

Курс « Основы схемотехники »

Схемотехника — это наука о проектировании и исследовании схем электронных устройств

Лектор:

Мачалин Игорь Алексеевич

доктор технических наук,

профессор кафедры телекоммуникационных
систем

ауд. 3-227, 3-205.

elec2015@ukr.net

Пароль: 123qwe

План курса (Часть 1)-Аналоговые и импульсные устройства:

- Усилительные устройства на транзисторах;
- Операционные усилители (ОУ);
- Усилительные устройства на ОУ;
- Операционные схемы и фильтры на ОУ.

МКР №1

- Генераторы сигналов на транзисторах и ОУ;
- Импульсные схемы на транзисторах и ОУ;
- Импульсные источники питания;
- Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи;

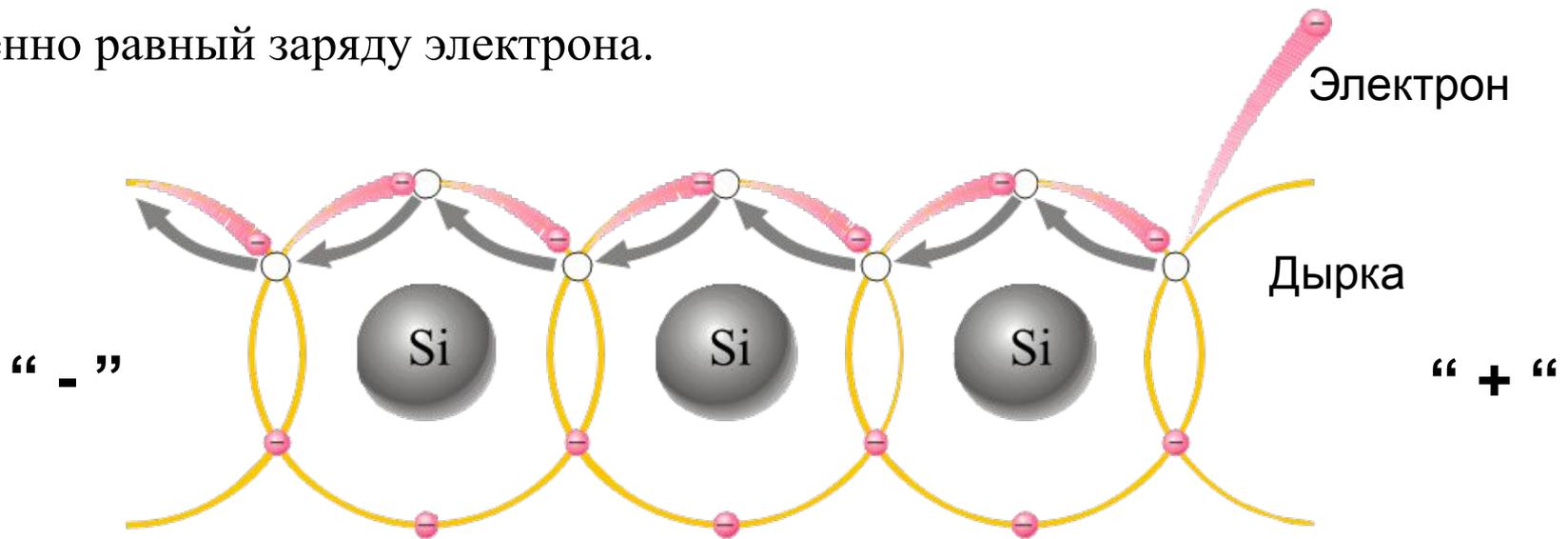
МКР №2

Литература

1. Бойко В. І. та ін. Схемотехніка електронних систем: У 3 кн., Кн. 2 / В. І. Бойко, А. М. Гуржій, В. Я. Жуйков. К.: Вища школа, 2004. 423 с.
2. Опадчий Ю. Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника : Учебник для вузов / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров; Под ред. О. П. Глудкина. М.: Горячая Линия – Телеком, 2000. – 768 с.
3. Гершунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники.-Киев: Вища школа, 1977.-344с.
4. Нандорф У. Аналоговая электроника. Основы, расчет, моделирование.- М. Техносфера.-2008.
5. Фолкенберри Л. Применение операционных усилителей и линейных схем.-М.: Мир.-1985.
6. Титце У. Шенк К. Полупроводниковая схемотехника.-М. Мир.-1982.
7. **Floyd T., Buchla D.** Electronics Fundamentals Circuits, Devices and Applications.-PLE, NY.-2014.
8. **Floyd T.** Electronics Devices.-PLE, NY. - 2010.

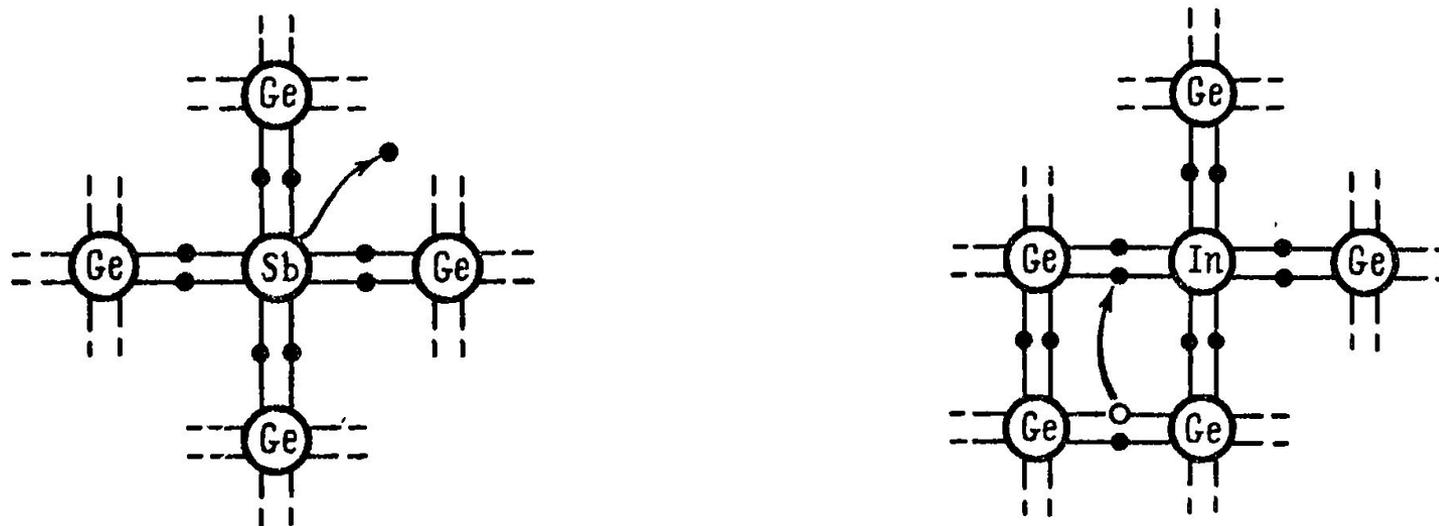
При перемещении электрона от одного атома к другому создаются положительные заряды, называемые «дырками», которые перемещаются в противоположном направлении.

Дырка (hole) — квазичастица, носитель положительного заряда, равного элементарному заряду, в полупроводниках. Незаполненная валентная связь, которая проявляет себя как положительный заряд, численно равный заряду электрона.



Если в полупроводнике имеются примеси других веществ, появляется «примесная» проводимость, которая в зависимости от рода примеси, она может быть **электронной** или **дырочной**.

Примеси, атомы которых отдают электроны, называются **донорами**.



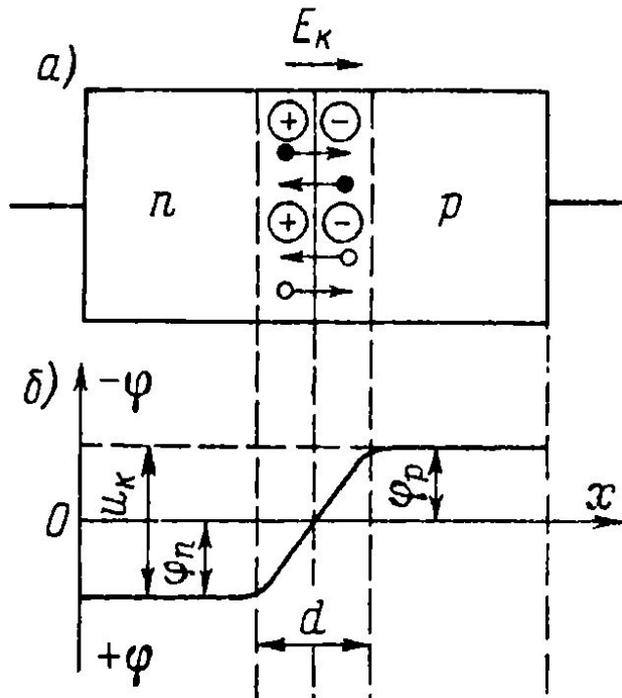
Вещества, отбирающие электроны и создающие дырочную проводимость наз. **акцепторами** (акцептор- принимающий)

Полупроводники с преобладанием дырочной проводимости называются полупроводниками **p - типа**, а с преобладанием электронной проводимости **n – типа**.

Полупроводниковые приборы.

Понятие n-p перехода. Диоды

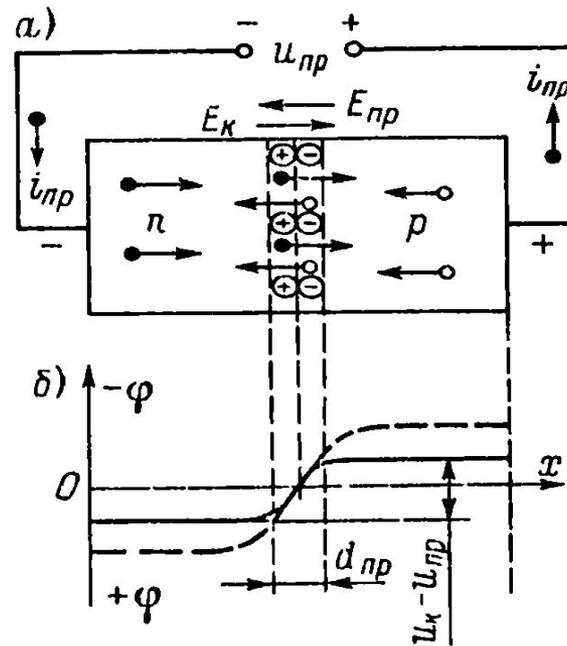
Область на границе двух полупроводников с различными типами проводимости называется электронно-дырочным переходом или n-p (p-n) переходом



В результате диффузии носителей по обе стороны границы перехода создаются объемные заряды различных знаков.

Между объемными зарядами возникает контактная разность потенциалов (составляет десятые доли вольта) и электрическое поле (вектор E_k).

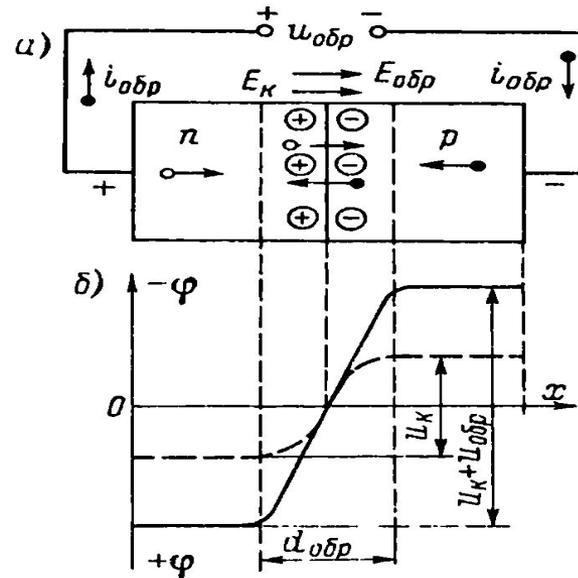
Электронно-дырочный переход при прямом включении



n- область наз.
«эмиттер»
P- область наз.
«коллектор»

При прямом напряжении потенциальный барьер понижается, уменьшается толщина запирающего слоя и его сопротивление в прямом направлении становится малым (единицы Ом)

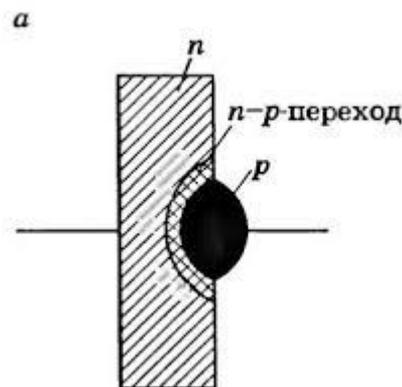
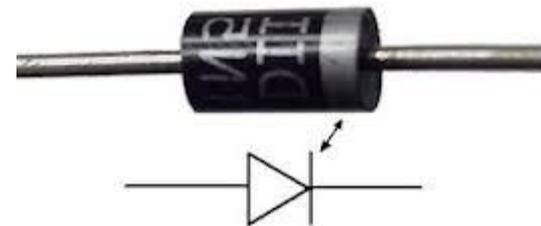
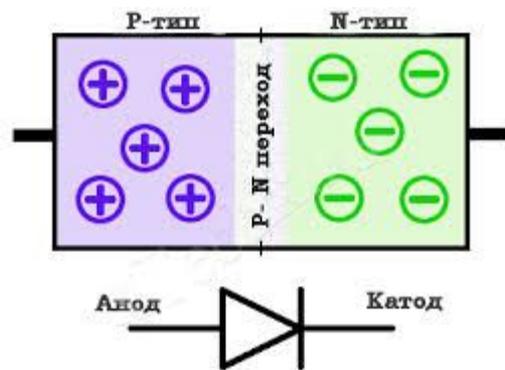
Электронно-дырочный переход при обратном включении



Электроны отрицательного полюса источника притянут дырки обедненной области **р** ближе к концу кристалла, а к другому концу кристалла положительный потенциал источника притянет свободные электроны. При этом электроны и дырки практически не будут пересекать переход, а потенциальный барьер увеличится. Будет протекать небольшой обратный ток — $i_{обр}$ (мкА)

Происходит «инжекция» носителей из **n** области в **p** область.

Диод (от греч. — два и -од — от окончания *-од* термина *электрод*; букв. «двухэлектродный») — электронный элемент, обладающий различной проводимостью в зависимости от направления электрического тока. Электрод диода, подключаемый к положительному полюсу источника тока, когда диод открыт (то есть имеет маленькое сопротивление), называют **анодом**, подключаемый к отрицательному полюсу — **катодом**.



Теоретическая вольтамперная характеристика диода

$$I = I_0 [\exp(U / \varphi_T) - 1]$$

I_0 - обратный ток, очень мал (мкА);

U - напряжение на p-n переходе

$\varphi_T = kT / e$ - температурный потенциал (k-постоянная Больцмана, e – заряд электрона)

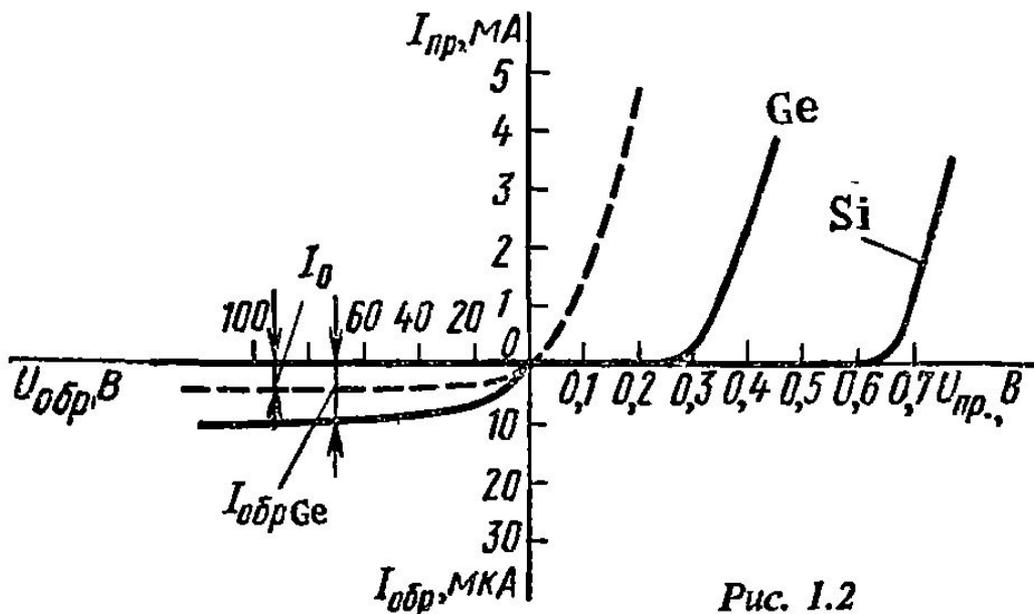


Рис. 1.2

Кремниевые диоды имеют существенно меньшее значение обратного тока по сравнению с германиевыми вследствие более низкой концентрации неосновных носителей заряда. Обратная ветвь ВАХ у кремниевых диодов при данном масштабе практически сливается с осью абсцисс. Прямая ветвь ВАХ у кремниевых диодов расположена значительно правее, чем у германиевых.

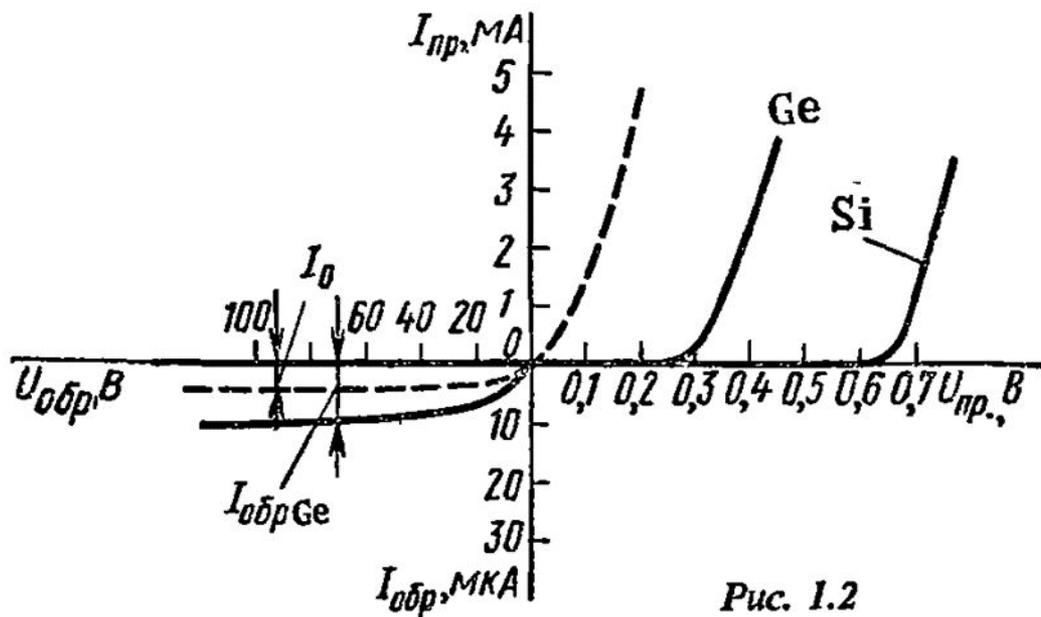
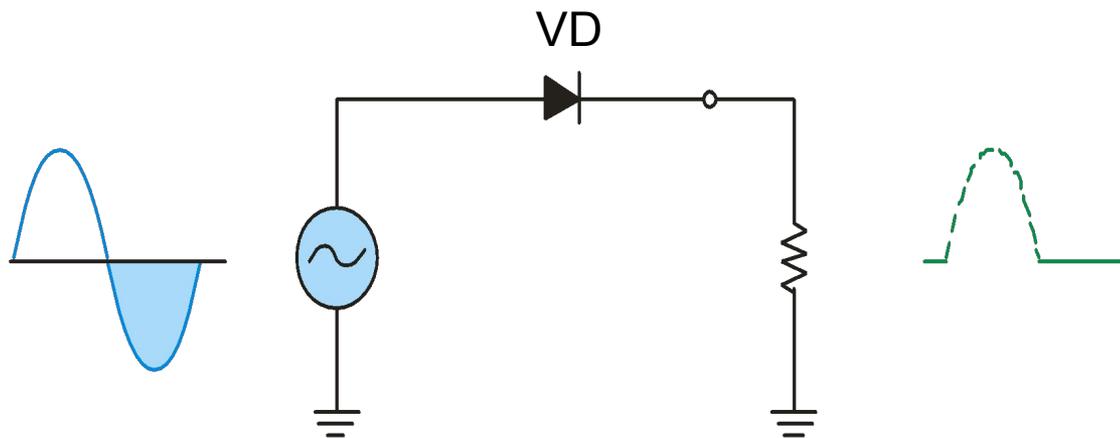
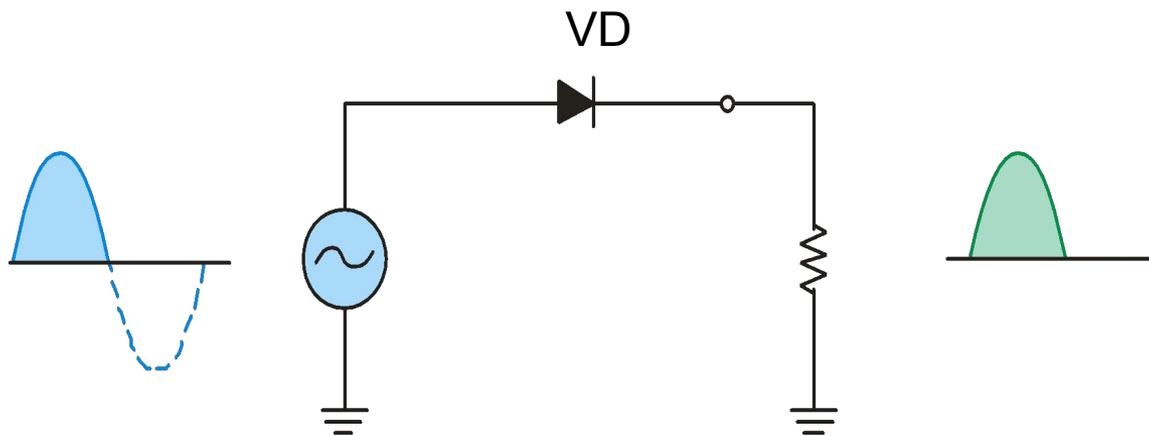
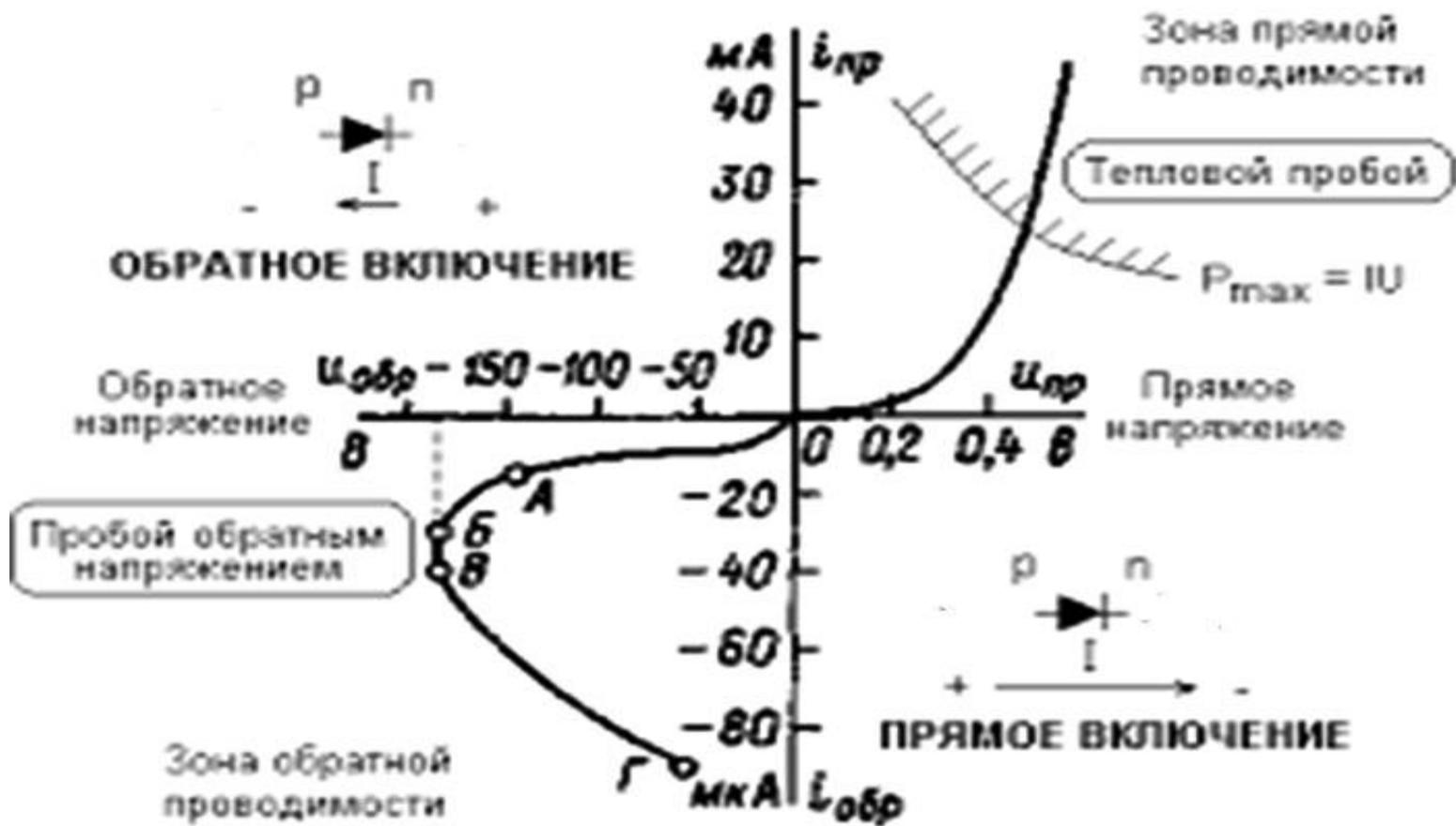


Рис. 1.2

Диод проводит ток в прямом направлении если величина приложенного напряжения больше потенциального барьера. Германиевый диод требует прямое смещение 0,2-0,3 В, а кремниевый- 0,5-0,7В. Соответственно и падение напряжения на диоде равно этим величинам.

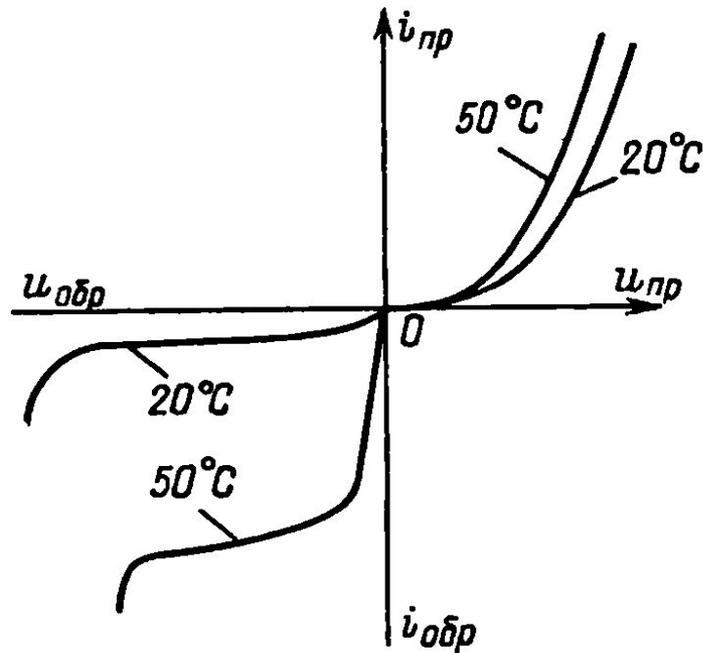
Работа диода





На участке от 0-А протекает небольшой обратный ток (мкА). Далее происходит лавинное размножение носителей из-за ударной ионизации и вырывание электронов из атомов. Участок АБВ – электрический обратимый пробой p-р перехода при котором обратный ток резко возрастает и сопротивление пирающего слоя резко уменьшается. Участок ВГ – необратимый тепловой пробой перехода.

Влияние температуры на проводимость диода



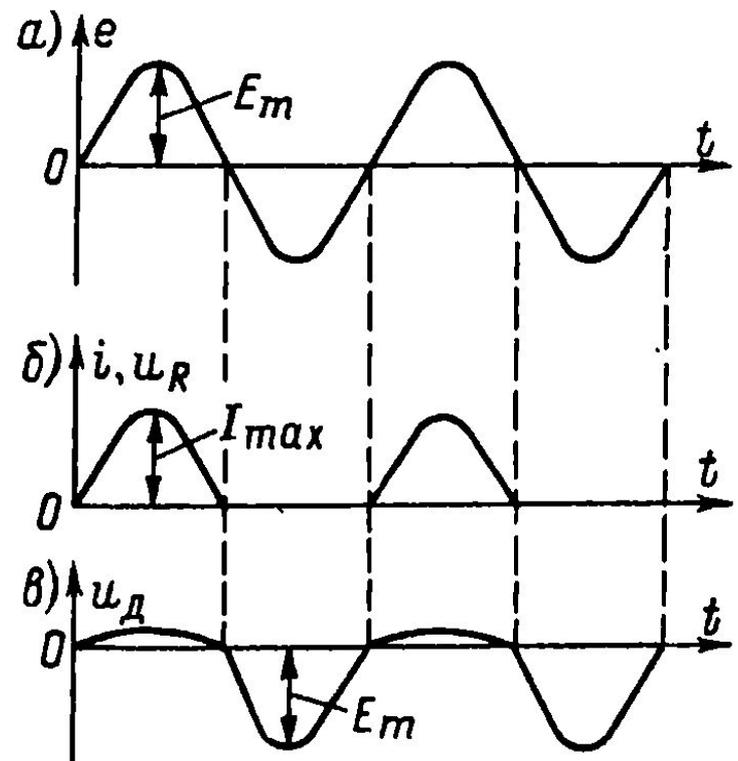
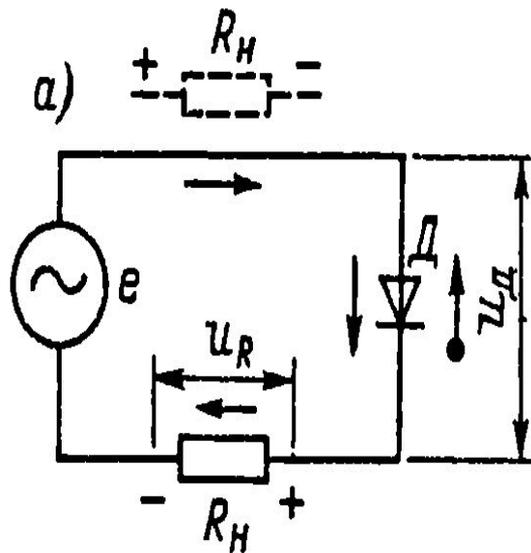
$$i_{\text{обр}}(t) = i_{\text{обр}}(20 \text{ C}) \cdot 2^{(t-20)/10},$$

При увеличении температуры среды, ток протекающий через диод возрастает

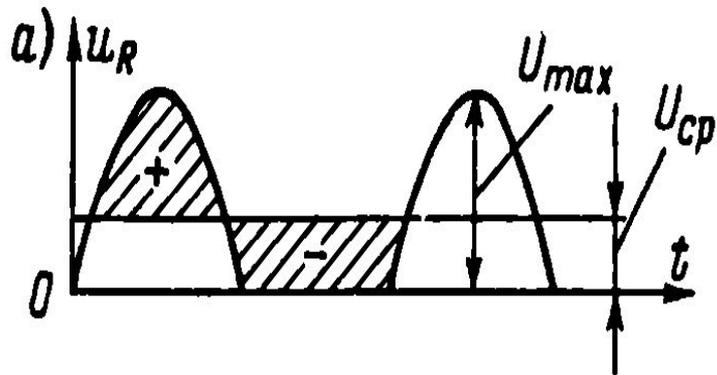
$$dU/dT \approx -2,5 \text{ мВ/}^\circ\text{C}.$$

Если через диод из германия протекает постоянный ток, то при изменении температуры, падение напряжения изменяется на 2,5 мВ/С

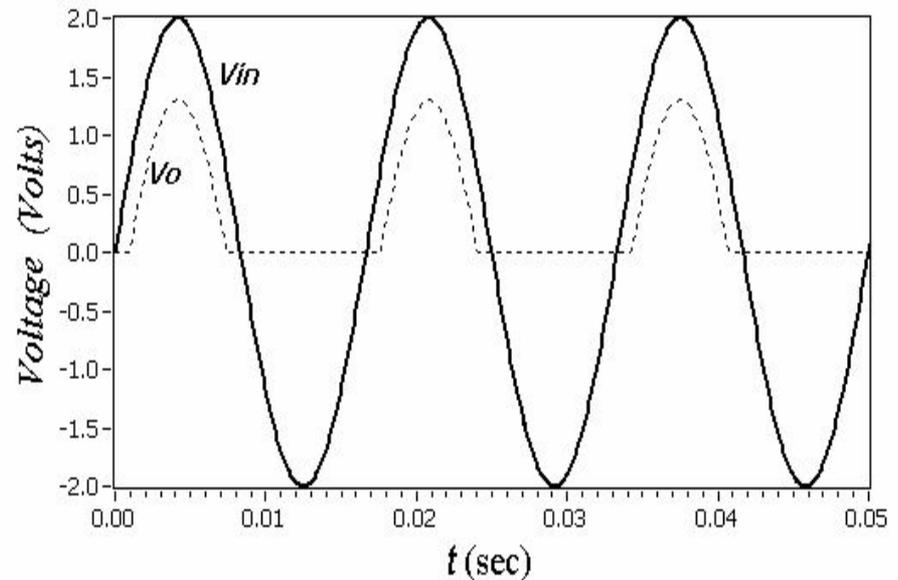
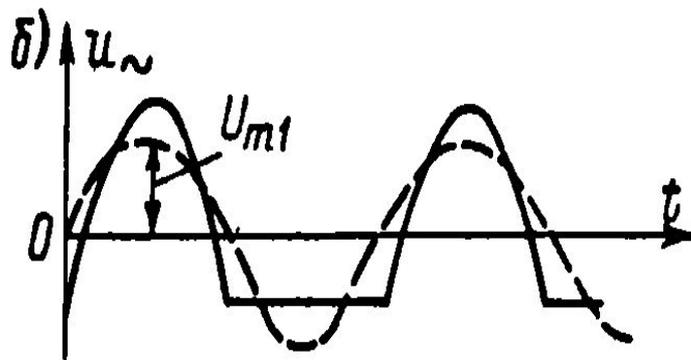
3. Выпрямители. Однополупериодный однофазный выпрямитель



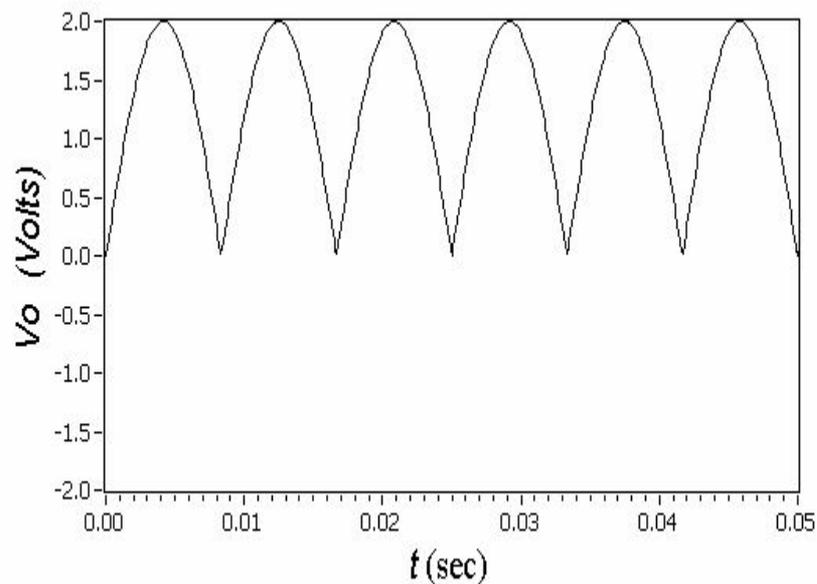
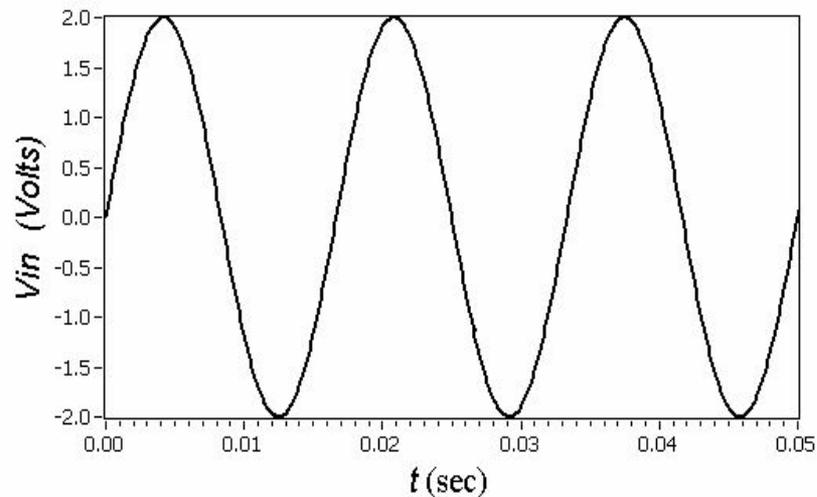
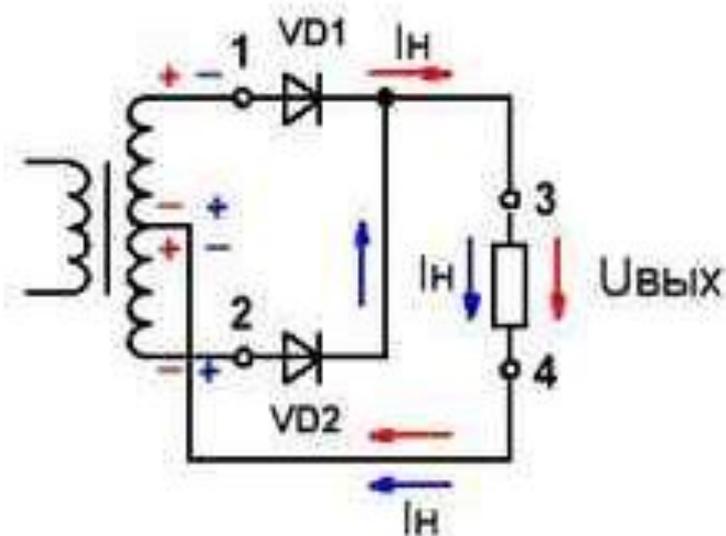
Постоянная и переменная составляющие выпрямленного напряжения



$$U_{CP} = U_{ВЫХ} / \pi = 0,318 U_{ВЫХ} \approx \approx 0,3 U_{ВЫХ}$$

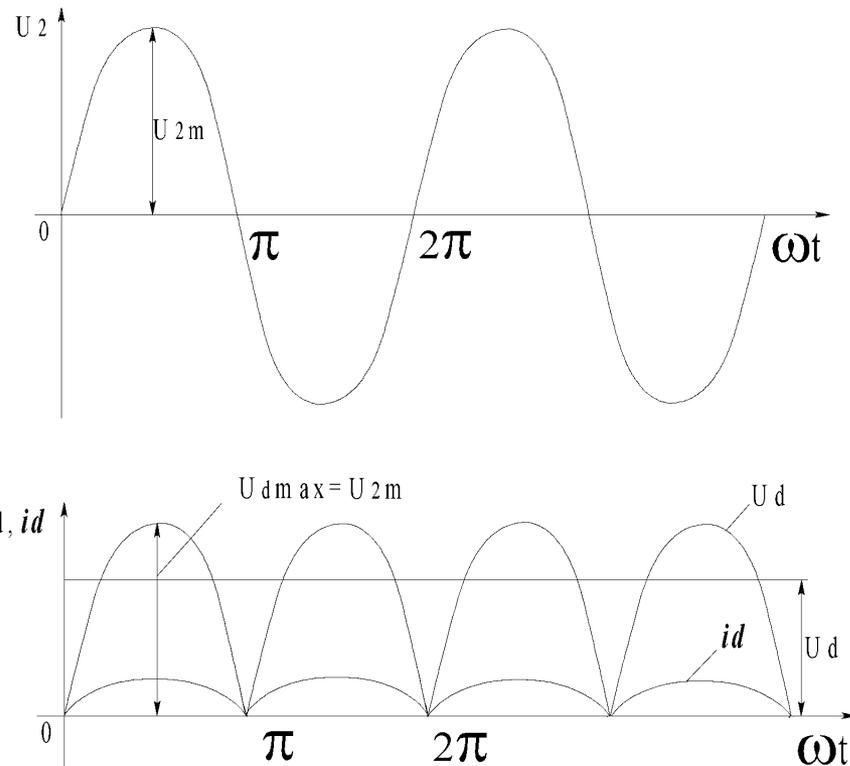
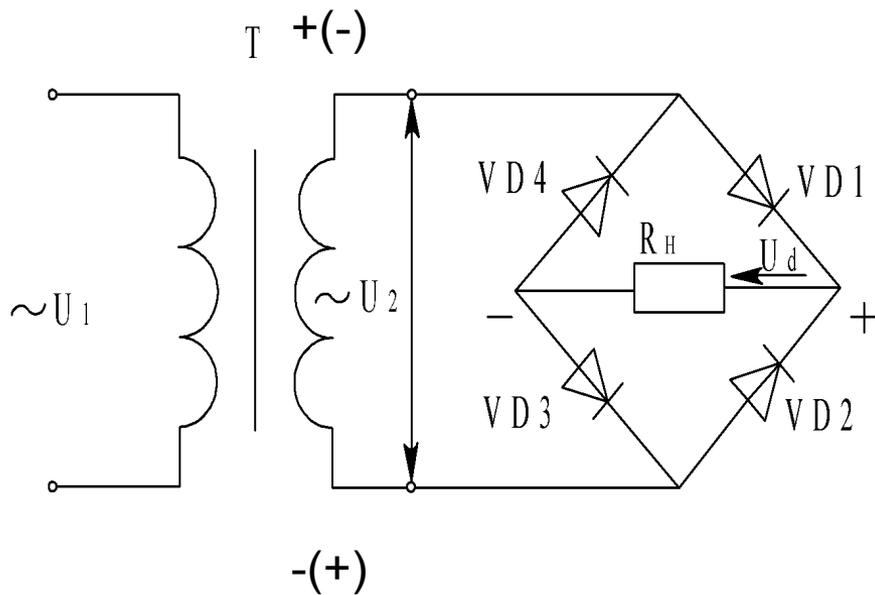


Двухполупериодный выпрямитель с выводом средней точки



$$U_{CP} = 2U_{ВЫХ} / \pi = 0,636U_{ВЫХ} \approx \approx 0,6U_{ВЫХ}$$

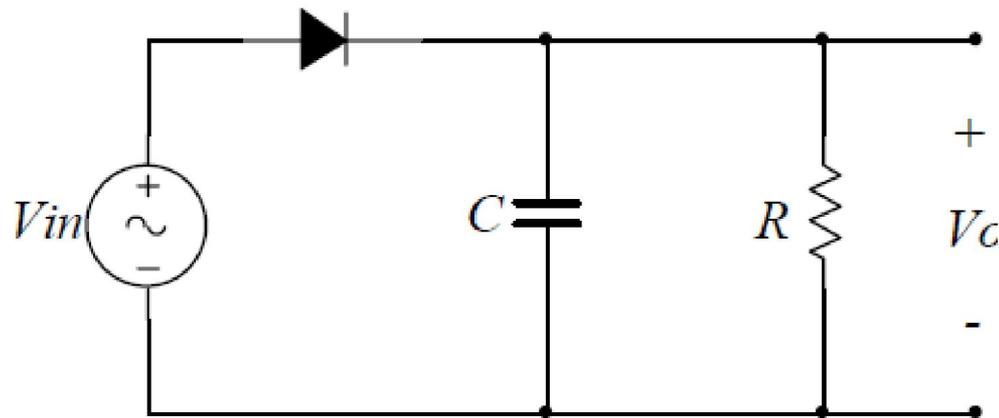
Двухполупериодный мостовой выпрямитель



$$U_{CP} = 2U_{ВЫХ} / \pi = 0,636U_{ВЫХ} \approx$$

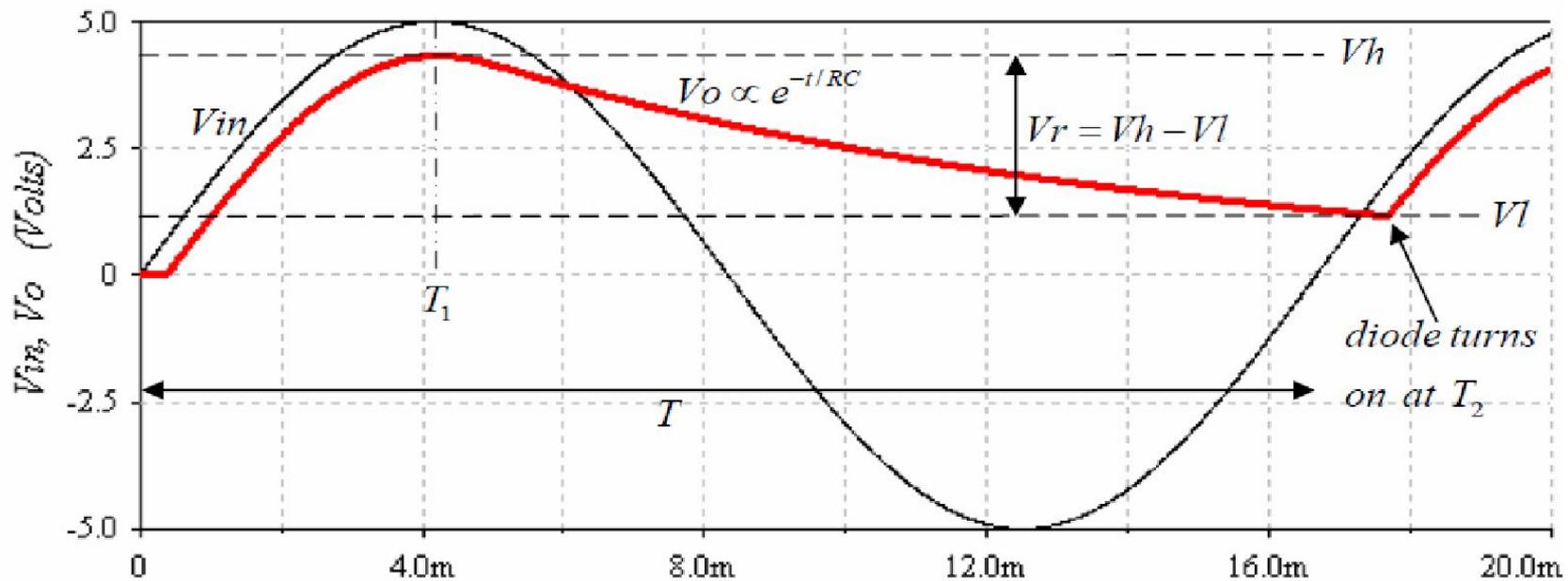
$$\approx 0,6U_{ВЫХ}$$

Однофазный выпрямитель с емкостной нагрузкой



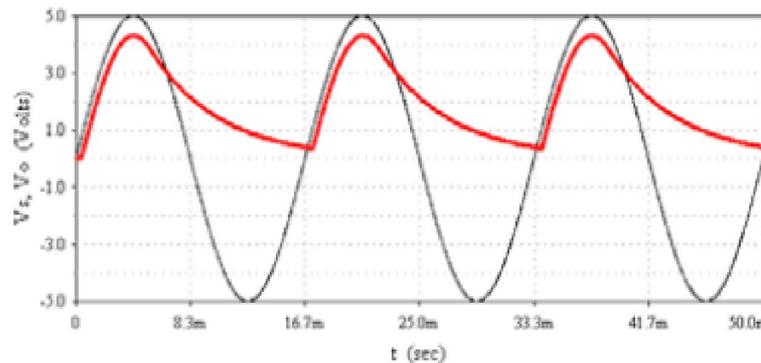
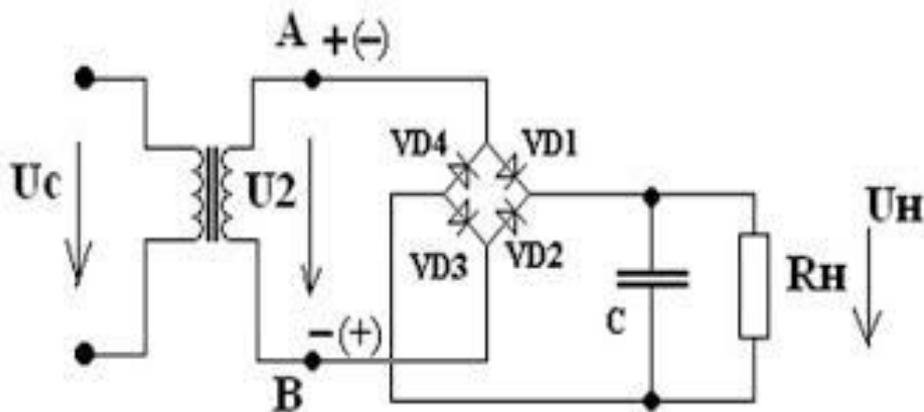
$$V_o(t) = V_h e^{-(t-T_1)/RC}$$

$$V_l = V_h e^{-(T_2-T_1)/RC}$$

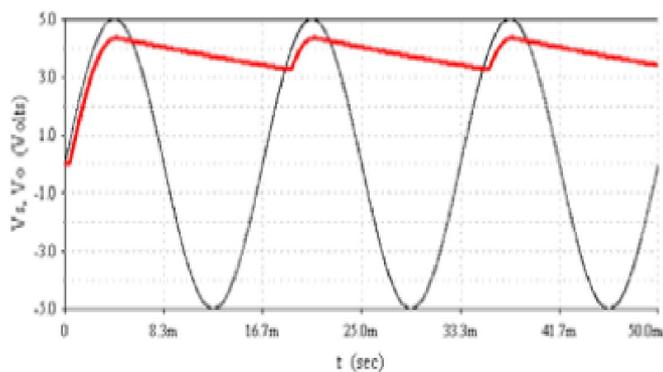


Однофазный двухполупериодный выпрямитель с емкостной нагрузкой

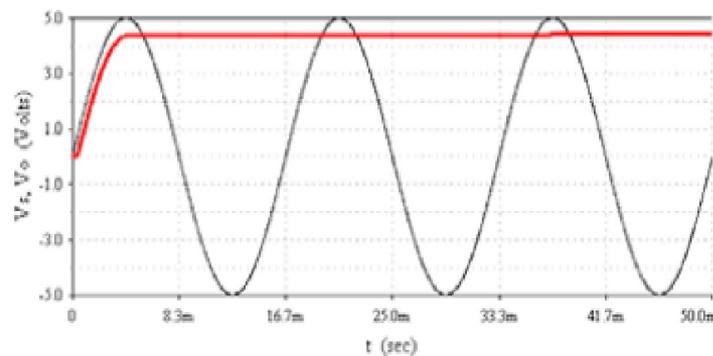
$$T=RC$$



(c) $C=5\mu\text{F}$, $R=1\text{k}\Omega$



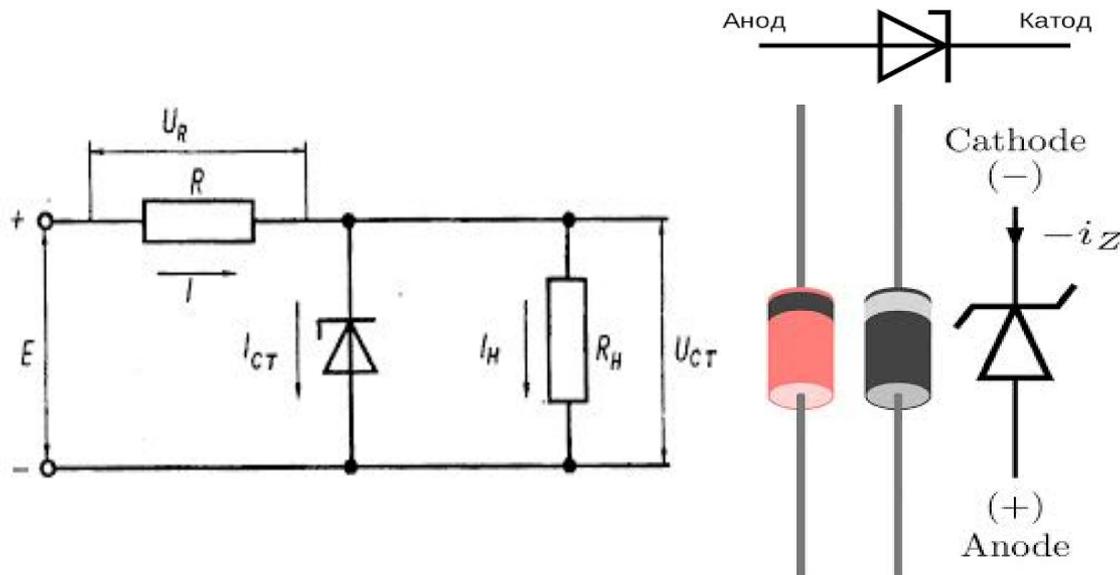
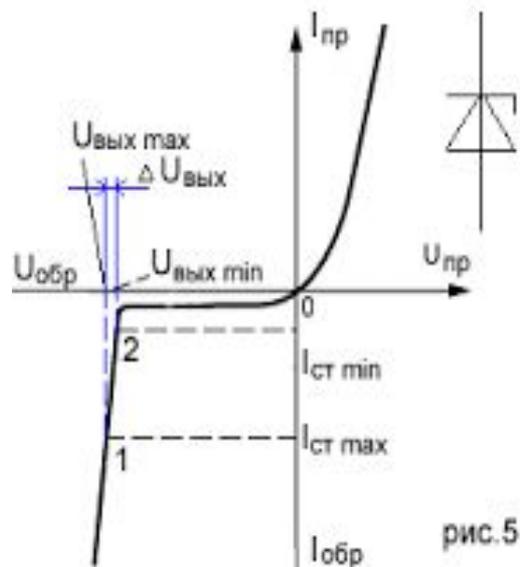
(d) $C=5\mu\text{F}$, $R=10\text{k}\Omega$



(e) $C=5\mu\text{F}$, $R= \text{infinite}$

Стабилитроны (Zener diode)

Это полупроводниковые диоды, предназначенные для стабилизации напряжения на участке цепи при резких колебаниях тока



Вольтамперная характеристика стабилитрона при обратном включении

Схема включения стабилитрона

Стабилитрон всегда включается в цепь в обратном направлении, при прямом включении он работает как обычный диод

Транзисторы.

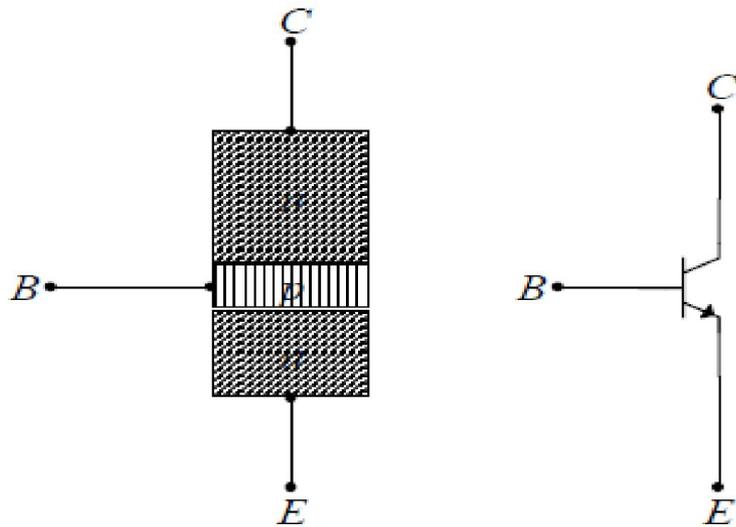
Транзистор (англ. **transistor**), полупроводниковый триод — радиоэлектронный компонент из полупроводникового материала, обычно с тремя выводами, позволяющий входным сигналом управлять током в электрической цепи.

Работа **биполярного транзистора**, основана на переносе зарядов одновременно двух типов, носителями которых являются электроны и дырки (от слова «би» — «два»).

Биполярные транзисторы (БТ) (международный термин — **BJT, bipolar junction transistor**).

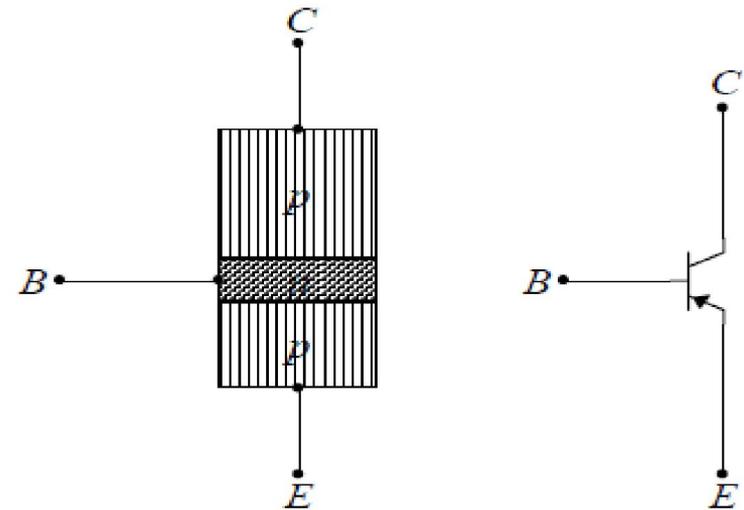
Биполярные транзисторы

$np + pn = npn$

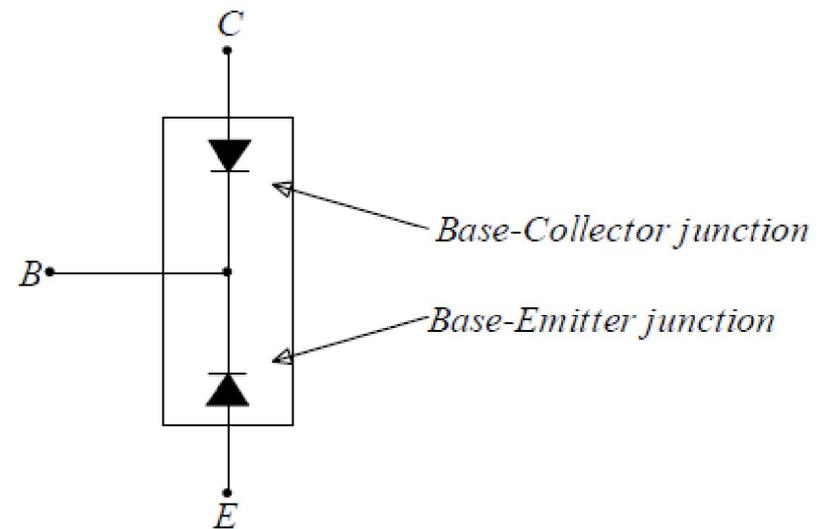
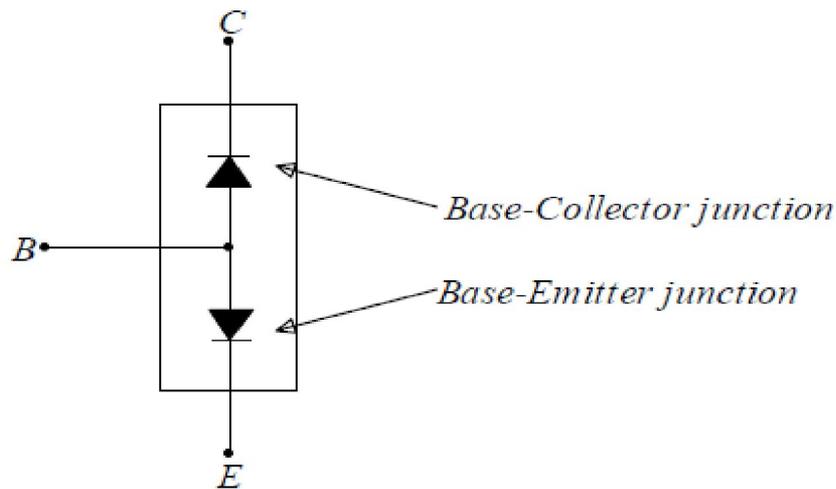


(a) *npn* transistor

$pn + np = pnp$

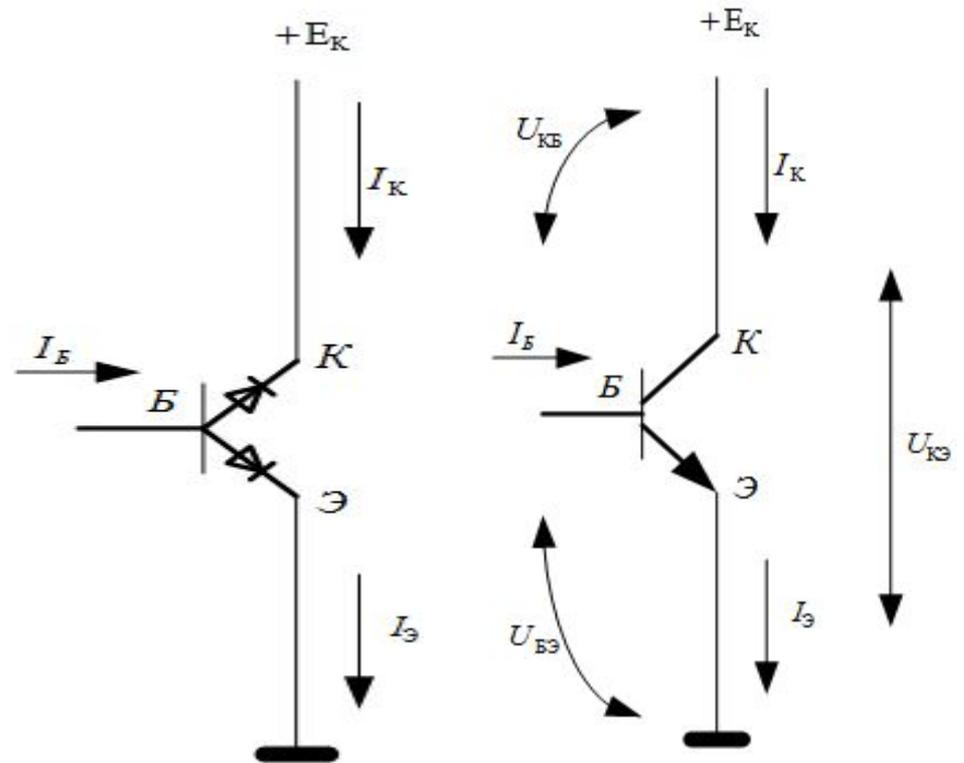
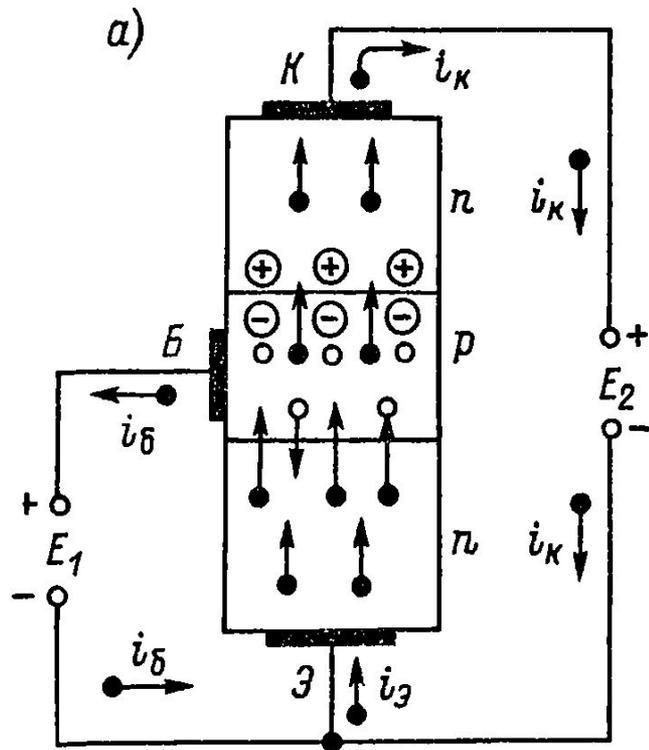


(b) *pnp* transistor



Процессы, протекающие в транзисторе в активном режиме

$$U_{K-Э} = U_{K-Б} + U_{Б-Э}. \quad U_{Б-Э} \ll U_{K-Б} \quad U_{K-Э} \approx U_{K-Б}.$$



$$i_Э = i_К + i_Б. \quad i_Б \ll i_Э, \quad i_К \approx i_Э.$$

$$i_{\mathcal{E}} = i_K + i_B; \quad i_K \approx \alpha i_{\mathcal{E}}; \quad \text{т.к. } i_K < i_{\mathcal{E}}; \quad \alpha < 1$$

$\alpha < 1$ - коэффициент передачи (усиления) тока эмиттера

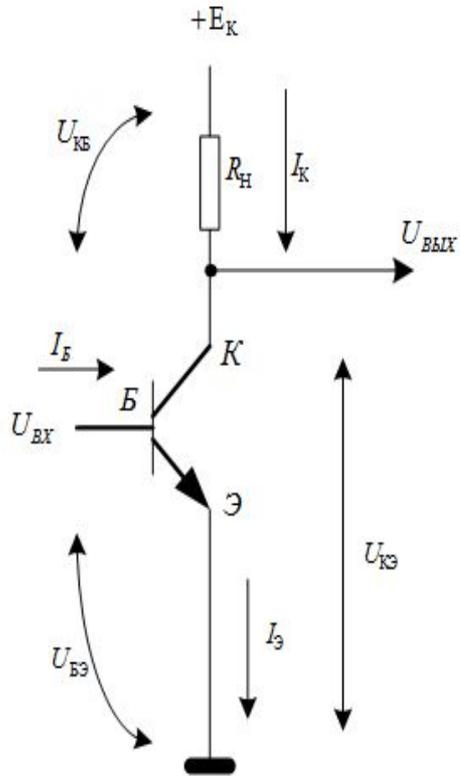
$$i_K = \alpha(i_K + i_B);$$

$$i_K = \frac{\alpha}{1 - \alpha} i_B; \quad \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \beta \gg 1$$

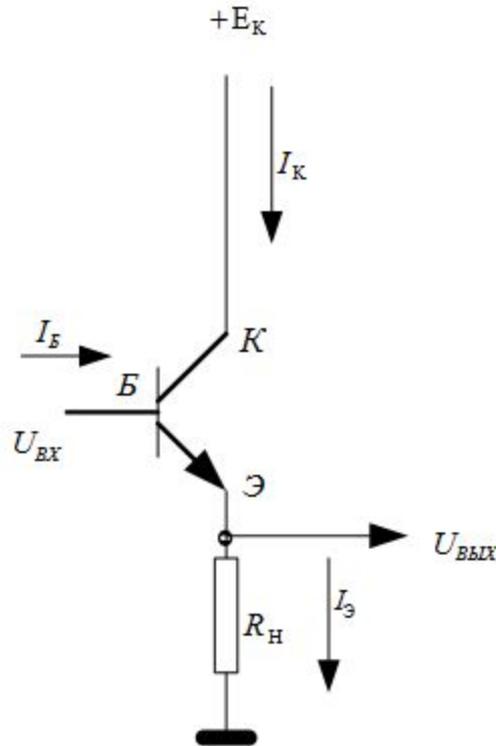
$$\frac{\beta}{1 - \beta} = \alpha$$

$\beta = \frac{i_K}{i_B} \gg 1$ - коэффициент передачи (усиления) тока базы

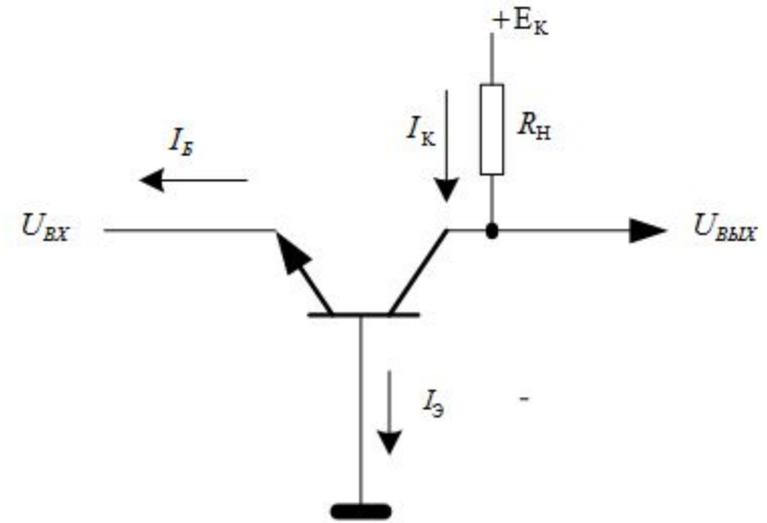
Схемы включения биполярного транзистора



ОЭ



ОК



ОБ

Статические характеристики транзистора

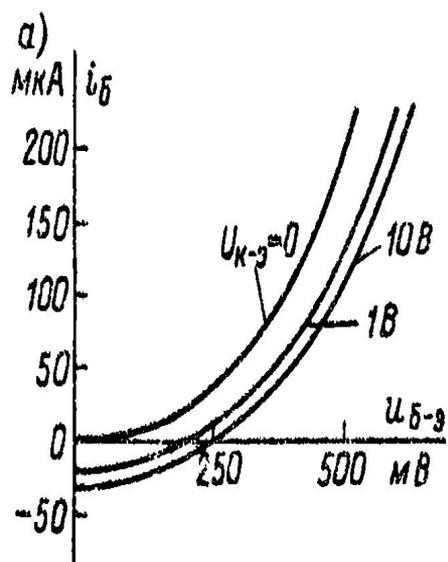


Рис.1. Входная характеристика

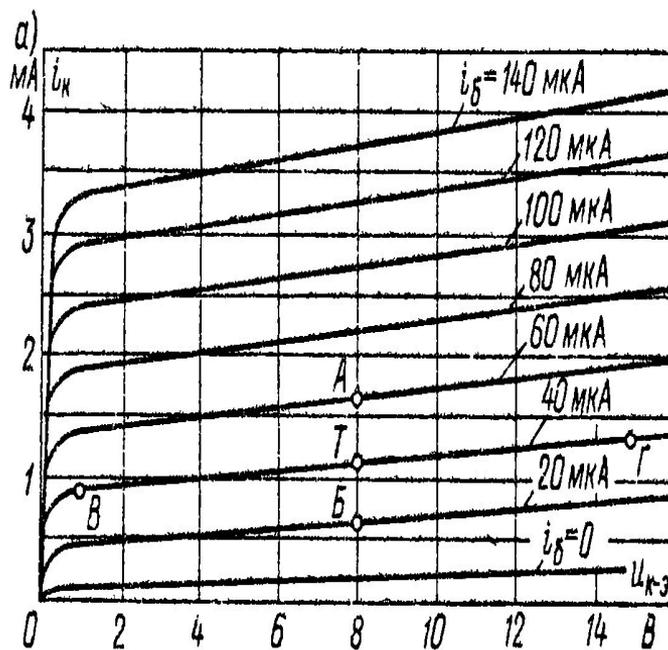


Рис.2. Семейство выходных характеристик

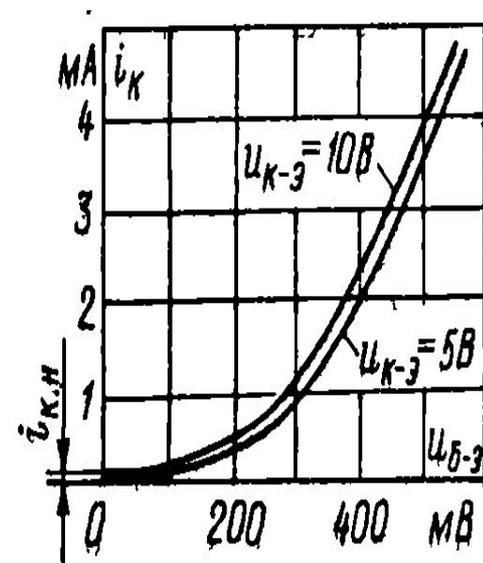
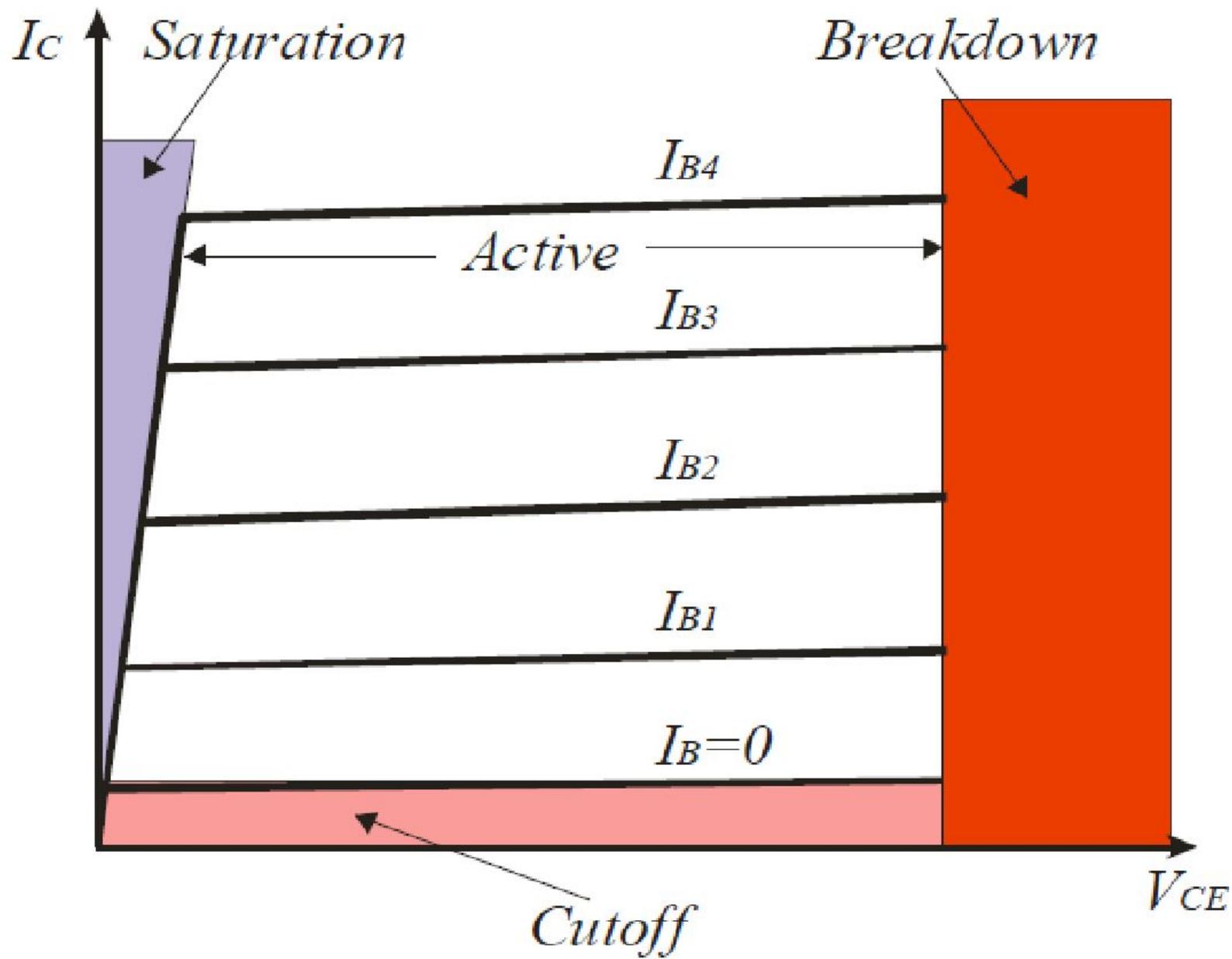
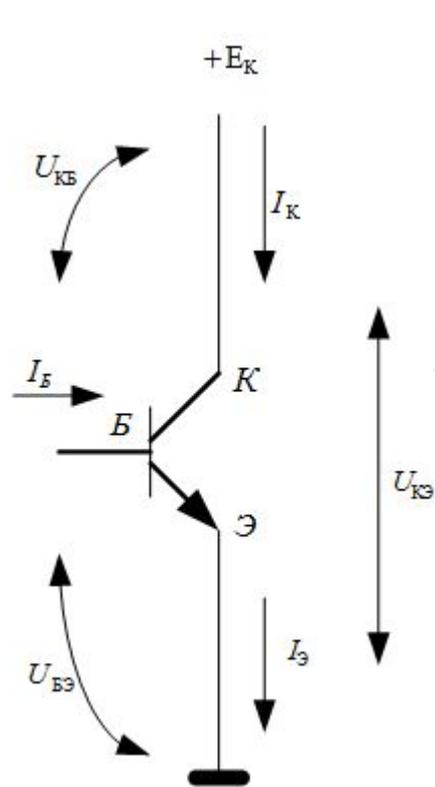


Рис.3. Передаточная х-ка



Основные соотношения токов и напряжений в схеме с общим эмиттером (режим покоя)



$$U_{КЭ} = U_{КБ} + U_{БЭ} \quad I_{Э} = I_{К} + I_{Б}$$

$$I_{К} = \beta \cdot I_{Б} \quad I_{Э} = \beta I_{Б} + I_{Б} = (1 + \beta) I_{Б}$$

$$\beta = \frac{I_{К}}{I_{Б}} - \text{Коэффициент передачи (усиления) тока базы}$$

$$\beta \gg 1, \quad I_{Э} \approx \beta I_{Б}$$

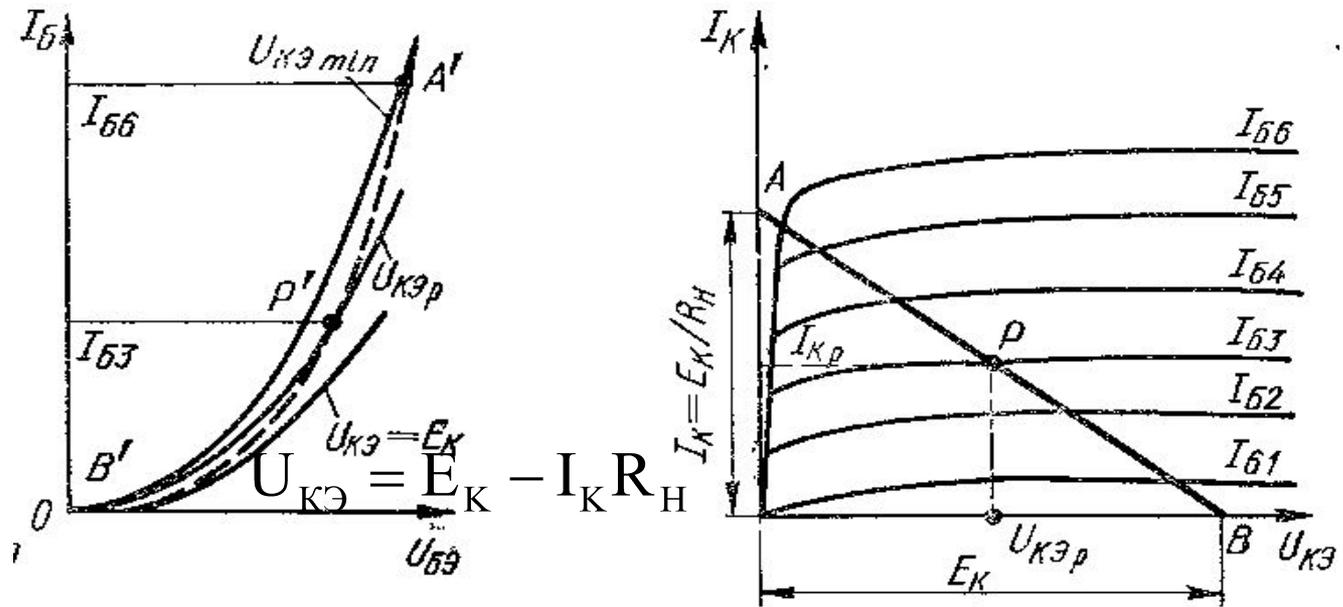
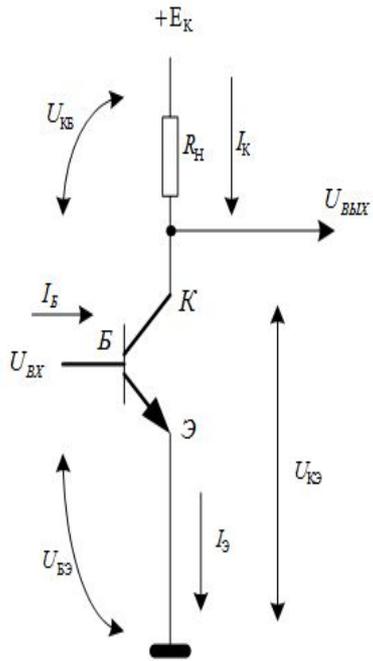
$$I_{К} = \frac{\beta}{1 + \beta} I_{Э} \quad \frac{\beta}{1 + \beta} = \alpha \leq 1 \quad I_{К} = \alpha I_{Э} \quad I_{К} \approx I_{Э}$$

α - Коэффициент передачи (усиления) тока эмиттера

$$U_{КЭ} = E_{К} - I_{К} R_{Н}$$

$$\beta \approx 100, \quad \alpha \approx 0,97 - 0,99$$

Графо-аналитический метод выбора рабочей точки



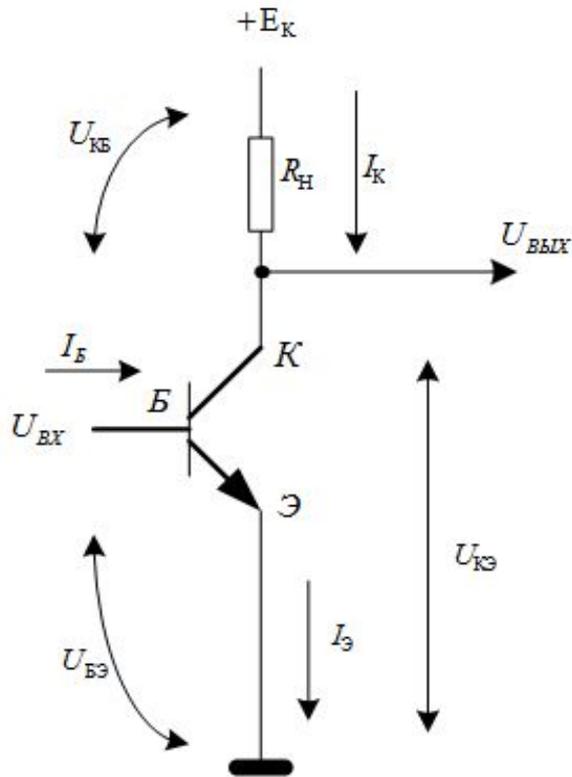
$$U_{KЭ} = E_K - I_K R_H$$

1. $I_K = 0$, $U_{KЭ} = E_K$ – режим "отсечки"
2. $U_{KЭ} = 0$, $I_K = E_K / R_H$ – режим "насыщения"

Ток коллектора задается величиной сопротивления нагрузки (коллектора). Положение рабочей точки определяется током базы, который можно задать подачей смещения на базу .

Схемы включения биполярных транзисторов.

Схема с общим эмиттером



$r_{BX, OЭ}$ Входное сопротивление транзистора в схеме с ОЭ (приводится в паспорте)

Коэффициент усиления по току (высокий)

$$K_U = \frac{I_{ВЫХ}}{I_{ВХ}} = \frac{I_K}{I_B} = \beta \gg 1$$

Коэффициент усиления по напряжению (высокий)

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{I_K R_K}{I_B R_{ВХ}} = \frac{\beta R_K}{r_{ВХ, OЭ}} \gg 1$$

Входное сопротивление (высокое)

$$R_{ВХ} = \frac{U_{ВХ}}{I_{ВХ}} = \frac{I_B r_{ВХ, OЭ}}{I_B} = r_{ВХ, OЭ} \gg 1$$

Выходное сопротивление (высокое)

$$R_{ВЫХ} \approx R_K$$

Схема с общим коллектором

Коэффициент передачи по току (высокий)

$$K_I = \frac{I_{\mathcal{E}}}{I_B} = \beta + 1 \quad I_{\mathcal{E}} = \beta I_B + I_B = (1 + \beta) I_B$$

Коэффициент усиления по напряжению (низкий)

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} \approx 1$$

Входное сопротивление (высокое)

$$R_{ВХ} = \frac{U_{ВХ}}{I_{ВХ}} = \frac{I_B r_{ВХ,ОЭ}}{I_B} = r_{ВХ,ОЭ} \gg 1$$

Выходное сопротивление (низкое)

$$R_{ВЫХ} \approx R_{\mathcal{E}}$$

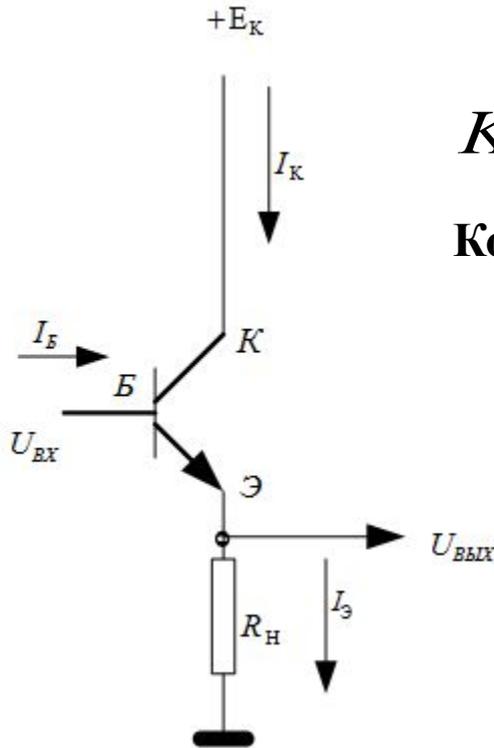


Схема с общей базой

Коэффициент передачи по току (низкий)

$$K_I = \frac{I_K}{I_{\mathcal{E}}} = \alpha < 1$$

Коэффициент усиления по напряжению (высокий)

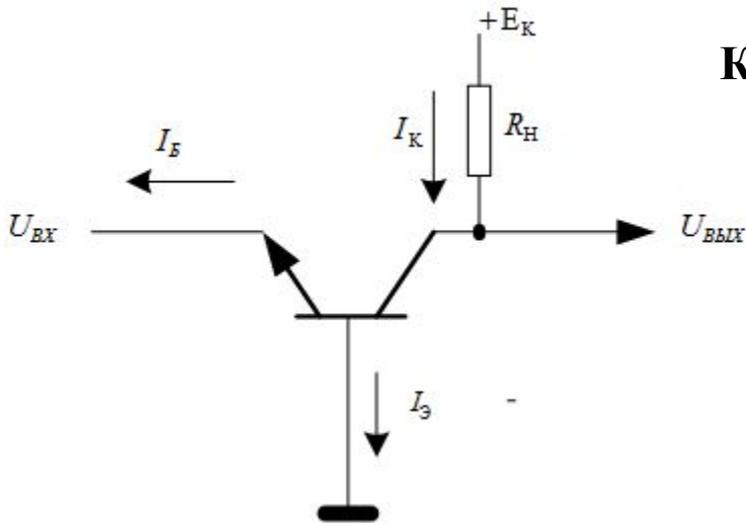
$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} > 1$$

Входное сопротивление (низкое)

$$R_{ВХ} = \frac{U_{ВХ}}{I_{ВХ}} = \frac{I_{\mathcal{E}} r_{ВХ, \mathcal{O}\mathcal{E}}}{I_B} \approx \frac{I_K r_{ВХ, \mathcal{O}\mathcal{E}}}{I_B} \approx \frac{r_{ВХ, \mathcal{O}\mathcal{E}}}{\beta}$$

Выходное сопротивление (высокое)

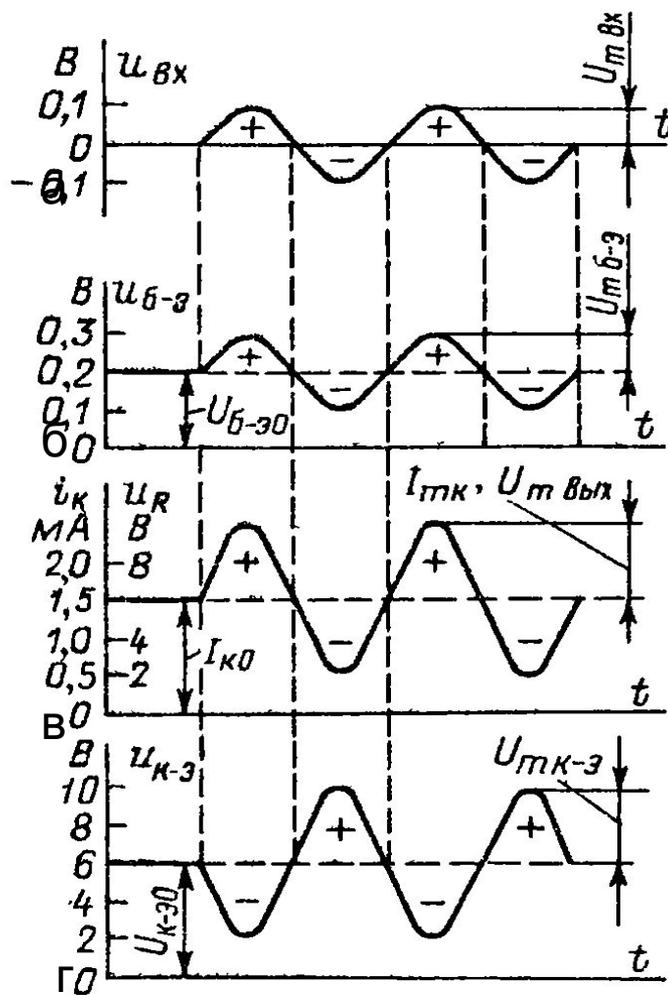
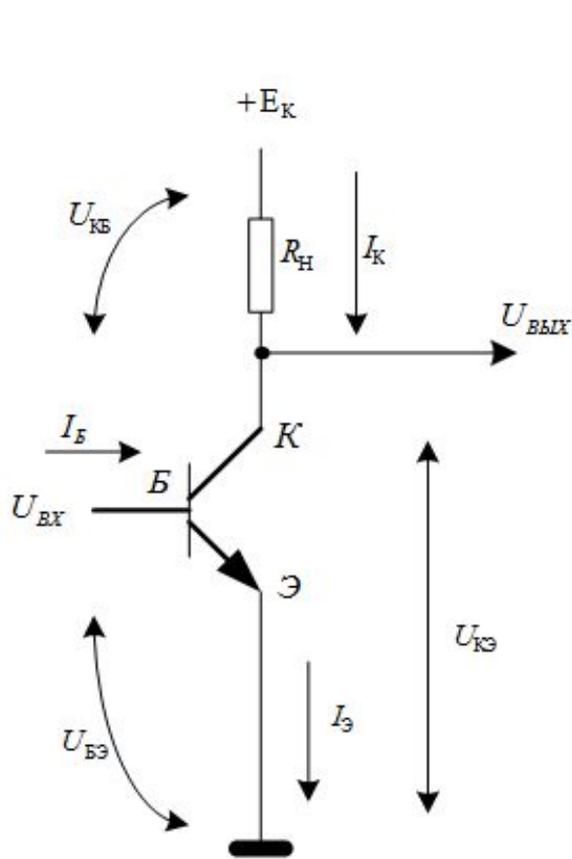
$$R_{ВЫХ} \approx R_K$$



Сравнительные характеристики схем

Схема	Кэф. усиления по напряжению	Кэф. усиления по току	Входное сопр.	Выходное сопр.
ОЭ	Выс.	Выс.	Выс.	Выс.
ОБ	Выс.	Низк.	Низк.	Выс.
ОК	Низк.	Выс.	Выс.	Низк.

Принцип усиления напряжения в схеме с ОЭ в динамическом режиме



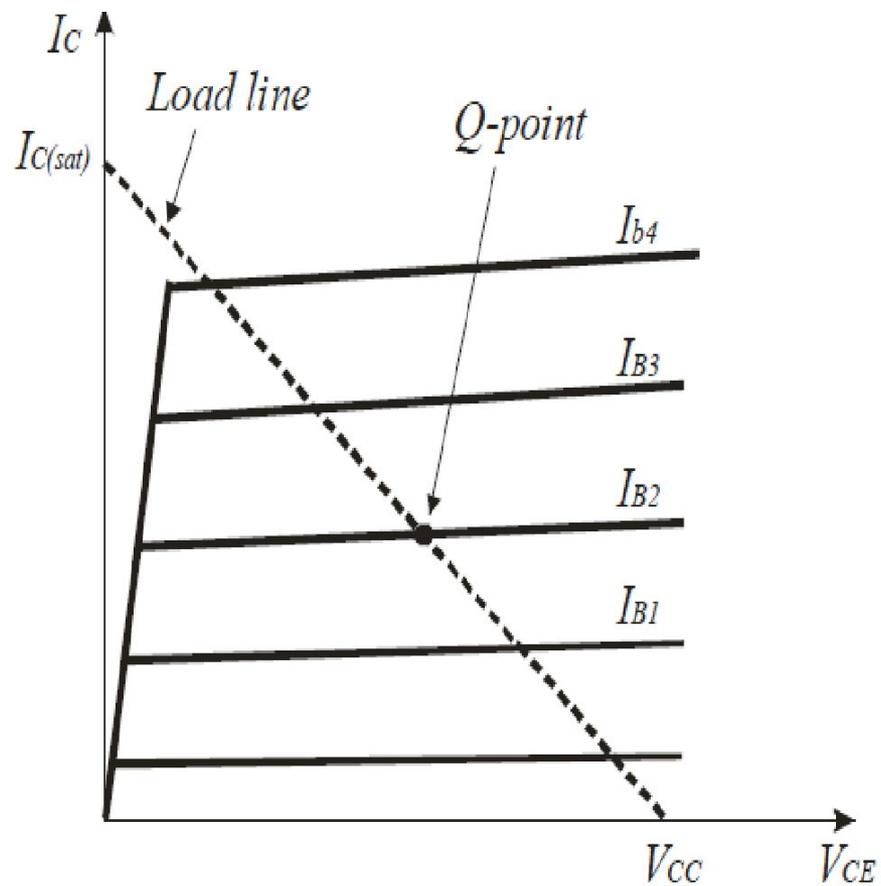
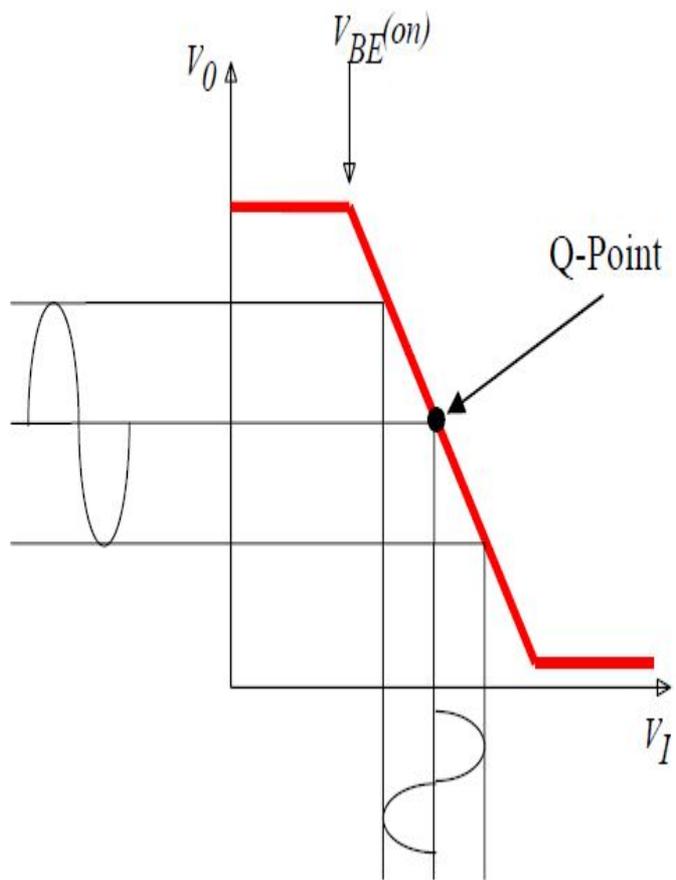
$$U_{КЭ} = E_K - I_K R_H$$

$$I_K R_H \rightarrow \uparrow$$

$$U_{КЭ} \rightarrow \downarrow$$

Работа транзистора с нагрузкой называется динамическим режимом
Каскад с ОЭ инвертирует входной сигнал

Режим линейного усиления



Нелинейное усиление

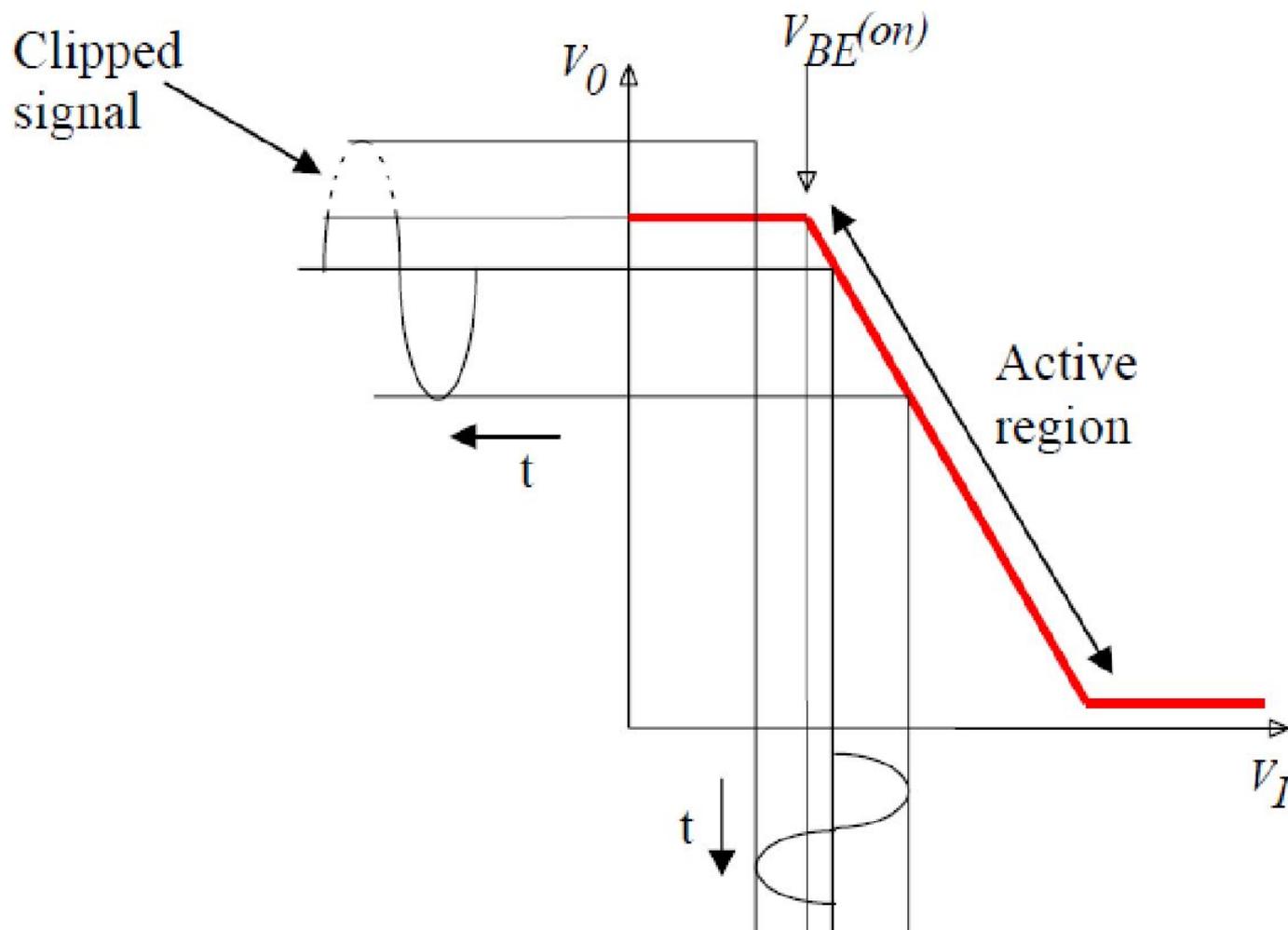
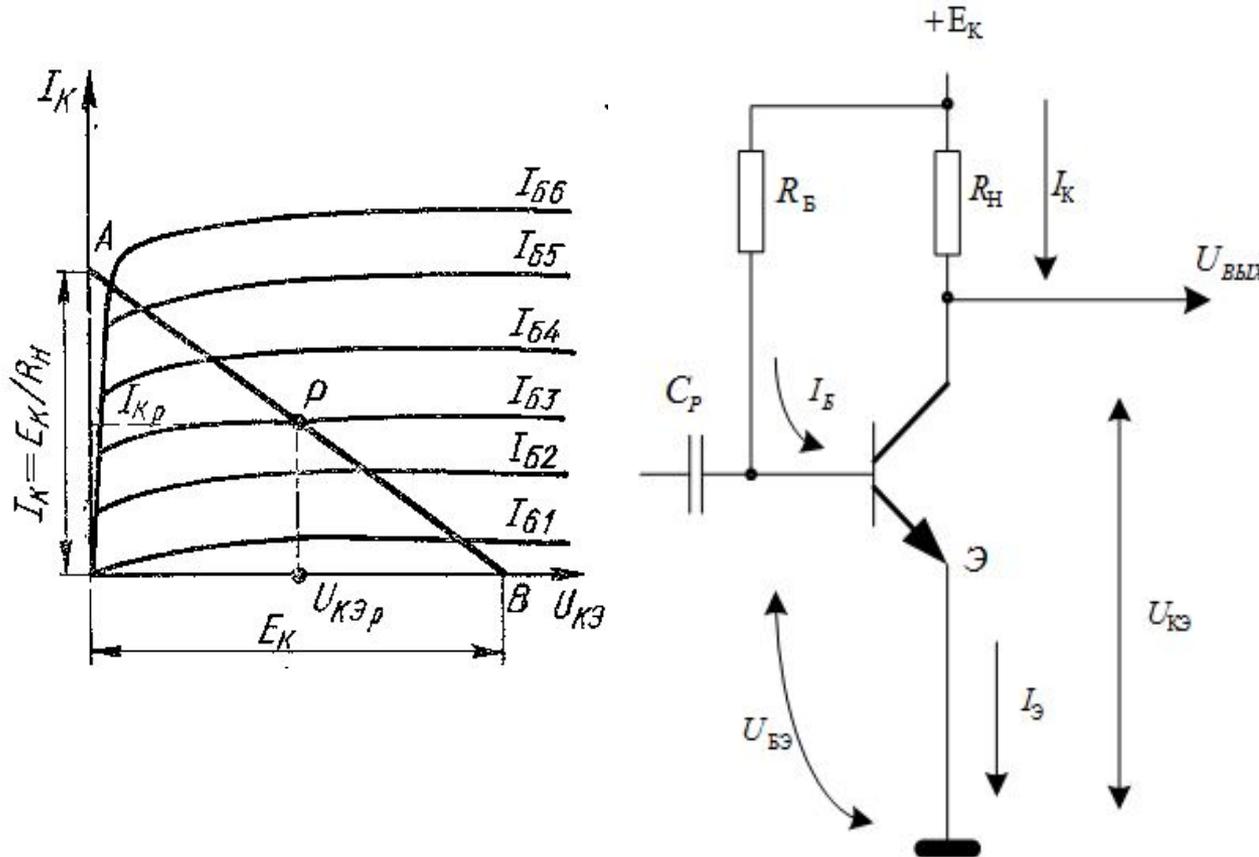


Схема смещения фиксированным током базы

С помощью дополнительного резистора в цепи базы задается ток смещения базы и фиксируется рабочая точка

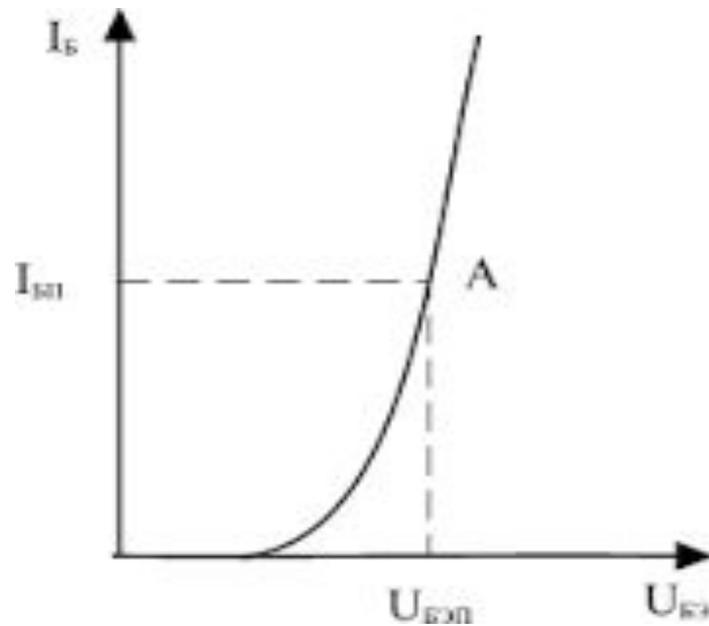
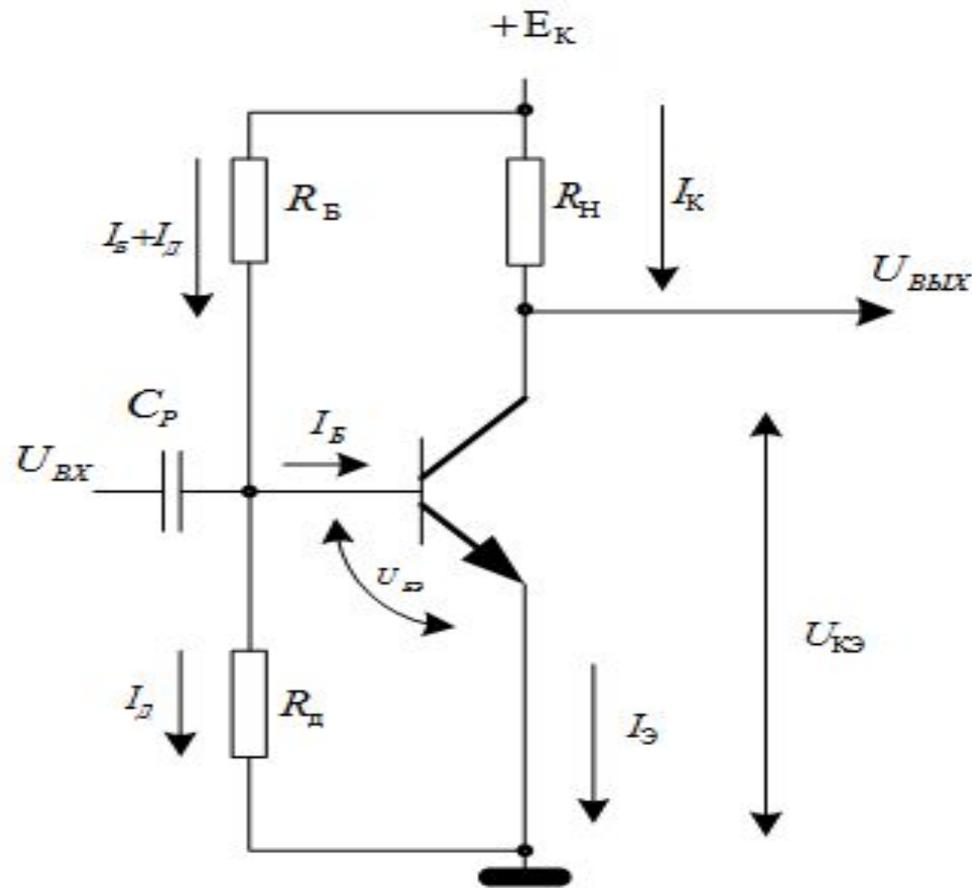


$$R_B = \frac{E_{КЭ} - U}{I_B} = \frac{E_K - 0,7}{I_B}$$

$$I_B \approx \frac{E_K}{R_B}$$

Таким образом, ток базы определяется фиксированными величинами напряжения источника питания и сопротивления резистора R_B

Схема смещения фиксированным напряжением база-эмиттер



$$I_D = (2 - 5)I_B$$

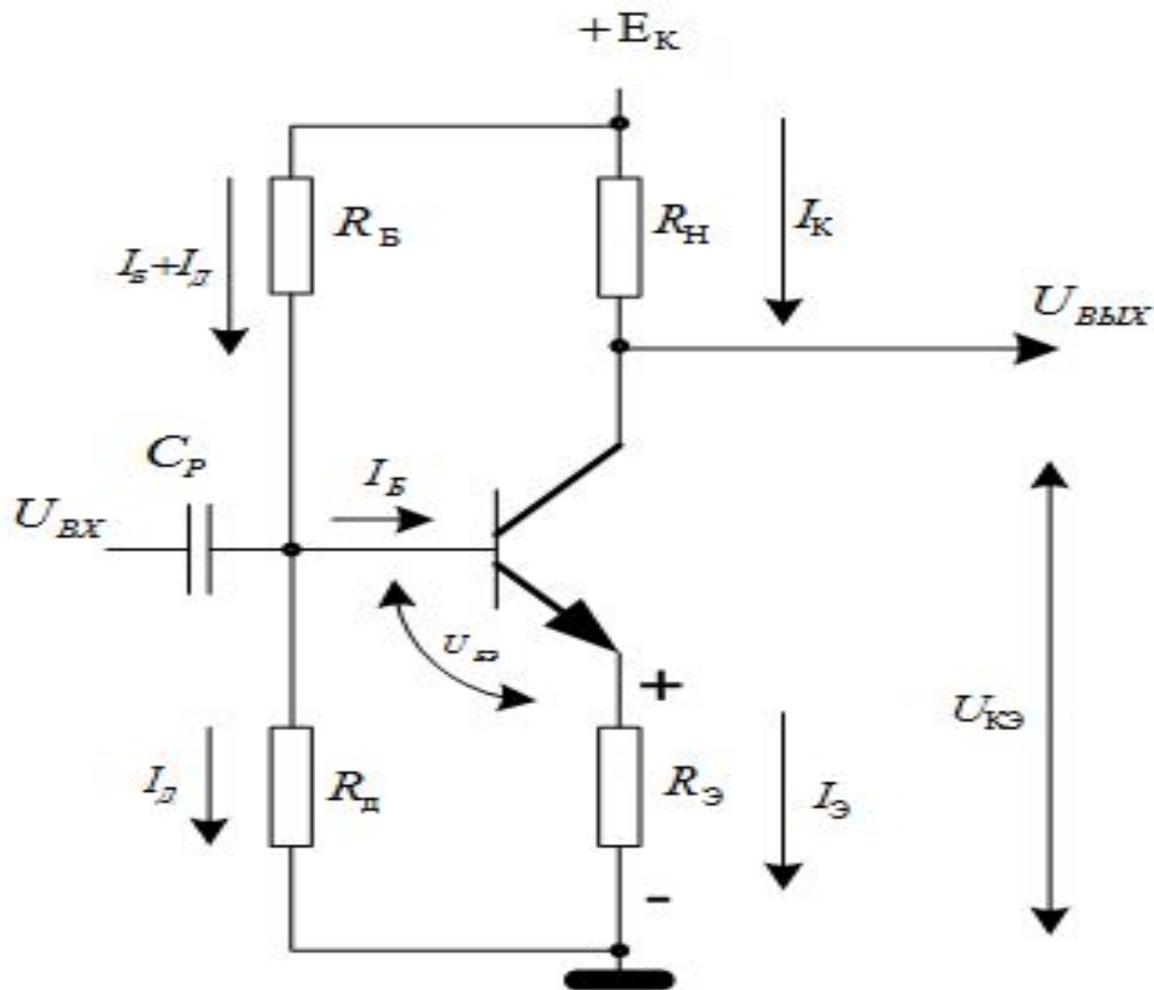
$$R_D = \frac{U_B}{I_D}$$

$$R_B = \frac{E_K - U_B}{I_B + I_D}$$

$$U_B = \frac{R_D}{R_B + R_D} E_K$$

Стабилизация рабочей точки в схеме с ОЭ

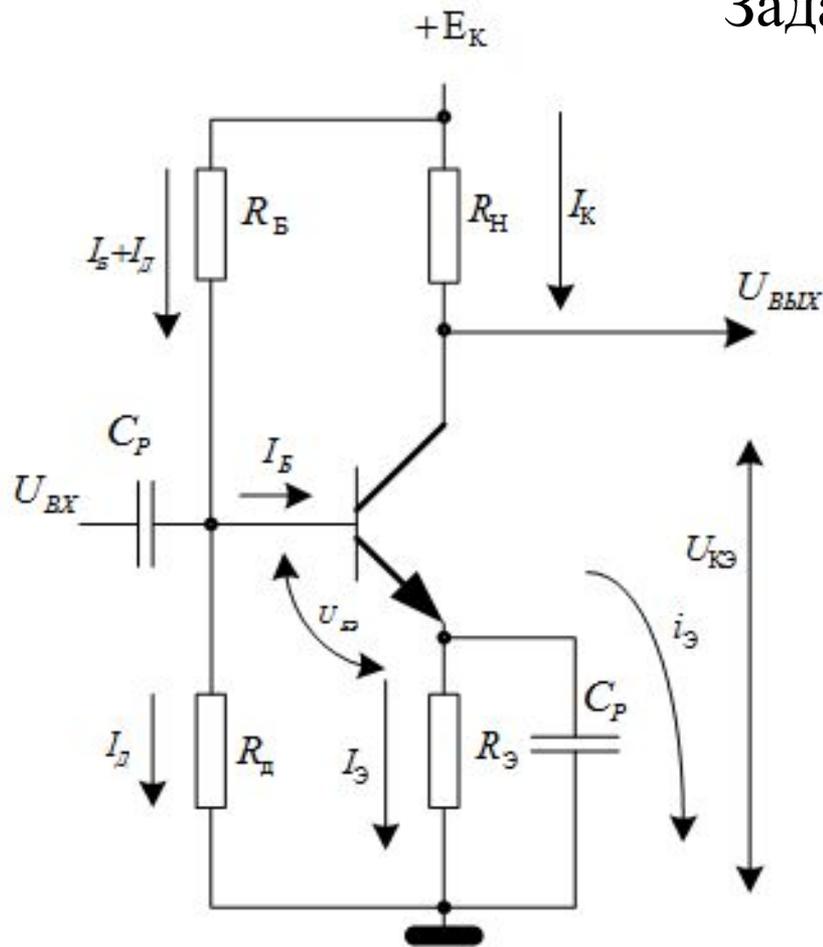
$$I_K \approx I_{\text{Э}}$$



$t^0(E_K) \uparrow \rightarrow I_K \uparrow \rightarrow I_{\text{Э}} \uparrow \rightarrow +U_{R_{\text{Э}}} \uparrow \rightarrow U_{\text{БЭ}} \downarrow \rightarrow \text{транзистор запирается} \rightarrow I_{\text{Э}} \downarrow$

Стабилизация рабочей точки в схеме с ОЭ

Задаются токи покоя I_K I



$$I_D = (2 - 5)I_B \quad I_K \approx I_{\mathcal{E}}$$

$$R_B = \frac{E_K - (U_{БЭ} + I_{\mathcal{E}}R_{\mathcal{E}})}{I_B + I_D}$$

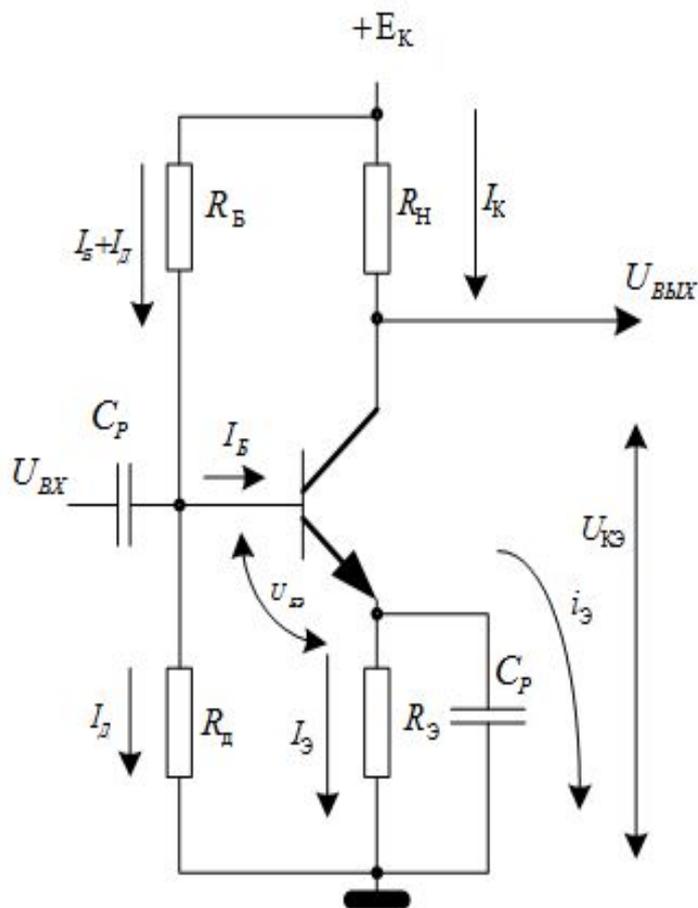
$$R_D = \frac{U_{БЭ} + I_{\mathcal{E}}R_{\mathcal{E}}}{I_D}$$

$$R_{\mathcal{E}} = \frac{U_{\mathcal{E}}}{I_{\mathcal{E}}} = \frac{(0,12 \dots 0,2)E_K}{I_{\mathcal{E}}}$$

$$C_{\mathcal{E}} \geq \frac{1}{2\pi f_H R_{B\mathcal{X}O_{\mathcal{E}}}}$$

$$R_K = \frac{E_K - U_{КЭ}}{I_K}$$

Параметры каскада



Входное сопротивление

$$R_{ВХБ} = \frac{U_{ВХ}}{I_{ВХ}} = \frac{I_Б r_{БХ,ОЭ} + I_Э R_Э}{I_Б} = \frac{I_Б r_{БХ,ОЭ} + (I_Б + I_К) R_Э}{I_Б} =$$

$$= \frac{I_Б [r_{БХ,ОЭ} + (\beta + 1) R_Э]}{I_Б} \approx r_{БХ,ОЭ} + \beta R_Э$$

$$R_{ВХБ} \approx \beta R_Э, \quad r_{БХ,ОЭ} \gg r_{БХ,ОЭ}$$

$$R_{ВХ} = \frac{R_Б R_Д}{R_Б + R_Д} \beta R_Э,$$

Коэффициент усиления

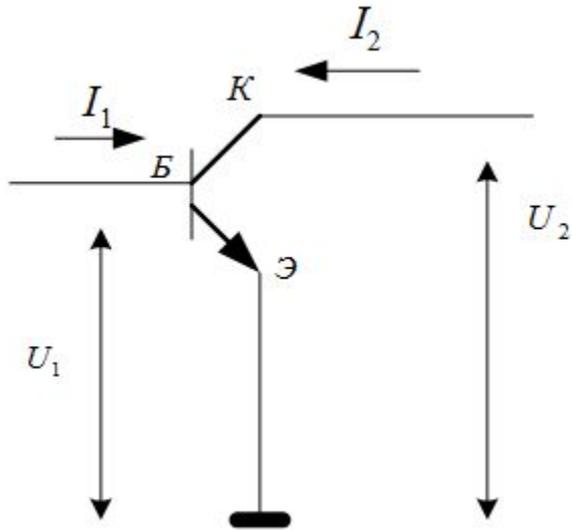
$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{I_К R_К}{I_Б R_{ВХ}} = \frac{\beta R_К}{r_{БХ,ОЭ} + (\beta + 1) R_Э} \approx \frac{R_К}{R_Э}$$

Выходное сопротивление

$$R_{ВЫХ} \approx R_К$$

Эквивалентные схемы и параметры транзистора.

h-параметры



1. **Входное сопротивление** — сопротивление транзистора переменному входному току при отсутствии на выходе переменного напряжения

$$h_{11} = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \text{ при } \Delta U_2 = const$$

2. **Коэффициент обратной связи по напряжению.** Показывает какая доля выходного переменного напряжения передается на вход транзистора вследствие обратной связи в нем

$$h_{12} = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \text{ при } \Delta I_1 = const$$

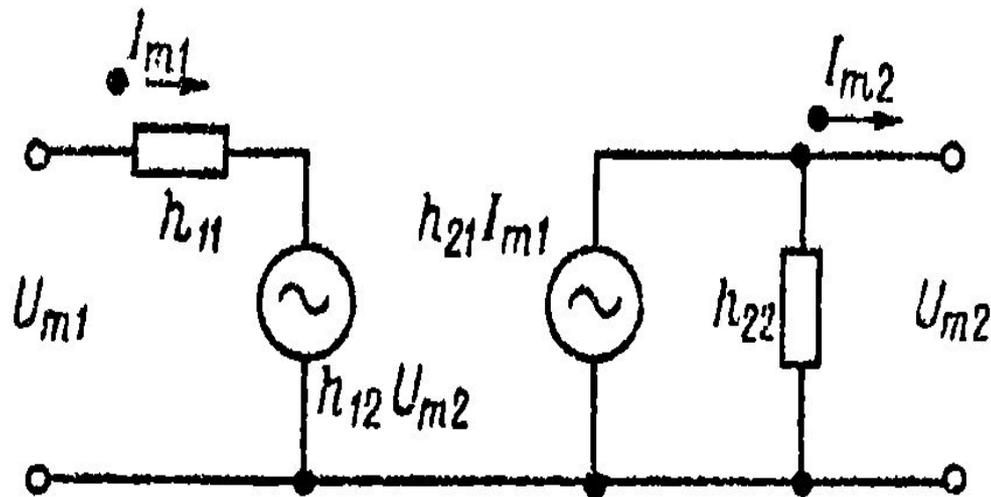
3. Коэффициент усиления по току (коэффициент передачи по току) – показывает величину усиления переменного тока транзистора в режиме работы без нагрузки

$$h_{21} = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} \text{ при } \Delta U_2 = const$$

4. Выходная проводимость – внутренняя проводимость для переменного тока между выходными зажимами транзистора

$$h_{22} = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} \text{ при } \Delta I_1 = const$$

Эквивалентная схема транзистора с ОЭ



$$U_{m1} = h_{11}I_{m1} + h_{12}U_{m2};$$

$$I_{m2} = h_{21}I_{m1} + h_{22}U_{m2}.$$

Полевые (униполярные) транзисторы

JFET (junction field-effect transistor)

Полевым транзистором называется полупроводниковый прибор, работа которого основана на модуляции сопротивления полупроводникового материала поперечным электрическим полем. Т.е. управление в таком транзисторе осуществляется полем.

Полевые транзисторы часто называют униполярными. Т.к. в канале протекают носители одного типа.

Полевые транзисторы бывают двух видов;

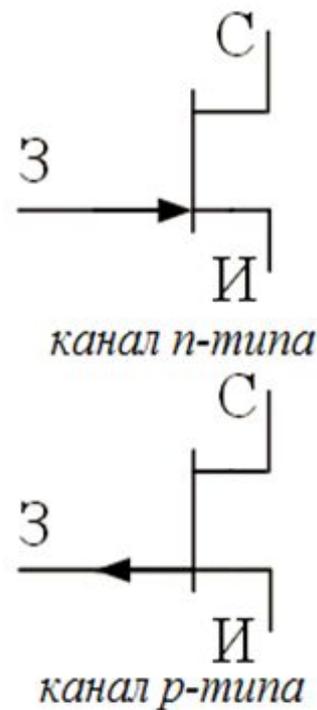
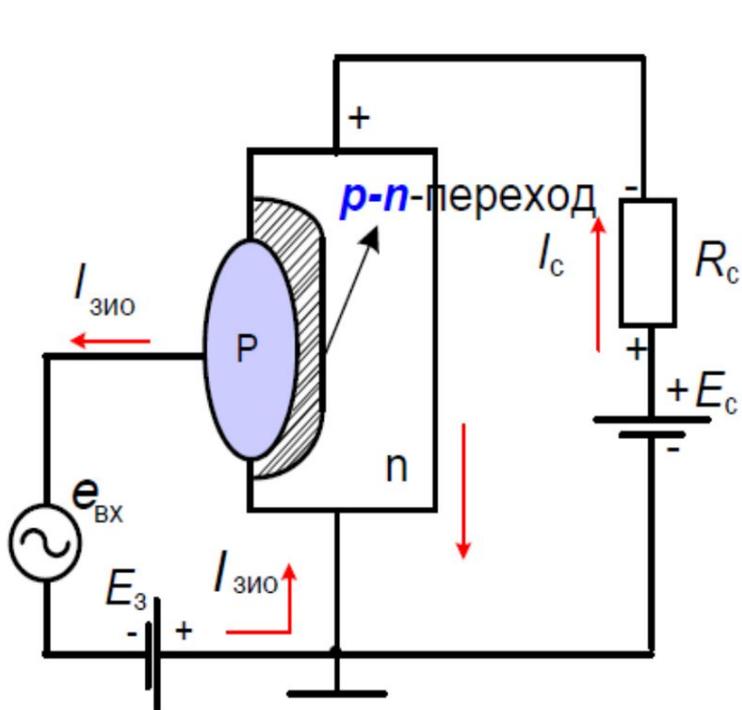
- с управляющим **p-n** переходом (бывают с каналом **n-типа** или с каналом **p-типа**)
- со структурой **металл-диэлектрик-полупроводник** (МДП-транзистор). Часто в качестве диэлектрика применяют окисел кремния, поэтому их часто называют **МОП-транзистор** (**металл-окисел-полупроводник**, *metal-oxide-semiconductor field effect transistor*, сокращенно **MOSFET**).

МОП-транзисторы могут быть двух типов:

- транзисторы с встроенным каналом;
- транзисторы с индуцированным каналом.

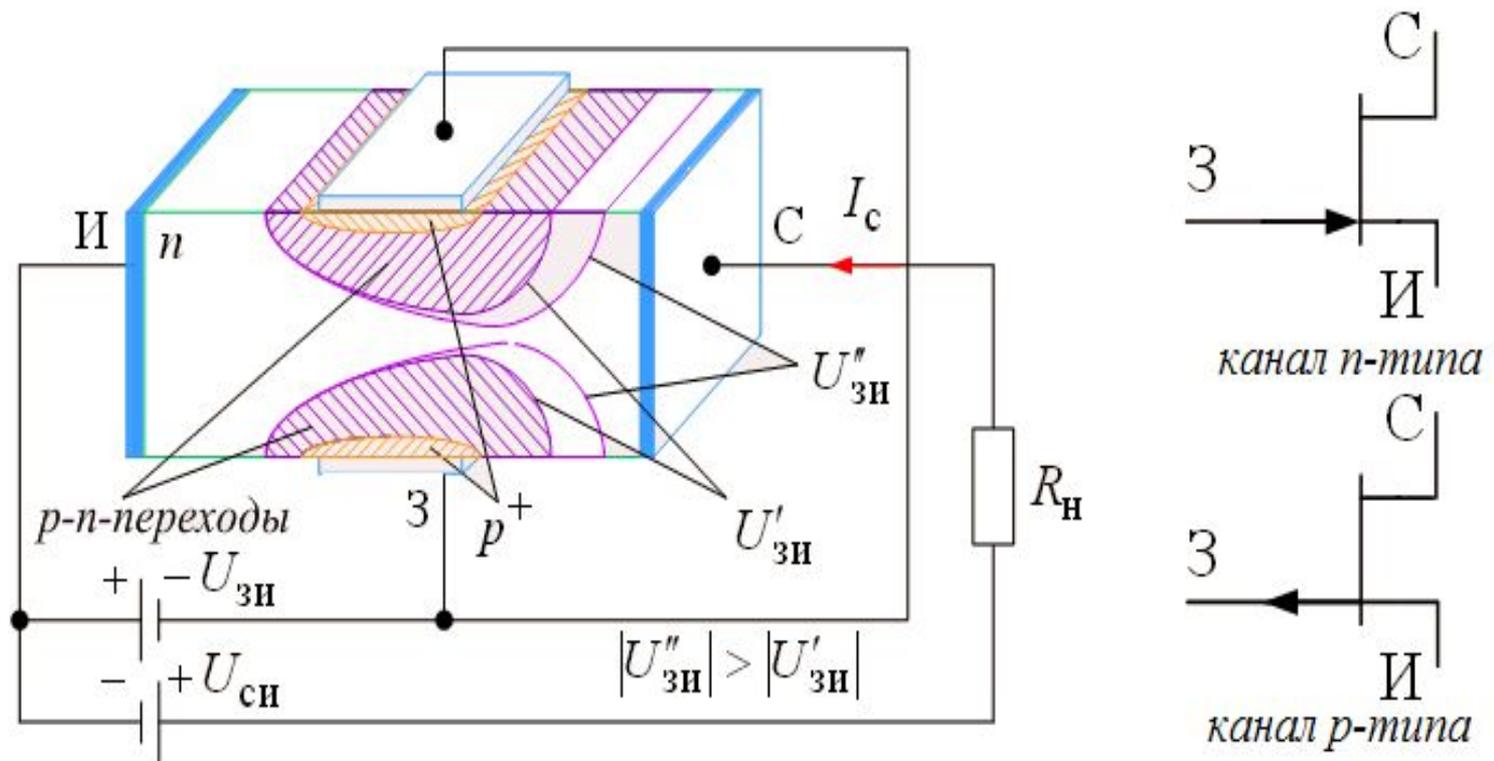
Полевые транзисторы с управляющим p-n-переходом

Полевой транзистор представляет собой монокристалл полупроводника (например **n – типа**) по торцам которого сформированы электроды, а посередине создана область противоположного типа проводимости (соотв. **p-типа**) и выводы от этой области. Тогда на границе раздела областей с различным типом проводимости возникнет **p-n-переход**.

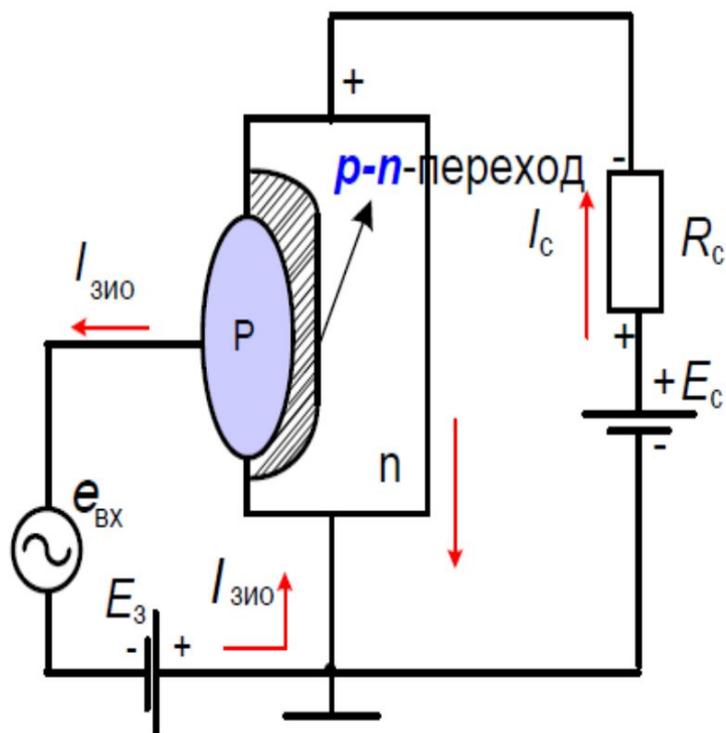


- Электрод, от которого движутся основные носители заряда в канале, называют истоком, а электрод, к которому движутся, - стоком. Управляющий электрод называют затвором.
- Для эффективного управления выходным током материал основного полупроводника должен быть высокоомным. Кроме того, начальная ширина канала должна быть достаточно малой – порядка нескольких микрон.

Полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом



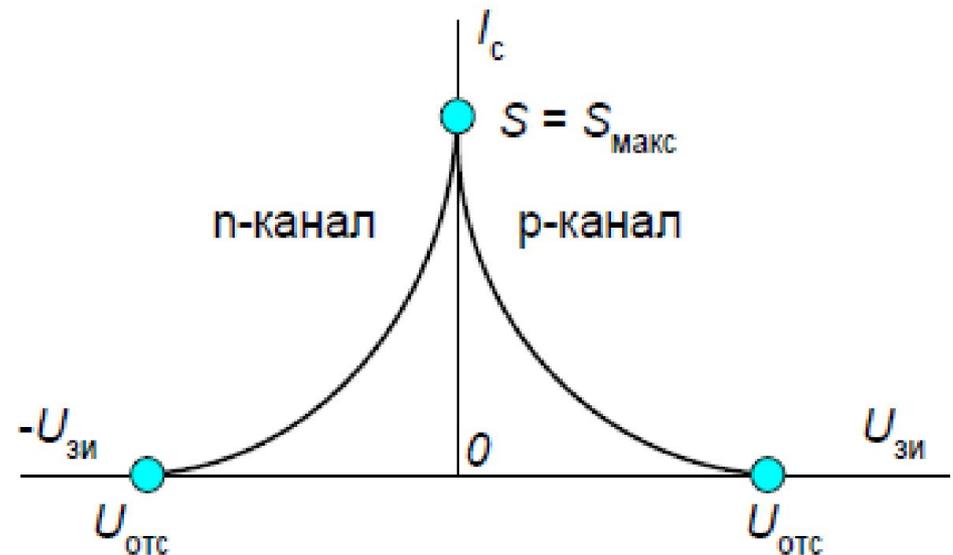
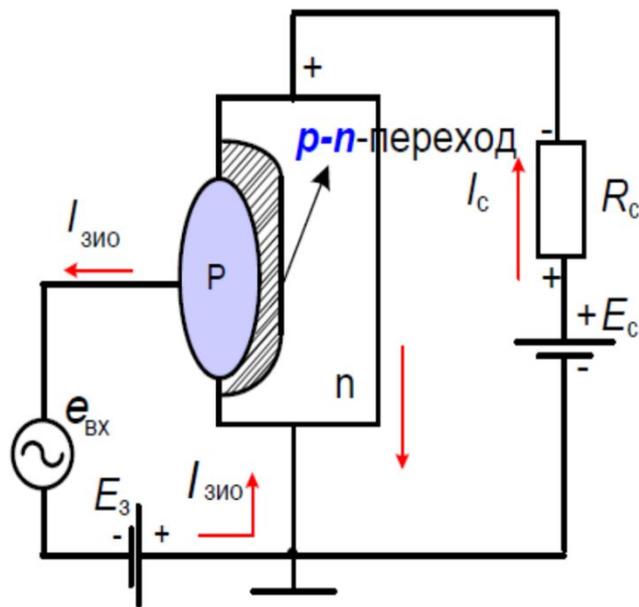
Полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом



При изменении входного напряжения изменяется обратное напряжение на переходе и от этого изменяется его ширина. Соответственно изменяется площадь поперечного сечения канала, через который проходит поток основных носителей заряда.

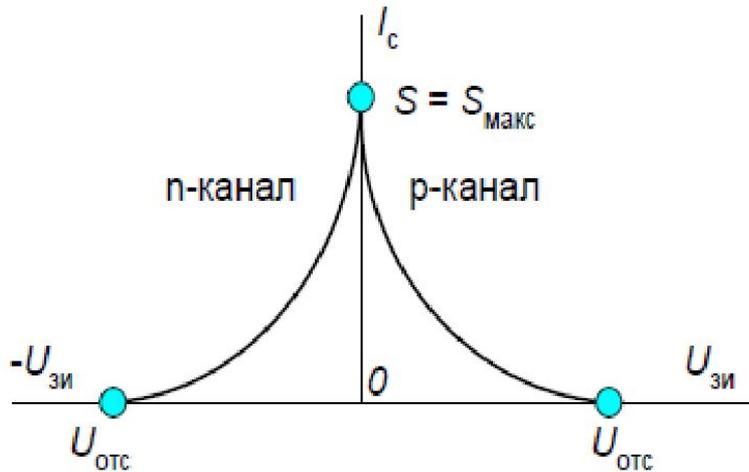
Стоко-затворная характеристика канал n-типа

- Управляющее действие затвора наглядно иллюстрирует стоко-затворная характеристика $I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = \text{const}$.
- При $U_{зи} = 0$ сечение канала наибольшее, его сопротивление минимально, и, следовательно, ток максимален. Если $U_{зи}$ становится отрицательным, площадь поперечного сечения канала уменьшается, ток снижается. При некотором запирающем напряжении, называемом напряжением отсечки, площадь поперечного сечения станет равной нулю и ток стока будет очень мал.

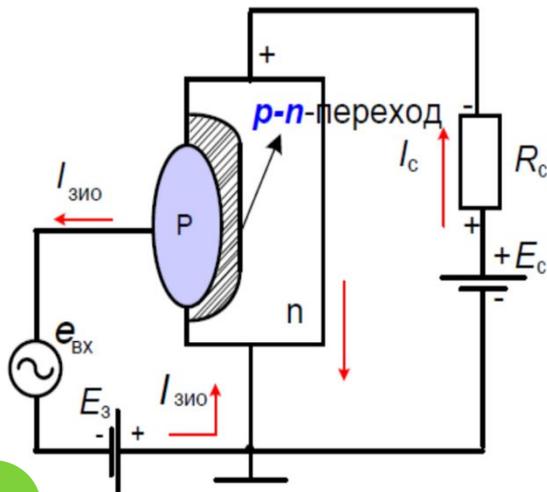
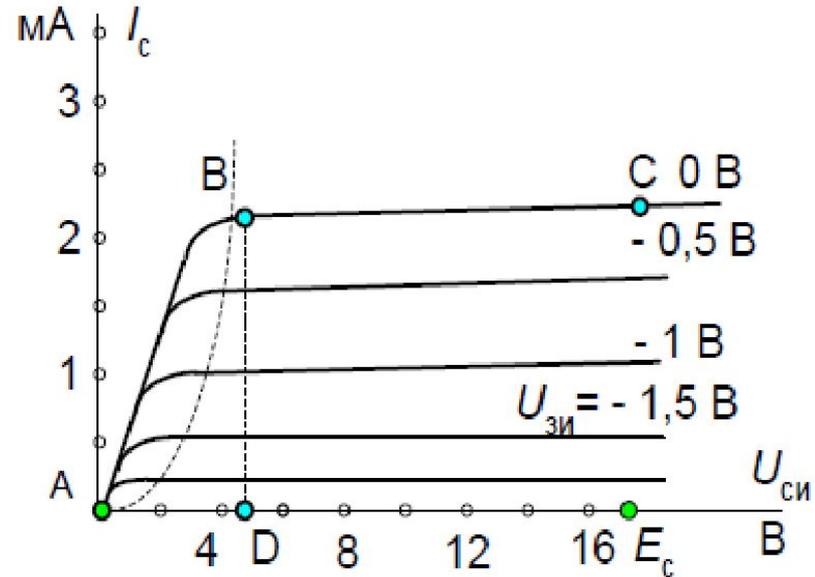


Выходная характеристика канал n-типа

Стоко-затворная характеристика



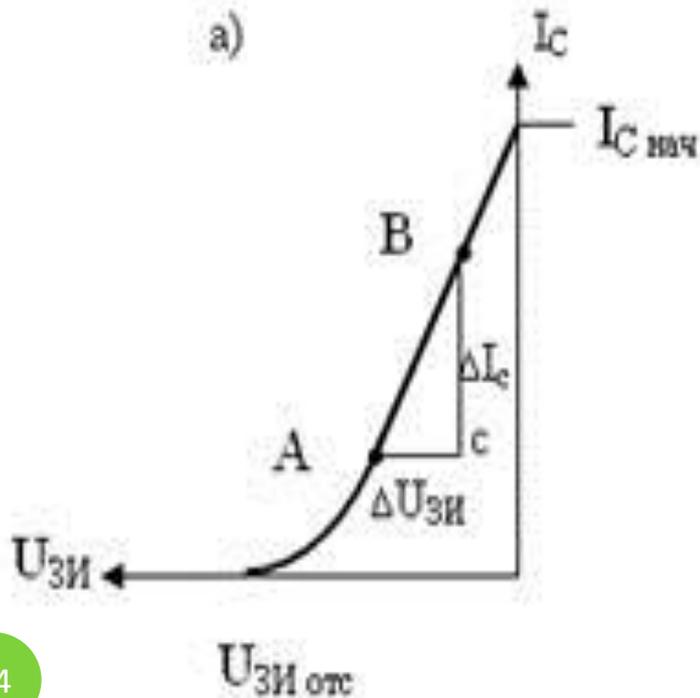
Выходная характеристика



- Активный режим
- Режим насыщения
- Режим отсечки

Основные параметры ПТ

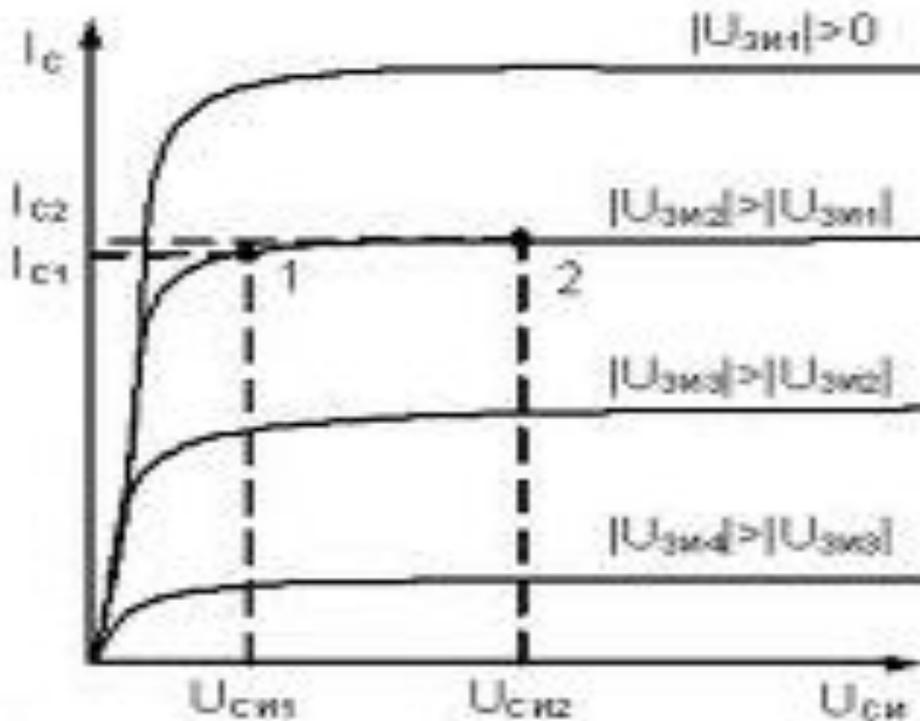
- 1) Напряжение отсечки.
- 2) Крутизна стоко-затворной характеристики. Она показывает, на сколько миллиампер изменится ток стока при изменении напряжения на затворе на 1В.



$$S = \Delta I_c / \Delta U_{зи} \text{ , mA/V}$$

при $U_{си} = \text{const}$

3) Внутреннее сопротивление (или выходное) полевого транзистора.

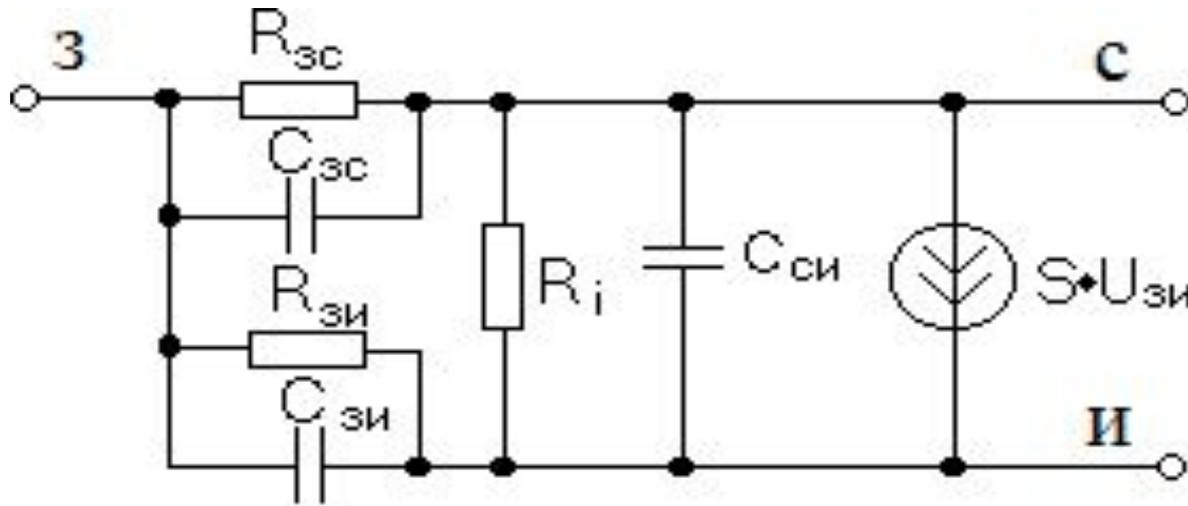


$$R_i = \frac{\Delta U_{\text{си}}}{\Delta I_{\text{с}}} \text{ при } U_{\text{зи}} = \text{Const}$$

4) Входное сопротивление

$$R_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{\text{зи}}}{\Delta I_{\text{з}}} \leq 10^9 \text{ Ом}$$

Эквивалентная схема полевого транзистора с управляющим р-п-переходом



$R_{зс}$, $R_{зи}$ и $C_{зс}$, $C_{зи}$ – сопротивление и емкости р-п-переходов, включенных в обратном направлении;

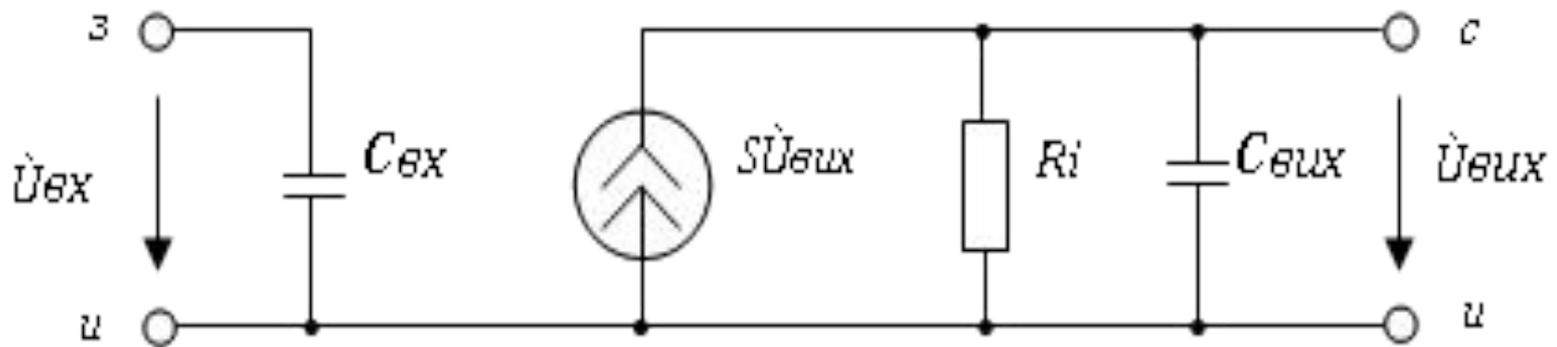
$C_{си}$ – емкость между стоком и истоком транзистора;

$S \cdot U_{зи}$ – генератор тока, характеризующий усилительные свойства транзистора.

Усилительные свойства по напряжению характеризует коэффициент усиления:

$$K_d = dU_{си} / dU_{зи} = (dU_{си} / dI_c) \cdot (dI_c / dU_{зи}) = R_i \cdot S.$$

схема



Преимущества полевых транзисторов по сравнению с биполярными транзисторами:

- высокое входное сопротивление;
- малые шумы;
- высокая термостабильность;
- простота изготовления.

Схемы включения

- а- ОИ
- б- ОЗ
- в- ОС

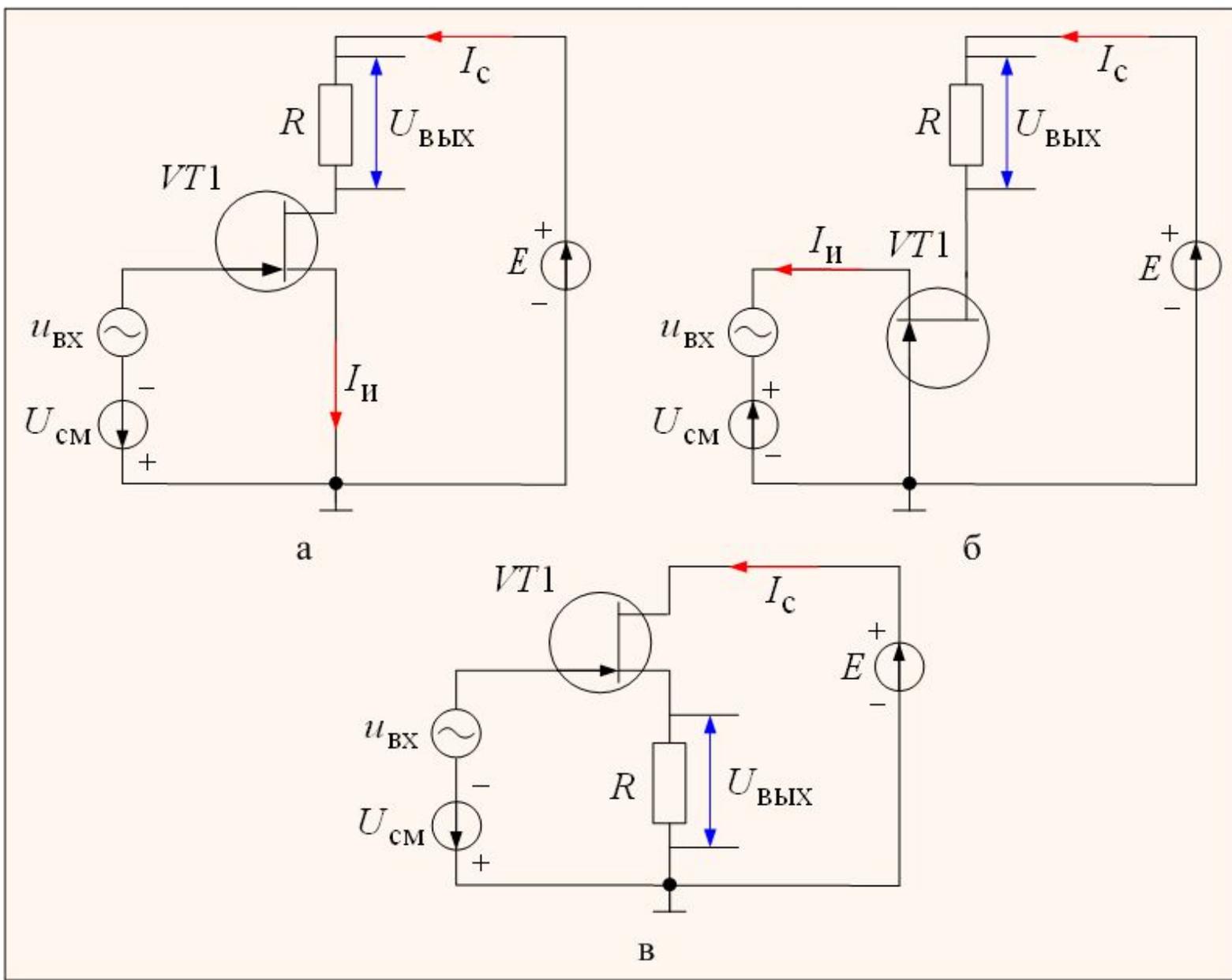
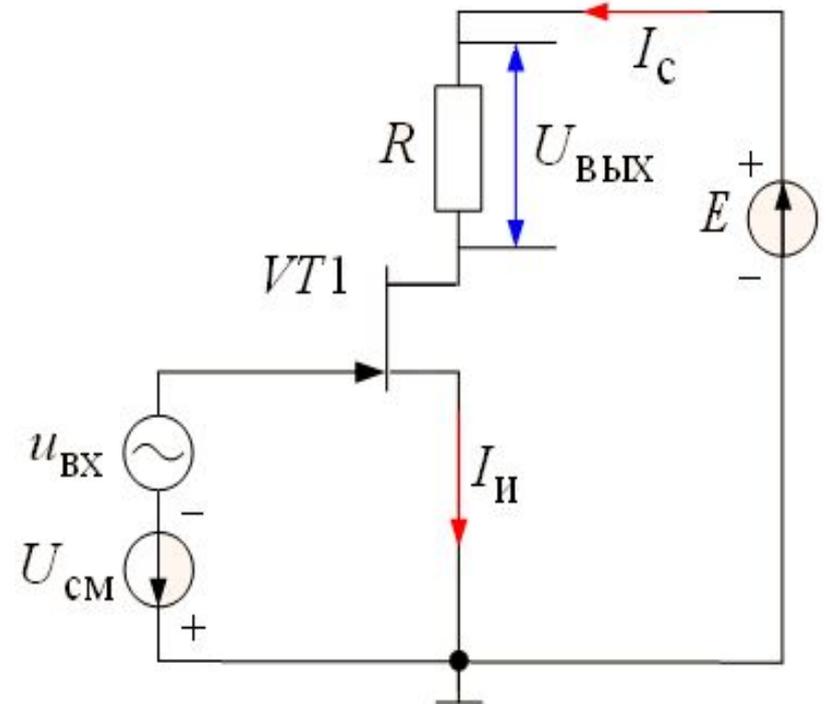


Схема с общим истоком

1. Имеет большой коэффициент усиления по току и по напряжению.
2. Изменяет фазу входного сигнала на 180 градусов.
3. Относительно большие входное и выходное сопротивления.



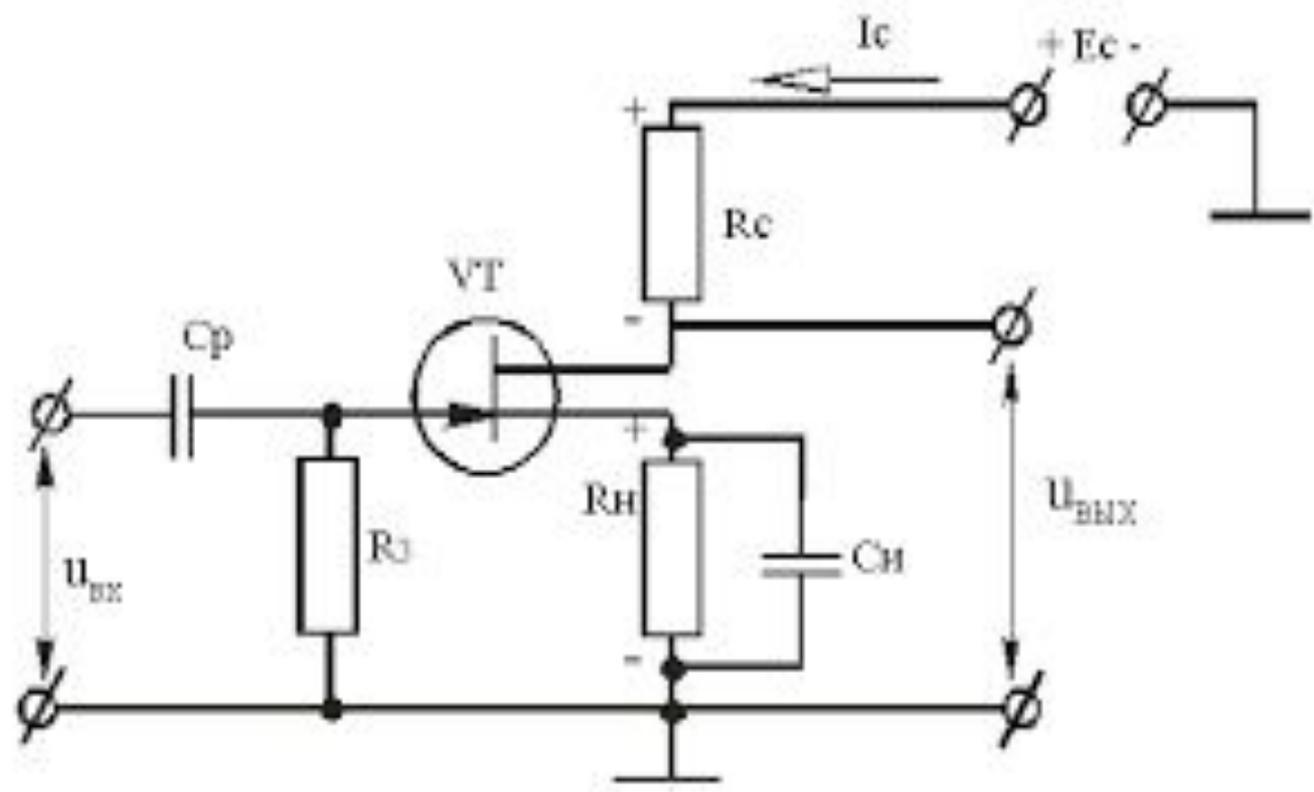


Схема с общим стоком

1. Подобна эмиттерному повторителю и называется истоковый повторитель.
2. Выходное напряжение по фазе повторяет входное.
3. Коэффициент усиления по напряжению меньше единицы.
4. Высокое входное сопротивление и низкое выходное сопротивление.

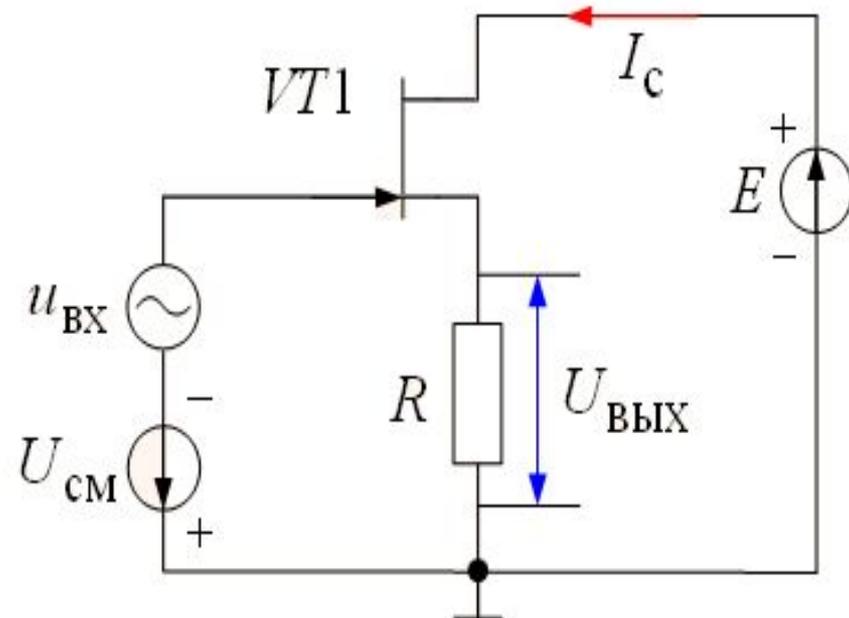
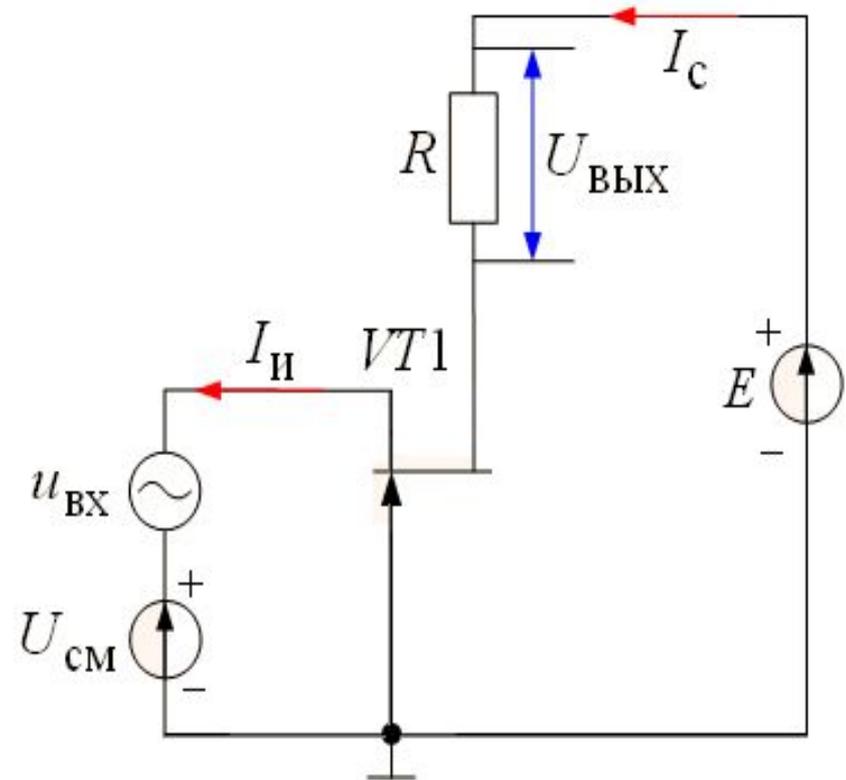


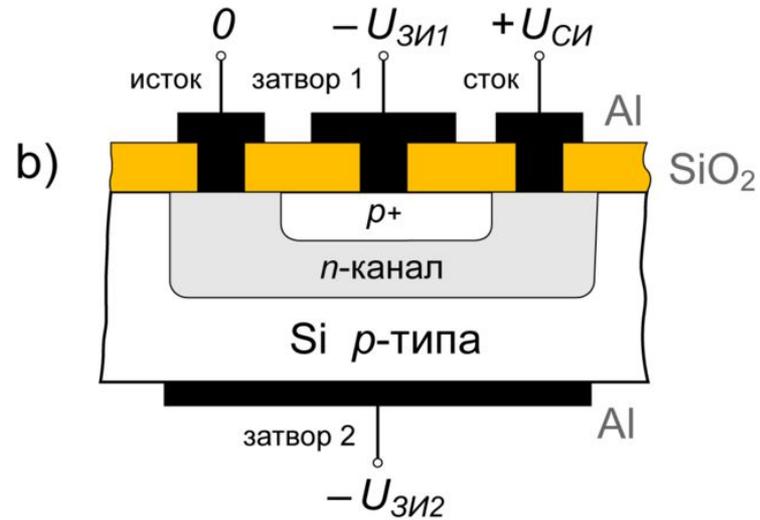
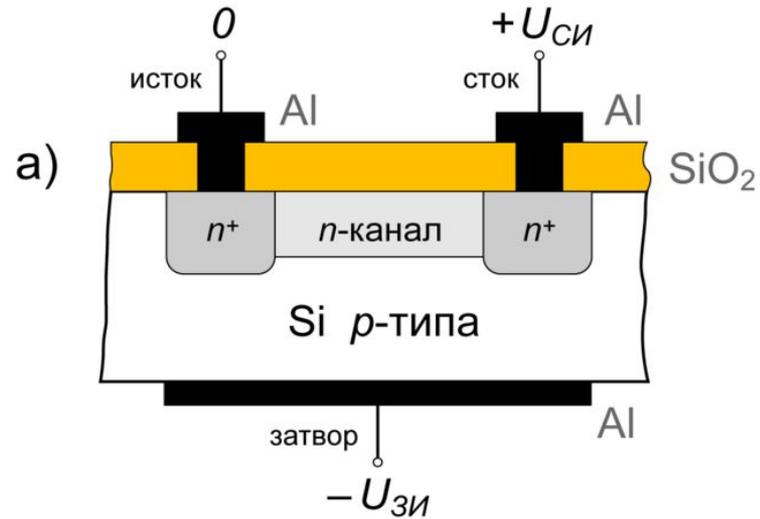
Схема с общим затвором

1. Аналогична схеме с общей базой.
2. Не дает усиления по току и поэтому коэффициент усиления по мощности незначителен.
3. Фаза напряжения при усилении не изменяется.
4. Входное сопротивление мало, так как входным током является ток истока.

Поэтому отдельно практически не используется

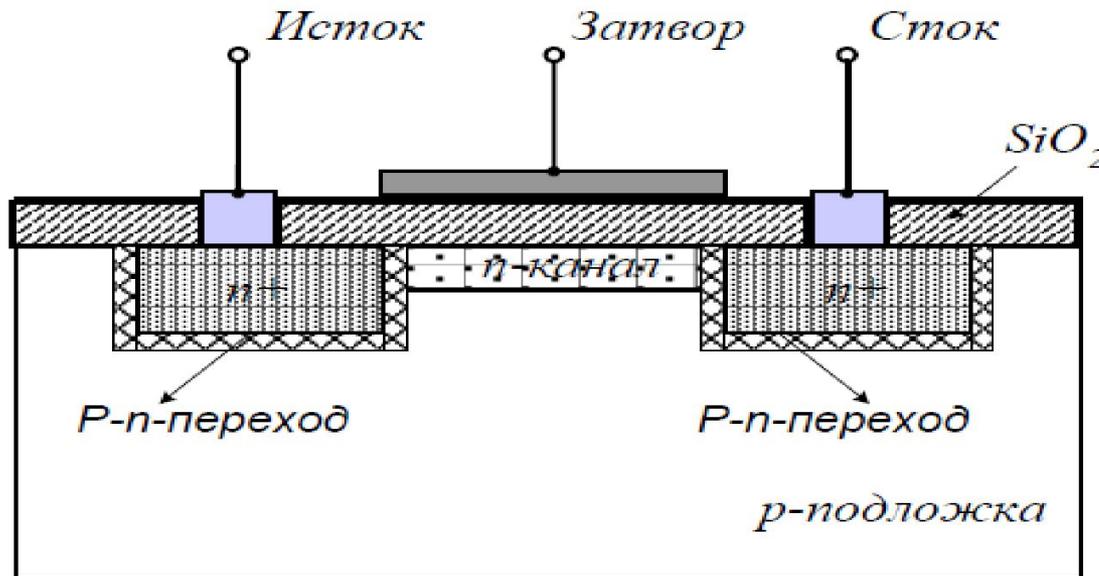


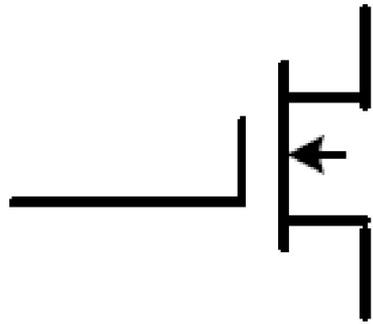
Устройство полевого транзистора с управляющим р-п-переходом



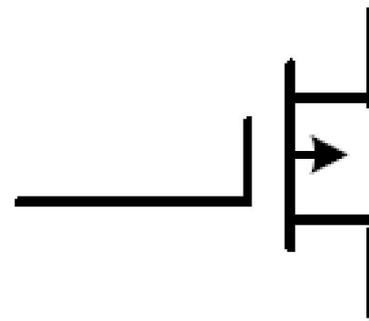
МОП (МДП) транзистор с изолированным затвором
(*metal-oxide-semiconductor field effect transistor, Depletion- MOSFET, D-MOSFET*)

Дальнейшим развитием полевых транзисторов являются транзисторы с изолированным затвором. У них металлический затвор отделен от полупроводникового канала тонким слоем диэлектрика. Иначе эти приборы называют МДП-транзисторами (от слов «металл — диэлектрик — полупроводник») или МОП-транзисторами (от слов «металл — оксид — полупроводник»), так как диэлектриком обычно служит слой диоксида кремния.

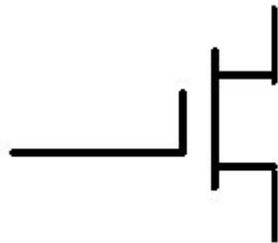




*Встроенный **n**-канал*

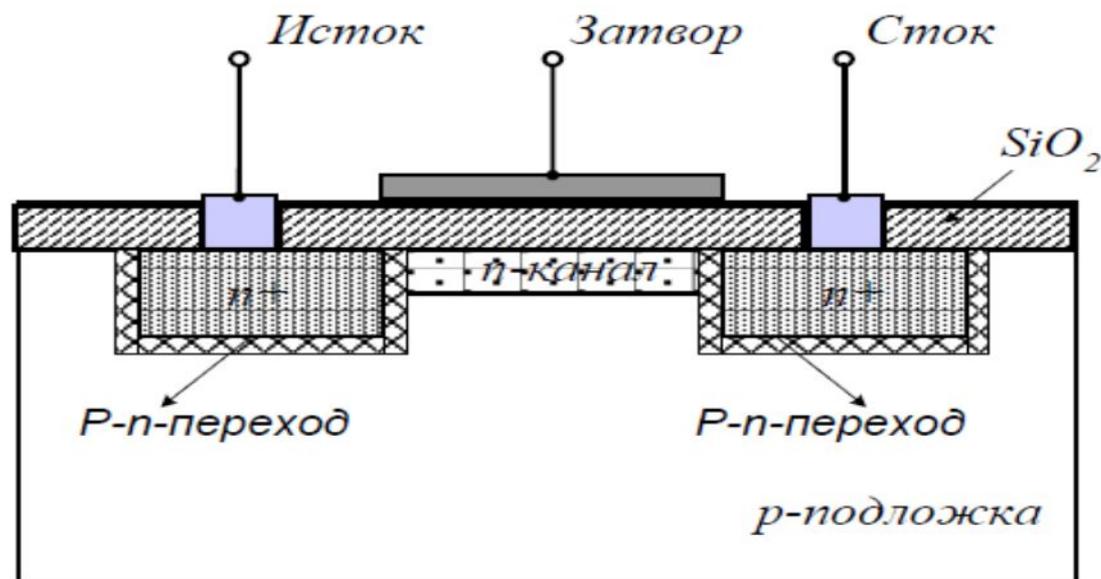


*Встроенный **p**-канал*

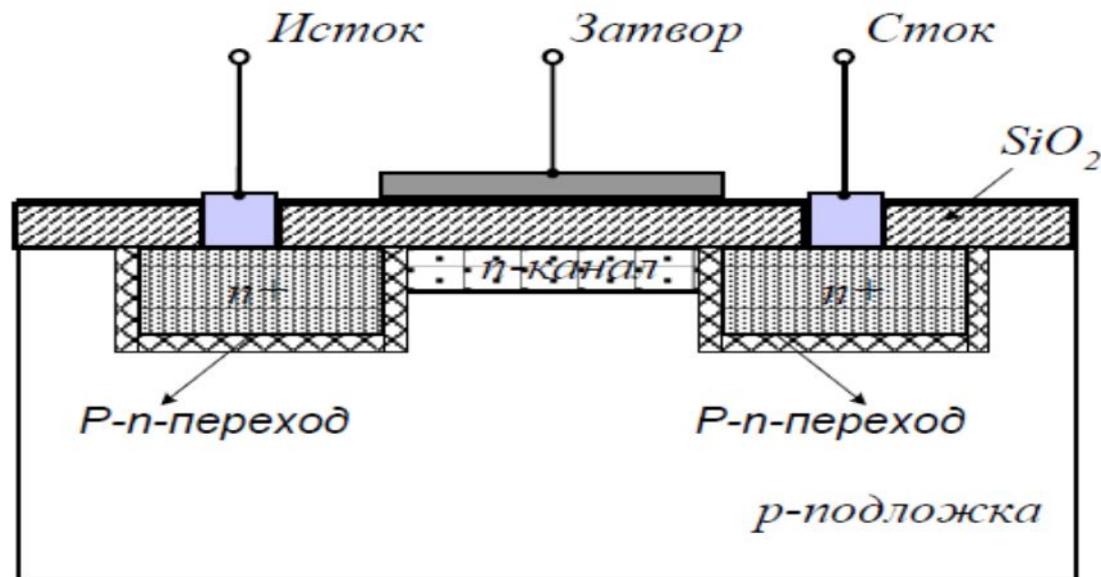


Если подложка подключена к истоку

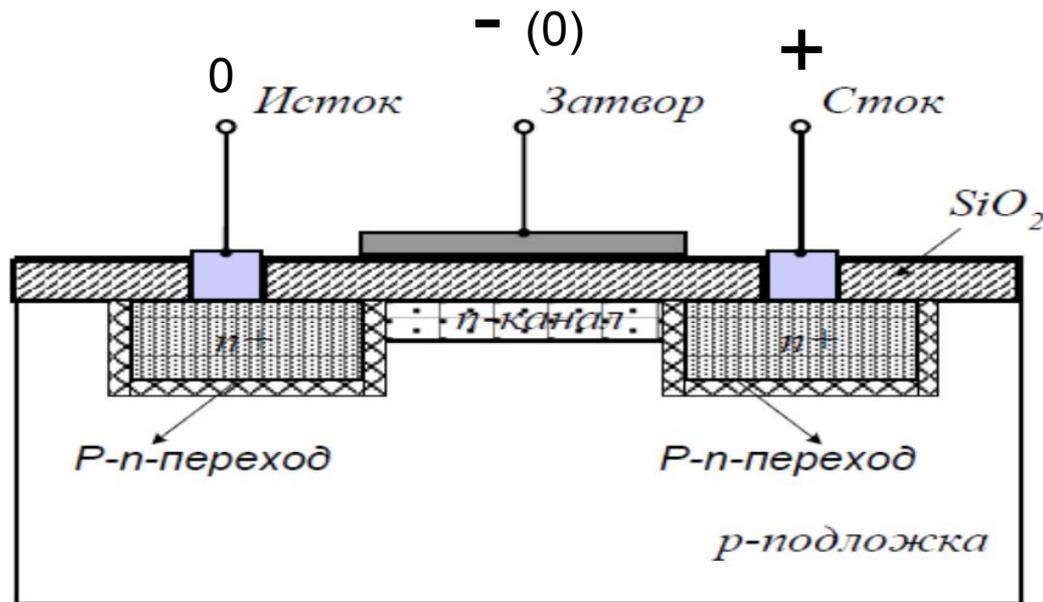
Основанием служит кремниевая пластинка с электропроводностью типа p . В ней созданы две области с электропроводностью n^+ - типа с повышенной проводимостью. Эти области являются истоком и стоком. От них сделаны выводы. Между истоком и стоком имеется тонкий приповерхностный канал с электропроводностью n -типа.



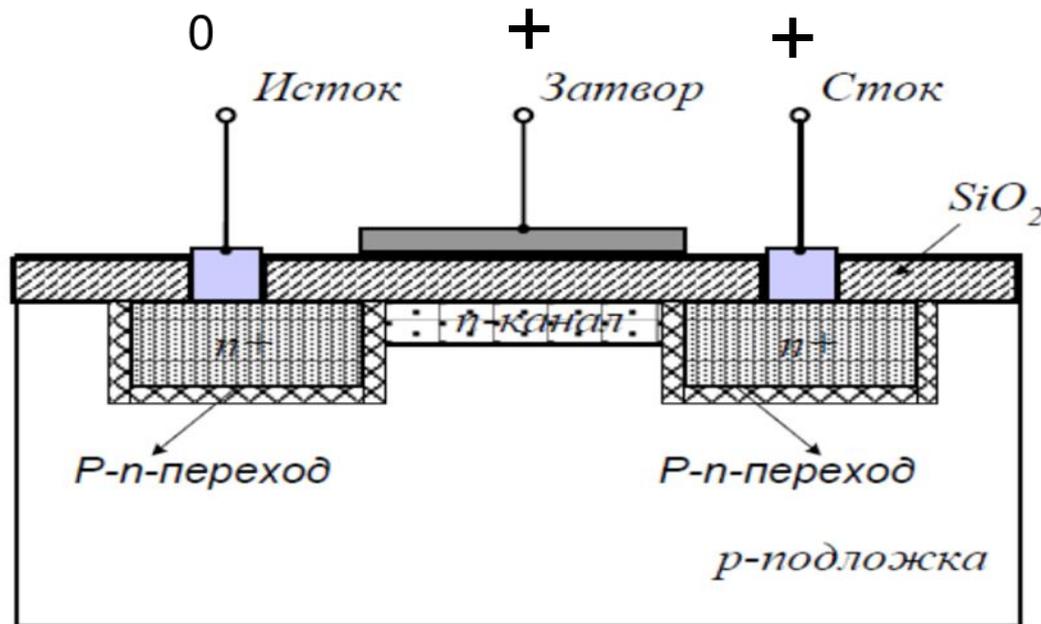
Длина канала от истока до стока обычно единицы микрометров, а его ширина — сотни микрометров и более, в зависимости от рабочего тока транзистора. Толщина диэлектрического слоя диоксида кремния (показан штриховкой) 0,1—0,2 мкм. Сверху диэлектрического слоя расположен затвор в виде тонкой металлической пленки. Кристалл МДП-транзистора обычно соединен с истоком, и его потенциал принимается за нулевой — так же, как и потенциал истока. Прибор с такой структурой называют транзистором с собственным (или встроенным) каналом.

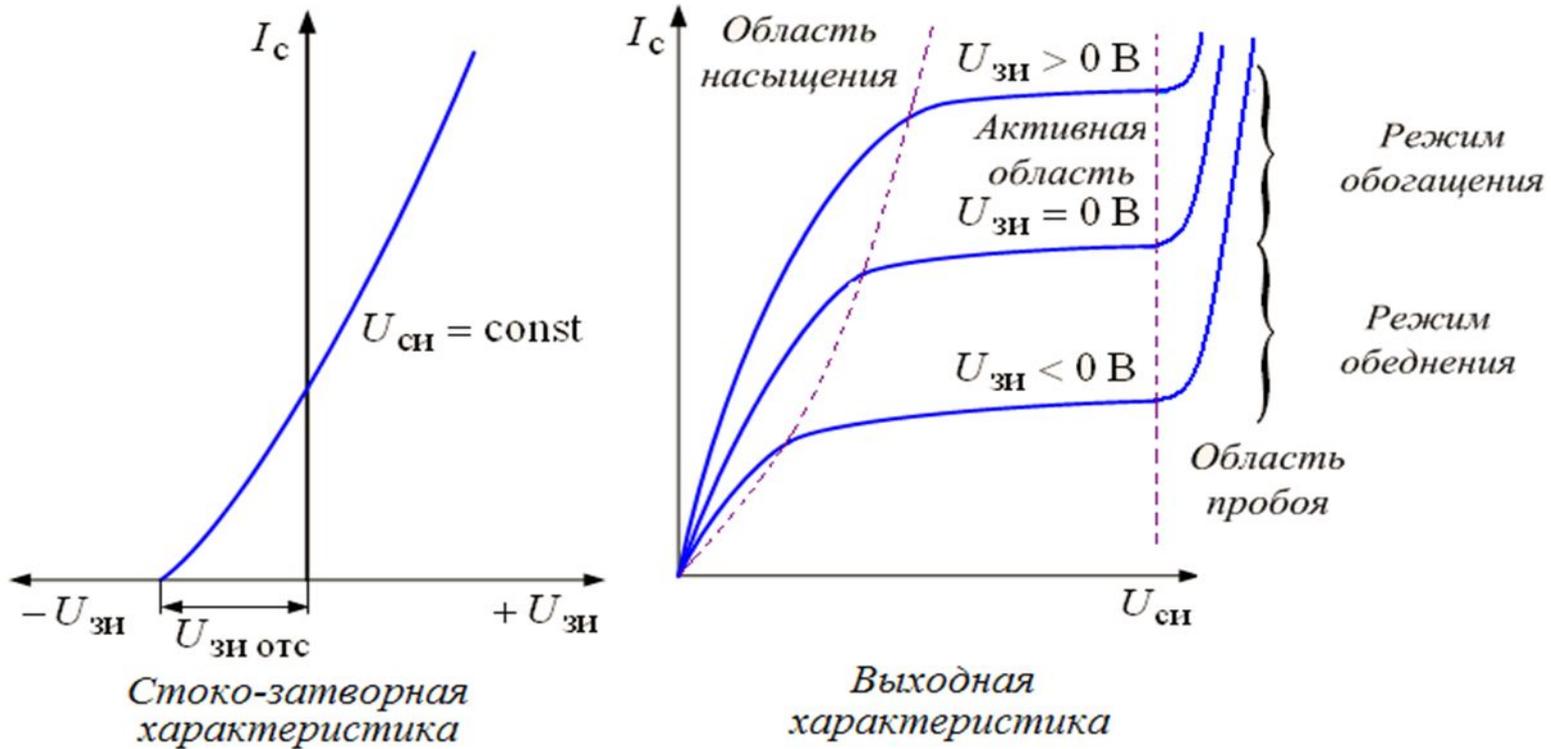


Если при нулевом напряжении затвора приложить между стоком и истоком напряжение, то через канал потечет ток, представляющий собой поток электронов. Через кристалл ток не пойдет, так как один из **p-n**-переходов находится под обратным напряжением. При подаче на затвор напряжения, отрицательного относительно истока, а следовательно, и относительно кристалла, в канале создается поперечное электрическое поле, под влиянием которого электроны проводимости выталкиваются из канала в области истока и стока и в кристалл. Канал обедняется электронами, сопротивление его увеличивается, и ток стока уменьшается. Чем больше отрицательное напряжение затвора, тем меньше этот ток. Такой режим транзистора называют режимом *обеднения* (збіднення, *Depletion*).



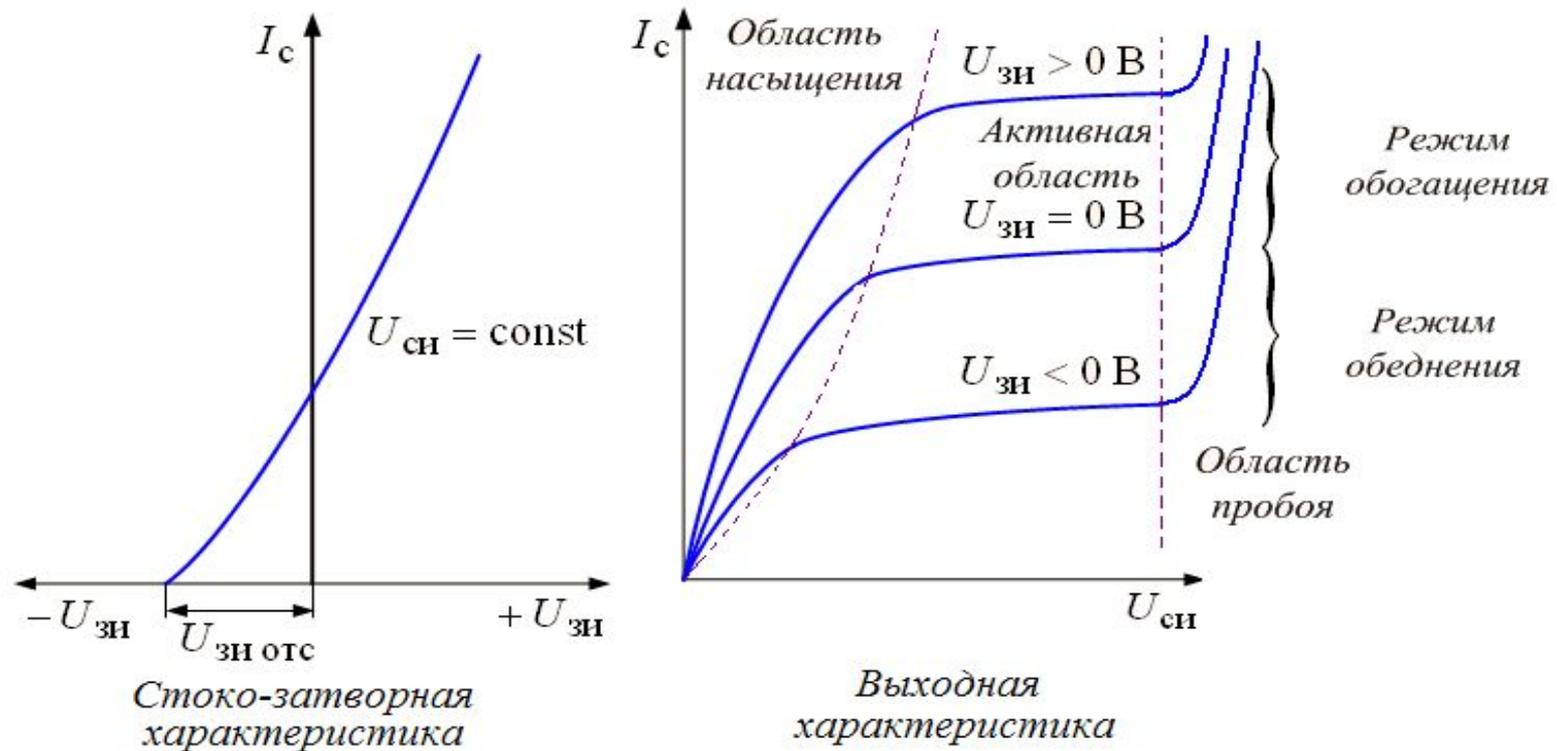
Если же на затвор подать положительное напряжение, то под действием поля, созданного этим напряжением, из областей истока и стока, а также из кристалла в канал будут приходить электроны; проводимость канала при этом увеличивается и ток стока возрастает. Этот режим называют *режимом обогащения (збагачення)*. Рассмотренный транзистор с собственным каналом, таким образом, может работать как в режиме обеднения, так и в режиме обогащения.





Выходные характеристики МДП-транзистора подобны выходным характеристикам полевого транзистора с управляющим р-п переходом. Это объясняется тем, что при возрастании напряжения $U_{сн}$ от нуля сначала действует закон Ома и ток растет приблизительно пропорционально напряжению, а затем, при некотором напряжении $U_{сн}$, канал начинает сужаться. Так как на п-р-переходе между каналом и кристаллом возрастает обратное напряжение, область этого перехода, обедненная носителями, расширяется и сопротивление канала увеличивается.

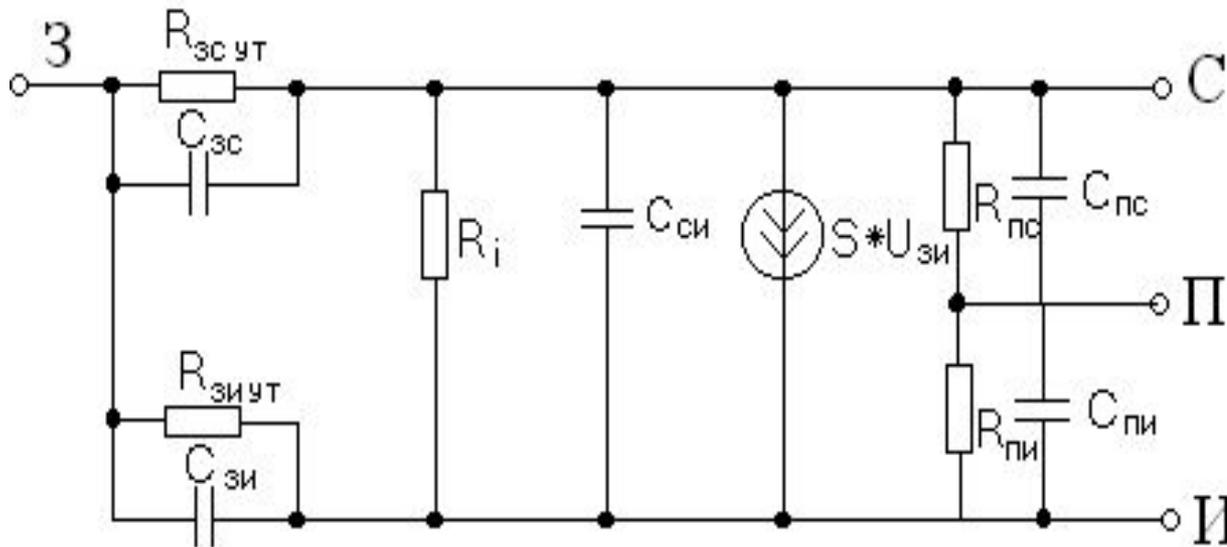
Характеристики МДП-транзистора с встроенным каналом



$R_i = dU_{си} / dI_c$ при $U_{зи} = \text{const}$ – дифференциальное (внутренне) сопротивление канала транзистора (сотни кОМ);

$S = dI_c / dU_{зи}$ при $U_{си} = \text{const}$ – крутизна характеристики, определяющая управляющее действие затвора;

Эквивалентная схема МДП-транзистора с встроенным каналом



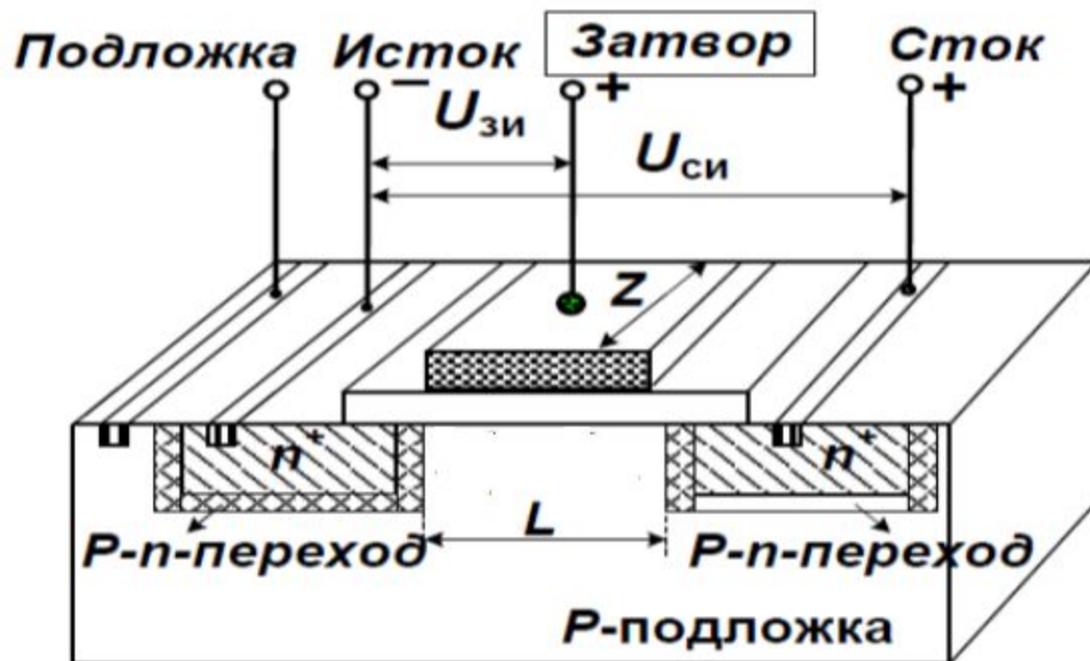
$R_{зс\text{ ут}}$, $R_{зи\text{ ут}}$ и $C_{зс}$, $C_{зи}$ – сопротивление утечки и емкости между затвором и областями стока и истока соответственно;

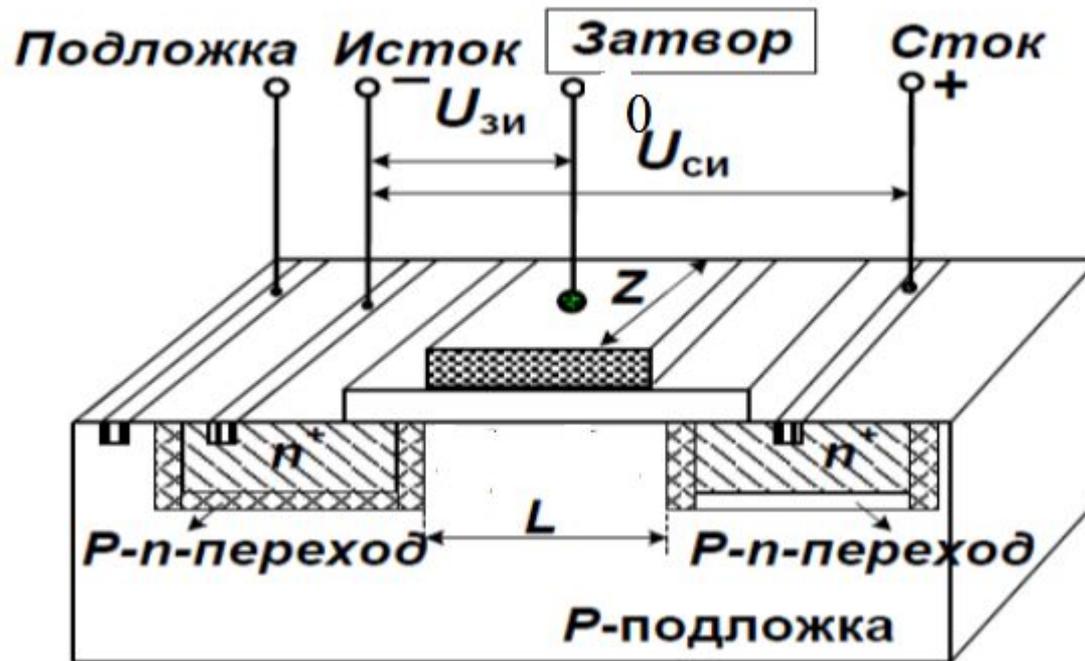
$C_{си}$ – емкость между стоком и истоком транзистора;

$S * U_{зи}$ – генератор тока, характеризующий усилительные свойства транзистора;

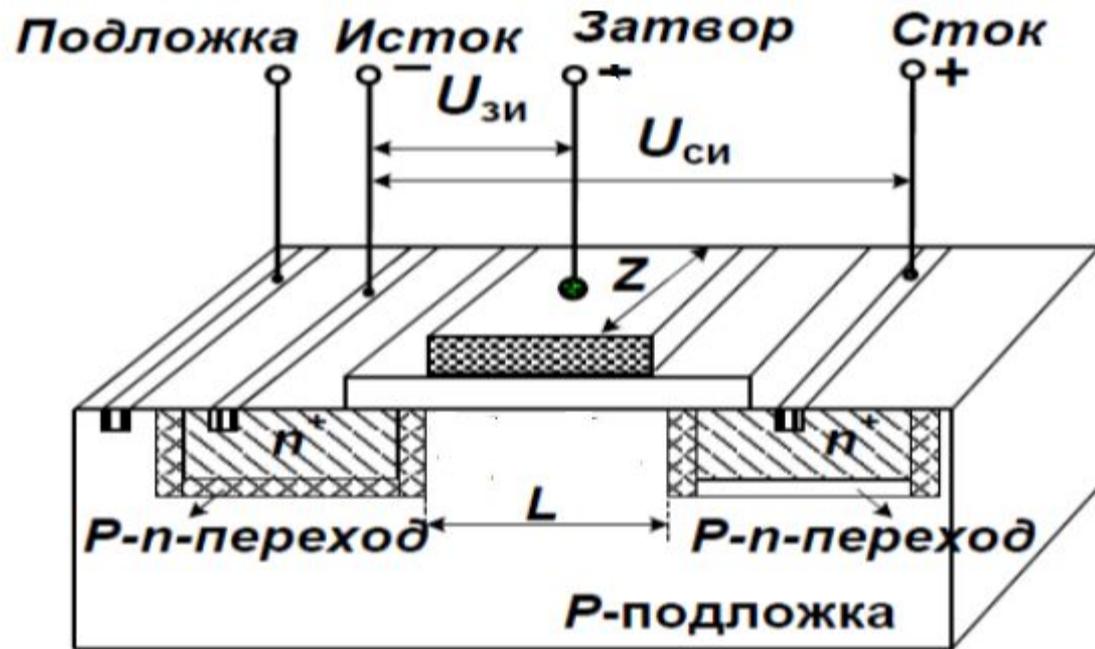
$R_{пс}$, $R_{пи}$ и $C_{пс}$, $C_{пи}$ – сопротивление и емкости переходов подложка-сток и подложка-исток, включенных в обратном направлении.

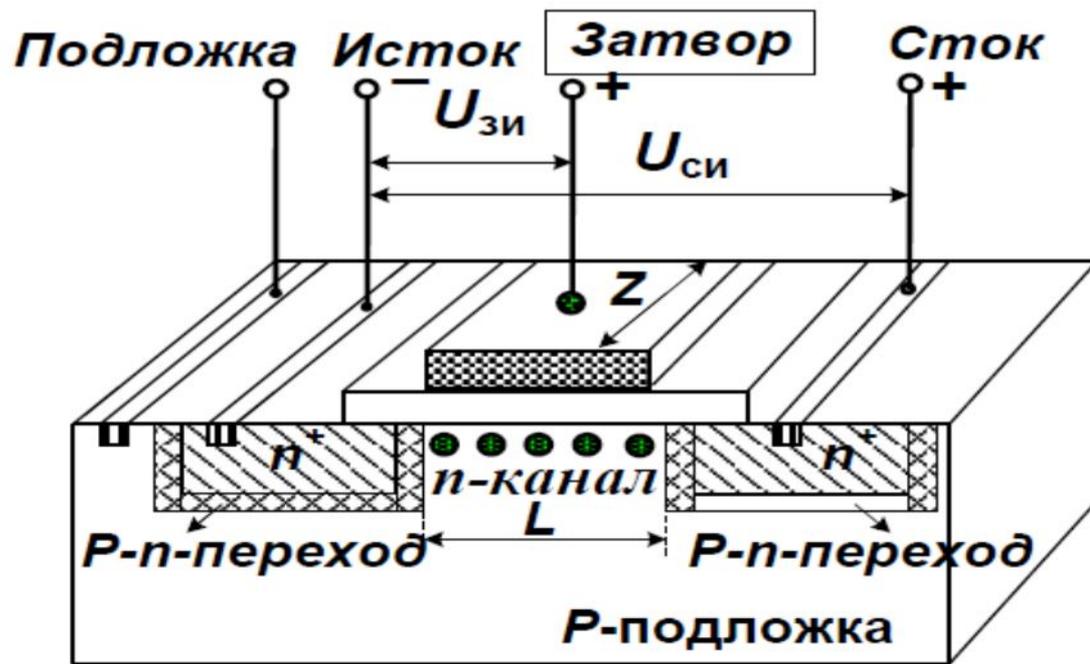
МДП-транзистор с индуцированным каналом (обогащенного типа, *Enhancement MOSFET*, *E-MOSFET*)



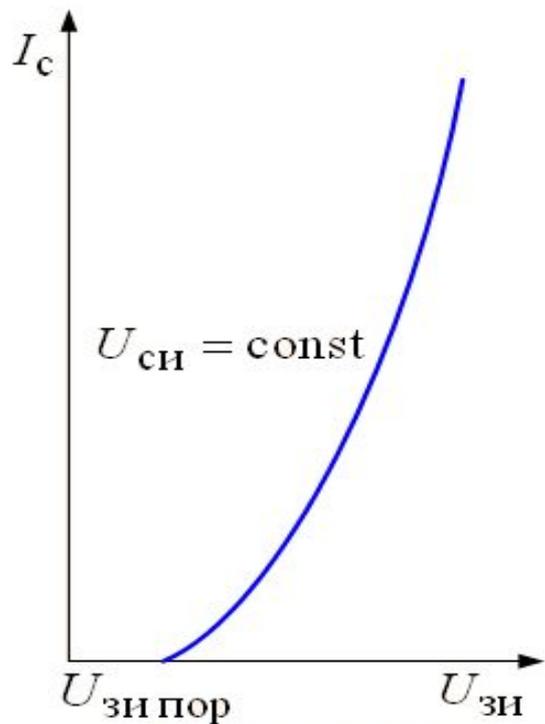


Если подать напряжение питания в цепь стока, а на затворе $U_{зи} = 0$, то ток в канале будет отсутствовать (за исключением тока неосновных носителей обратносмещённых переходов).

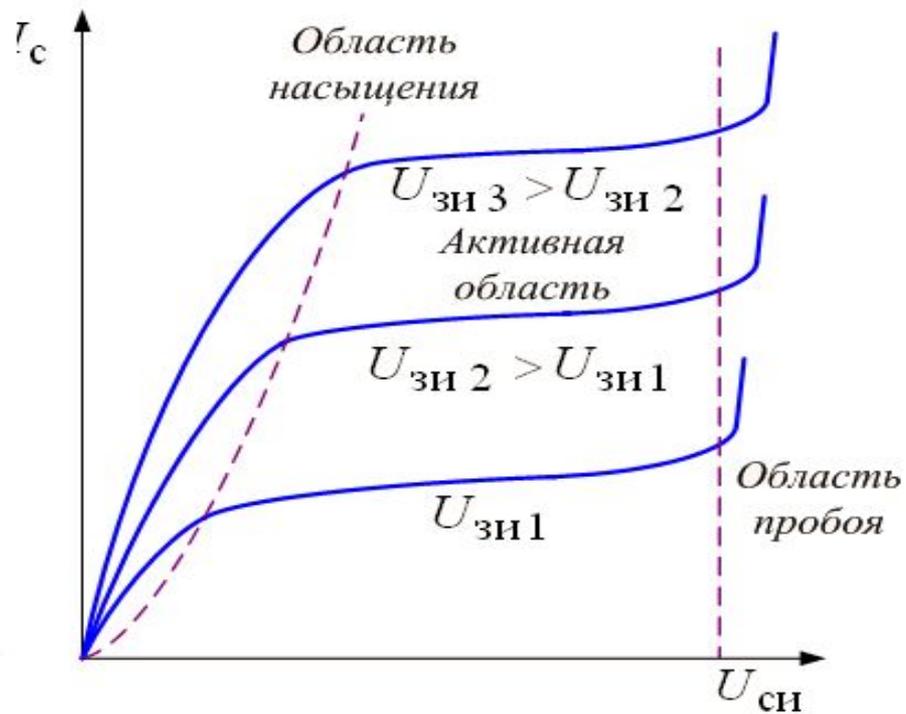




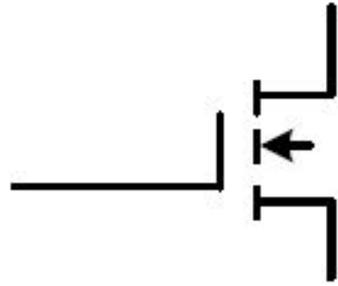
Если на затвор подать положительное напряжение, то под действием ускоряющего поля затвора в приповерхностный слой начнут подтягиваться носители n -типа. Уровень напряжения на затворе, при котором в канале появляется проводимость, называется *пороговым напряжением*. Обозначим его через U_0 . При $U_{зи} \approx 2U_0$ образуется токопроводящий канал (индуцированный), который соединит области стока и истока, и ток стока достигнет своего номинального значения.



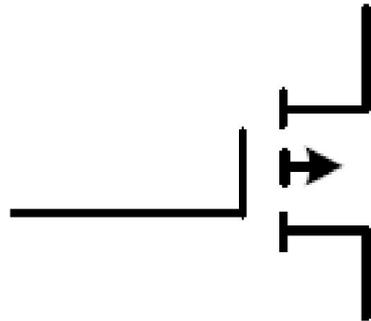
Стоко-затворная характеристика



Выходная характеристика



*Индуцированный
n-канал*



*Индуцированный **p**-канал*

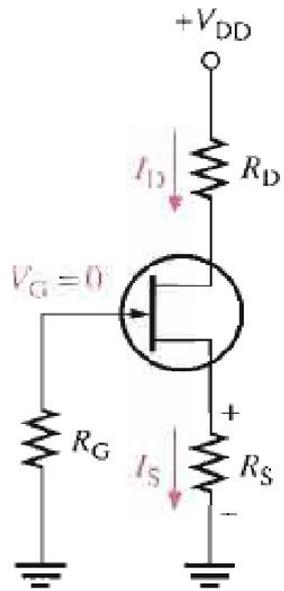
Преимущества МДП-транзисторов

Преимущества МДП – транзисторов по сравнению с полевыми транзисторами с управляющим р-п-переходом:

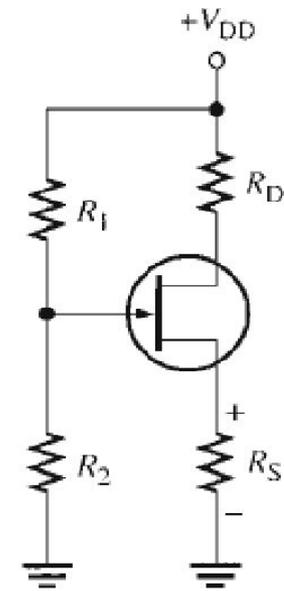
- лучшие температурные характеристики;
- лучшие шумовые характеристики;
- большое входное сопротивление (до 10^{15} Ом) при любой полярности входного напряжения;
- меньшее значение входной емкости, следовательно, предельная частота может достигать сотен МГц;
- простота конструктивной реализации, особенно транзисторов с индуцированным каналом.

Включение ПТ в схемах

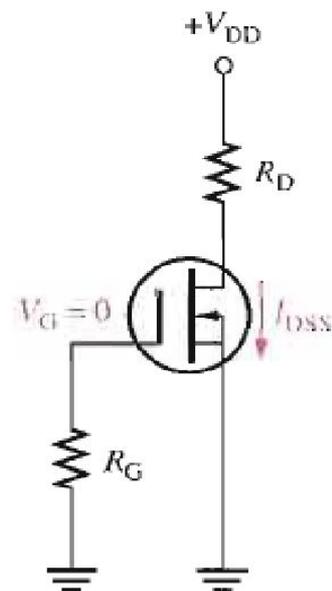
JFET



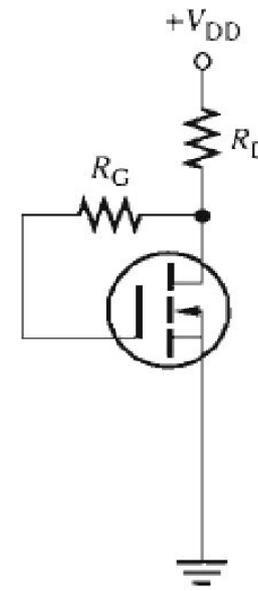
JFET



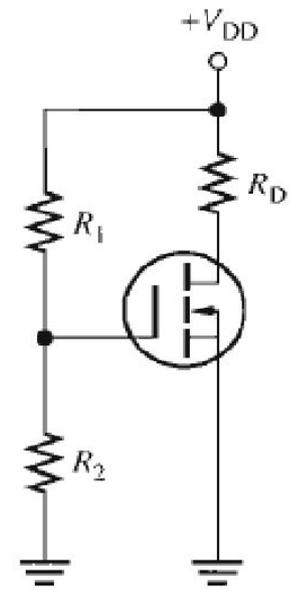
D-MOSFET



E-MOSFET



E-MOSFET



Полевые транзисторы

с управляющим р-п переходом

канал n-типа



канал p-типа



с изолированным затвором

встроенный канал (обеднённые)

канал n-типа



канал n-типа
2-х затворные



индуцированный канал (обогащённые)

канал n-типа



канал p-типа



Представление физических величин в относительных единицах

Величина, выраженная в децибелах, численно равна десятичному логарифму безразмерного отношения физической величины к одноимённой физической величине, принимаемой за исходную, умноженному на десять:

$$A_{dB} = 10 \lg \frac{A}{A_0}$$

где A_{dB} — величина в децибелах, A — измеренная физическая величина, A_0 — величина, принятая за базис

Для оценки отношения мощностей $P_{dB} = 10 \lg \frac{P_1}{P_0}$

Для оценки отношения напряжений $U_{dB} = 20 \lg \frac{U_1}{U_0}$

Соответственно, переход от дБ к отношению мощностей осуществляется по формуле $P_1/P_0 = 10^{(0,1 \cdot \text{величина в дБ})}$,

Пусть значение мощности P_1 стало в 2 раза больше исходного значения мощности P_0 , тогда

$$10 \lg(P_1/P_0) = 10 \lg(2) \approx 3,0103 \text{ дБ} \approx 3 \text{ дБ},$$

то есть рост мощности на 3 дБ означает её увеличение в 2 раза.

Пусть значение мощности P_1 стало в 2 раза меньше исходного значения мощности P_0 , то есть $P_1 = 0,5 P_0$. Тогда

$$10 \lg(P_1/P_0) = 10 \lg(0,5) \approx -3 \text{ дБ},$$

то есть снижение мощности на 3 дБ означает её снижение в 2 раза. По аналогии:

• **рост мощности в 10 раз:** $10 \lg(P_1/P_0) = 10 \lg(10) = 10 \text{ дБ}$, снижение в 10 раз: $10 \lg(P_1/P_0) = 10 \lg(0,1) = -10 \text{ дБ}$;

• **рост в 1 млн. раз:** $10 \lg(P_1/P_0) = 10 \lg(1\,000\,000) = 60 \text{ дБ}$, снижение в 1 млн раз: $10 \lg(P_1/P_0) = 10 \lg(0,000001) = -60 \text{ дБ}$

$\frac{P_1}{P_0}$	1000	100	10	4	2	1	0,79	0,5	0,25	0,1	0,01	0,001
$P_{\text{дБ}}$	30	20	10	6	3	0	-1	-3	-6	-10	-20	-30

Полезно запомнить соотношения:

1 дБ \rightarrow в $\approx 1,26$ раза,

3 дБ \rightarrow в ≈ 2 раза,

10 дБ \rightarrow в 10 раз.

13 дБ = 10 дБ + 3 дБ \rightarrow в $\approx 10 \cdot 2 =$ в 20 раз,

20 дБ = 10 дБ + 10 дБ \rightarrow в $10 \cdot 10 =$ в 100 раз,

30 дБ = 3 \cdot (10 дБ) \rightarrow в $10^3 =$ в 1000 раз

- 0 дБ** Ничего не слышно (порог слышимости)
- 30** Тихо шепот, тиканье настенных часов.
- 60** Шумно (улица)
- 80** Очень шумно крик, мотоцикл с глушителем
- 100** Крайне шумно оркестр, вагон метро (прерывисто), гром
- 110** Крайне шумно, вертолёт
- 130** Болевой порог, самолёт на старте
- 160** - возможен разрыв барабанных перепонки

VOLTAGE GAIN (A_V)**DECIBEL VALUE**

32	$20 \log(32) = 30 \text{ dB}$
16	$20 \log(16) = 24 \text{ dB}$
8	$20 \log(8) = 18 \text{ dB}$
4	$20 \log(4) = 12 \text{ dB}$
2	$20 \log(2) = 6 \text{ dB}$
1	$20 \log(1) = 0 \text{ dB}$
0.707	$20 \log(0.707) = -3 \text{ dB}$
0.5	$20 \log(0.5) = -6 \text{ dB}$
0.25	$20 \log(0.25) = -12 \text{ dB}$
0.125	$20 \log(0.125) = -18 \text{ dB}$
0.0625	$20 \log(0.0625) = -24 \text{ dB}$
0.03125	$20 \log(0.03125) = -30 \text{ dB}$

POWER	dBm
32 mW	15 dBm
16 mW	12 dBm
8 mW	9 dBm
4 mW	6 dBm
2 mW	3 dBm
1 mW	0 dBm
0.5 mW	-3 dBm
0.25 mW	-6 dBm
0.125 mW	-9 dBm
0.0625 mW	-12 dBm
0.03125 mW	-15 dBm

dBm (русское дБм) — опорным уровнем является мощность в 1 мВт

Например, «выходная мощность усилительного каскада составляет 12 дБм» (то есть мощность, выделяющаяся на номинальной для этого усилительного каскада нагрузке, составляет 16 мВт).