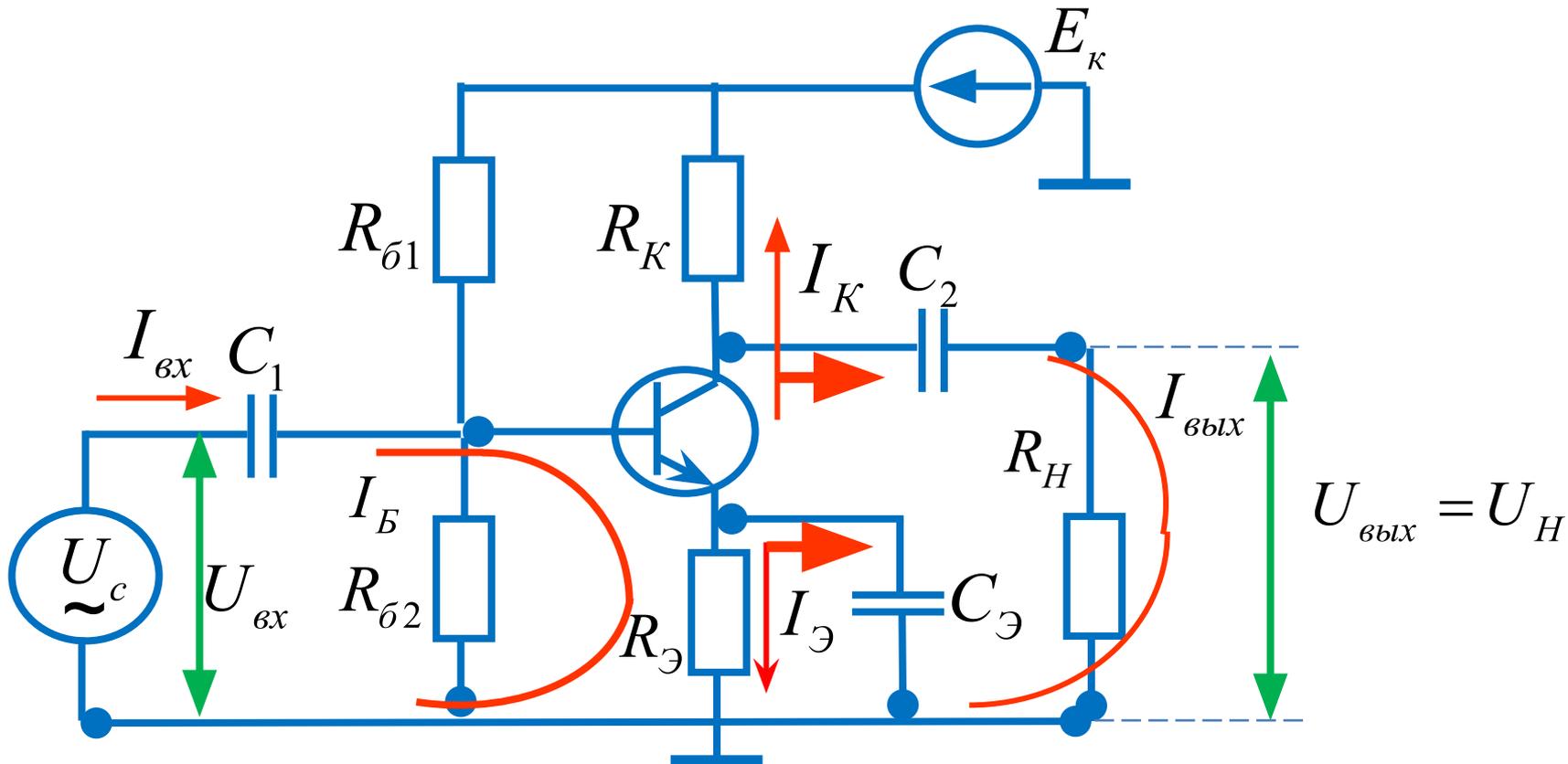
Характерные параметры
усилителей
Максимальные частоты до 100
ГГц
Выходная мощность до 100 Вт
К.п.д. 80-95%

Частотный коэффициент усиления



Рабочий
диапазон
частот

Принципиальная схема усилителя с ОЭ



Расчет усилителя производится в 2
этапа

1. Расчет по постоянному току (напряжениям)- статический режим.
2. Расчет по переменным токам и напряжениям- динамический режим.

1. Расчет по постоянному току (напряжениям)- статический режим.

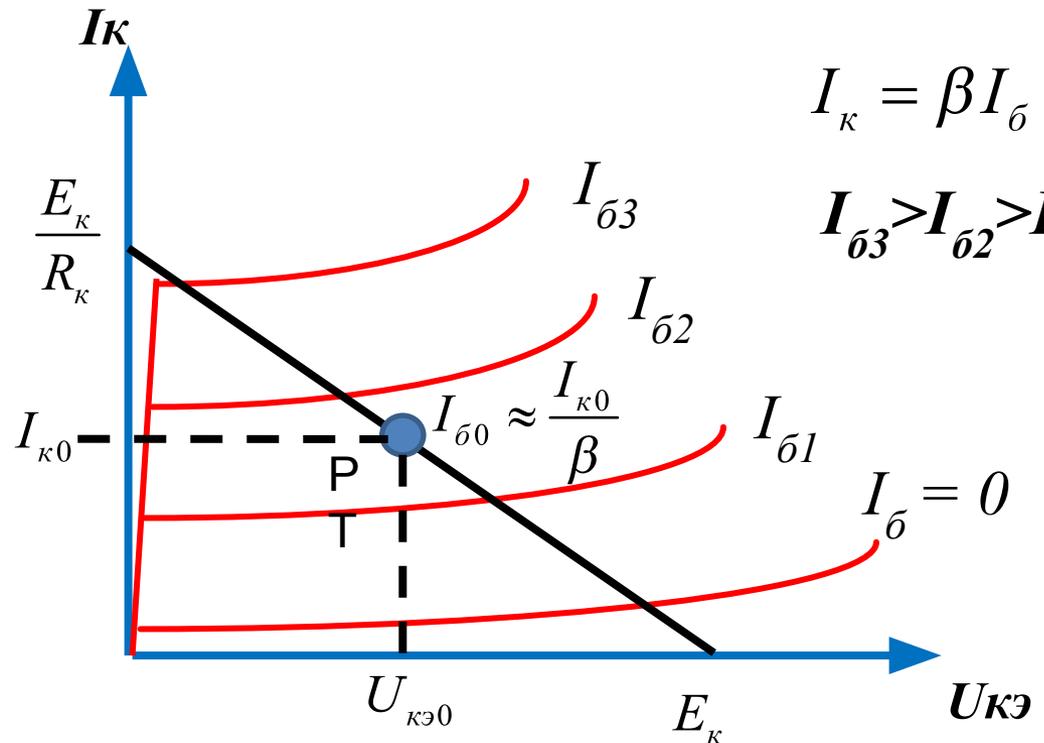
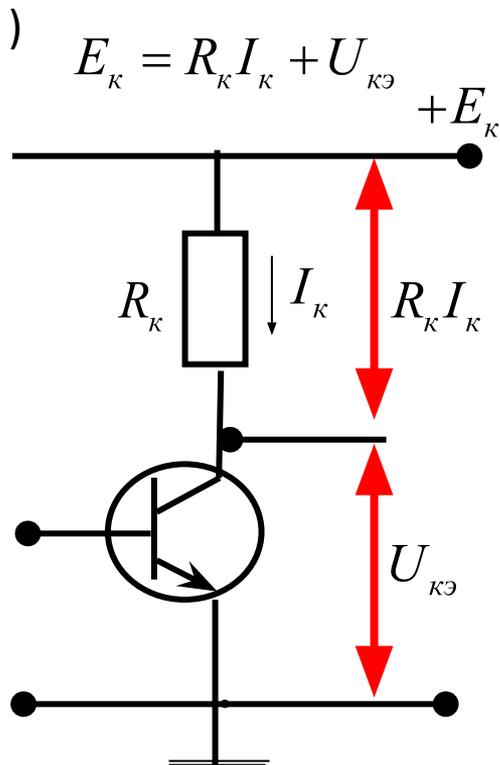
Цель- определить рабочую точку для постоянных токов и напряжений.

В схеме усилителя все конденсаторы заменяются на разрыв цепи.

Для цепи постоянного тока рабочая точка находится из входных и выходных характеристики транзистора (эмиттерная и коллекторная ВАХ).

Коллекторная характеристика $I_k = f(U_{кэ}, I_б)$, ($I_б$ - параметр)

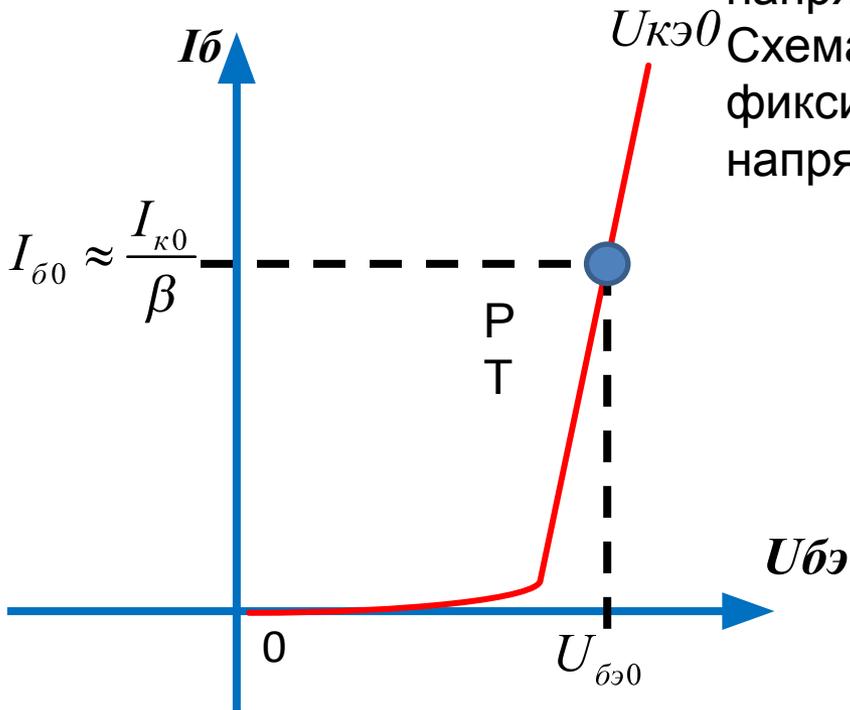
A



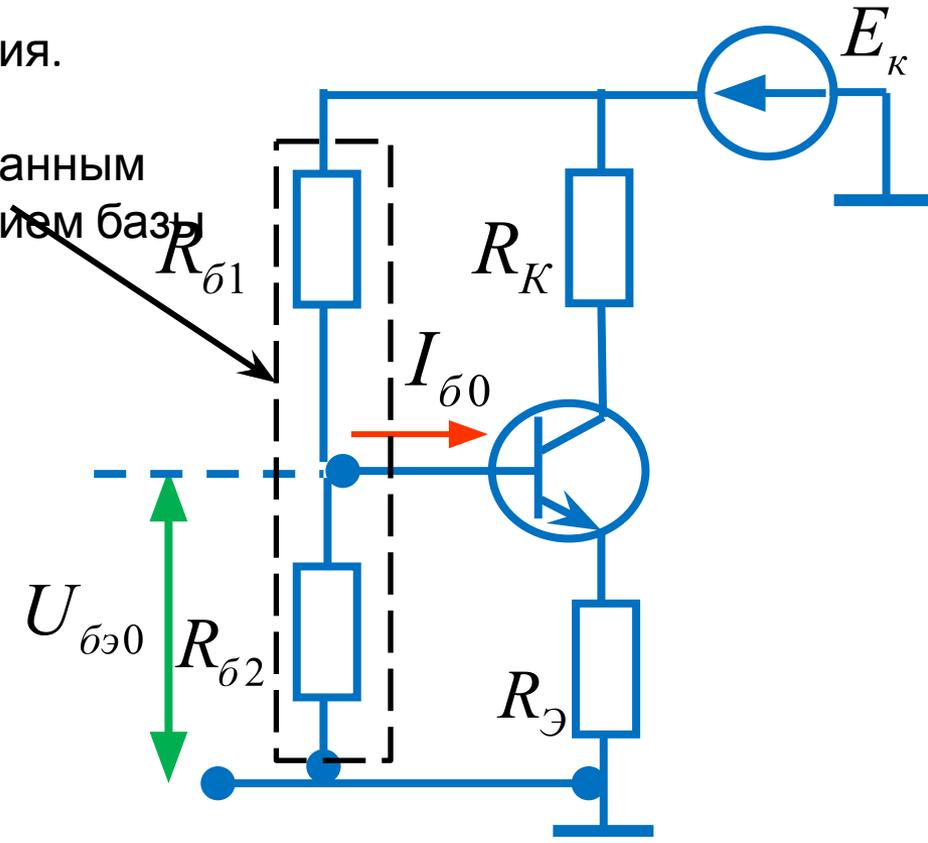
Определили РТ для выходной характеристики, переход к определению РТ для входных характеристик

Б Входная (эмиттерная)
) характеристика

$$I_b = f(U_{bэ}, U_{кэ}), U_{кэ} - \text{параметр}$$



Делитель
 напряжения.
 Схема с
 фиксированным
 напряжением базы



$$U_{bэ0} = \frac{E_k R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}}$$

Все рабочие точки в статическом режиме
 определены.

Переход к определению параметров динамического
 режима.

2. Расчет по переменным токам и напряжениям- динамический режим.

Цель- определить коэффициенты усиления (тока, напряжения, мощности) для переменных (усиливаемых) токов и напряжений.

В схеме усилителя все конденсаторы заменяются на короткое замыкание участка цепи.

Для цепи переменного тока характеристики усилителя находятся из h -параметров после входного преобразования схемы усилителя.

Входная цепь транзистора

$$R_{\sigma} = R_{\sigma 1} // R_{\sigma 2}$$

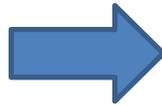
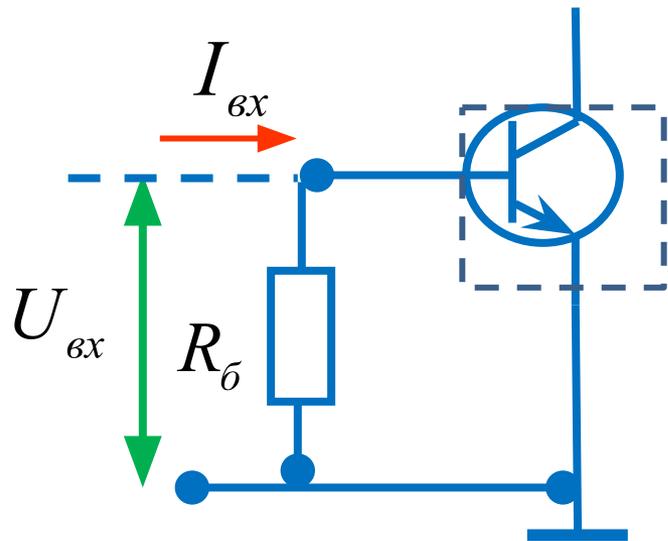
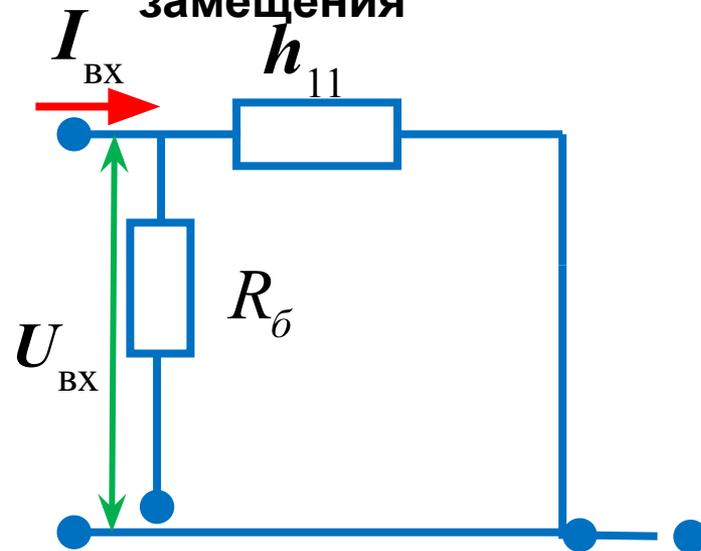


Схема замещения



$$\frac{U_{ex}}{R_{\sigma}} + \frac{U_{ex}}{h_{11}} = I_{ex} \quad R_{ex} = \frac{h_{11} R_{\sigma}}{h_{11} + R_{\sigma}}$$

$$R_{\sigma} \boxtimes h_{11}$$

$$R_{ex} \approx h_{11}$$

Выходная цепь транзистора

$$R_{KH} = R_K // R_H$$

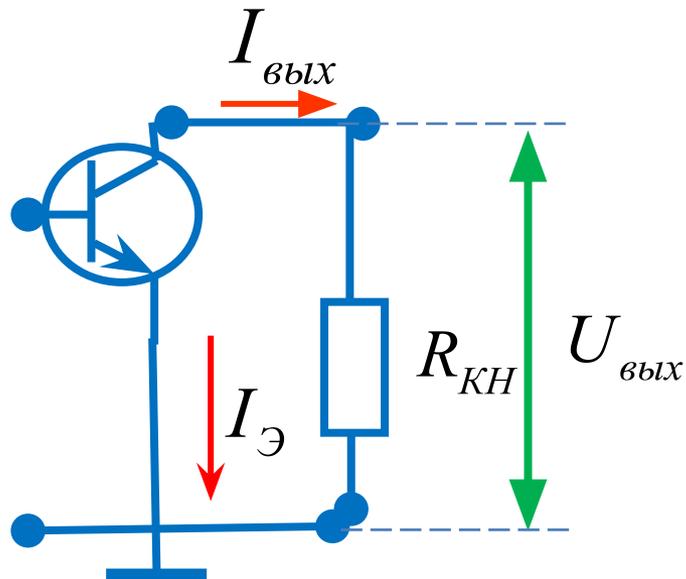
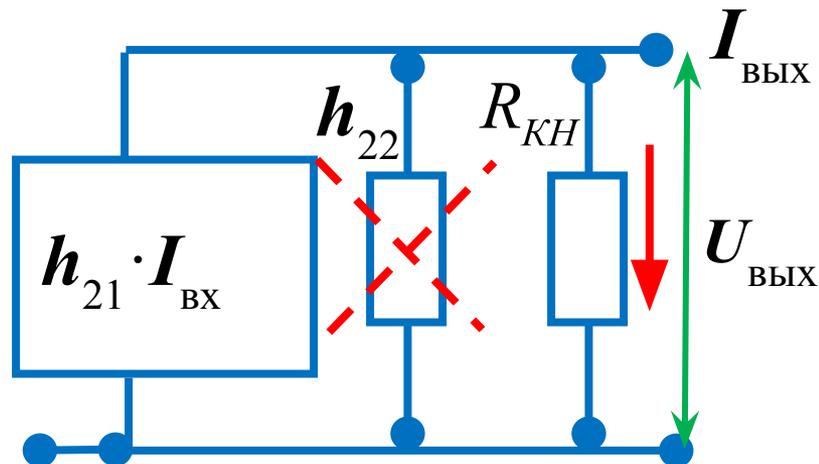


Схема замещения

$$\frac{1}{h_{22}} \boxtimes R_{KH}$$



$$R_{\text{вых}} = R_{KH}$$

$$K_I = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{h_{21} I_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} \approx \beta$$

$$U_{\text{вых}} = R_{KH} h_{21} I_{\text{вх}}$$

$$U_{\text{вх}} = R_{\text{вх}} I_{\text{вх}} = h_{11} I_{\text{вх}}$$

$$K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_{KH} h_{21} I_{\text{вх}}}{h_{11} I_{\text{вх}}} \approx \frac{R_{KH} h_{21}}{h_{11}} = \frac{R_{KH} \beta}{h_{11}}$$

$$K_P = K_I K_U = \frac{R_{KH} \beta^2}{h_{11}}$$

Оценим значения параметров усилителя

Параметры схемы:

$R_H = \infty$ (нагрузка отключена холостой ход),

$R_K = 1000 \text{ Ом}$

Параметры

транзистора:

$h_{21} = \beta = 100$.

$$R_{M_{\text{вх}}} \approx h_{11} = 100$$

$$R_{M_{\text{вх}}} \approx R_K = 1000$$

$$K_I = \frac{I_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{h_{21} I_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} \approx \beta = 100$$

$$K_U = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_K \beta}{h_{11}} = 1000$$

$$K_P = K_I K_U = \frac{R_{KH} \beta^2}{h_{11}} = 10^5$$

Методы стабилизации положения РТ транзисторных усилителей

Под действием внешних и внутренних дестабилизирующих факторов положение РТ может измениться настолько, что транзистор окажется в нерабочей области.

Дестабилизирующие факторы:

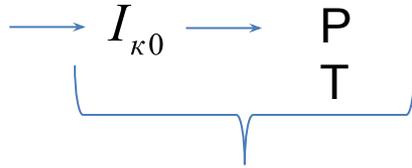
- основное влияние – изменение температуры (разогрев транзистора)

- дрейф параметров элементов схемы,
- дрейф напряжения источников питания

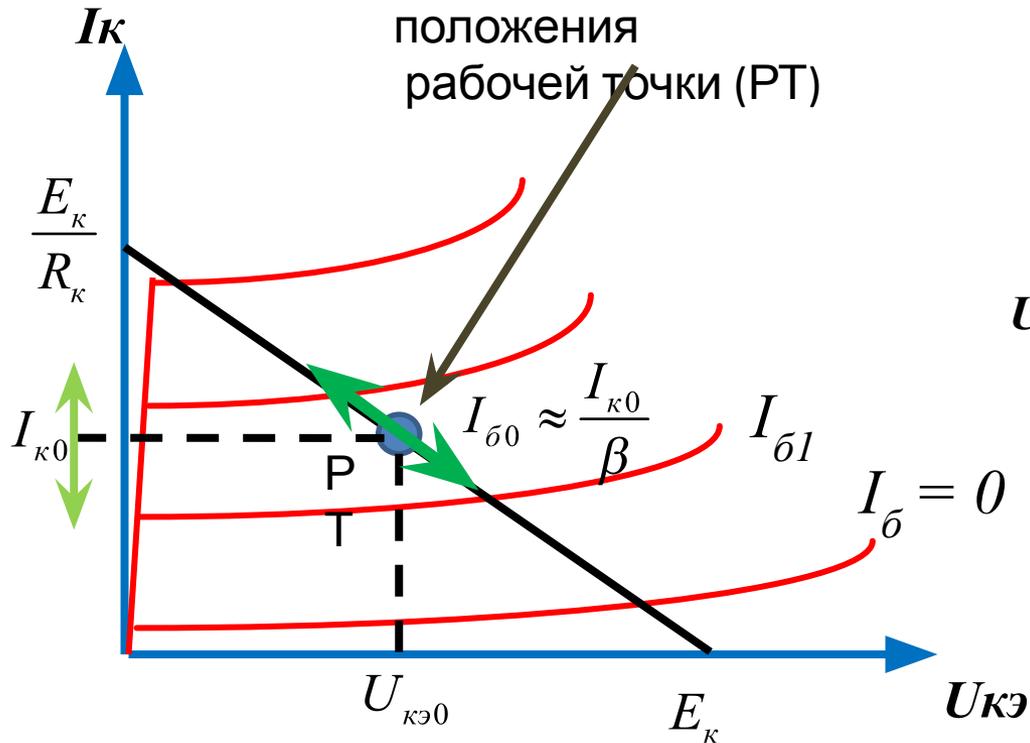
В частности, с повышением температуры транзистора его параметры изменяются таким образом, что приводят к увеличению тока коллектора и эмиттера. Для уменьшения этого влияния применяют специальные методы.

Дрейф рабочей точки на примере транзисторного усилителя включенного по схеме с ОЭ

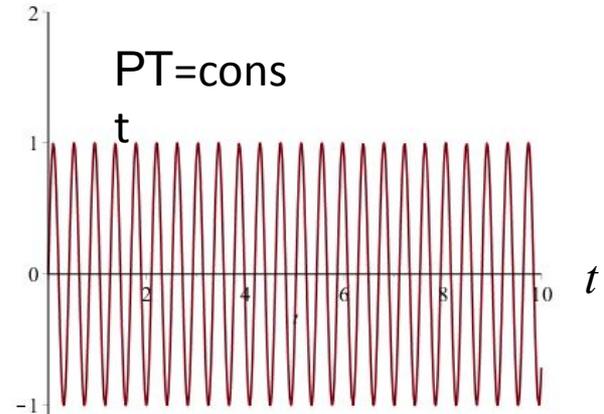
Изменение тока эмиттера $I_{Э0}$



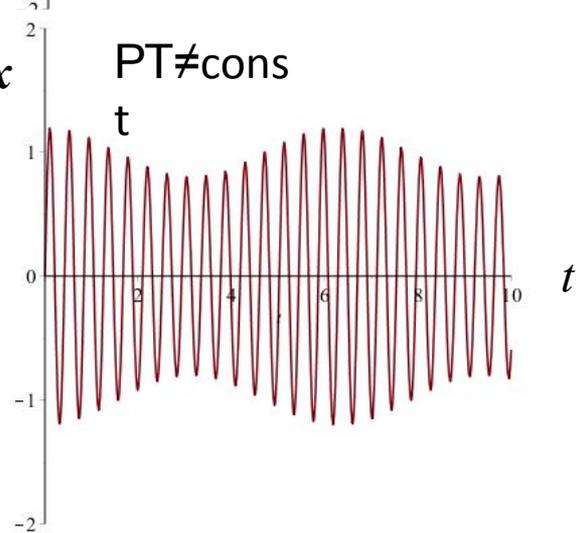
Изменение положения рабочей точки (РТ)



$U_{вых}$



$U_{вых}$



Используется несколько схем стабилизации:

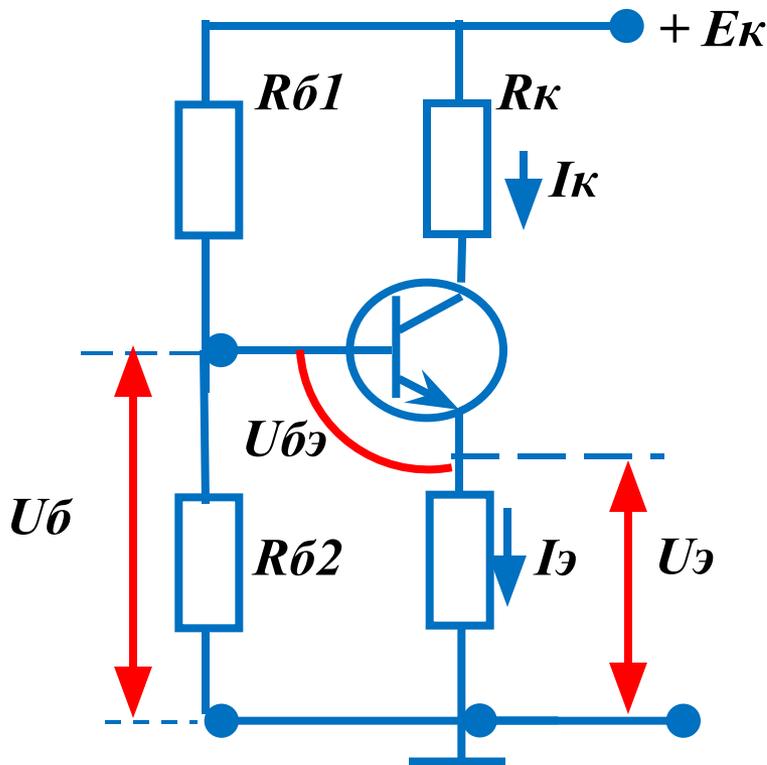
- эмиттерная стабилизация (обратная связь по току),
- коллекторная стабилизация (обратная связь по напряжению),
- термокомпенсация.

Схема с эмиттерной стабилизацией

$$I_k \approx I_\varepsilon$$

$$U_\varepsilon = R_\varepsilon \cdot I_k$$

$$U_{бэ} = U_б - U_\varepsilon$$



С повышением температуры T ток I_k увеличивается, увеличивается напряжение U_ε

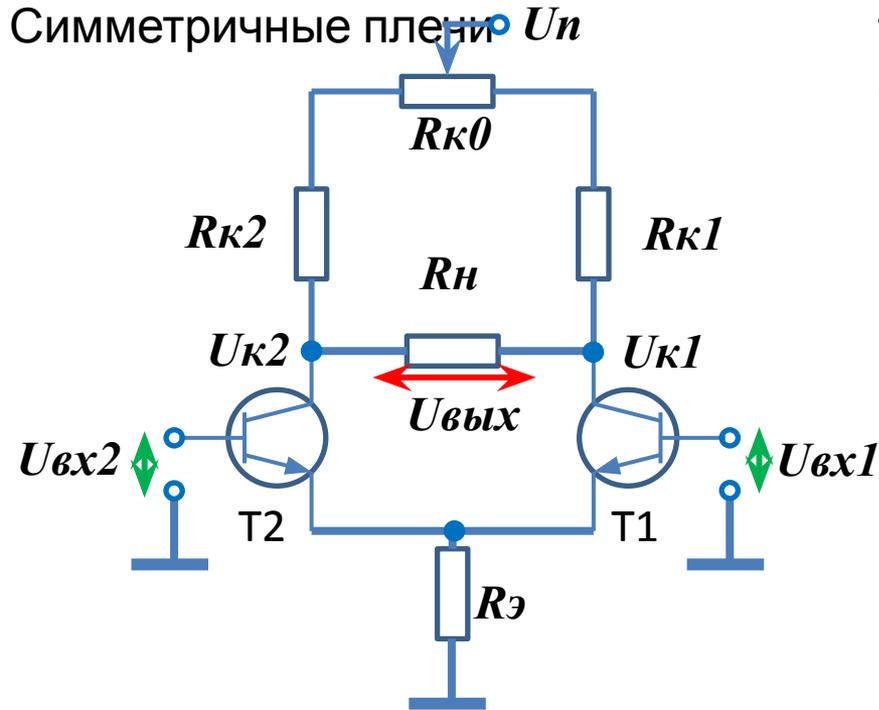
Напряжение остается $U_б$ неизменным.

В результате напряжение $U_{бэ} = U_б - U_\varepsilon$ уменьшается, что приводит к закрыванию транзистора и уменьшению тока коллектора I_k .

Отрицательная обратная связь по току

Дифференциальный усилитель (ДУ)

Мостовая схема включения транзисторов с ОЭ. Симметричные плечи



В основе ДУ лежит идеальная симметрия обоих плеч моста, т. е. идентичность параметров транзисторов $T1, T2$ и равенство сопротивлений $R_{к1}, R_{к2}$.

1. $U_{вх1} = U_{вх2} = 0$

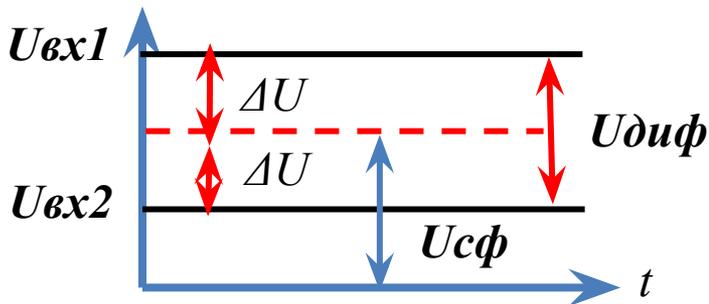
$U_{вых} = 0$ при одновременном и одинаковом изменении токов в обоих плечах. В идеальном ДУ дрейф выходного напряжения отсутствует, однако возможен дрейф РТ в каждом $T1, T2$.

2. $U_{вх1} = U_{вх2} = U_{сф}$ – синфазные напряжения

$I_{к1} = I_{к2}, U_{к1} = U_{к2}, U_{вых} = 0$

3. $U_{вх1} = -U_{вх2} = U_{диф}$ – противофазные (дифференциальные) напряжения

$I_{к1} = -I_{к2}, U_{к1} = -U_{к2}, U_{вых} = U_{к1} - U_{к2}$



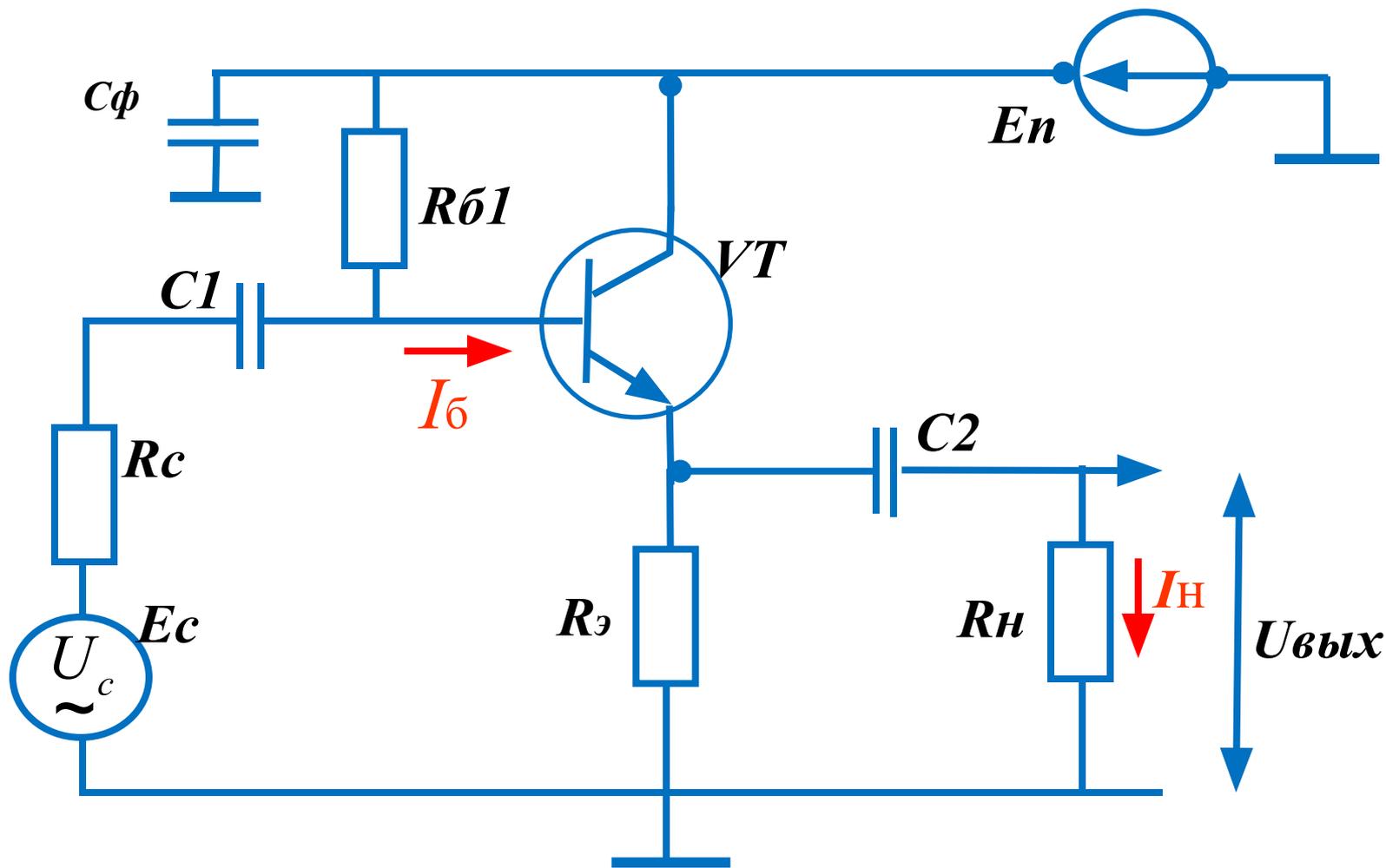
$R_{вх} \approx 2h_{11}$

$R_{вых} \approx 2(R_{к1} + R_{к2})$

$K_U = \frac{h_{21}}{h_{11}} R_k$

7. Схема включения транзистора с ОК. Эмиттерный повторитель

Принципиальная схема



Параметры схемы с ОК

$$R_{ЭН} = R_{Э} // R_H$$

Входное

сопротивление

$$R_{вх} = R_{б} + (\beta + 1)(R_{Э} // R_{ЭН}) \approx h_{11} + (\beta + 1)R_{ЭН}$$

$$h_{11} \ll R_{Э}, \quad R_{Э} \ll R_H$$

$$R_{вх} \approx (\beta + 1)R_{Э}$$

Выходное

сопротивление

$$R_{вых} = R_{ЭН} \approx R_{Э}$$

Усиление по току

$$K_I = \frac{I_{Э}}{I_{Б}} = (\beta + 1)$$

Усиление по напряжению

$$U_{вх} = R_{вх} I_{б}$$

$$U_{вых} = R_{вых} I_{Э}$$

$$K_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{R_{ЭН}(\beta + 1)}{h_{11} + (\beta + 1)R_{ЭН}} < 1$$

Усиление по мощности

$$K_P = K_I K_U = (\beta + 1) \approx \beta$$

Характеристики ОК

ОК имеет следующие особенности:

- высокое входное сопротивление
- малое выходное сопротивление
- коэффициент усиления по напряжению равен единице.

В схеме с ОК транзистор является повторителем входного напряжения по амплитуде и по фазе - **Эмиттерный повторитель**

Эмиттерный повторитель используется для согласования выходного сопротивления источника сигнала с нагрузкой.

8. Полевые транзисторы

Идея работы полевого транзистора была высказана в 1930 г.

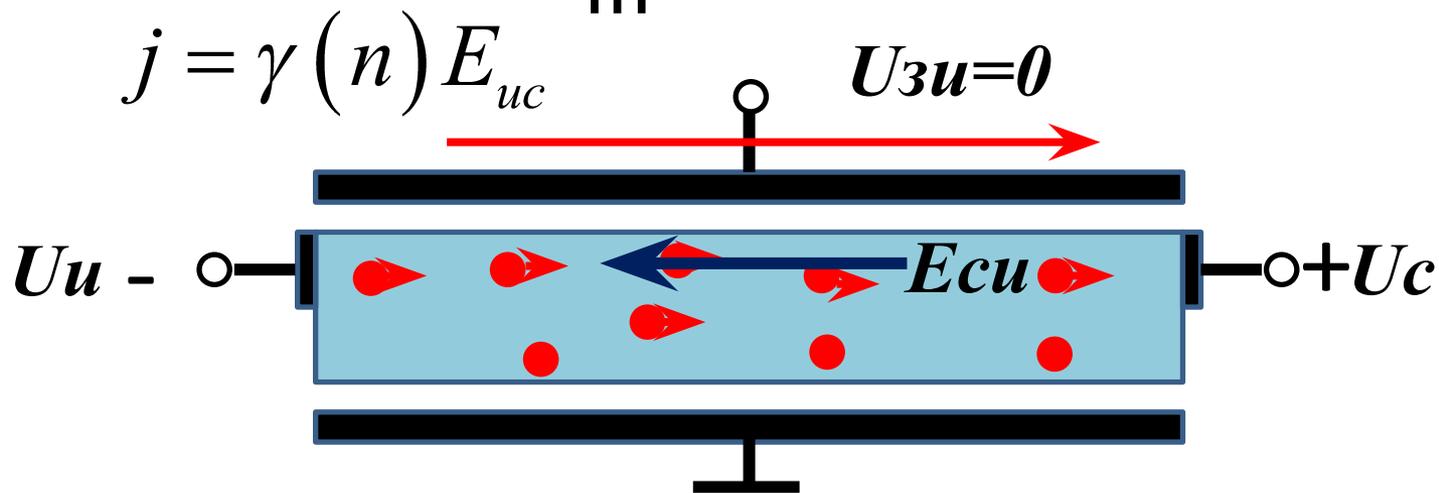
В 1952 г. принцип работы удалось реализовать японскому ученому Есаки.

Полупроводниковый прибор, способный усиливать мощность электрических сигналов.

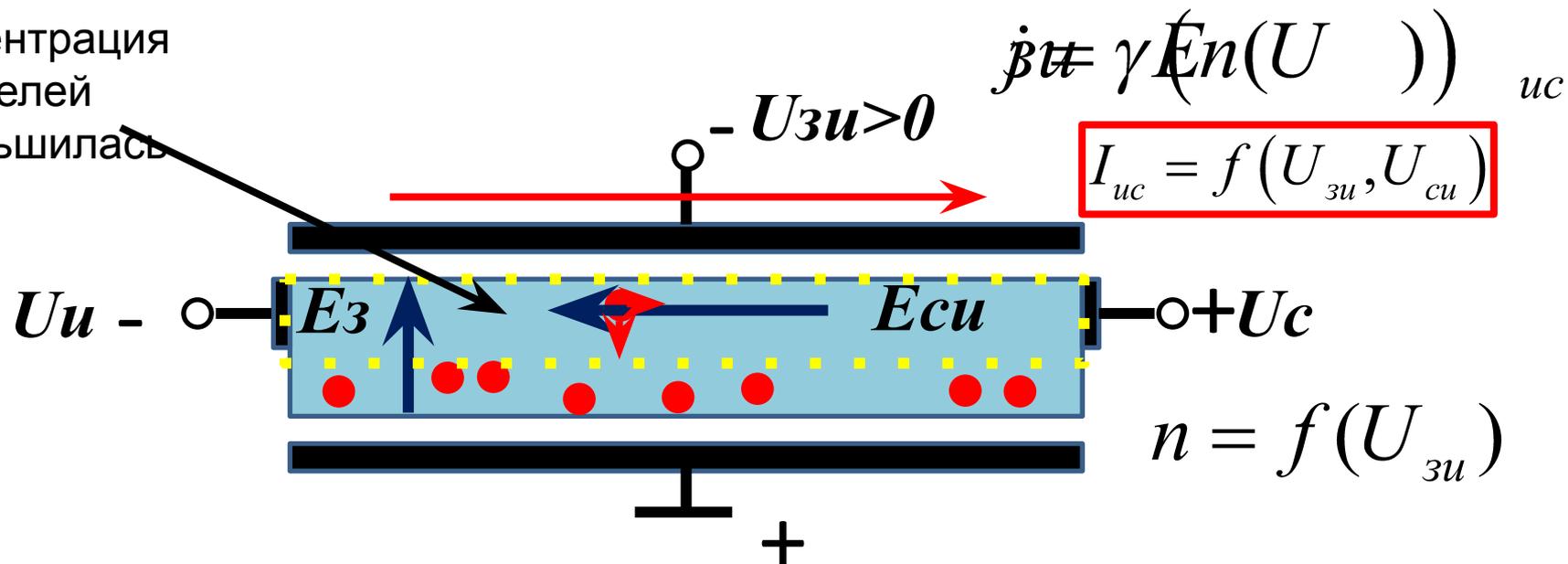
Особенность работы полевого транзисторов состоит в том, что:

1. Выходной ток управляется с помощью электрического поля
2. В процессе протекания электрического тока участвуют только основные носители заряда (униполярные транзисторы).

Основная идея
ПТ



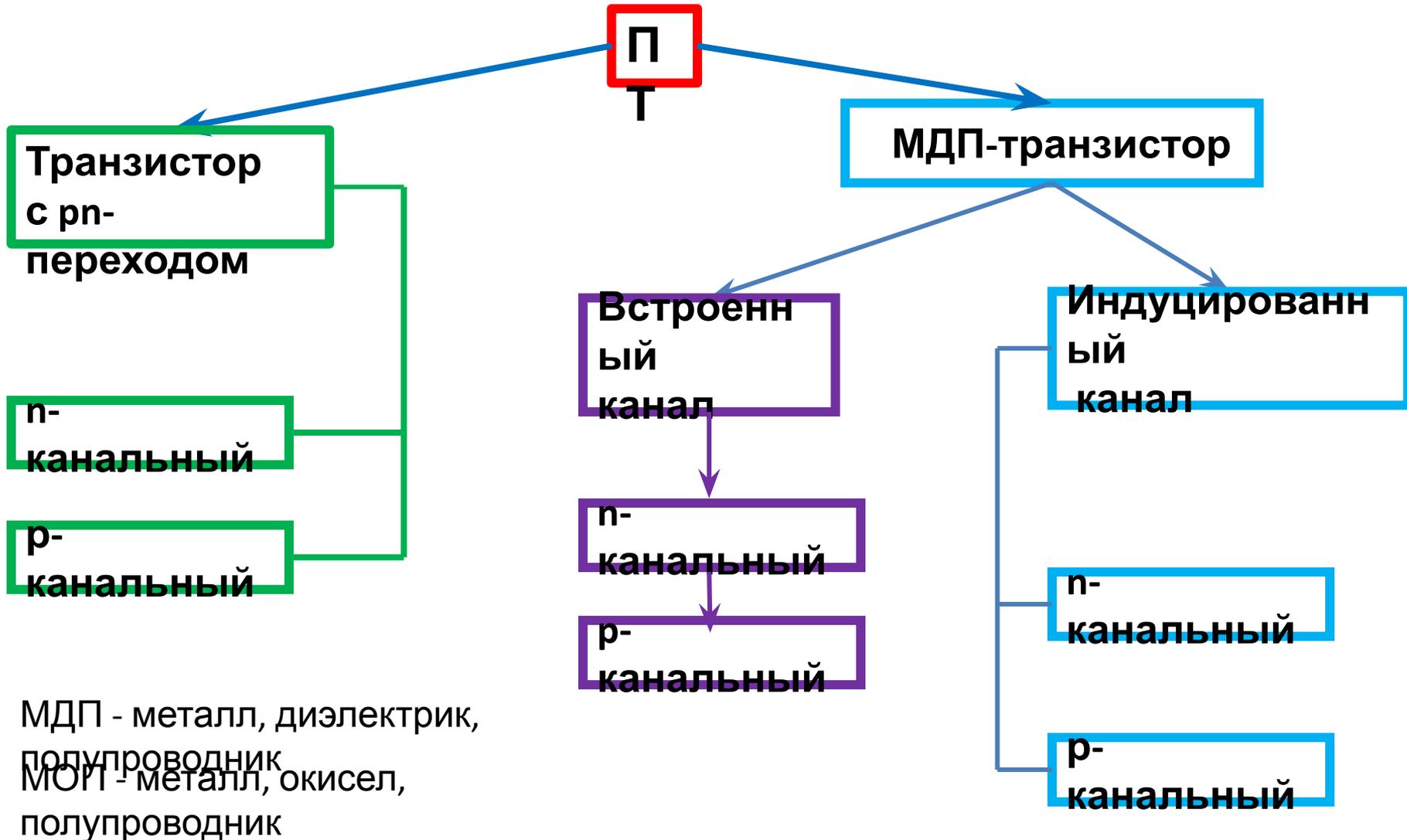
Концентрация
носителей
уменьшилась



Классификация ПТ в зависимости от того, как изолирован управляющий электрод от управляемого канала.

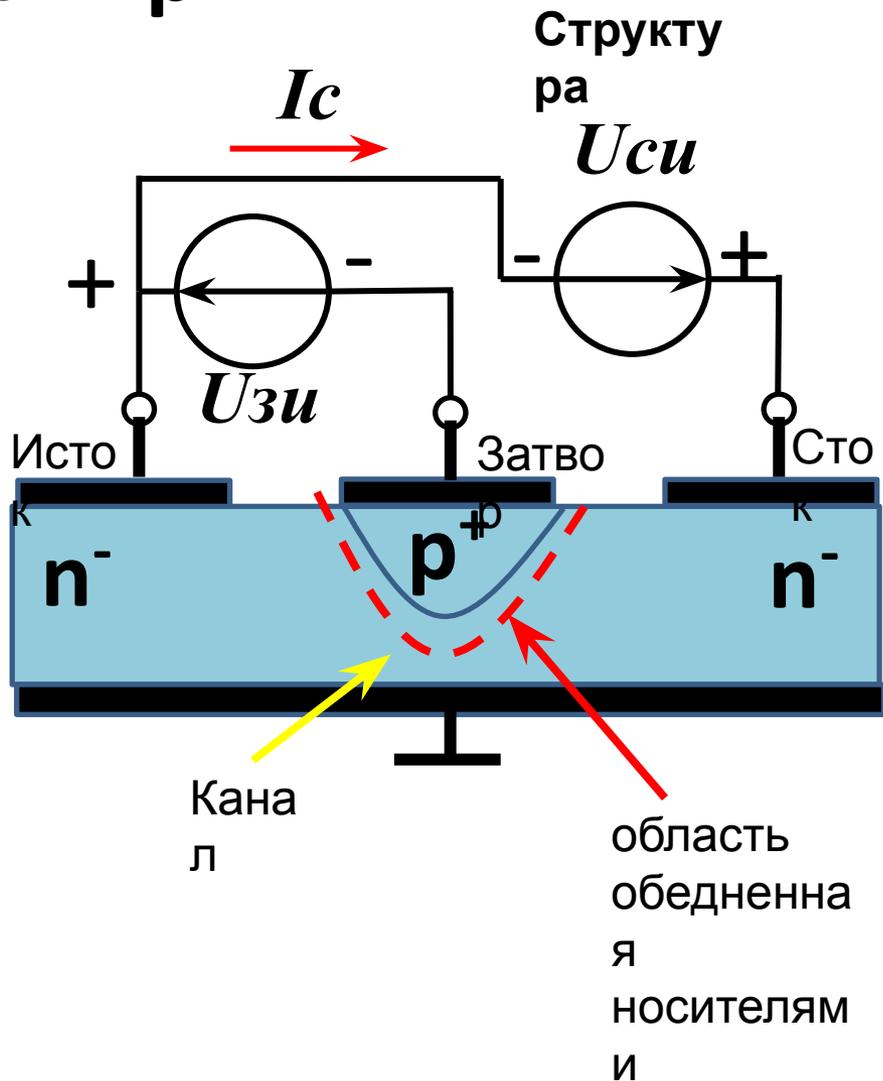
В зависимости от конструктивного исполнения проводящего канала и типа носителей заряда.

Классификация ПТ

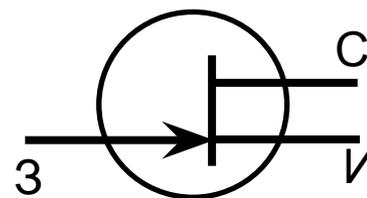


8.1 Полевой транзистор с рп-переходом

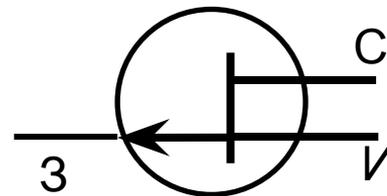
$$n^- \ll p^+$$



Обозначение



n-канал



p-канал

Принцип работы ПТ с рn-переходом

Управляющий р-п-переход включен в обратном направлении и имеет высокое сопротивление.

При изменении напряжения на затворе изменяется толщина обедненного слоя, а следовательно, изменяется сечение канала, проводимость канала и ток стока. Т.е. изменением напряжения на затворе можно управлять током стока.

При некотором напряжении $U_{зи}$ канал полностью перекрывается обедненной областью рп-перехода и ток стока I_c уменьшится до нуля. Это напряжение является параметром транзистора и называется **напряжением отсечки** тока стока $U_{зи.отс}$.

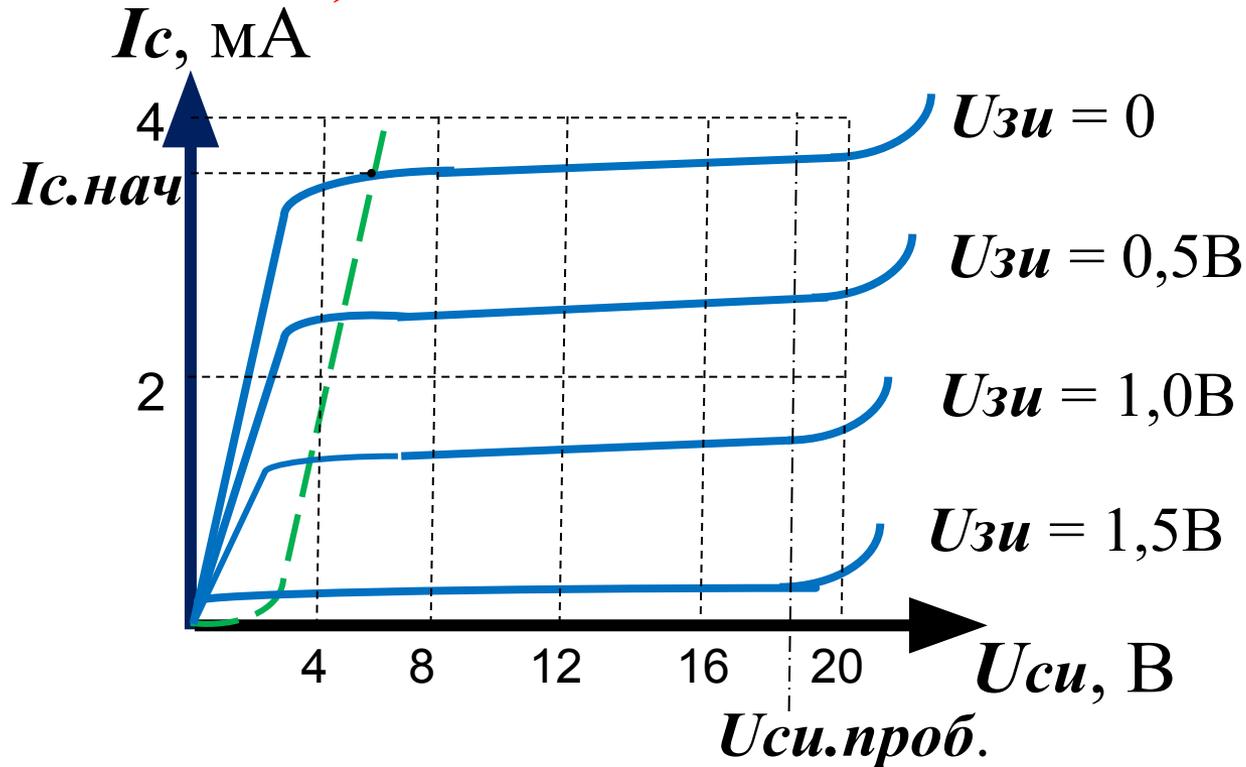
При небольших напряжениях сток-исток $U_{си}$ канал ведет себя как линейное сопротивление. По мере роста напряжения обедненный слой будет расширяться, причем около стока в большей мере, чем около истока. Сечение канала будет уменьшаться и рост тока замедлится.

Вольт-амперные характеристики ПТ с рп-переходом

Основными статическими характеристиками полевого транзистора являются:

- выходная или стоковая $I_c = f(U_{си}, U_{зи})$,
- передаточная или стокотворная $I_c = f(U_{зи}, U_{си})$.

Выходная ВАХ $I_c = f(U_{си}, U_{зи})$

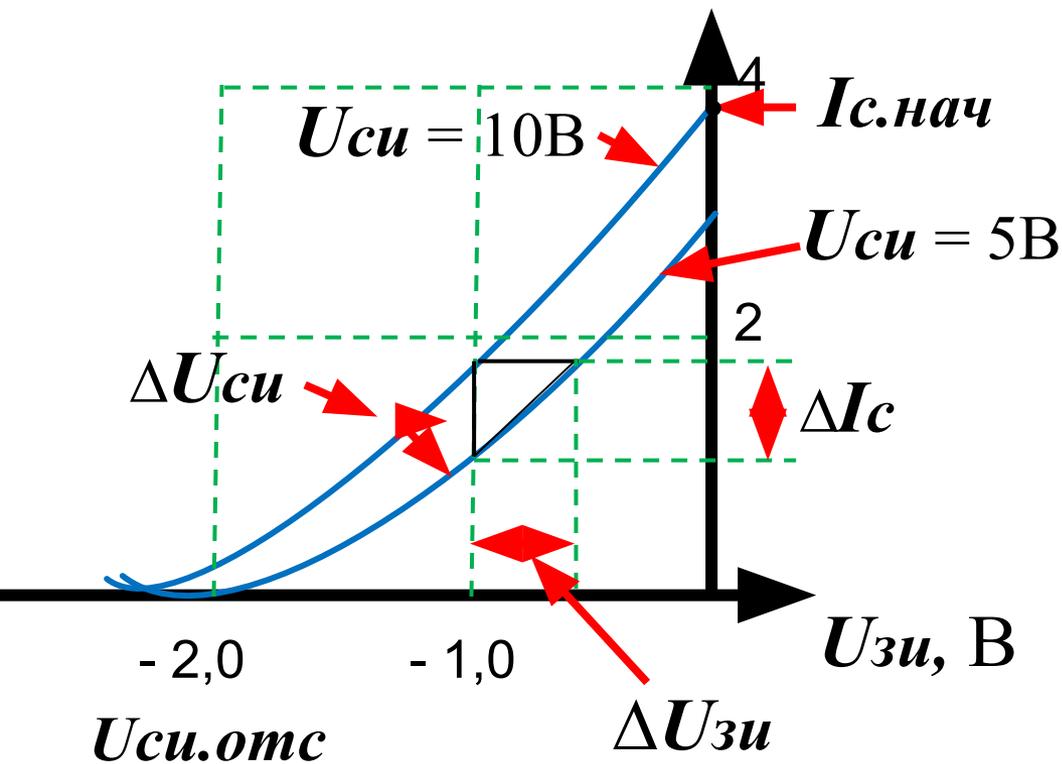


Стокозатворная характеристика $I_c = f(U_{зи}, U_{си})$

Эта характеристика хорошо описывается выражением

$$I_{cн} \neq I_c \cdot \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зи\text{отс}}}\right)^2$$

$I_c, \text{ мА}$



Дифф.
параметры
крутизна,

$$S = \frac{\left[\frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \right]}{\Delta U_{зи}} \Big|_{U_{зи} = const}$$

Дифф.
сопротивление
сток-исток, [Ом]

$$r_{си} = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \Big|_{U_{зи} = const}$$

Коэфф.
усиления
по напряжению

$$\mu = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}} \Big|_{I_c = const}$$

Связь
параметров

$$\mu = S \cdot r_{си}$$

Параметры транзистора можно определить экспериментально, как показано на входной ВАХ. Значение параметров зависит от точки ВАХ, в которой они определялись.

Возможны три схемы включения полевого транзистора:
с общим истоком, общим стоком, общим затвором.
Наибольшее применение находит схема **ОИ**.

В рабочем режиме в цепи затвора протекает ток обратносмещенного р-n-перехода, составляющий единицы наноампер.

Полевой транзистор имеет **высокое входное сопротивление**, что является одним из основных его достоинств.

8.2 МДП-транзисторы

В транзисторах этого типа затвор отделен от полупроводника (канала) слоем диэлектрика. Если используется двуокись кремния SiO_2 , то транзисторы обозначают аббревиатурой МОП.

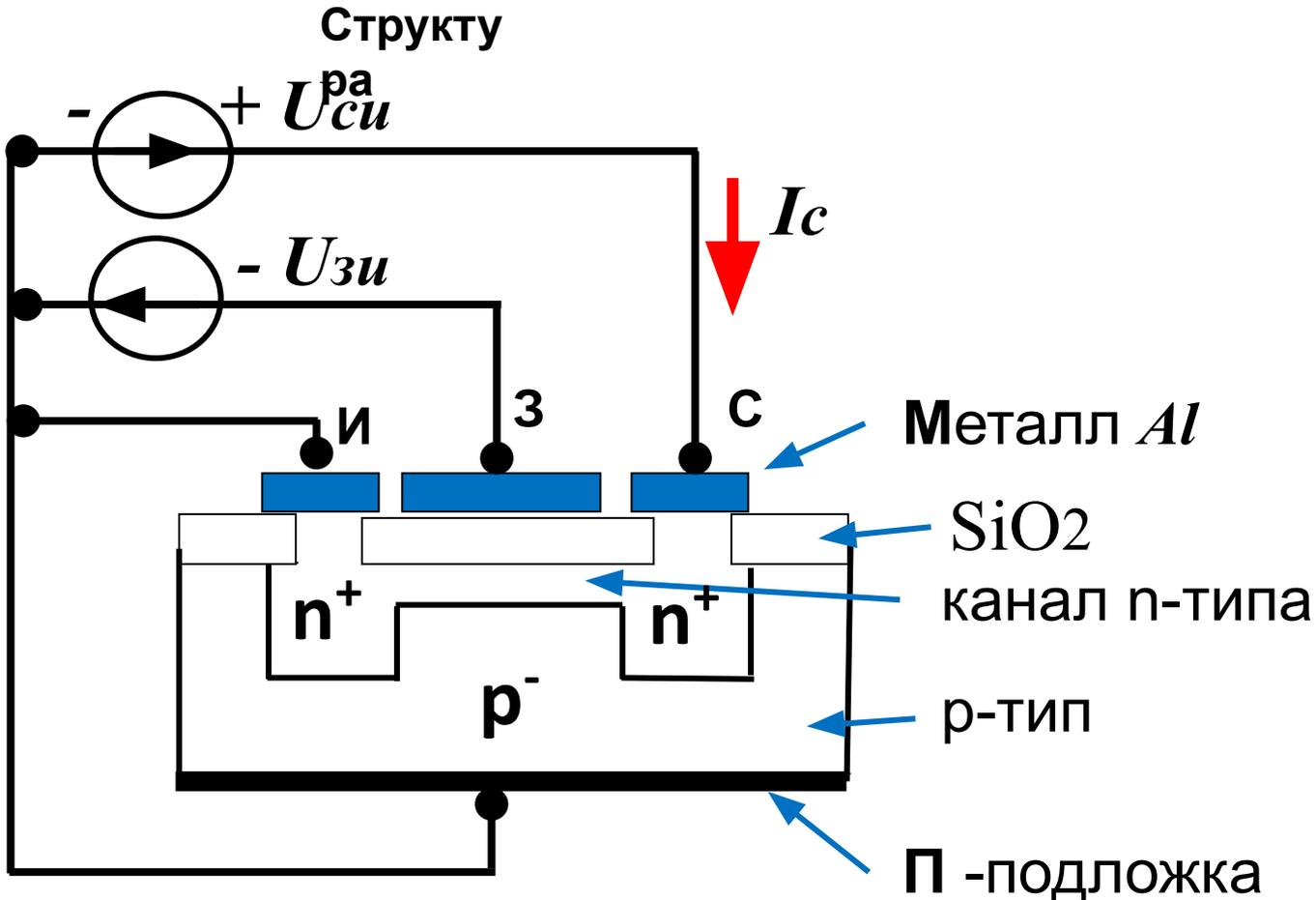
МДП транзисторы делятся на два типа:

- со встроенным каналом (обедненного типа),
- с индуцированным каналом (обогащенного типа).

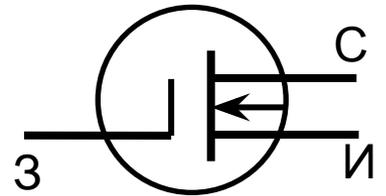
Канал может быть n-типа или p-типа.

Особенность МДП-транзисторов – очень высокое входное сопротивление, поскольку управляющий затвор отделен от остальной структуры слоем изолятора.

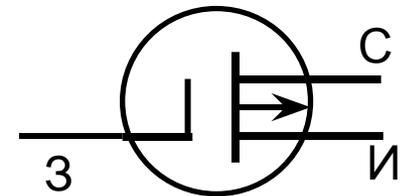
МДП-транзистор со встроенным каналом



Обозначение



n-канал



p-канал

Транзистор может работать в двух режимах:

- обеднения,
- обогащения.

Режим обеднения.

На затвор подается **отрицательное** напряжение по отношению к истоку.

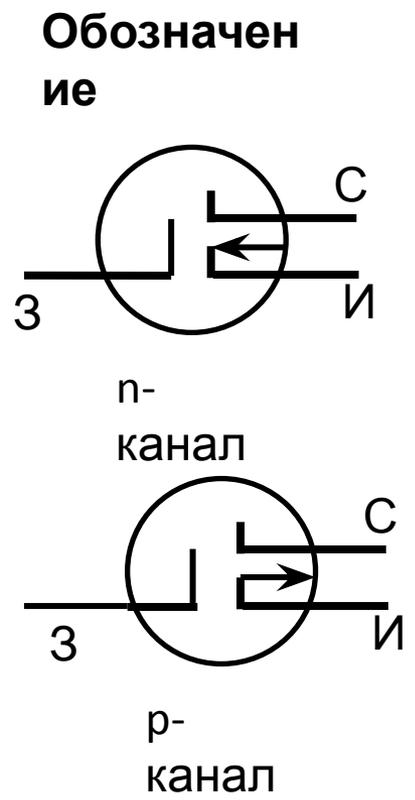
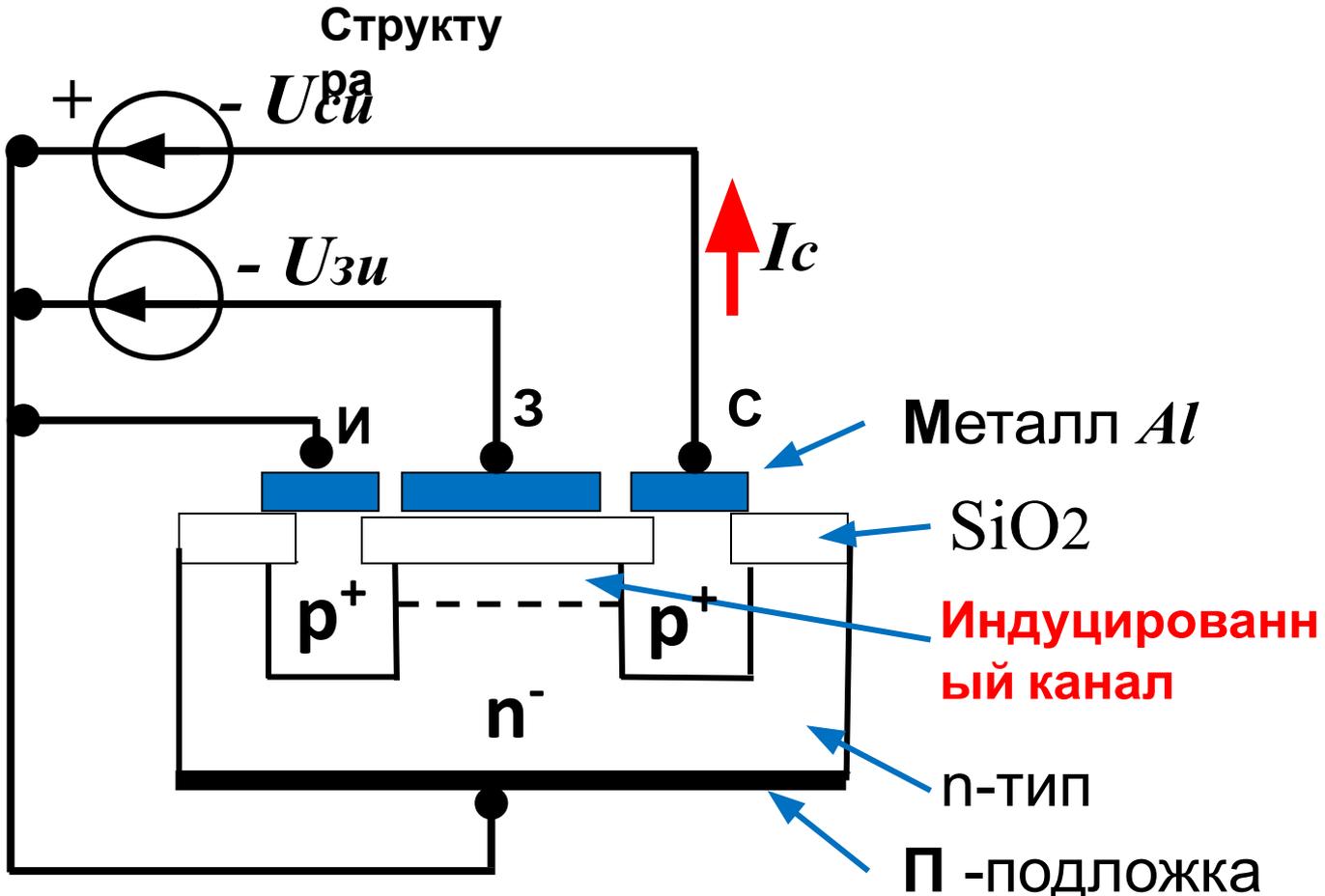
Под действием электрического поля электроны выталкиваются из подзатворной области, канал обедняется носителями и ток стока уменьшается.

Режим обогащения.

На затвор подается **положительное** напряжение по отношению к истоку.

Под действием электрического поля электроны втягиваются в подзатворную область, канал обогащается носителями и ток стока увеличивается.

МДП-транзисторы с индуцированным каналом



Транзистор может работать только в режиме обогащения.

До некоторого напряжения *$U_{зи.пор}$* канал отсутствует и транзистор закрыт.

Режим обогащения.

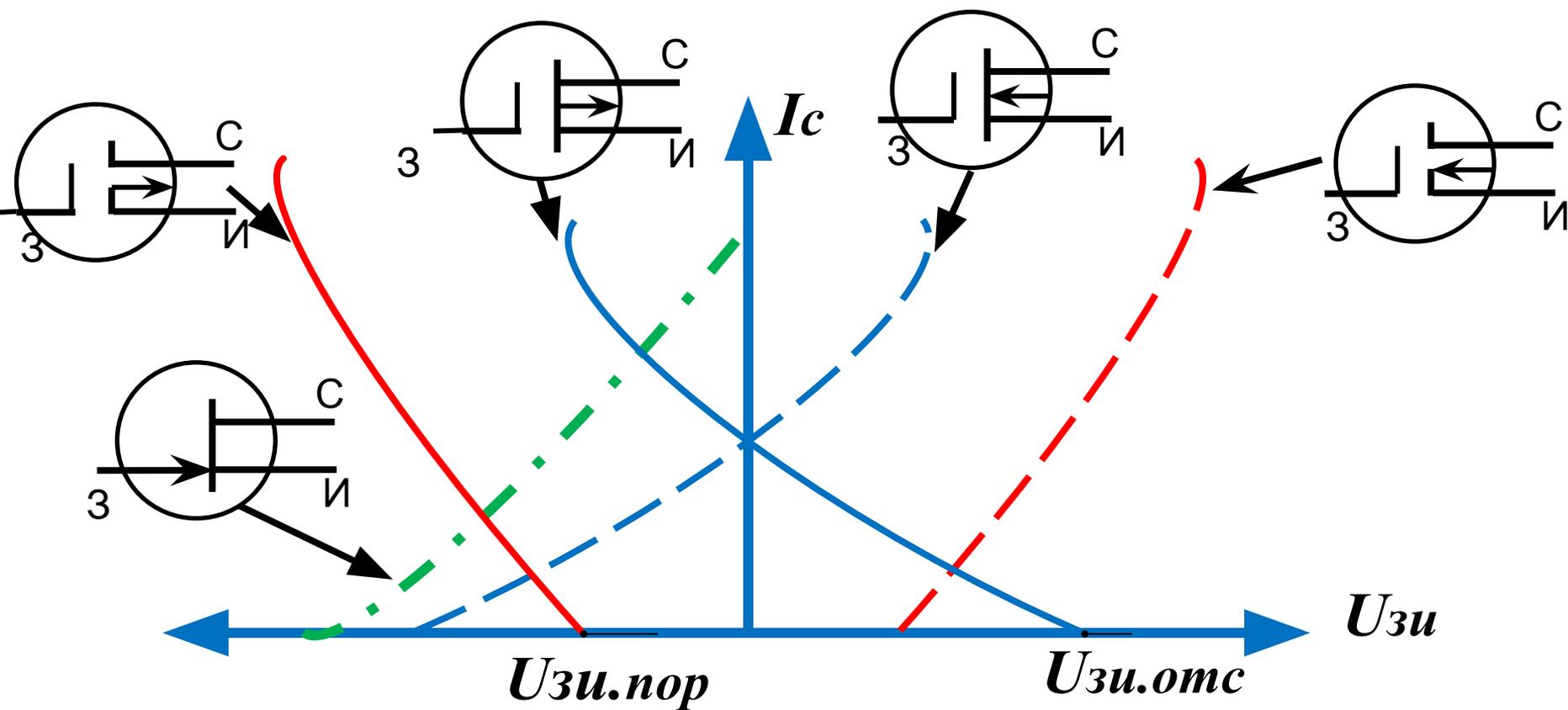
На затвор подается отрицательное напряжение по отношению к истоку.

Под действием электрического поля электроны выталкиваются из подзатворной области, канал обогащается носителями р-типа и образуется канал, начинает протекать ток стока.

Обобщенная стокозатворная характеристика транзисторов различного типа

р-канал

п-канал



Флэш-память на основе МОП-транзистора

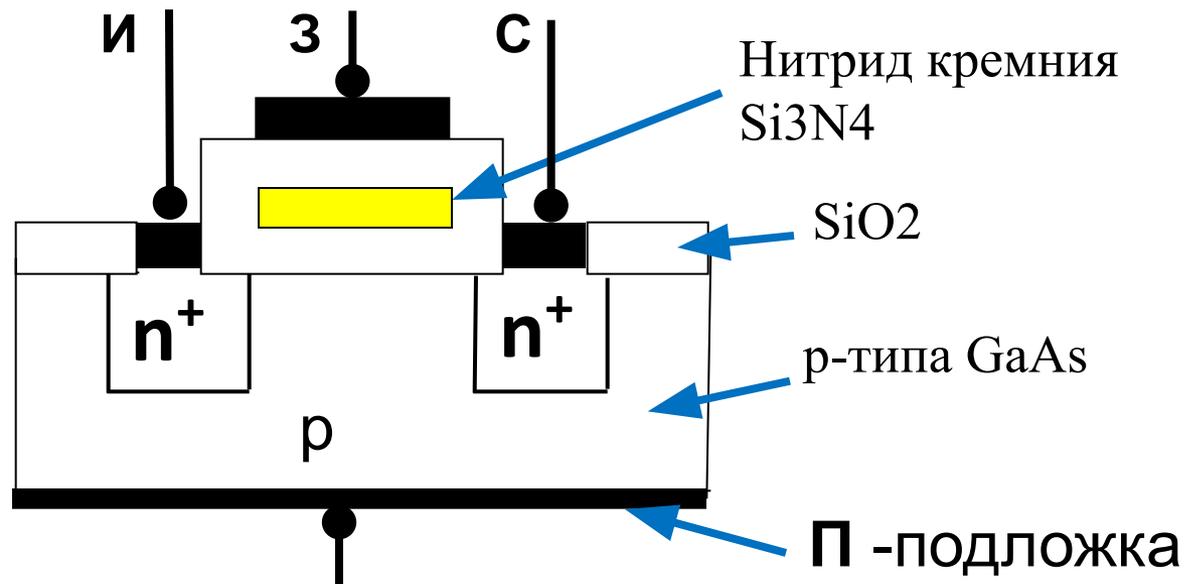
Используются транзисторы с индуцированным каналом.

Предназначены для создания быстродействующей программируемой запоминающей ячейки флэш-памяти.

Позволяет производить электрическую запись и стирание одного бита информации.

Память является энергонезависимой. Информация не стирается при отключении питания.

Упрощенная структура ячейки флэш-памяти



Принцип

При **записи информации** в ячейку памяти на затвор подается импульс напряжения.

В результате происходит пробой тонкого слоя изоляции. Электроны получают дополнительную энергию и туннельным эффектом переходят в плавающий затвор. Затвор заряжается отрицательно. Пороговое напряжение увеличивается.

При обращении к транзистору такой ячейки он будет восприниматься как выключенный (ток стока равен нулю). Это соответствует записи одного бита – единицы.

При **стирании информации** электроны уходят с плавающего затвора (также в результате туннелирования) в область истока.

Транзистор в этом случае воспринимается при считывании информации как включенный. Что соответствует записи логического нуля.

Циклов записи-считывания может быть сотни тысяч.

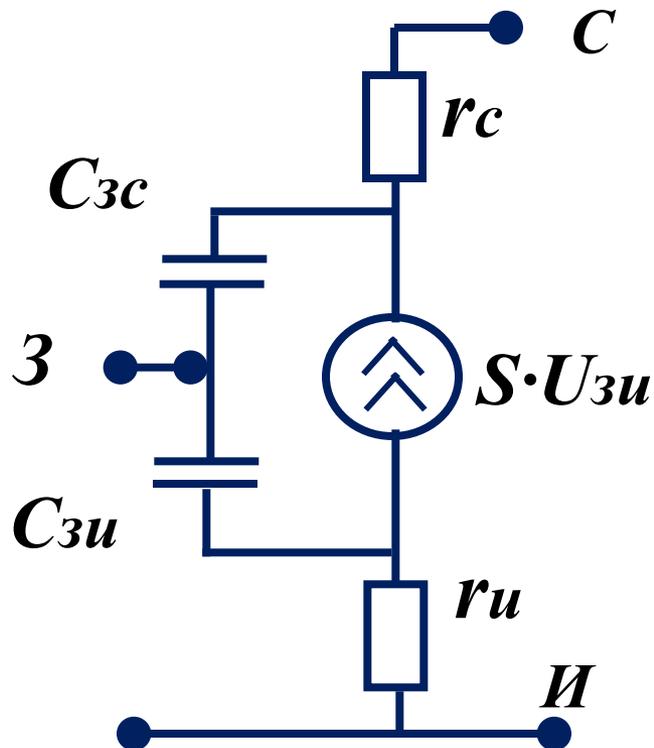
Записанное состояние ячейки может храниться десятки лет.

8.2 Модели полевого транзистора

Используются в основном две модели:

- Физическая эквивалентная схема,
- Схема в Y- параметрах.

Наиболее универсальна физическая эквивалентная схема. Она учитывает переменную составляющую токов и напряжений.



S – крутизна,

r_c – сопротивление участка канала от стока до середины,

r_u – сопротивление участка канала от середины до истока.

$C_{зс}$, $C_{зи}$ – распределенные емкости затвор-канал.

8.3 Усилитель на полевом транзисторе

В зависимости от того, какой из электродов транзистора является общей точкой для входного и выходного напряжений, различают три основные схемы включения ПТ: схема с общим истоком (ОИ), схема с общим стоком (ОС) и схема с общим затвором (ОЗ). Наибольшее распространение для усиления сигналов получила схема с ОИ.

Схема резистивного усилителя с ОИ на основе полевого транзистора с управляющим рп-переходом и каналом n-типа.

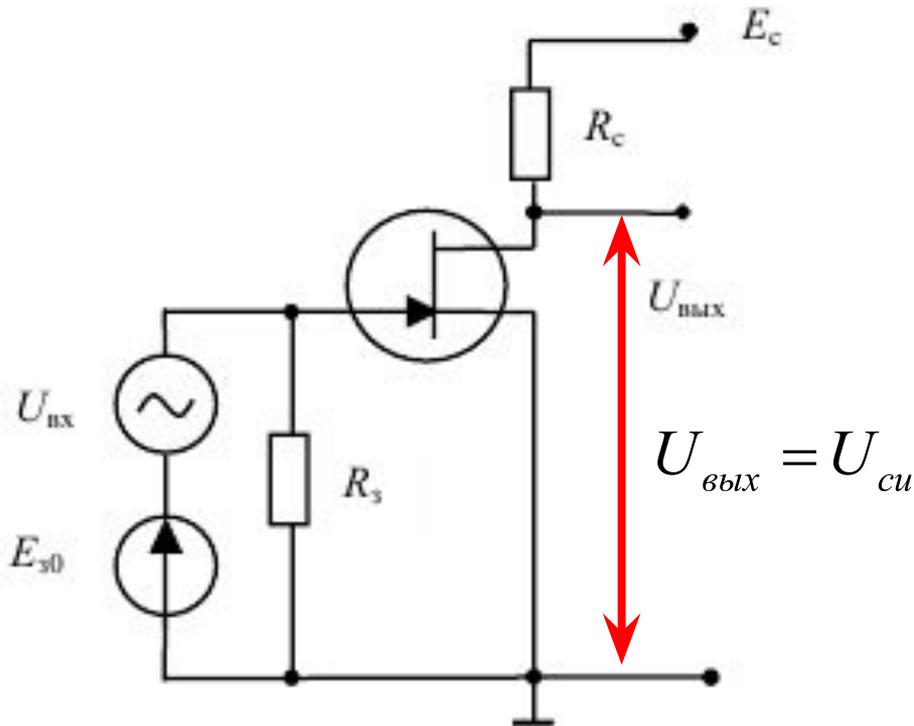
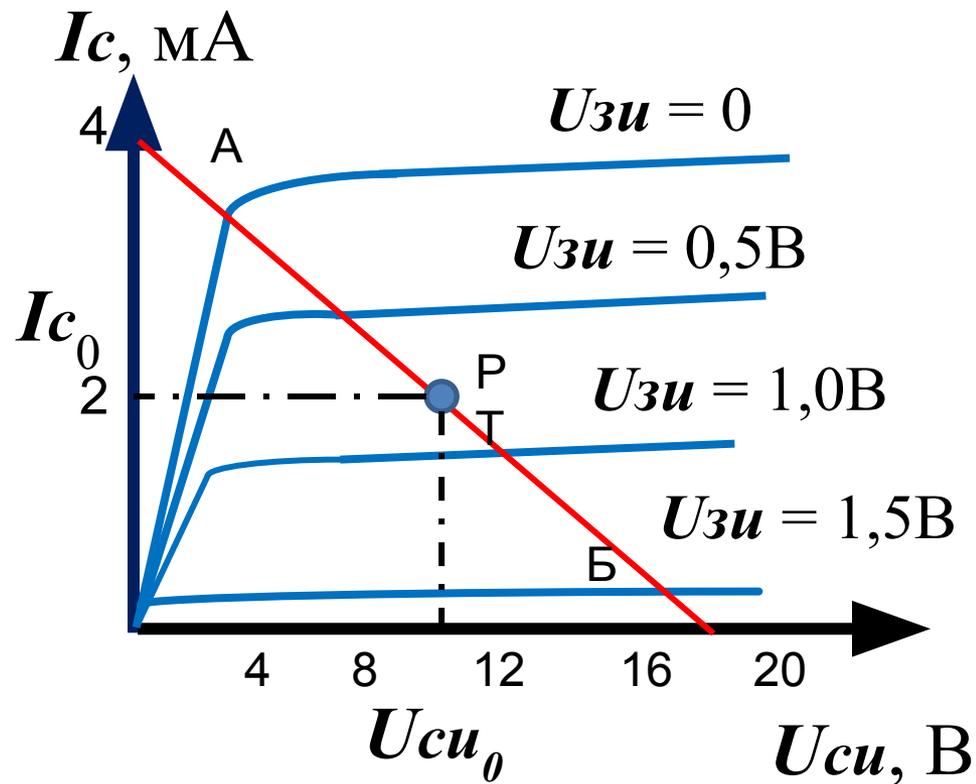
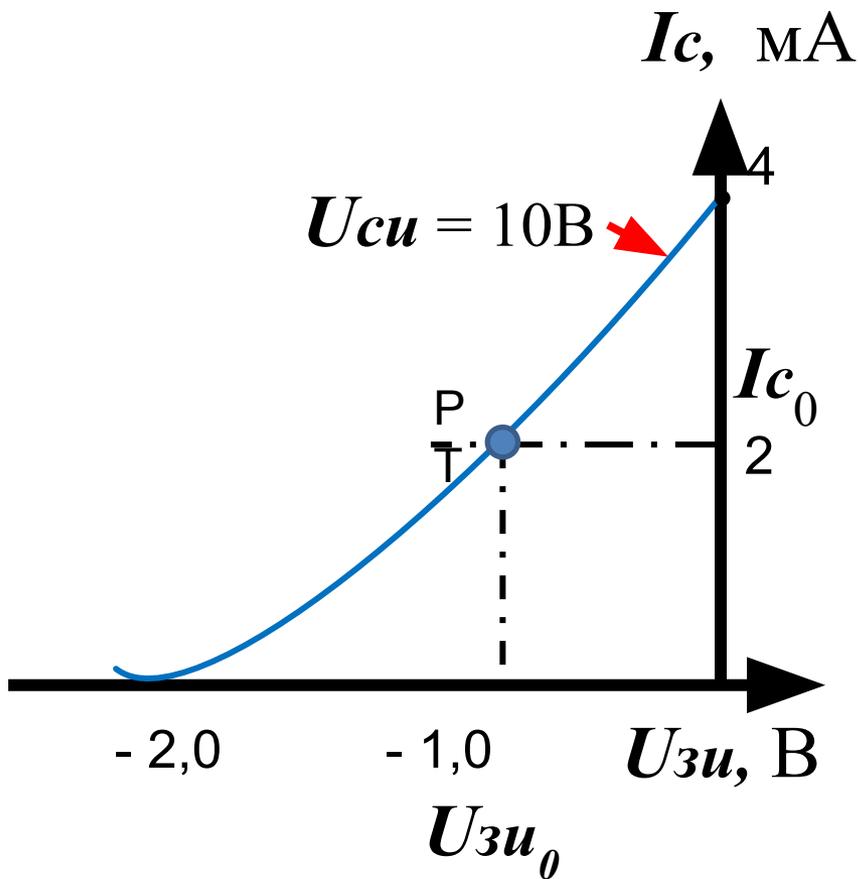


Схема содержит источник питания цепи стока E_c , источник смещения E_{z0} в цепи затвора, в которой действует также источник усиливаемого напряжения $U_{вх}$, резистор нагрузки R_c в цепи стока и резистор утечки R_z в цепи затвора.

Расчет по постоянному току (напряжениям)- статический режим.

$$E_{cu} = U_c + R I$$



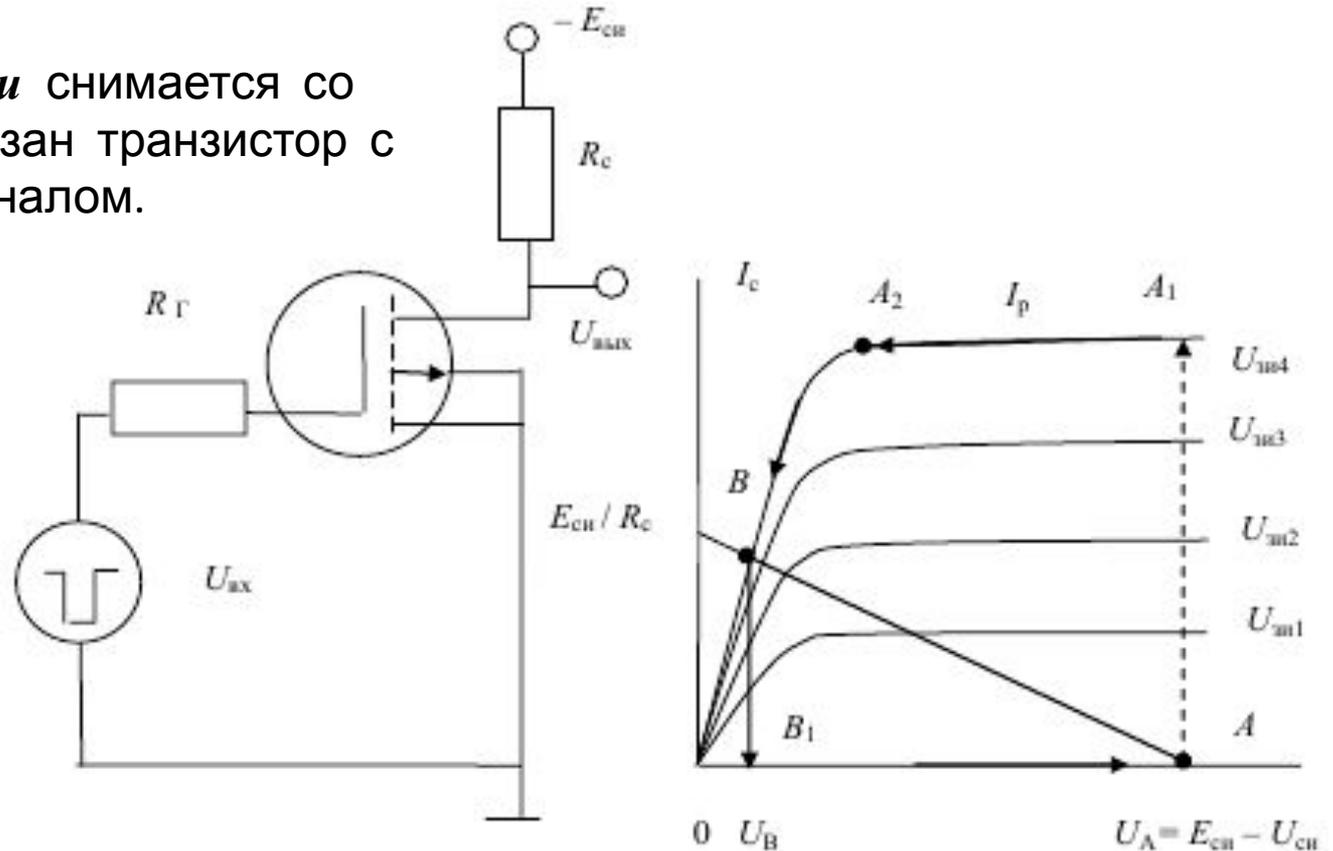
$$K_U = S \cdot R_c$$

8.4 Ключевой элемент на полевом транзисторе

Полевые транзисторы, имеющие индуцированный канал, находят широкое применение в качестве **ключевых элементов** в устройствах цифровой электронной техники. Эти транзисторы обладают четко выраженным уровнем порогового напряжения затвора $U_{пор}$. Если управляющее напряжение $U_{вх}$, подаваемое на затвор, меньше порогового, то транзистор закрыт, если больше порогового, то транзистор открыт.

Управляющее напряжение $U_{вх} = U_{зи}$ подается на затвор.

Выходное $U_{вых} = U_{си}$ снимается со стока. На схеме показан транзистор с индуцированным р-каналом.



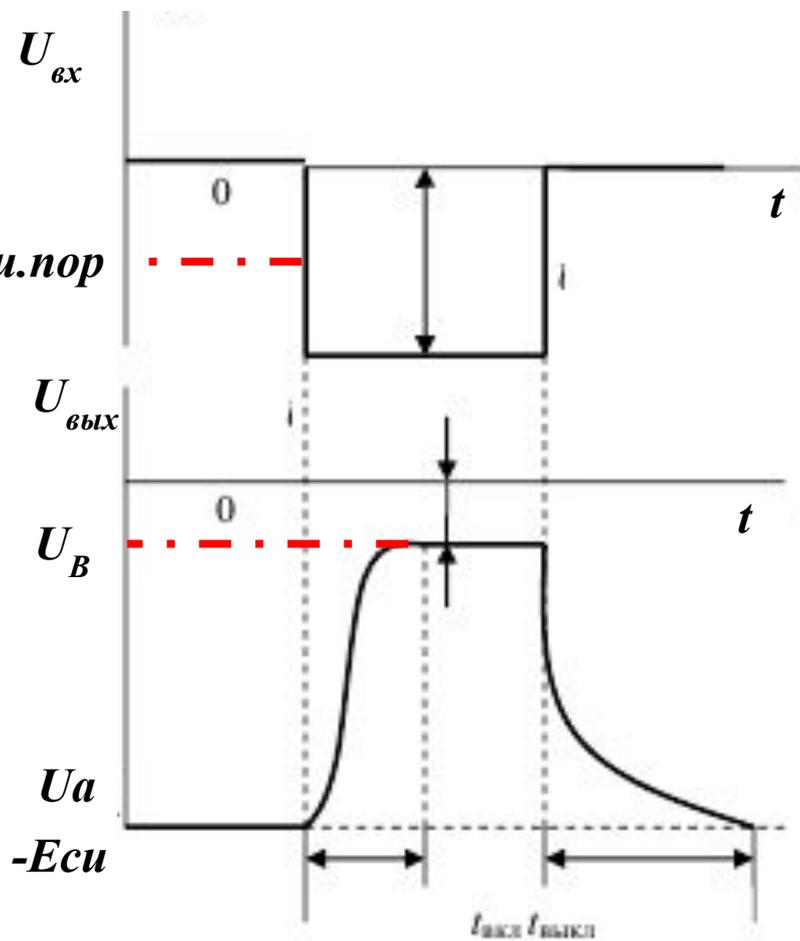
Состояние А – ключ закрыт, через транзистор протекает пренебрежимо малый ток. Выходное напряжение практически равно напряжению источника питания

$U_{вых} = U_A = E_{си}$, если сопротивление нагрузки резистора R_c не очень большое. В этом режиме входное напряжение должно быть меньше порогового: $|U_{вх}| < |U_{зи.пор}|$.

Состояние В – ключ открыт, через транзистор протекает полный рабочий ток. В этом режиме входное напряжение должно быть больше порогового:

$|U_{вх}| > |U_{зи.пор}|$. Выходное напряжение $U_{вых} = E_{си} - R_c I_c$ уменьшается.

Выходное напряжение открытого ключа тем меньше (что желательно), чем выше сопротивление резистора R_c и больше ток транзистора в режиме открытого канала.



Основные достоинства ПТ

- высокоомный вход, допускающий управление по напряжению.
- высокое быстродействие, обусловленное отсутствием в канале неравновесных носителей заряда и малыми величинами входной и выходной емкостей (время переключения 1–0,4 нс);
- сочетание высокого быстродействия с большими напряжениями и токами переключения (до 10 А за 15 нс);
- низкое сопротивление открытого канала, обеспечивающее коммутацию сигналов в низкоомных цепях, например в коаксиальном кабеле с волновым сопротивлением 50 Ом.

Важнейшим недостатком полевых транзисторов является их **чувствительность к статическому электричеству**. Поскольку изоляционный слой диэлектрика на затворе чрезвычайно тонкий, иногда даже относительно невысокого напряжения бывает достаточно, чтоб его разрушить. А разряды статического электричества, присутствующего практически в каждой среде, могут достигать несколько тысяч вольт.

9. Операционные усилители

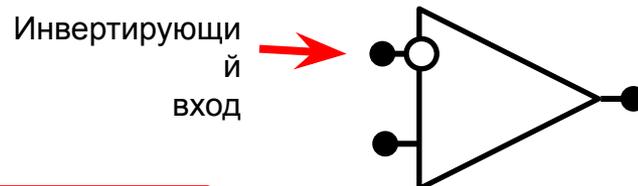
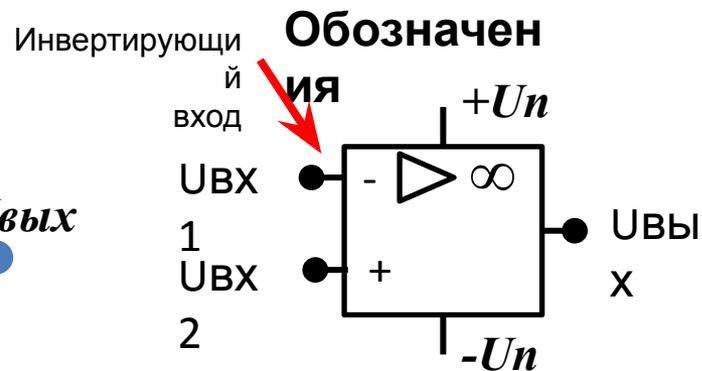
Операционный усилитель — устройство с большим коэффициентом усиления $K_0 = 10^5 - 10^6$ в широкой полосе частот, начиная с нулевой частоты. Входное сопротивление ОУ имеет большую величину $R_{вх} = 10^6 - 10^{12}$ Ом, выходное $R_{вых}$ — десятки Ом. Приближенно ОУ можно рассматривать как источник напряжения, управляемый напряжением.

- усиление сигналов
- математические операции над сигналами: умножение, сложение, интегрирование, дифференцирование и т.д.
- сравнение сигналов (компараторы)
- генерация сигналов различной формы и т.д.

Структура ОУ

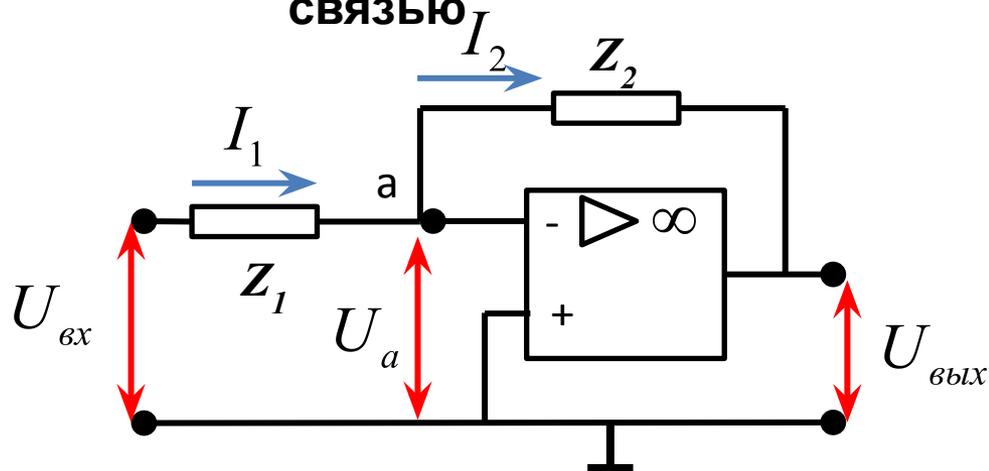


Идеальный
 $K_0 = \infty, R_{вх} = \infty, R_{вых} = 0$



$$U_{вых} = K_0 (U_{вх2} - U_{вх1})$$

ОУ с отрицательной обратной СВЯЗЬЮ



Идеальный

ОУ $I_1 = I_2$

$$\frac{(U_{вх} - U_a)}{Z_1} = \frac{(U_a - U_{вых})}{Z_2}$$

Замен

$$U_{а\text{ вых}} = -K_0 U_a$$

$$\frac{(U_{вх} + U_{вых}/K_0)}{Z_1} = -\frac{U_{вых} (1/K_0 + 1)}{Z_2}$$

Замен

$$K_{OY} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$$

$$K_{OY} = \frac{-Z_2}{Z_2/K_0 + Z_1(1/K_0 + 1)}$$

Учте

$$K_0^M \gg 1$$

$$K_{OY} \approx \frac{-Z_2}{Z_1}$$

9.1 Функциональные элементы на базе ОУ

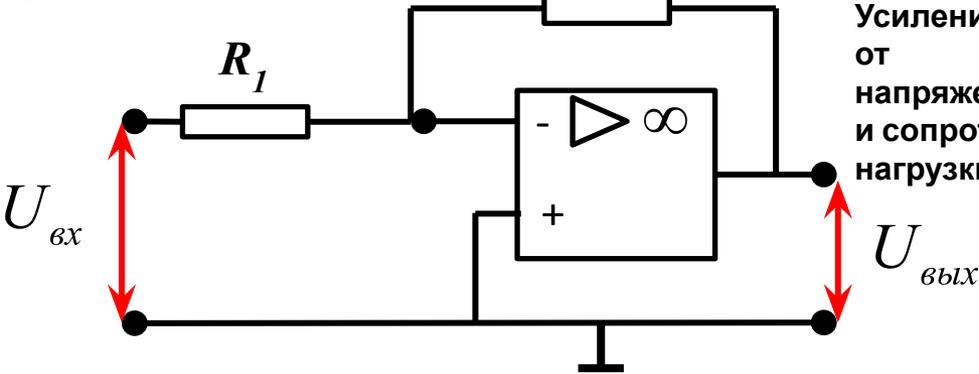
$$Z_1 = R_1, Z_2 = R_2$$

Усиление не зависит от напряжения питания и сопротивления нагрузки

$$K_{OY} \approx \frac{-R_2}{R_1}$$

$$U_{вых}(t) = -\frac{R_2}{R_1} U_{вх}(t)$$

Масштабный усилитель



Интегратор

$$Z_1 = R_1, Z_2 = C$$

Для гармонических токов и напряжений с частотой ω

$$\mathcal{E}_2 = \rightarrow \frac{1}{j\omega C}$$

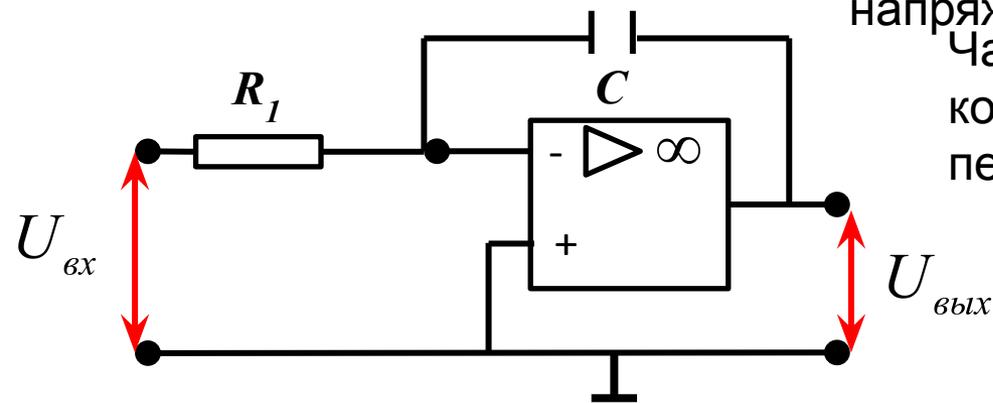
Частотный коэфф. передачи

$$K_{OY}(\omega) \approx \frac{-1}{j\omega R_1 C}$$

Во временной области

$$U_{вых}(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int U_{вх}(t) dt$$

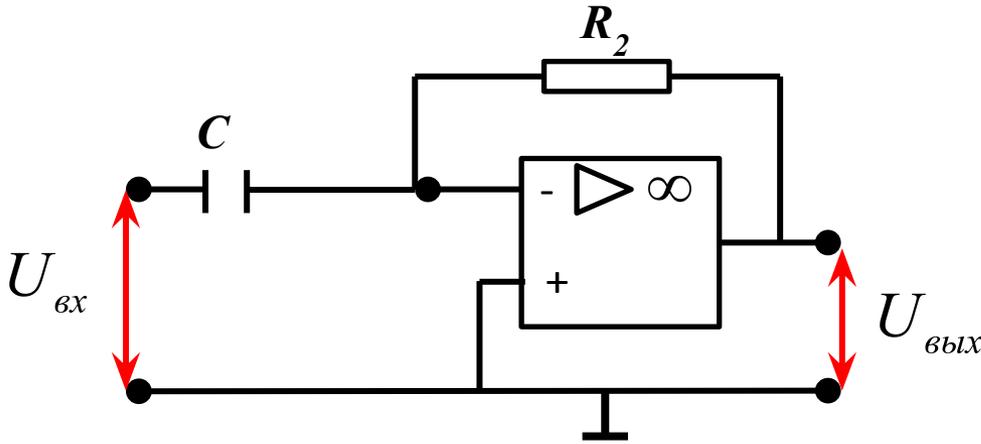
$$R_1 C = \tau \approx 100 T_{имп}$$



Дифференциат

ор

$$Z_1 = Z, R_2 = R_2$$



Для гармонических токов и напряжений с частотой ω

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C}$$

Частотный коэфф.

$$K_{OY}(\omega) \approx -j\omega R_2 C$$

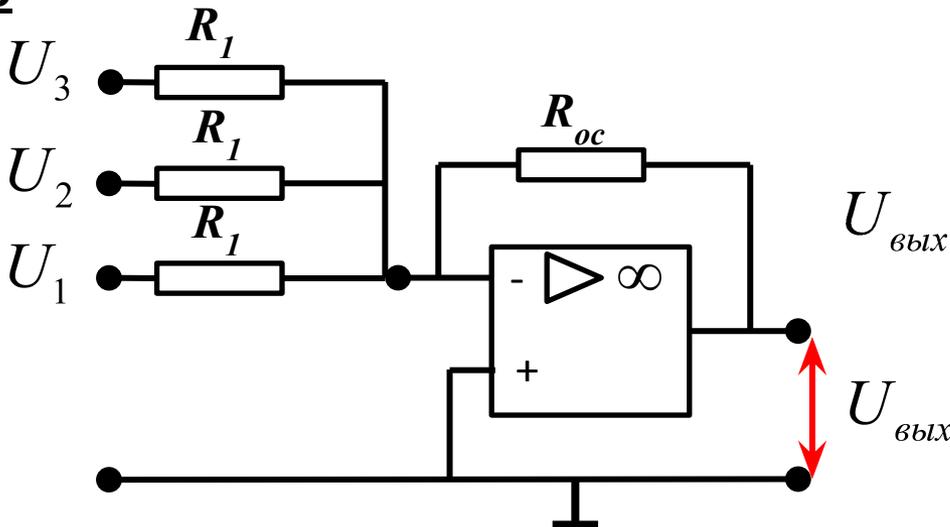
Во временной области

$$U_{вых}(t) = -R_2 C \frac{dU_{вх}(t)}{dt}$$

$$R_2 C = \tau \approx \frac{1}{100} T_{имп}$$

Сумматор

р

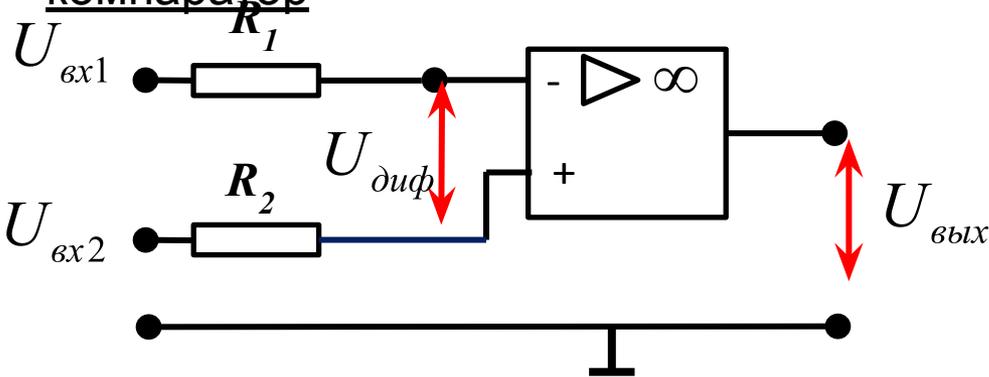


$$U_{вых}(t) = -\frac{R_{oc}}{R_1} (U_1(t) + U_2(t) + U_3(t))$$

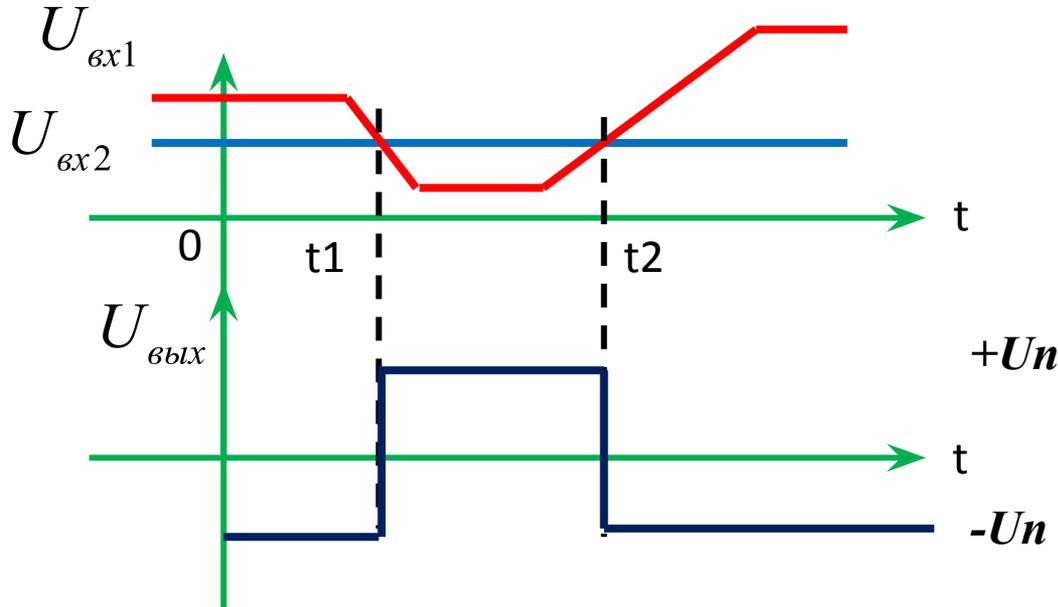
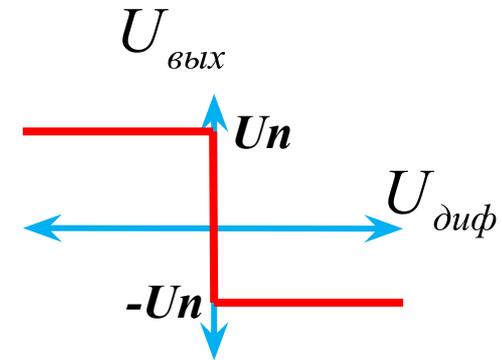
Компаратор

Устройство сравнения величин двух сигналов для фиксации факта и момента их равенства

Однопороговый двухвходовой компаратор



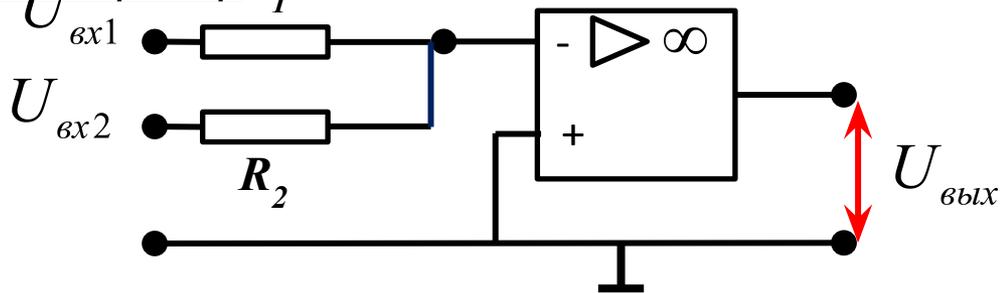
$$U_{\text{вых}} \approx U_n \cdot \text{sign}(U_{\text{дифф}})$$



На выходе компаратора формируется двухуровневый дискретный сигнал в зависимости от величины и знака рассогласования входных напряжений

Элемент связи между аналоговыми и цифровыми устройствами

Однопороговый одноходовый компаратор



Дан
0

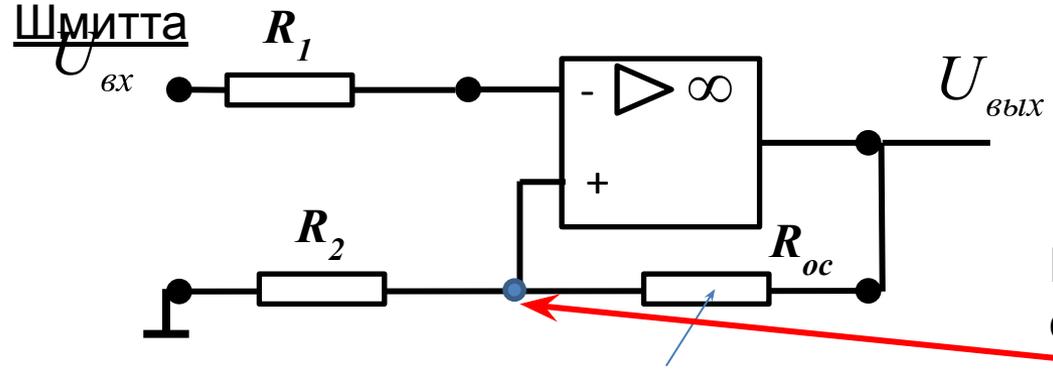
$$U_{vx1} = E = const$$

$$U_{vx2} = U_0 \cos(\omega t)$$

Найти
и

$$U_{вых}(t)$$

Гистерезисный компаратор. Триггер Шмитта



Положительная обратная
связь
(ПОС)

Коэфф.
ПОС

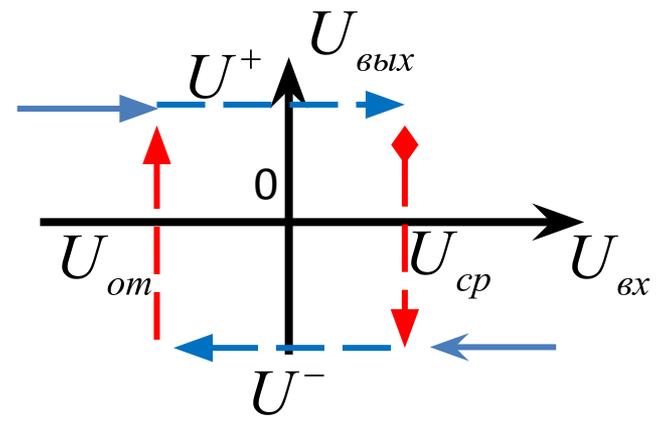
$$\beta = \frac{R_2}{R_2 + R_{oc}} > \frac{1}{K_0}$$

Два устойчивых состояния на
выходе $U_{вых} = U^+$ и $U_{вых} = U^-$

Напряжения срабатывания и
отпирания

$$U_{сп} = \beta U^+, U_{от} = -\beta U^-$$

Достоинство двухпорогового
компаратора:
высокая помехоустойчивость



Мультивибраторы

Мультивибратор-генератор релаксационных колебаний на основе двухэлементного усилителя с положительной обратной связью через емкость.

Классификация
мультивибраторов

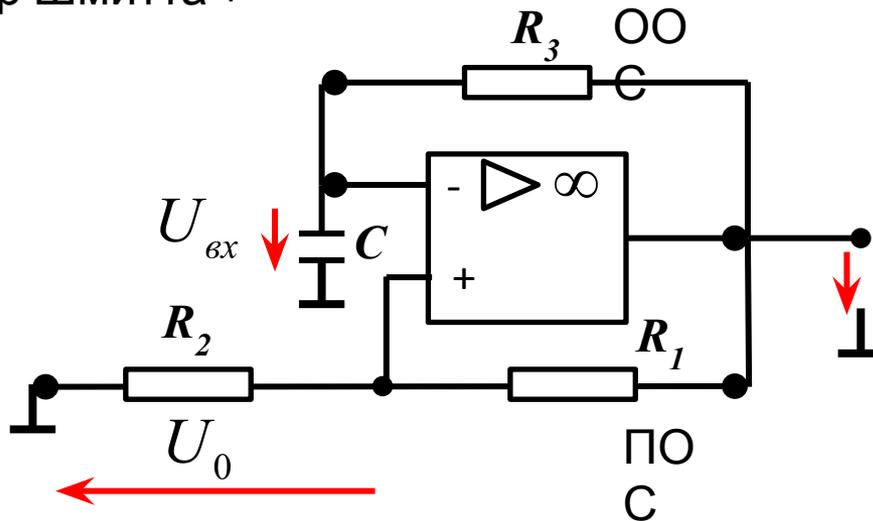
Автоколебательные
Нет состояний
устойчивого
равновесия

Ждушие
е
Одно состояние устойчивого
равновесия и одно
неустойчивого

Назначенные
Генерация сигналов сложной
формы
Прямоугольных импульсов
Пилообразного напряжения

Генератор прямоугольных импульсов (меандра)

Триггер Шмитта + ООС



$$\beta = \frac{R_2}{R_2 + R_1} \quad (\text{ПО С})$$

Два состояния напряжений на выходе

или $U \neq U^+ \quad U_{\text{вых}} = -$

$$U_0 = \beta U^+, \quad U_0 = -\beta U^-$$

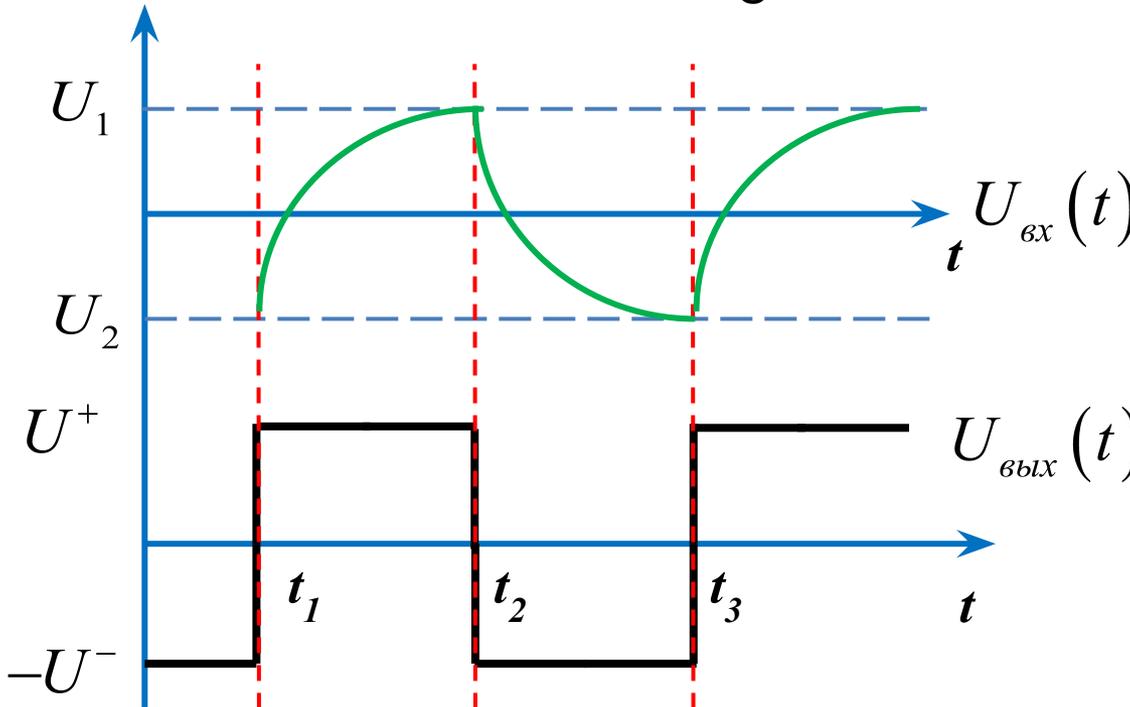
Услови $U_{\text{вых}} - U_0 = 0$
е

$$U_1 = \beta U^+, \quad U_2 = -\beta U^-$$

Релаксационный генератор

Период колебаний

$$T = 2R_3C \ln \left(2 + \frac{2R_1}{R_2} \right)$$



Основы цифровой электроники

Элементы алгебры логики

Вводится 2

понятия

истина	логическая 1
ложь	логический 0

Все переменные и функции могут принимать в любой момент времени значение 0 и 1 (бинарная или двоичная логика)

В цифровой электронике

1 -высокий уровень
напряжения
0- низкий уровень

Конкретные величины уровней напряжений определяются технологиями реализаций логических элементов (биполярные транзисторы, МОП-транзисторы)

$$y_i = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

y_i

Логическая

функция

x_n

Аргументы логической функции

Основные логические операции

Логическое сложение

(дизъюнкция)

$$y = x_1 + x_2 = x_1 \vee x_2$$

Обозначени

\oplus

+

Операц

ИЛ

OR

И

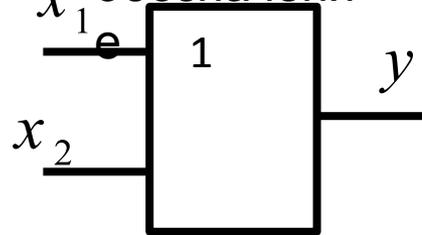
Таблица

x_1	ИСТИННОСТИ		x_2	y
0			0	0
0			1	1
1			0	1
1			1	1

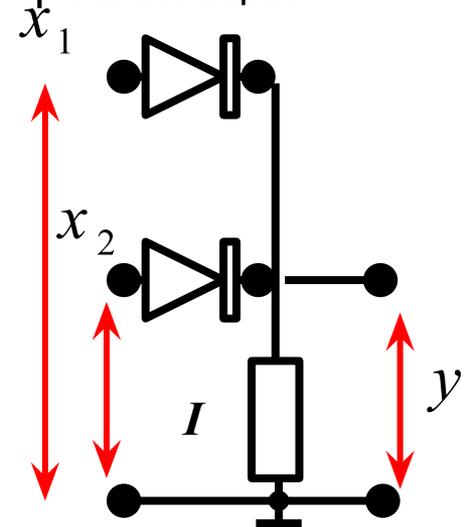
Графическо

е

обозначени



Схемная реализация



$$U=RI$$

Логическое умножение (конъюнкция)

$$y = x_1 \bullet x_2 = x_1 \wedge x_2$$

Обозначени

\bullet \wedge \bullet

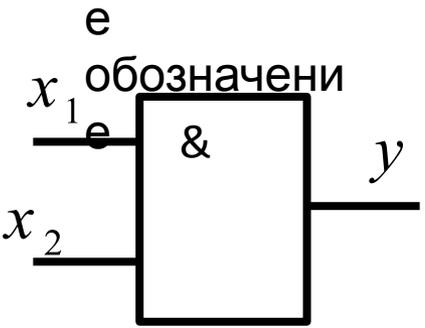
Операци

$\&$ AND

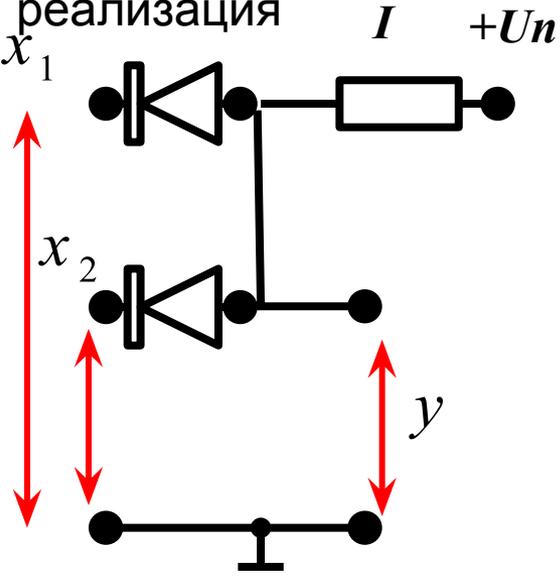
Таблица

x_1	ИСТИННОСТИ x_2	y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Графическо



Схемная реализация



$$U = U_n - RI$$

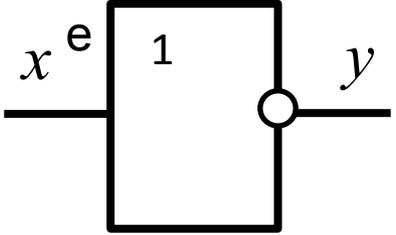
Логическая инверсия
 $y = \bar{x}$

Таблица истинности

x	y
0	1
1	0

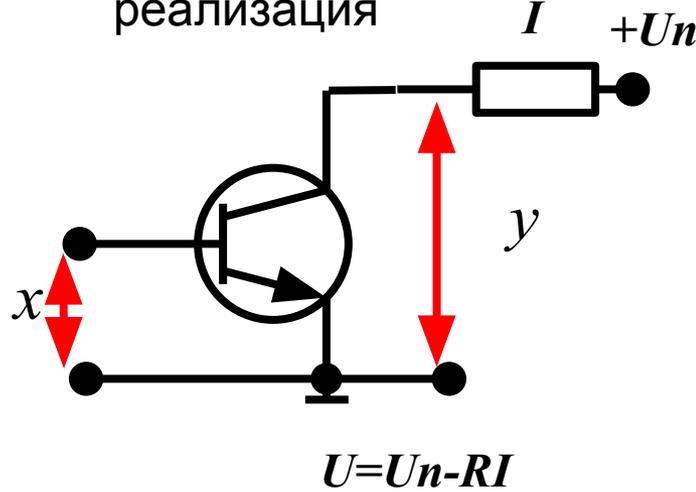
Обозначени
 \bar{x}

Графическо
 е обозначени



Операци
 я Н NOT
 Е

Схемная реализация



Базовые логические

элементы

На основе базовых логических элементов можно реализовать логические функции любой степени сложности

Функция

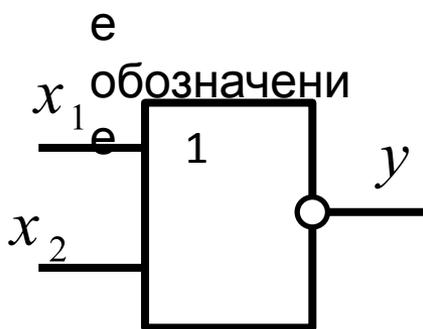
↓ Пирса или-НЕ

$$y = x_1 \downarrow x_2 = \overline{x_1 + x_2}$$

Таблица истинности

x_1	x_2	y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Графическое



Функция

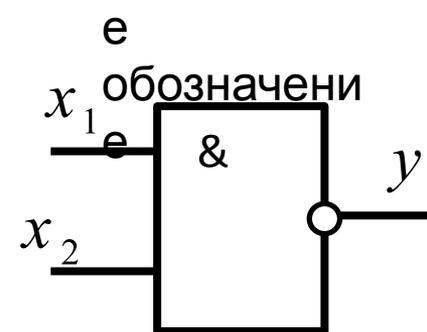
Щеффера И-НЕ

$$y = x_1 | x_2 = \overline{x_1 x_2}$$

Таблица истинности

x_1	x_2	y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

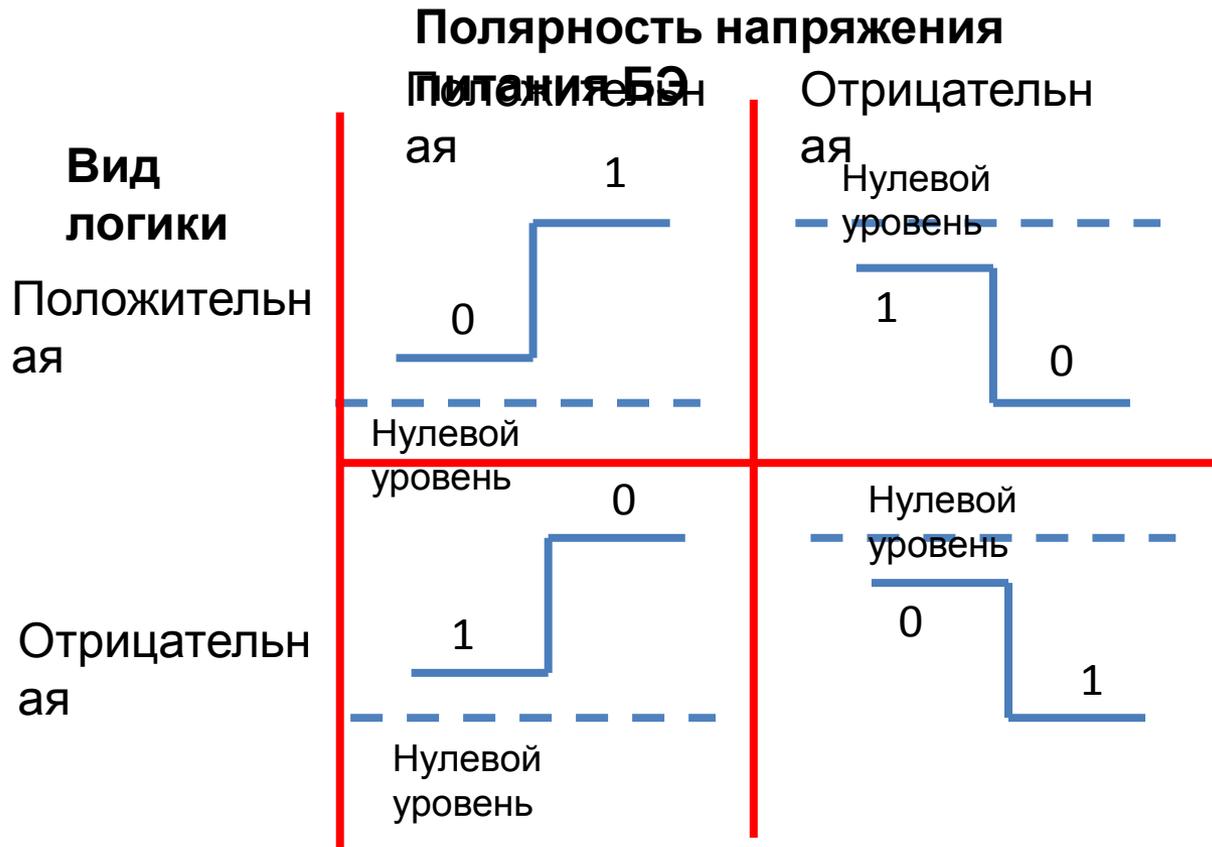
Графическое



На основе базовых элементов реализуются цифровые микросхемы различной степени интеграции (определяется количеством элементов в 1 корпусе, например СБИС — более 10 тыс. элементов в кристалле)

Реализация микросхем

Принцип построения, способ управления его работой, выполняемая логическая операция, напряжения питания и другие параметры базового элемента являются определяющими для всех логических микросхем.



Принципиальной разницы между положительной и отрицательной логиками нет. Одна и та же схема может работать и в той, и в другой логике. В дальнейшем будем считать логику положительной с положительной полярностью питания БЭ.

Схемные варианты реализации БЭ (микросхемы транзисторной логики)

ТТЛ – транзисторно-транзисторная логика

(серии интегральных цифровых микросхем (ТТЛ) 133; 155; 130; 131; 134; 158; 530; 531; 533; 555; 1531; 1533).

Применяются в широком классе электронных цифровых устройств (например, периферийные устройства для ЭВМ).

Преимущества – достаточно высокое быстродействие, самая высокая среди цифровых серий интегральных микросхем функциональная насыщенность.

Недостатки – невысокая помехозащищённость, высокая чувствительность к изменению напряжения питания, достаточно высокая потребляемая мощность.

КМОП (КМПД) - логика- комплиментарные полевые транзисторы со структурой металл-окисел-полупроводник (CMOS)

(серии интегральных цифровых микросхем 176; 561; 564; 1561).

Применяются в основном для изготовления устройств промышленной автоматики широкого класса.

Преимущества – высокая помехозащищённость благодаря высоким уровням логической единицы, крайне низкая потребляемая мощность в статическом режиме, высокое входное сопротивление, низкая чувствительность к изменению напряжения питания.

Недостатки – очень низкое быстродействие (максимальная частота переключения не превышает 8 МГц), быстродействие повышается с увеличением напряжения питания, но возрастает также потребляемая мощность, высокое выходное сопротивление.

ЭСЛ – эмиттерно-связная логика

(серии интегральных цифровых микросхем 137; 187; 229; 100; 500; 700; 1500). **Применяются** в устройствах, где требуется повышенное быстродействие.

Преимущества – крайне высокое быстродействие, повышенная помехозащищённость благодаря специальным схемным решениям.

Недостатки – очень высокая потребляемая мощность, уровни логического нуля и логической единицы (в отличие от всех других типов логических цифровых микросхем) находятся в отрицательной области напряжений, относительно общей “земли”.

Основные характеристики микросхем

ЛОГИКИ

U^0 , В – значение напряжения уровня логического нуля;

U^1 , В - значение напряжения уровня логической единицы;

P , мВт – средняя потребляемая мощность;

E_n , В – напряжение источника питания в вольтах;

F , мГц – предельная частота переключения,

Параметры	ТТЛ	КМОП	ЭСЛ
U^0 , В	0.3-0.4	0-0.3	-1.6
U^1 , В	2.4-2.7	3..15	-0.9
E_n , В	+5	+3..15	-5.2
P , мВт	1..40	0.1	35..70
$F_{пр}$, МГц	3-60	3-8	2000

Пример схемной реализации логической функции

1) Получение таблицы истинности логической функции

a	b	c	y
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

2а) Представление y в совершенной дизъюнктивной нормальной форме СДНФ

Для минитерм

$$y_{=1} = \bar{a}bc + a\bar{b}c + ab\bar{c} + abc$$

ил

2б) Представление y в совершенной конъюнктивной нормальной форме СКНФ

Для макстерм
 $y=0$ и

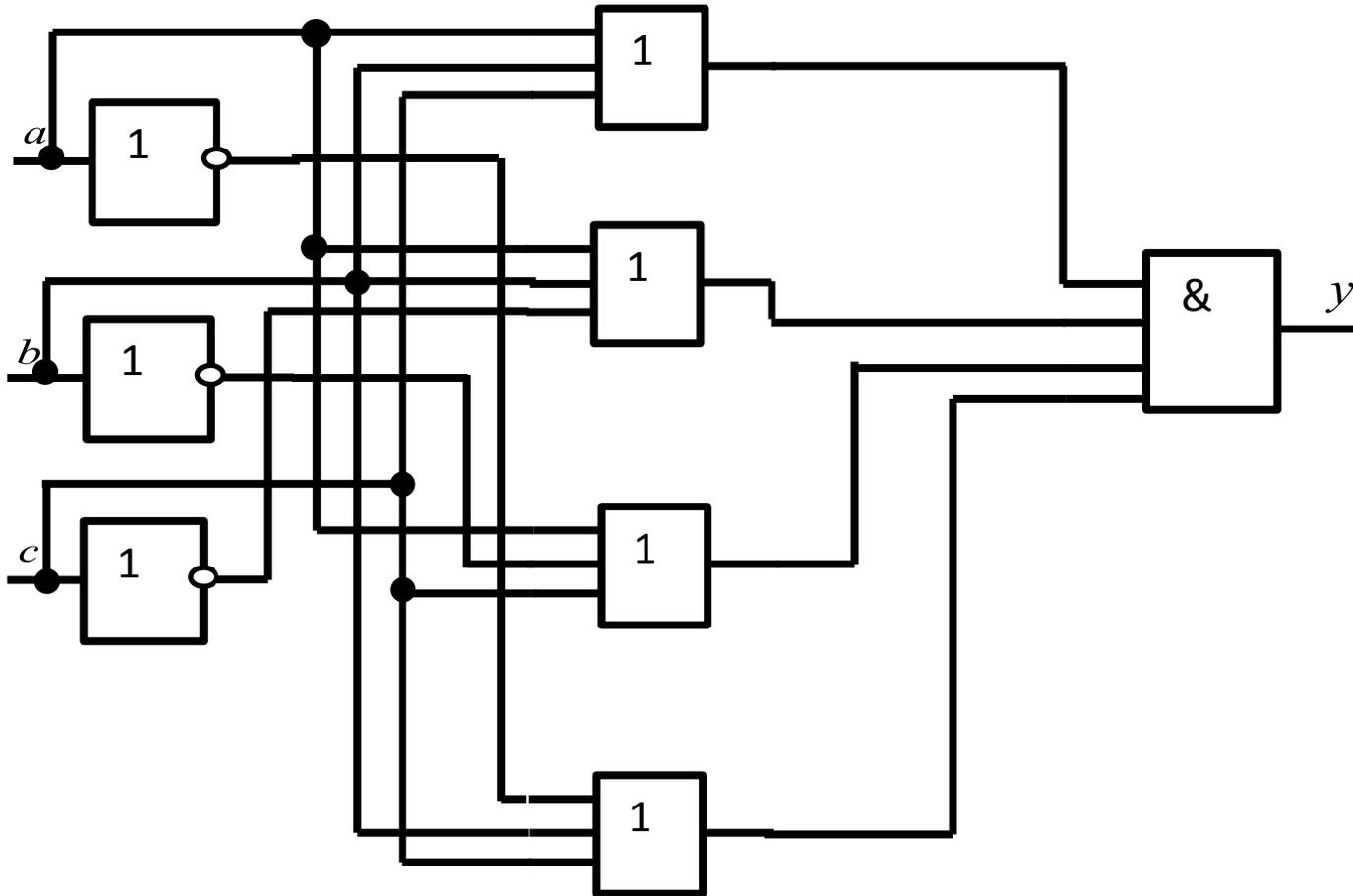
$$a + b + c, a + b + \bar{c}, a + \bar{b} + c, \bar{a} + b + c$$

$$y = (a + b + c)(a + b + \bar{c})(a + \bar{b} + c)(\bar{a} + b + c)$$

3) Реализация логической схемы по логической функции

$$y = (a + b + c)(a + b + \bar{c})(a + \bar{b} + c)(\bar{a} + b + c)$$

СКН
Ф



4) Схемная реализация на основе выбранного типа цифровых микросхем

Дешифрато

Дешифратор (декодер)-комбинационная схема преобразующая n -разрядное двоичное число в m -разрядный унитарный код.

Содержит n входов и 2^m выходов . На выходе с номером m появляется логическая единица при условии соответствия номера выхода поданному на вход двоичному коду. При этом на всех остальных выходах логический 0.

Используется для обращения к цифровым устройствам по адресу представленному в двоичном виде

Пример дешифратора

2x4

Таблица истинности дешифратора

x1	x2	y4	y3	y2	y1
0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	0
1	0	0	1	0	0
1	1	1	0	0	0

Лог.
функция

$$y1 = \bar{x}_1 \bar{x}_2$$

$$y2 = \bar{x}_1 x_2$$

$$y3 = x_1 \bar{x}_2$$

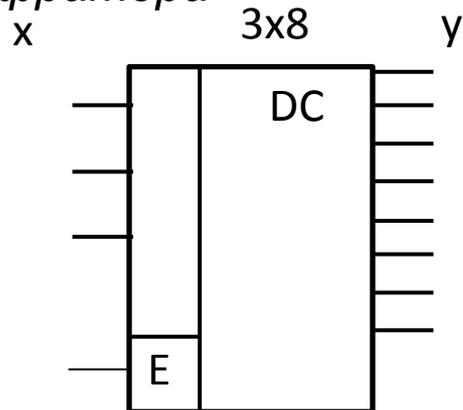
$$y4 = x_1 x_2$$

Широко используются дешифраторы 3x8, 4x16, 8x256

Пример схемотехнической реализации дешифратора 2x4

?

Графическое обозначение дешифратора



Стробирующий

сигнал
E=0 Выходные сигналы

E=1 =0

Шифратор

Ш

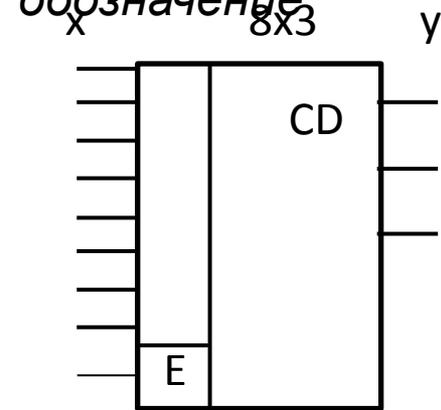
Выполняет функцию обратную дешифратору. Имеет n входов и m выходов. При подаче логической единицы на вход с номером n , на выходе формируется двоичное представление номера входа.

Применение: отображение в двоичном коде номера нажатой кнопки, контроллеры прерываний и т.д.

Пример

Реализация шифрования методом

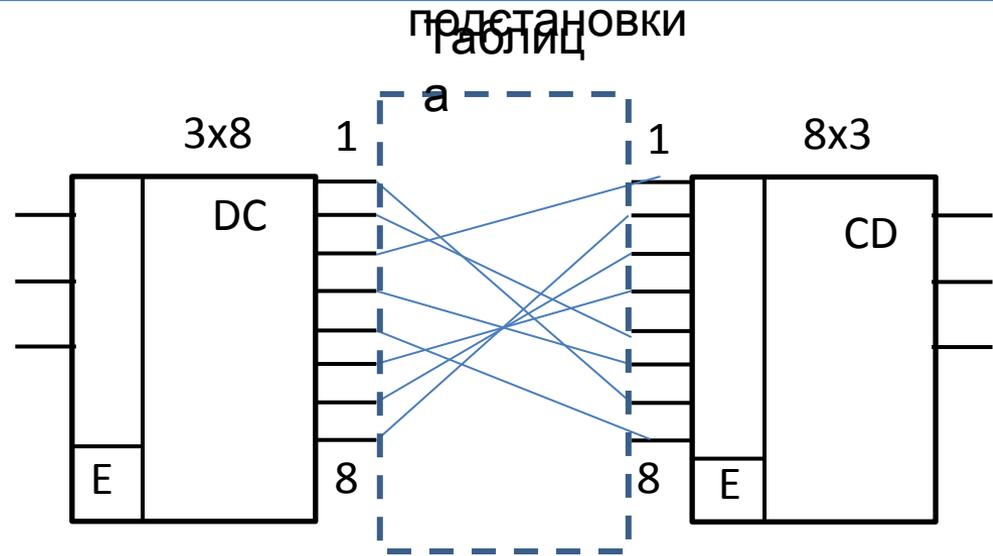
Графическое обозначение



Стrobe-сигнал

$E=0$ Выходные сигналы

$E=1$ =0



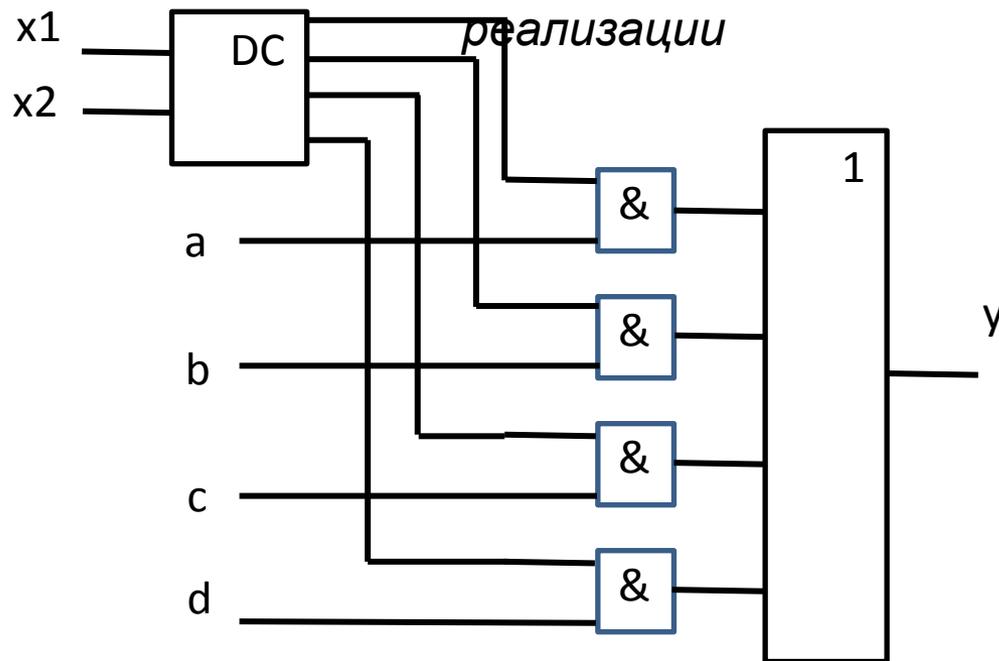
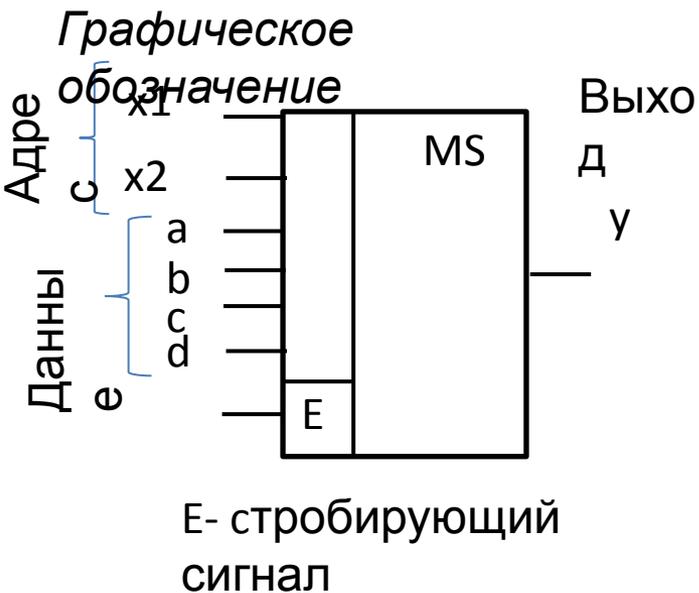
Замена входного кода символа на код выходного символа согласно таблице

Дес. элемент таблицы подстановки



Мультиплексо ры

Пример
реализации



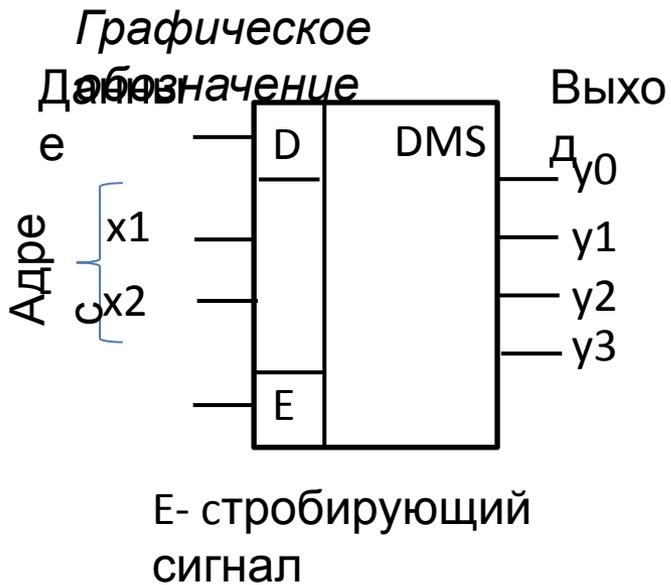
Логическая

функция

$y =$

Назначение мультиплексоров

- преобразование параллельных кодов в последовательные
- объединение нескольких входных информационных потоков в единый (агрегированный) выходной поток
- реализация логических функций (адрес = аргументы лог. функции y , данные = таблица истинности лог. функции y)

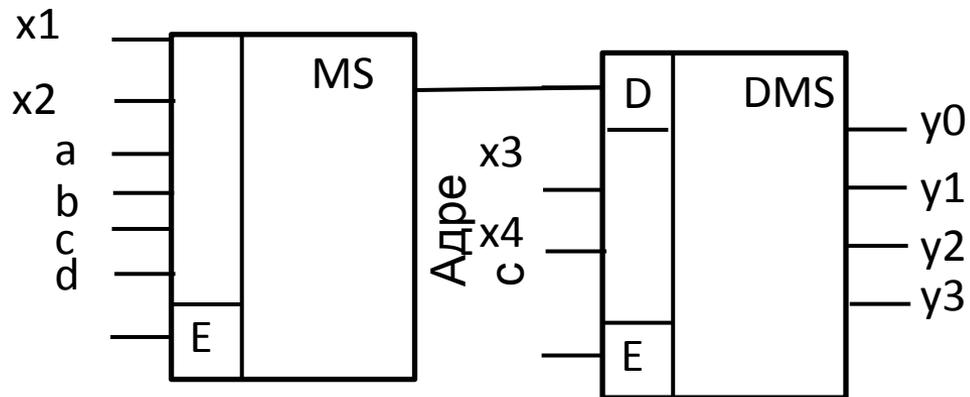


Демультимплексо

Пример реализации



D	X1	X2	y3	y2	y1	y0
1	0	0	0	0	0	1
1	0	1	0	0	1	0
1	1	0	0	1	0	0
1	1	1	1	0	0	0



Назначение демультимплексо

- преобразование последовательных кодов в параллельные
- разделение единого входного потока данных на несколько выходных потоков

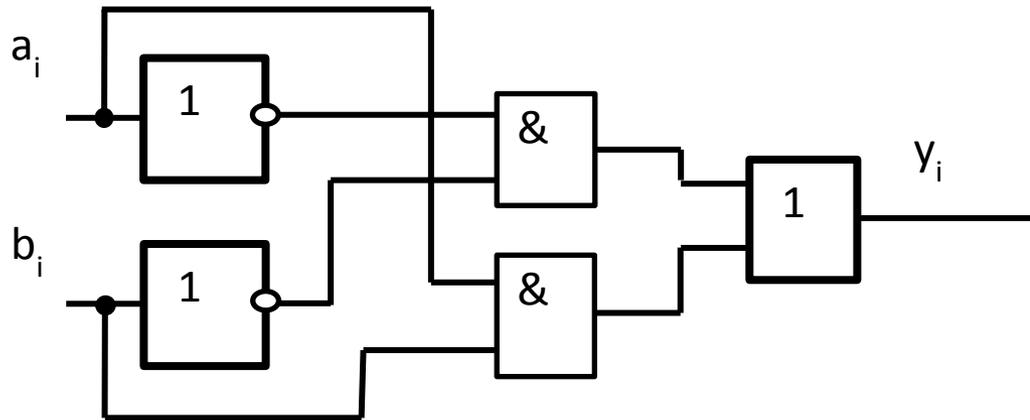
Цифровые компараторы

Предназначен для сравнения двух многоразрядных двоичных чисел. Сравнение проводится побитно. Результатом сравнения являются признаки «равно»- «неравно», «больше»- «меньше»

Логическая функция сравнения для одноименных разрядов i чисел a и b

$$y_i = a_i \cdot b_i + \overline{a_i} \cdot \overline{b_i}$$

Пример реализации для одного разряда двоичных чисел



Триггер

Триггер- система с двумя устойчивыми состояниями равновесия обеспечиваемых положительными обратными связями (ПОС). Под действием входных сигналов триггер может переключаться из одного состояния равновесия в другое , при этом происходит скачкообразное изменение уровней напряжения выходных сигналов (переход с низкого на высокий или наоборот). Используется для хранения информации.

По способу записи информации или переключению состояния, триггеры делятся на :

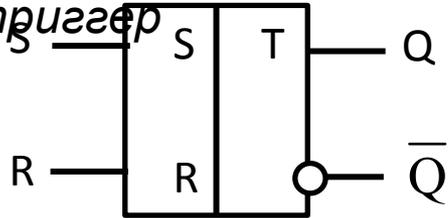
Асинхронные триггеры- запись(переключение) происходит в момент подачи входных сигналов

Синхронные триггеры- запись (переключение) происходит под действием синхроимпульса.

Момент переключения триггера связан с определенным уровнем синхроимпульса (*статические триггеры*) или с переходом напряжения синхроимпульса с одного уровня на другой (*динамические триггеры*).

Асинхронный и синхронный RS-триггер

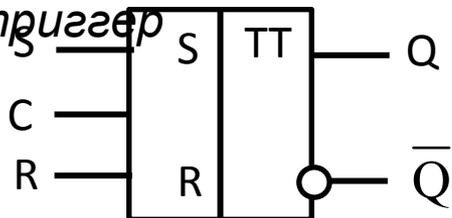
Асинхронный RS-триггер



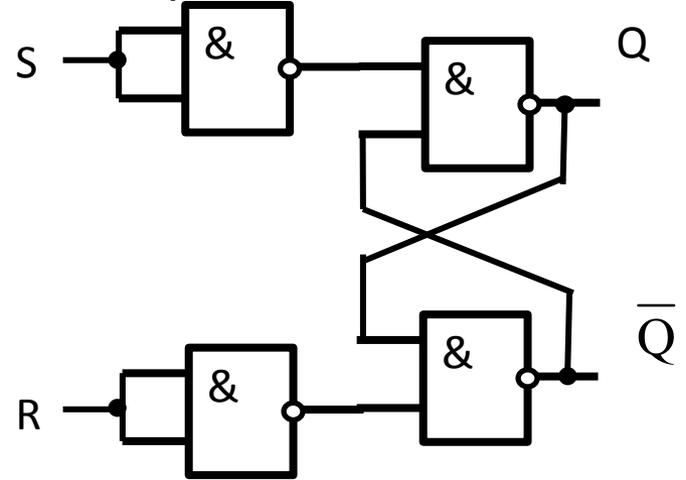
Таблица

R	ИСТИННОСТИ S	Q
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

Синхронный RS-триггер



Пример реализации



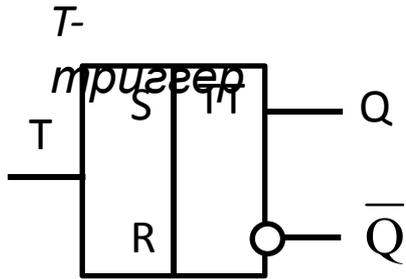
Временная диаграмма



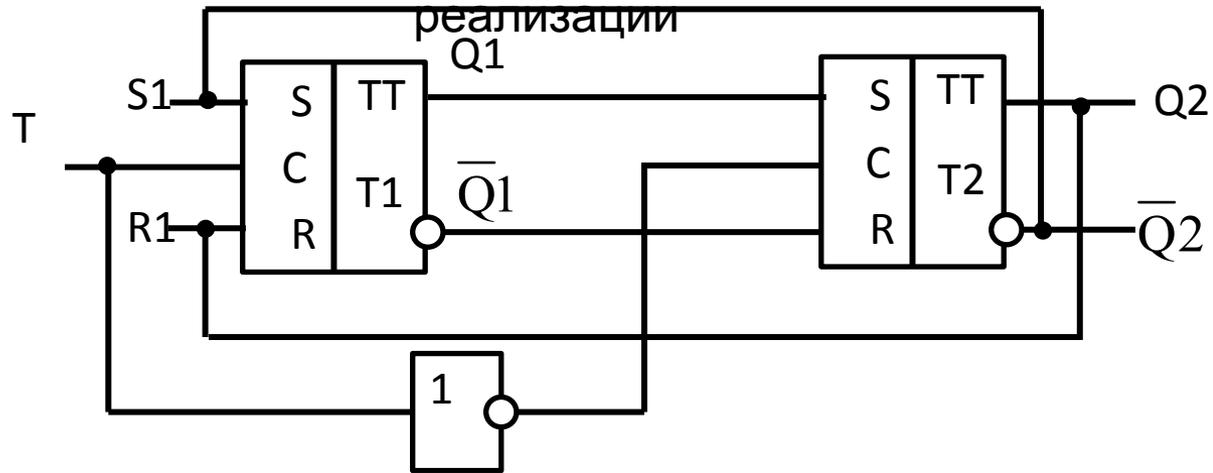
T-триггер

T-триггер переключается каждым импульсом подаваемым на единственный вход T.

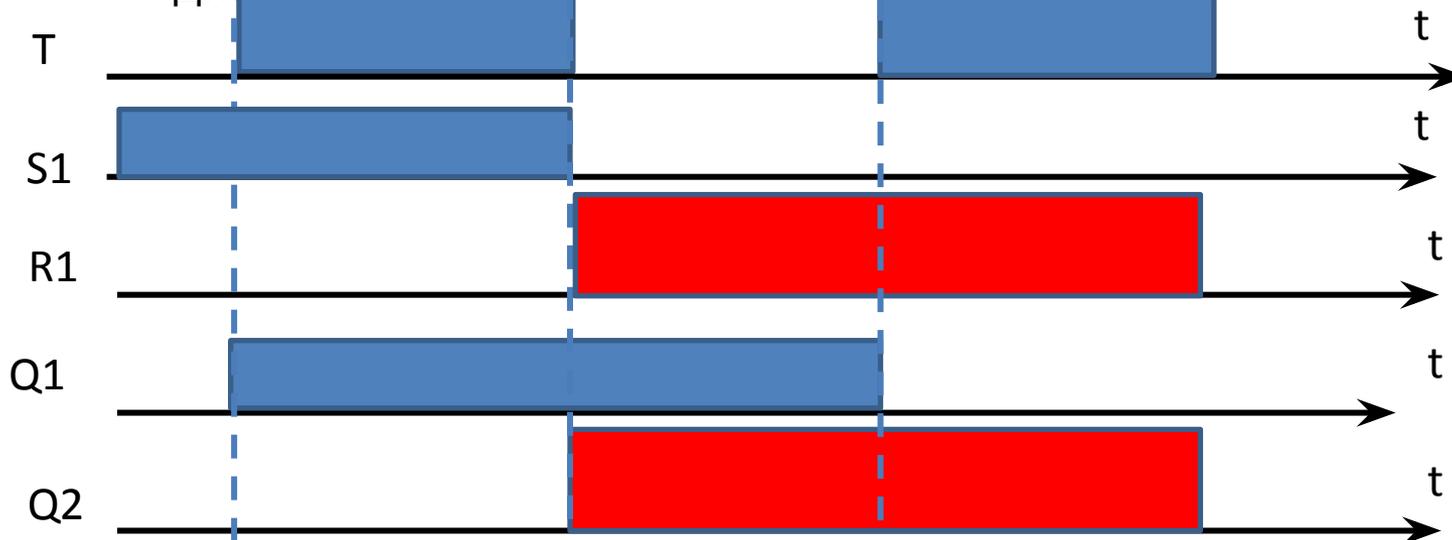
Графическое обозначение



Пример



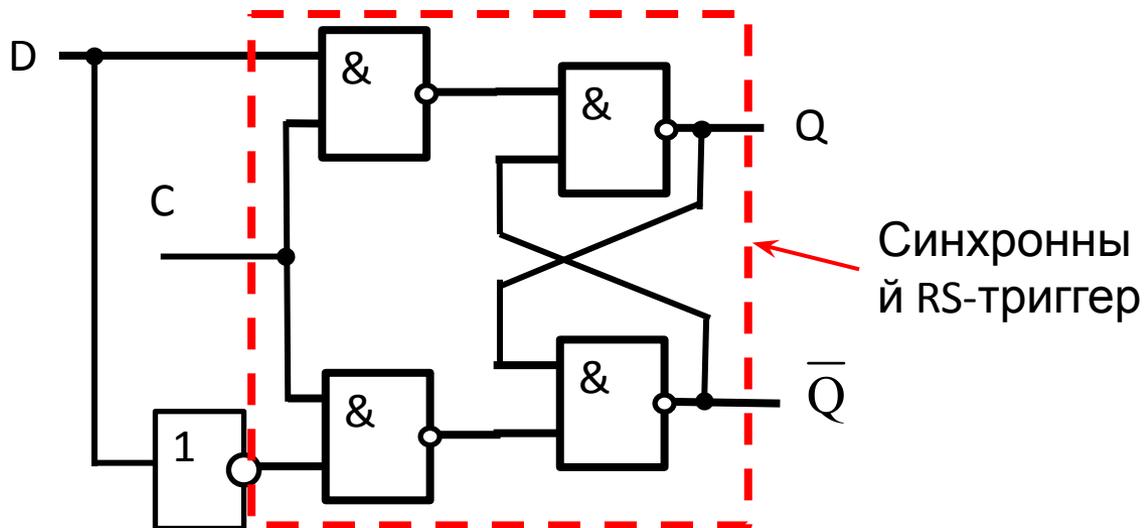
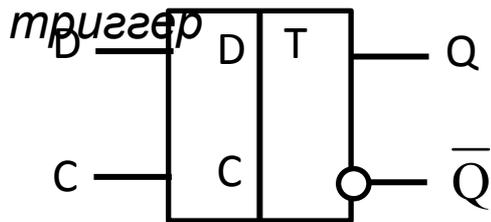
Временная диаграмма



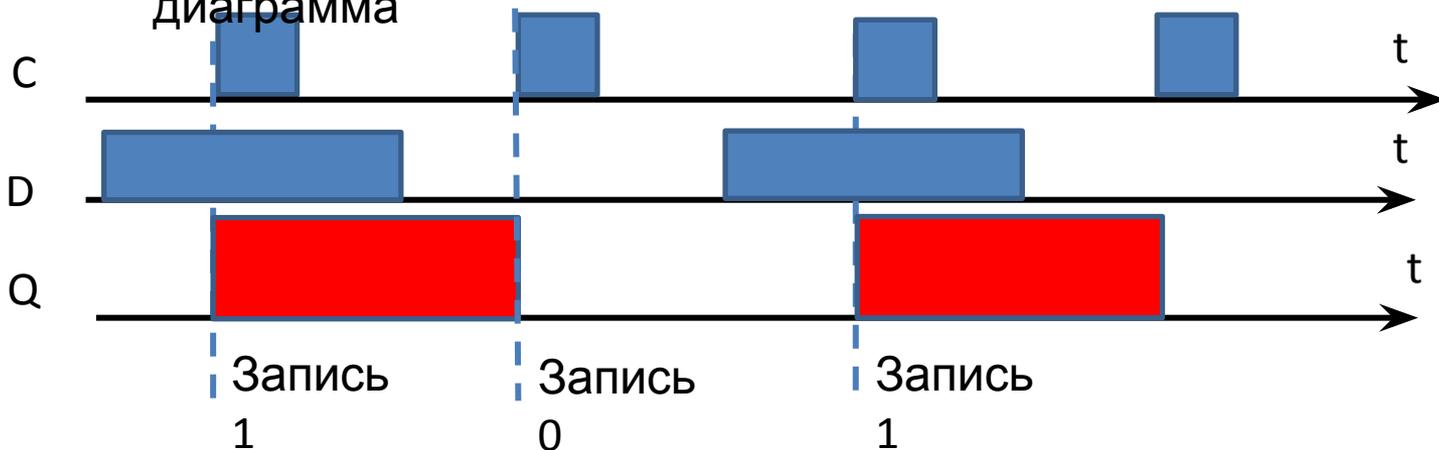
D-триггер

Имеет один информационный вход (D), информация с которого переписывается на выход (Q) под управлением тактового сигнала синхронизации (C)

Синхронный D-триггер

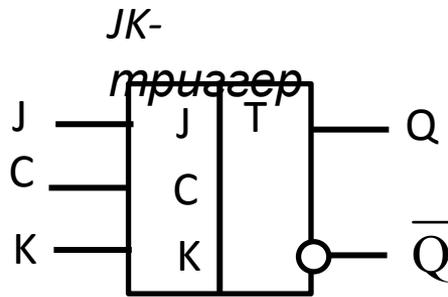


Временная диаграмма



Назначение – ячейка для хранения бита информации

JK-триггеры



Реализация триггеров различного типа на основе JK-триггера

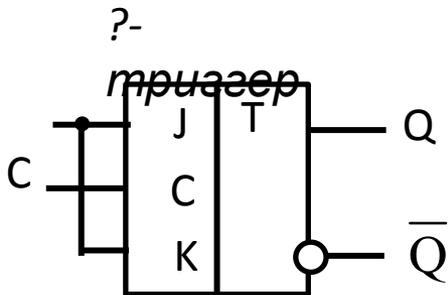


Таблица истинности

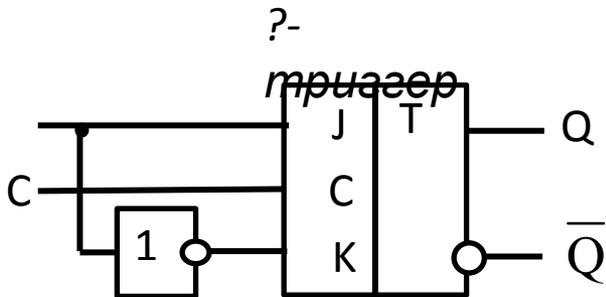


Таблица истинности

Таблица истинности

Jt	Kt	Qt	Q(t+1)
0	0	0	0
1	0	0	1
0	1	0	0
1	1	0	1
<hr style="border-top: 2px dashed black;"/>			
0	0	1	1
1	0	1	1
0	1	1	0
1	1	1	0

J=1, K=1 – счетный режим

Регистр

Регистры- многофункциональные устройства на базе триггеров, предназначенные для

записи, хранения и выполнения логических операций над n -разрядными

двоичными числами. Способы записи/хранения чисел и формы их представления делятся на

- Последовательные
- Параллельные
- Последовательно-параллельные

Логические операции и преобразования

- Умножение и сложение

Преобразование кодов

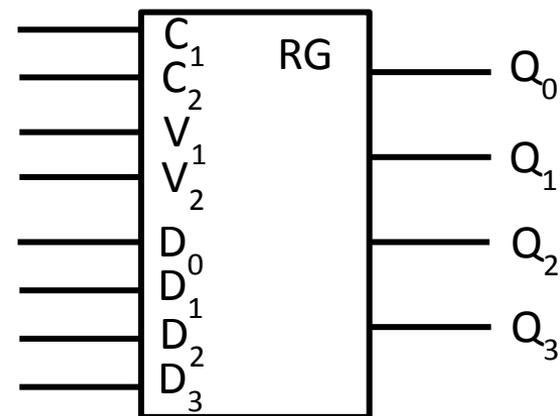
- последовательный - параллельный
- прямой – обратный

Сдвиг двоичных чисел

(сдвигающие регистры)

- Прямой (вправо в сторону млад. разрядов)
- Обратный (влево в сторону старш. разрядов)
- Реверсивный – прямой/обратный
- Кольцевые регистры (кольцевые счетчик)

(последовательный регистр у которого вход соединен с выходом)



Режимы работы

регистра

$V_2 = 1$	Параллельный режим
C_2	Синхроимпульсы
	$D \rightarrow Q$

$V_2 = 0$ Последовательно-параллельный режим

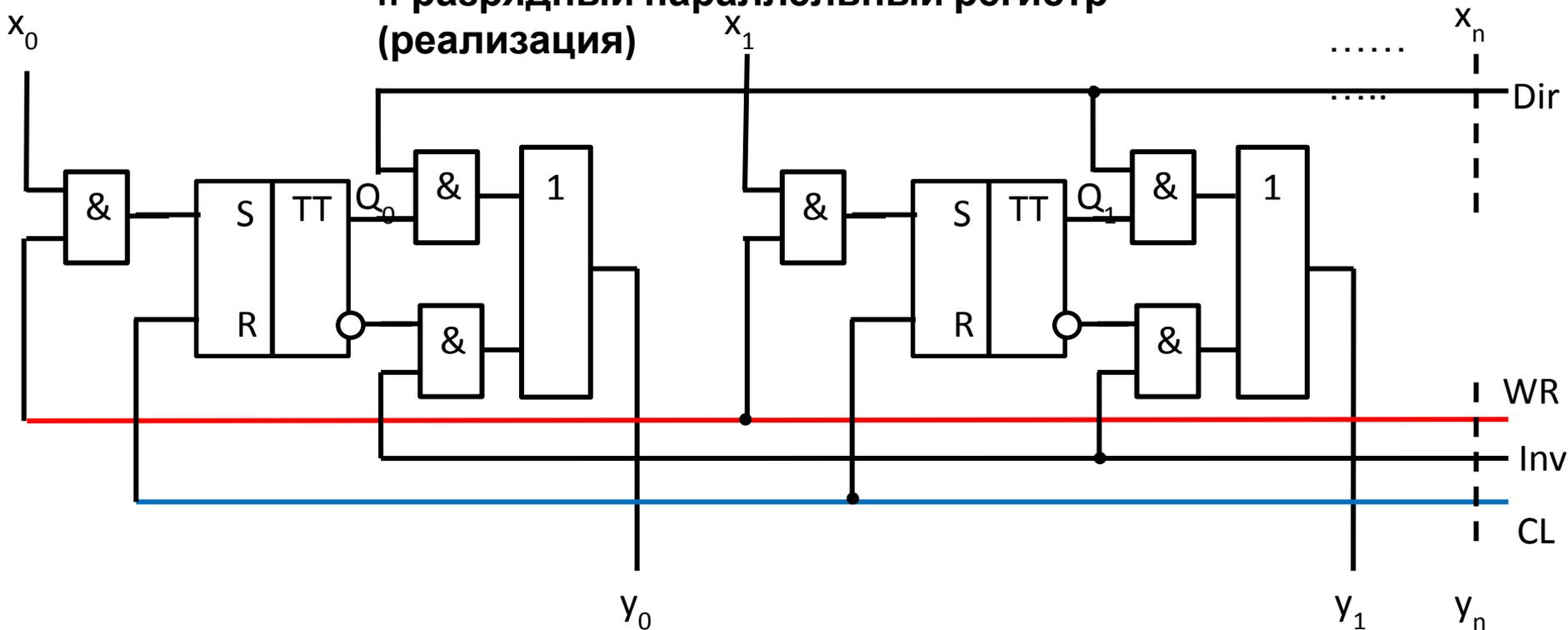
V_1 Даны

C_1 Синхроимпульсы

Сдвиг

вправо

n-разрядный параллельный регистр (реализация)

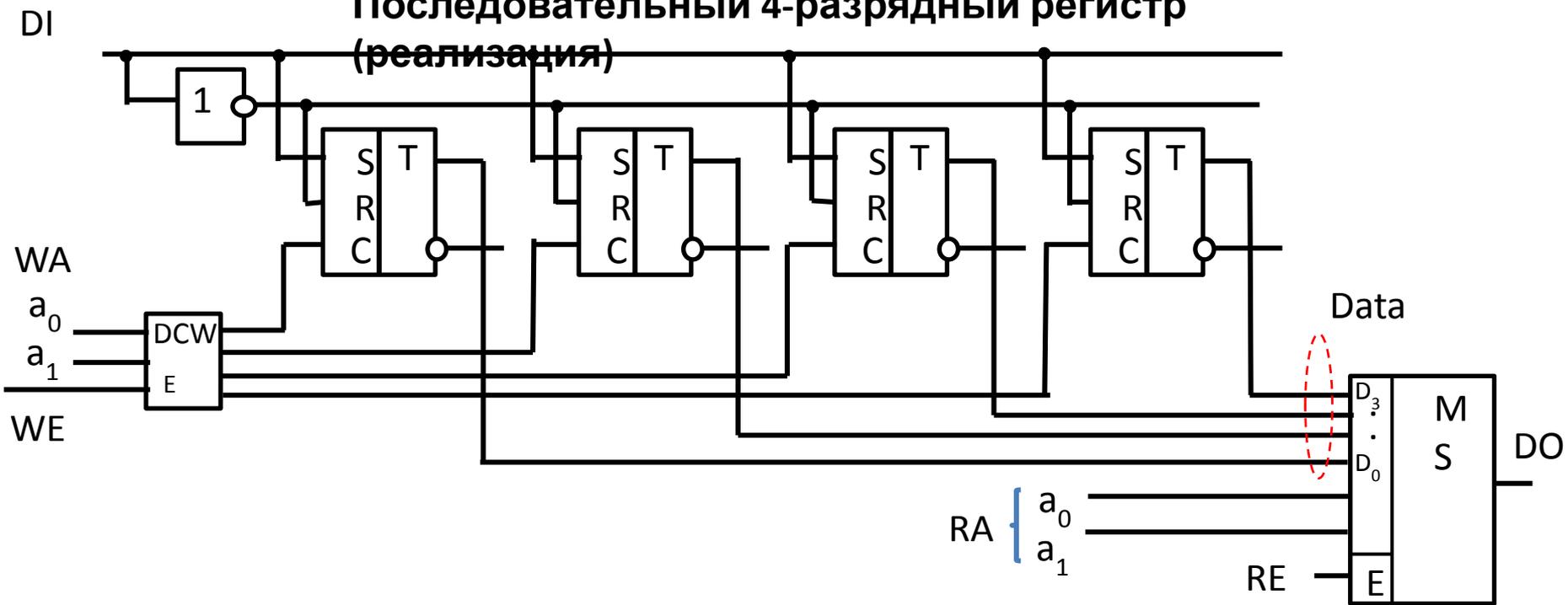


Запись в регистр происходит в два такта

вход		выход	
триггера		триггера	
1	CL=1	$Q_0 = 0 \dots Q_n = 0$	$y_0 = 0 \dots y_n = 0$
ТАКТ	WR=0		
2	CL=0	$Q_0 = x_0 \dots Q_n = x_n$	
ТАКТ	WR=1		

Хранение / чтение	Обратный код	Прямой код
CL=0	Dir=0	Dir=1
WR=0	Inv=1	Inv=0
	$y = \bar{x}$	$y = x$

Последовательный 4-разрядный регистр (реализация)



WE-разрешение
записи
WE=0 -
хранение/запрещено
WE=1 -
запись

RE-разрешение
чтения
RE=0 -
запрещено
RE=1 -
чтение

*Временные
последовательности*

*Запис
ь*

*Чтени
е*

DI → WA → WE=1

RA → RE=1 → DO

Счетчик

Счетчики предназначены для подсчета числа поступивших на его вход импульсов с сохранением результатов счета и представления этого числа в различных системах счисления, например в двоичной или десятичной.

Счетчики строятся на основе триггеров (обычно D- или JK- триггеров) и логических элементов определяющих различные типы счетчиков.

Основные

характеристики

-Разрядность счетчика (n-разрядное двоичное число)

-Максимальное число подсчитанных импульсов

Типы счетчиков

$N=2^n-1$
-суммирующие

-вычитающие

-реверсивные

-асинхронные (переключение разрядов последовательное)

-синхронные (переключение разрядов одновременное)

Назначение

-таймеры

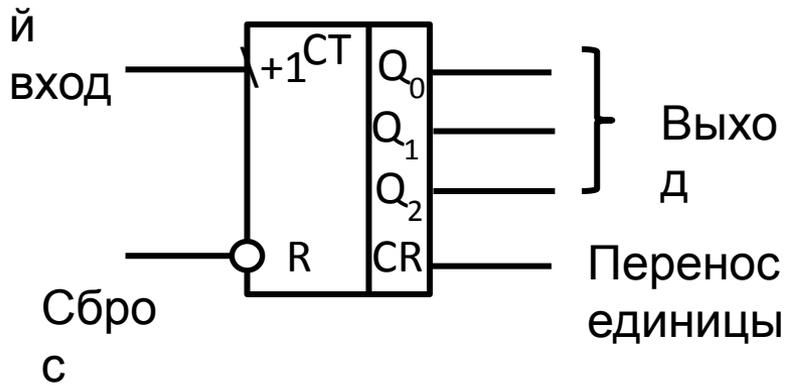
-делители

частоты

- и т.д.

Графическое изображение

Счетный вход



Обозначения
+1- суммирующий счетчик

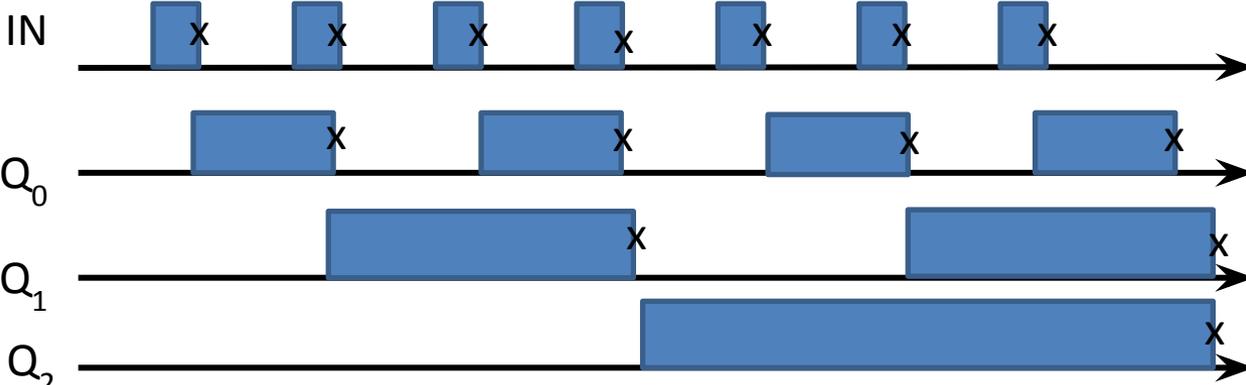
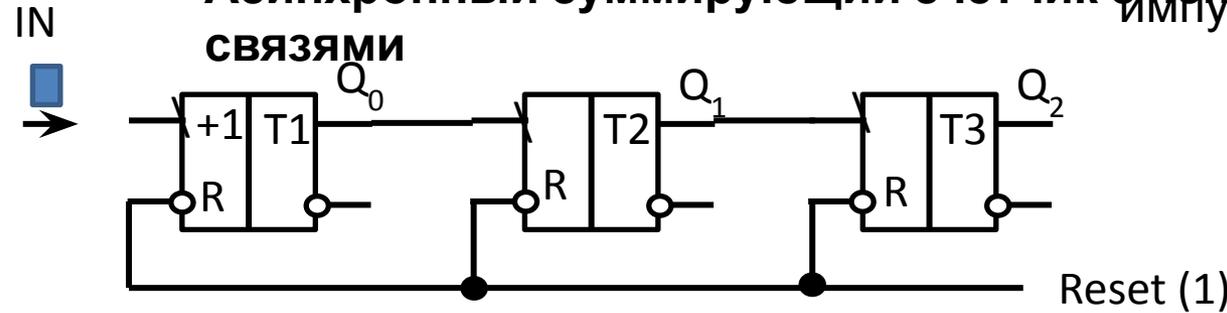
-1- вычитающий

Полярность переключения

\ - при переходе 1 – 0

▲ - при переходе 0 – 1

Асинхронный суммирующий счетчик с непосредственными связями



Временная диаграмма

Асинхронный вычитающий счетчик с непосредственными связями

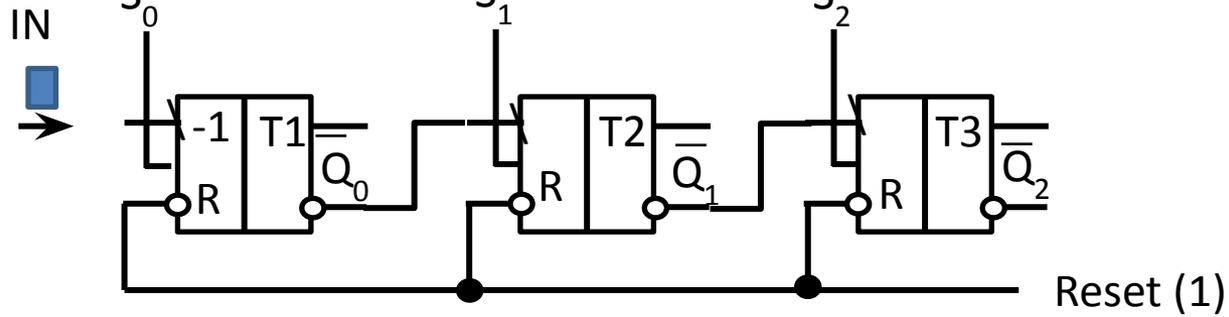
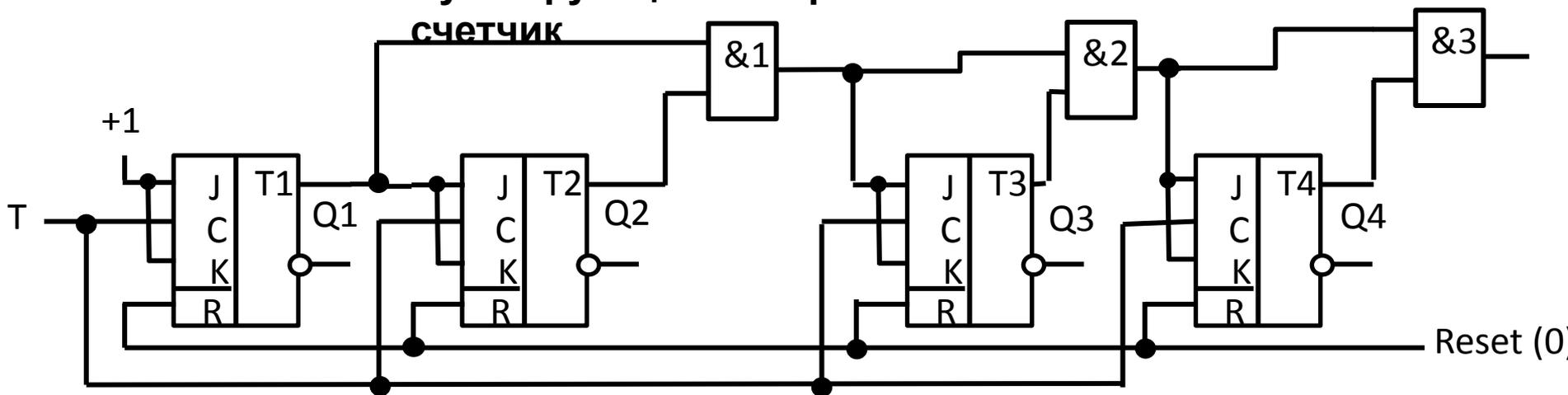


Таблица переходов

N импульса на входе	S0	S1	S2
	Q0	Q1	Q2
0	1	0	1
1	0	0	1
2	1	1	0
....

Суммирующий синхронный счетчик



T1- переключается счетными
импульсами T

*Условия переключения остальных
триггеров*

T2 $Q_1=1$

T3 $Q_1=1 \ \& \ Q_2=1$

T4 $Q_1=1 \ \& \ Q_2=1 \ \& \ Q_3=1$

The end