

# Раздел 3. Транзисторы

## 3.1. Устройство и принцип действия

### 3.1. Устройство и принцип действия

Транзисторы делятся на

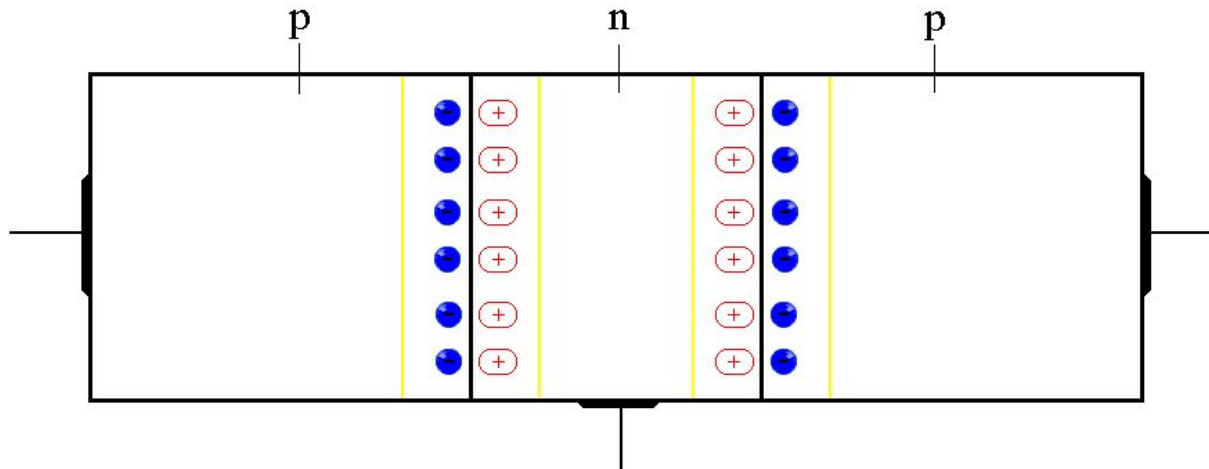
- биполярные,
- униполярные (полевые).

*Биполярный транзистор* – прибор для усиления мощности, состоящий из трех областей с разным типом проводимости.

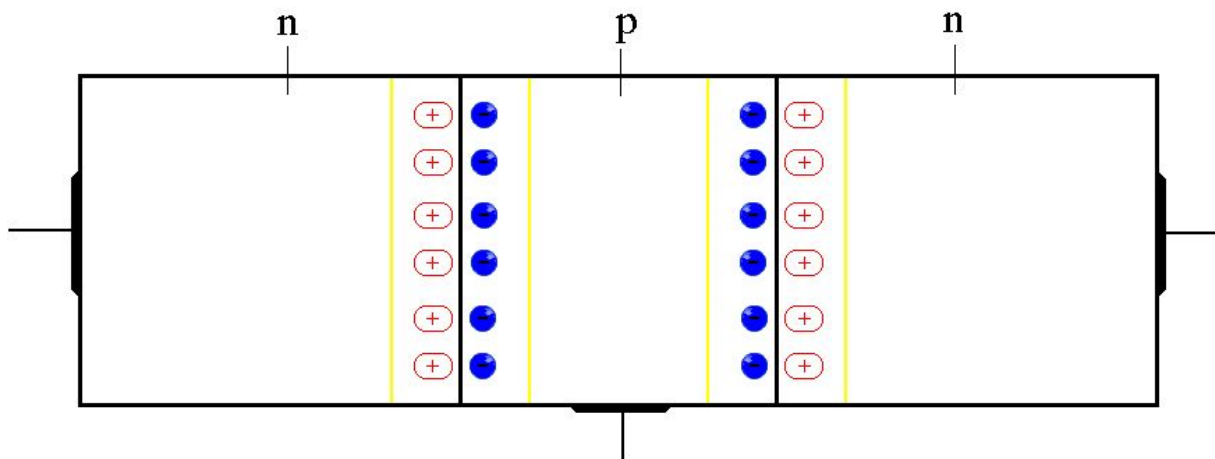
БПТ подразделяются на р-п-р и п-р-п в зависимости от чередования типов полупроводников

### 3.1. Устройство и принцип действия

- p-n-p

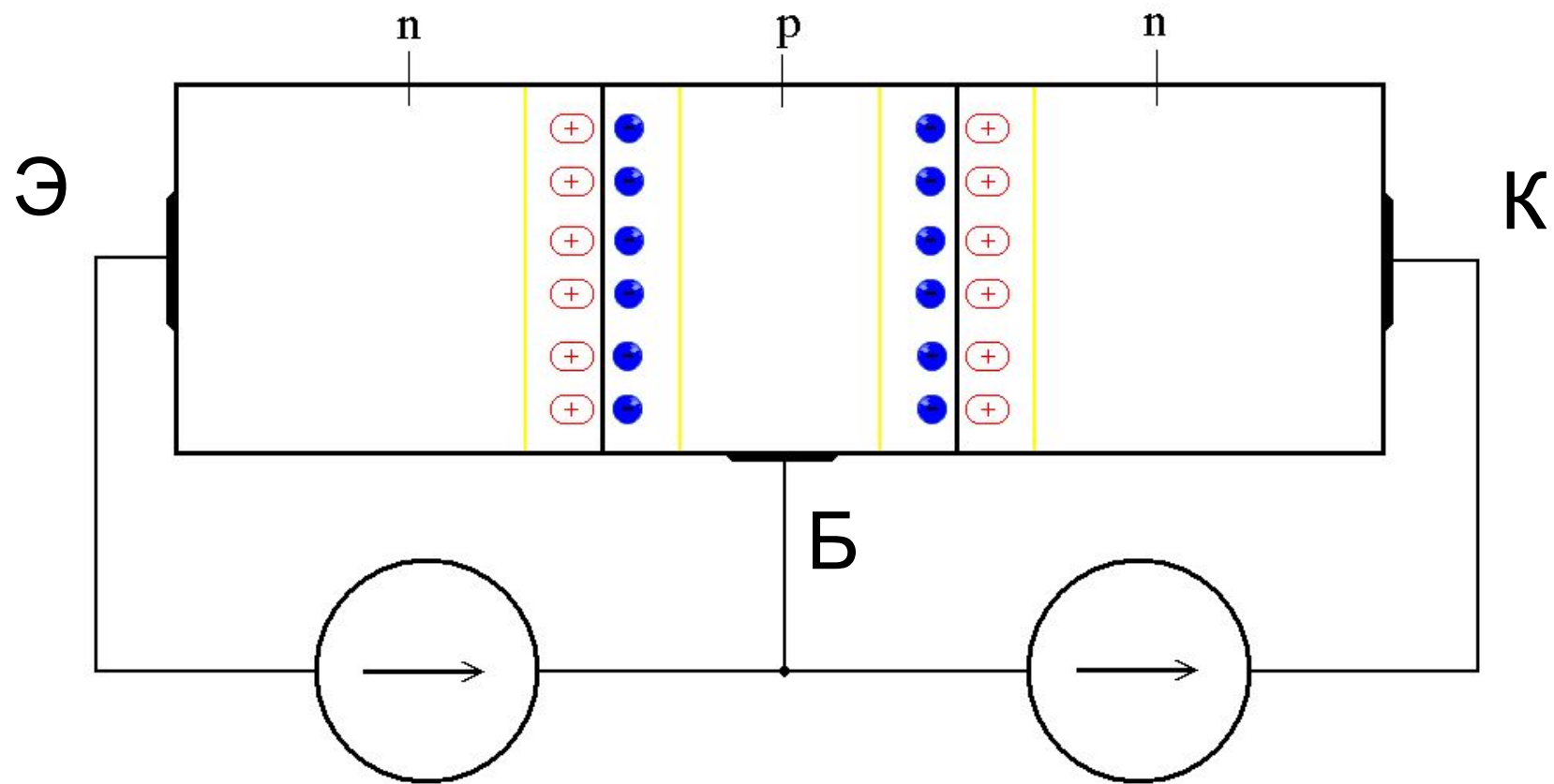


- n-p-n



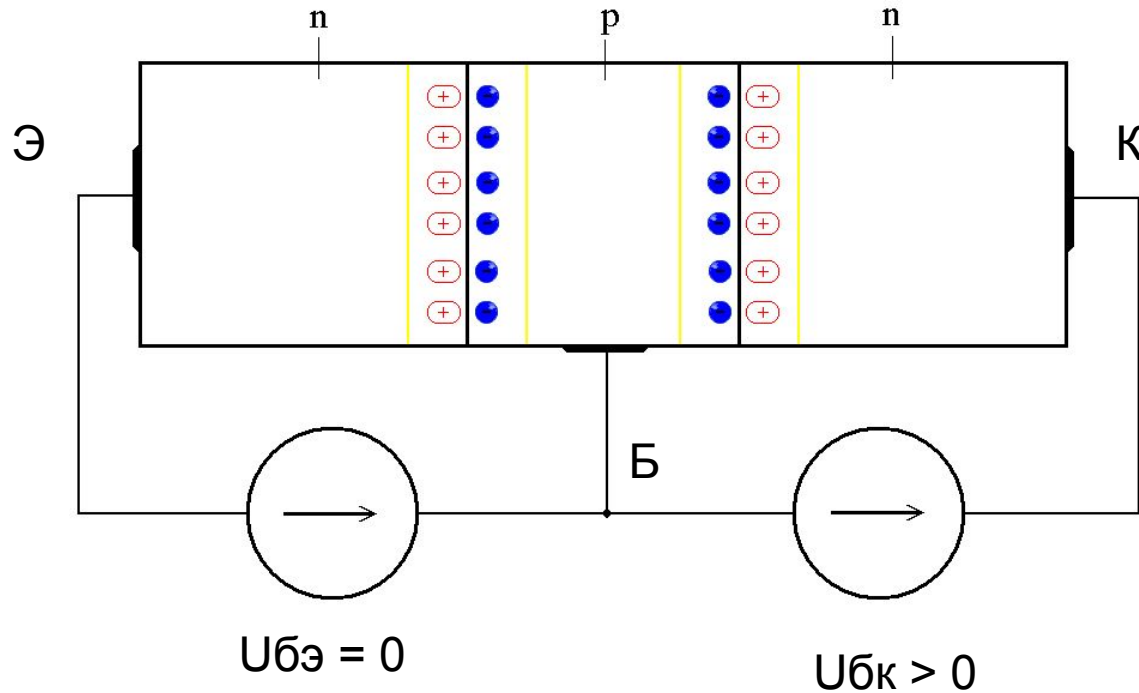
### 3.1. Устройство и принцип действия

Существуют 3 схемы подключения источников к транзистору



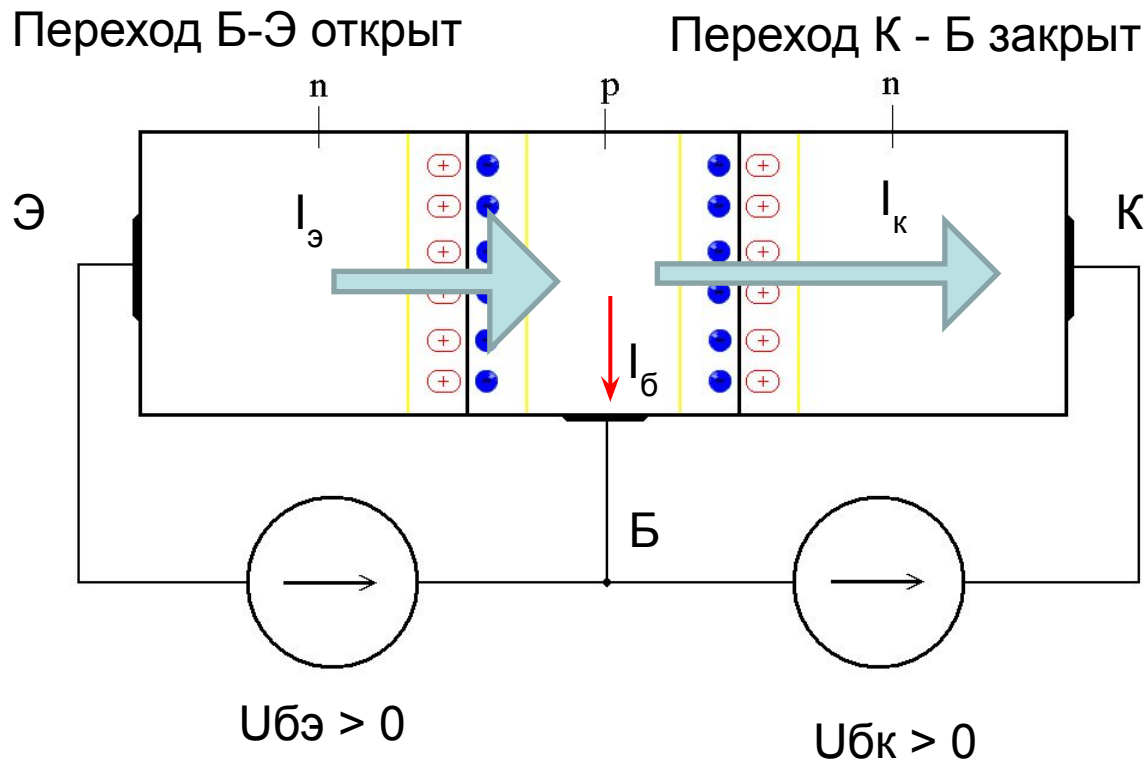
Переход Б-Э закрыт

Переход К - Б закрыт



Важно: переход коллектор-база для электронов коллектора закрыт, но для электронов базы он открыт, электрическое поле отлично бы способствовало перемещению электронов из базы в коллектор..., если бы электроны были в базе!

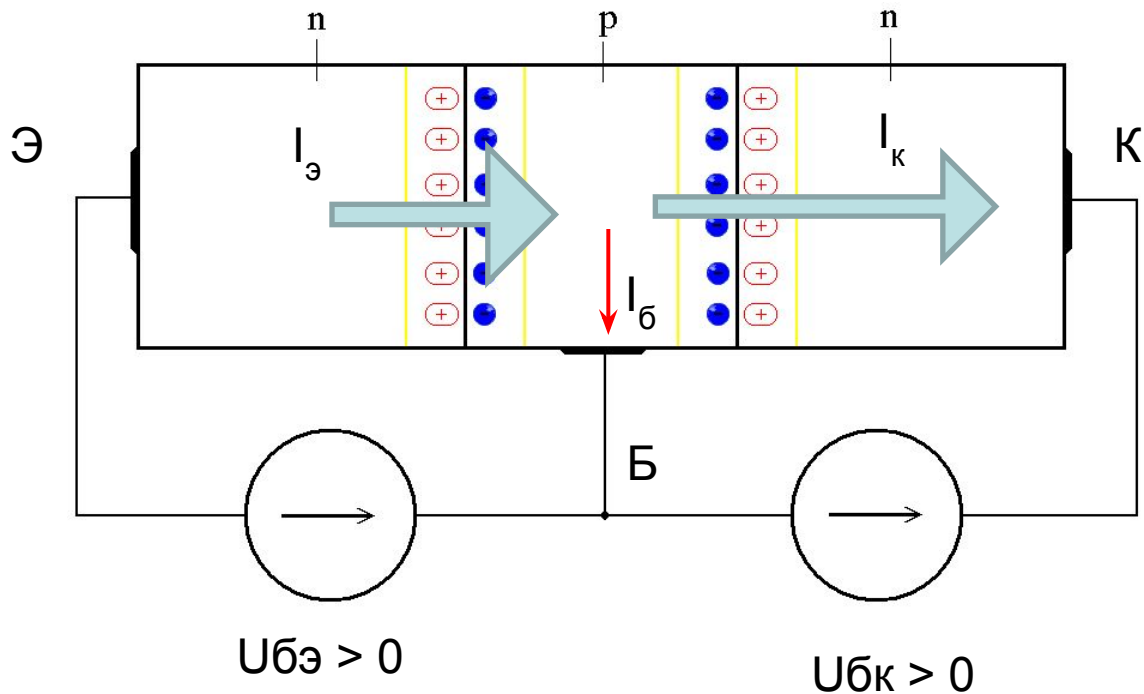
Чтобы электроны появились в базе, нужно открыть переход эмиттер-база, подав  $U_{бэ} > 0$



Под действием  $U_{\text{бэ}}$  электроны из коллектора переходят в базу. База делается тонкой, в этом случае электроны в базе сразу попадают под действие электрического поля, стремящегося переместить электроны из базы в коллектор. Поэтому основная часть электронов уходит в коллектор, и малая часть уходит в базу.

Переход Б-Э открыт

Переход К - Б закрыт



$$I_{э} = I_{б} + I_{к}, I_{э} \approx I_{к}$$

Важно здесь то, что неизменным условием наличия сквозного тока эмиттер-коллектор является наличие малого тока базы! Если мы прекратим маленький ток базы, прекратится и большой ток коллектора! Ток коллектора очевидно пропорционален току базы!

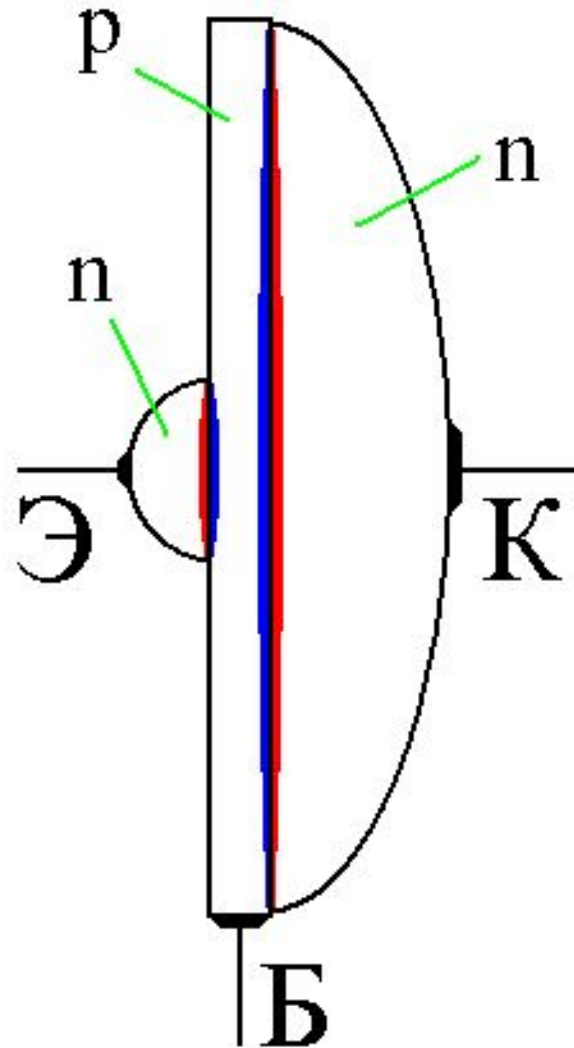
### 3.1. Устройство и принцип действия

- Ток эмиттера и коллектора течет только в случае открытого перехода база-эмиттер, следовательно, мы можем регулировать ток коллектора и эмиттера, управляя током базы!
- Если считать, что входным является малый ток базы, а выходным – большой ток коллектора, транзистор оказывается усилителем тока.
- Если смотреть на два состояния: есть ток базы – есть и сквозной ток эмиттер-коллектор; нет тока базы – нет сквозного тока Э-К, транзистор становится ключом, управляемым током базы.
- Также можно думать, что меняя ток базы, мы меняем сопротивление между эмиттером и коллектором (т.к. при одном и том же напряжении между К и Э изменение тока базы меняет ток между К и Э).

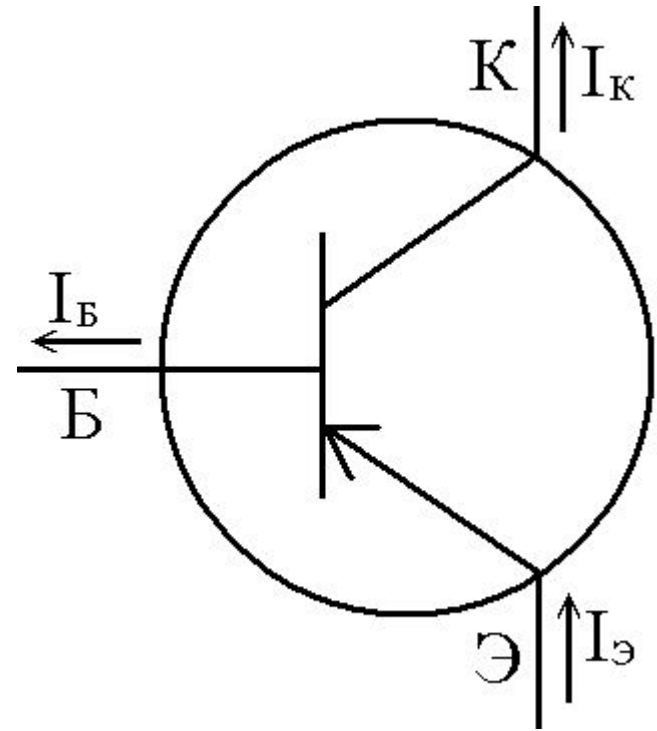
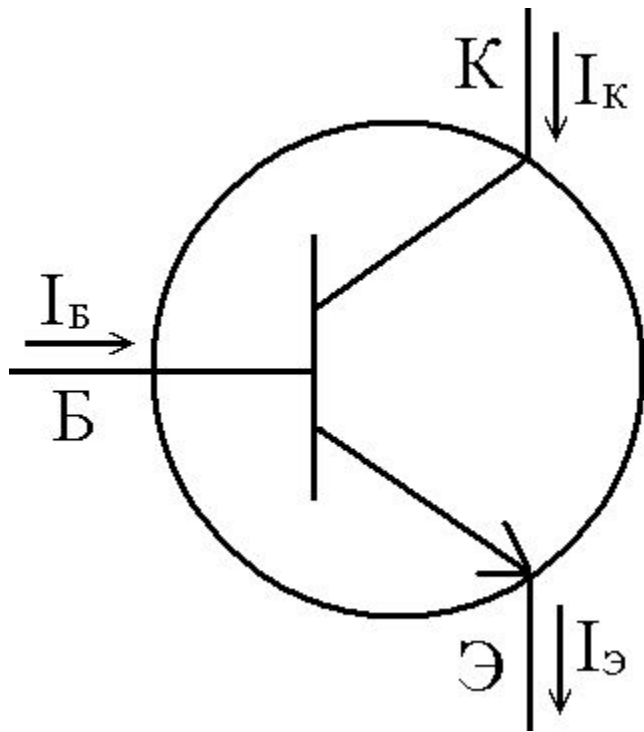


### 3.1. Устройство и принцип действия

#### Конструкция транзистора



### 3.1. Устройство и принцип действия



$$I_K \approx 0,9 - 0,95 \cdot I_Э$$

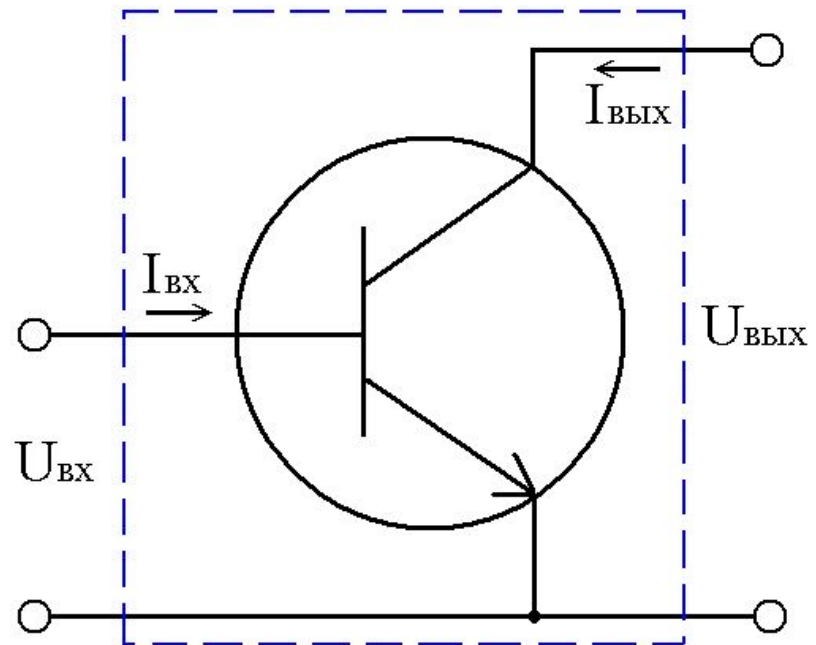
$$I_Б \approx 0,05 - 0,1 \cdot I_Э$$

### 3.1. Устройство и принцип действия

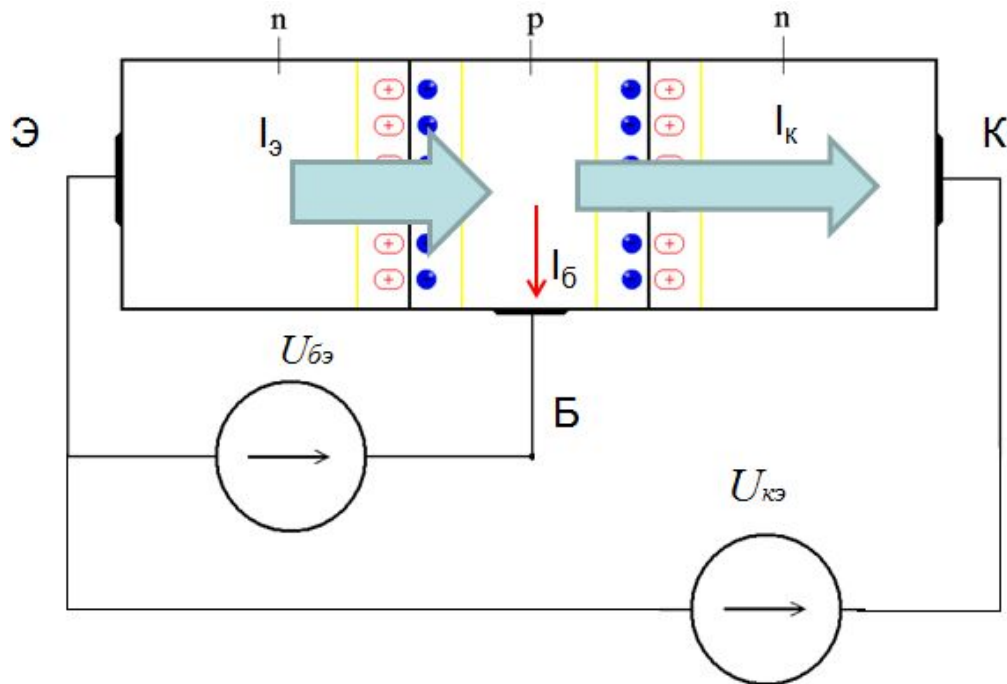
Транзистор может включаться по схеме с:

- общей базой;
- общим коллектором;
- общим эмиттером (самая распространенная)

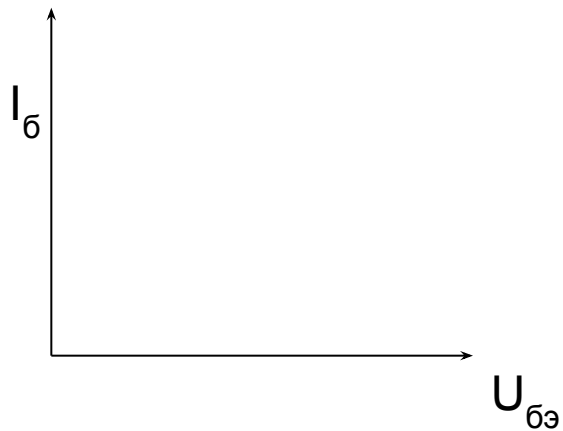
Включение по схеме с ОЭ



### 3.2. Основные характеристики транзистора в схеме с ОЭ



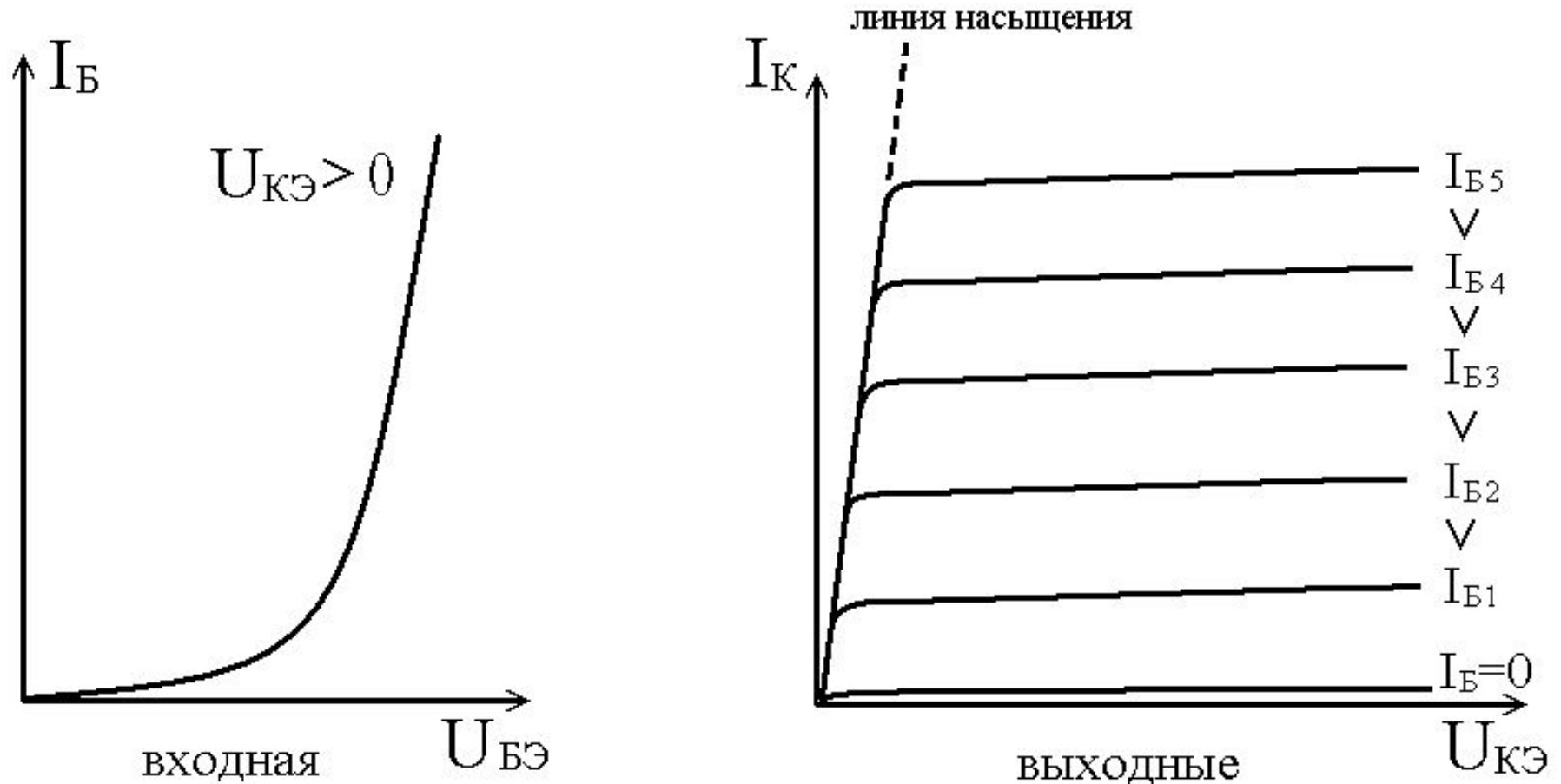
Входная характеристика  $I_{\text{б}}(U_{\text{бэ}})$  – характеристика рп-перехода



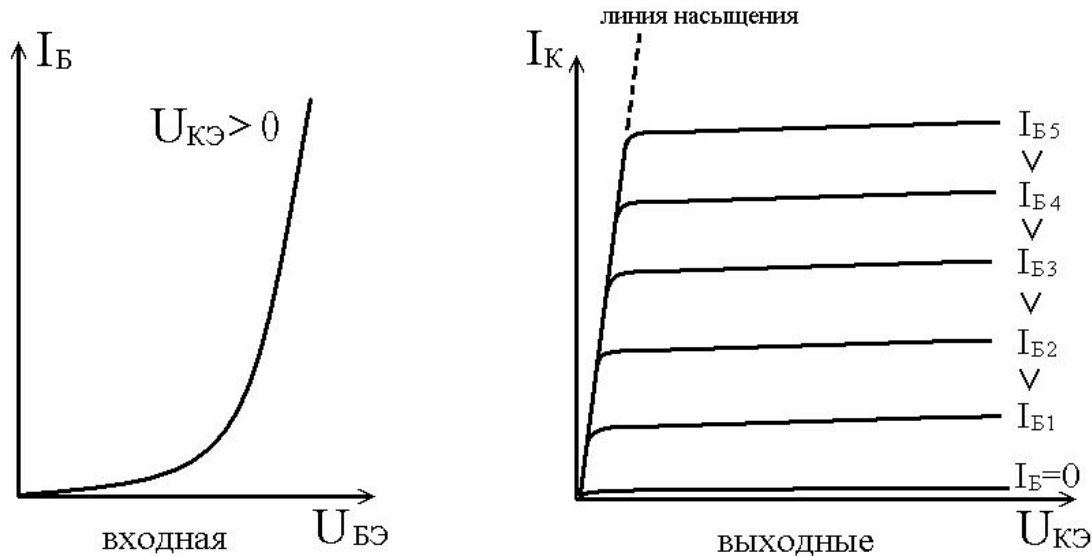
Выходная характеристика  $I_{\text{к}}(U_{\text{кэ}})$



### 3.2. Основные характеристики транзистора в схеме с ОЭ

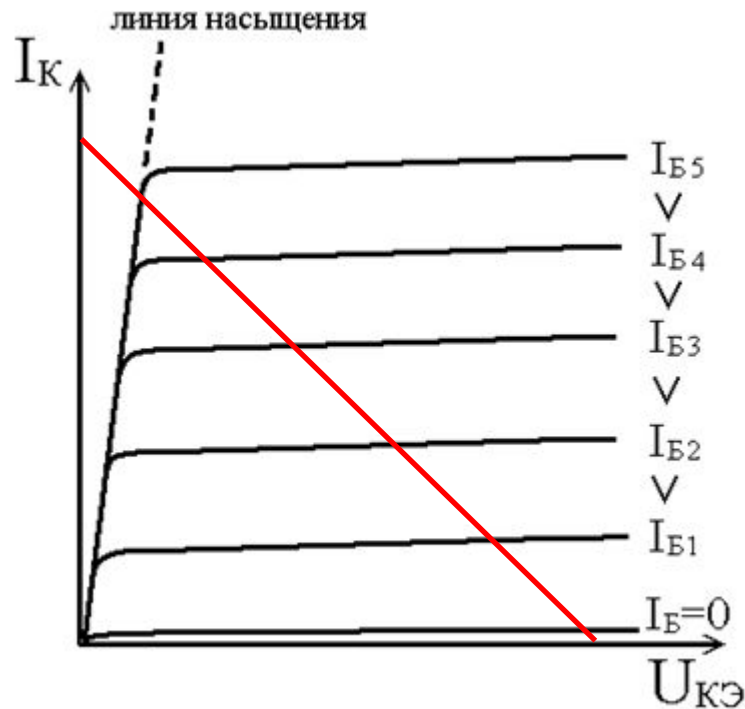
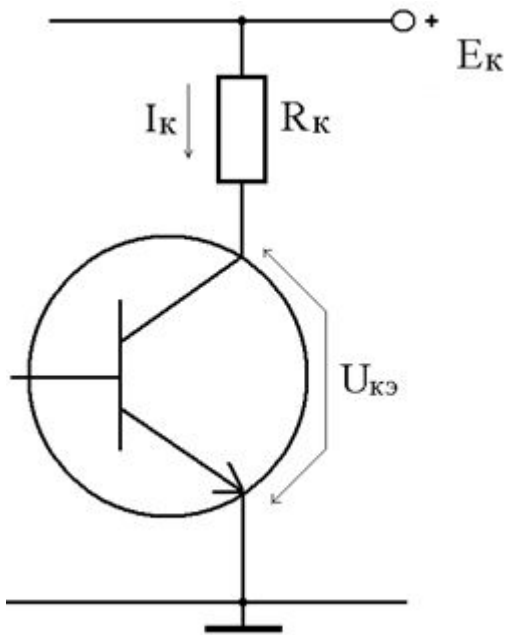


### 3.2. Основные характеристики транзистора в схеме с ОЭ



Рабочая область характеристик транзистора ограничена

- Максимальным напряжением  $U_{кэ}$
- Максимальным током коллектора  $I_{к}$
- Максимальной мощностью коллектора  $P_{к}$
- Минимальным (тепловым) током коллектора  $I_{к0}$ .

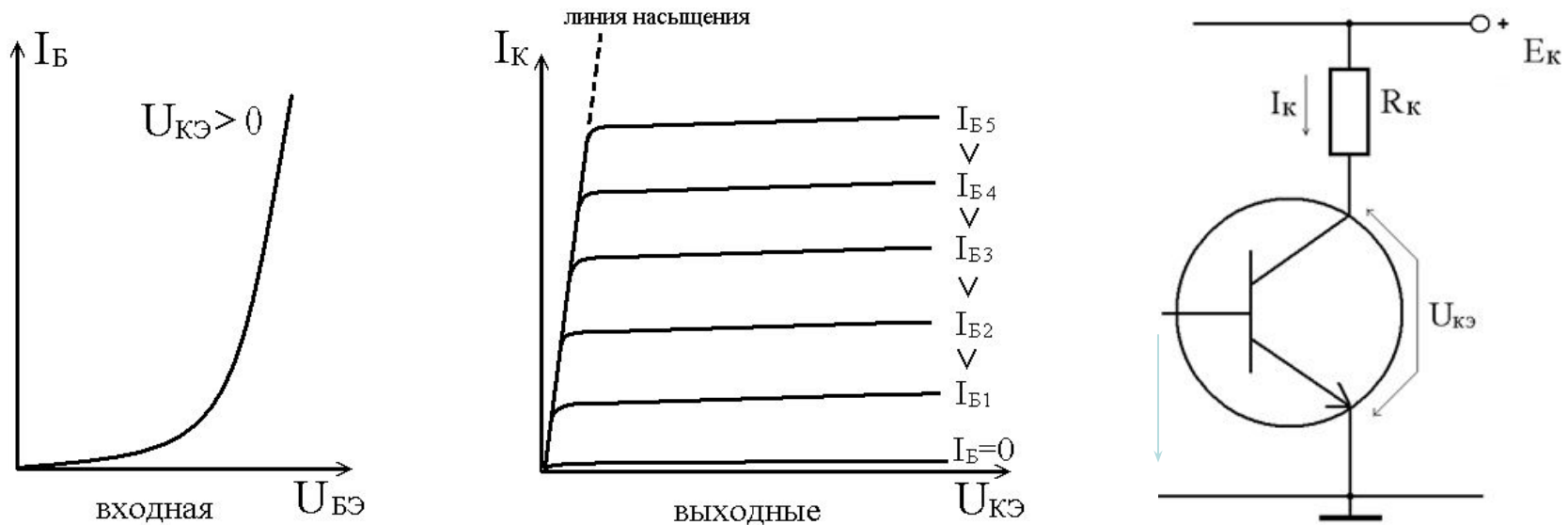


$$U_{КЭ} = E_K - I_K \cdot R_K$$

режимы работы транзистора:

- линейный, рабочая точка находится в пределах линейных участков характеристик (используется в усилителях переменного тока)
- насыщение, когда ток  $I_B$  настолько велик, что  $U_{КЭ}$  уже не зависит от тока  $I_K$  и минимально.
- отсечка, когда оба перехода в транзисторе закрыты, и  $U_{КЭ}$  максимально и не зависит от  $I_B$  и  $I_K$ . (режимы отсечки и насыщения используются в транзисторных ключах)
- инверсный режим, когда переход база-эмиттер смещен в обратном направлении, а коллектор-база – в прямом (применяется в двунаправленных ключах)

### 3.2. Основные характеристики транзистора в схеме с ОЭ



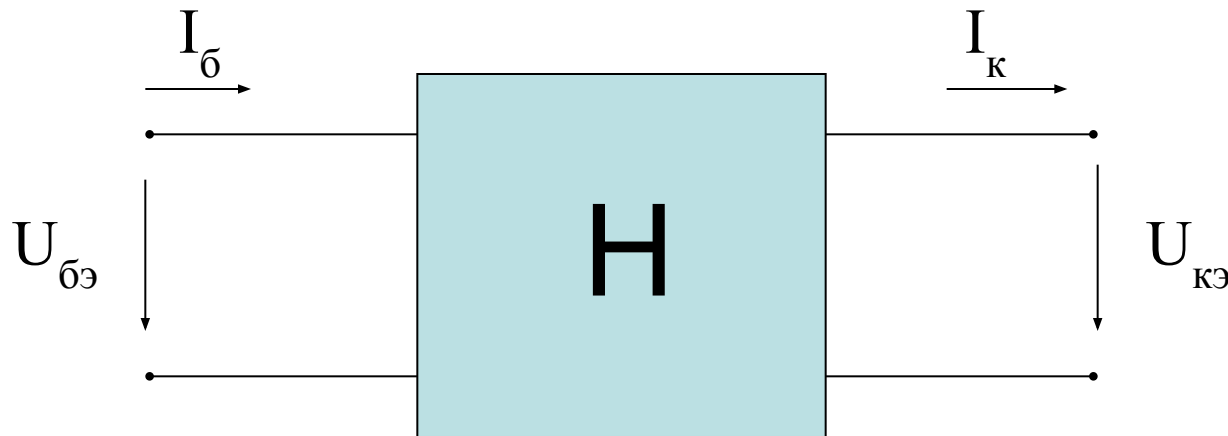
В линейном режиме приращения токов и напряжений пропорциональны. Этот режим используется в усилителях. Пропорциональность изменений токов и напряжений важна для сохранения формы сигнала.

Чтобы попасть в линейный режим и усиливать переменное напряжение, на вход транзистора необходимо подавать постоянную составляющую напряжения, называемую напряжением покоя. Без напряжения покоя усилить переменное напряжение или ток нельзя, т.к. транзистор пропускает только токи одной полярности.



# 3.3. Схема замещения транзистора на переменном токе

В пределах линейных участков входной и выходной характеристик транзистора переменные составляющие входных и выходных токов и напряжений связаны друг с другом линейными уравнениями. Поэтому транзистор можно описать как линейный четырехполюсник.



### 3.3. Схема замещения транзистора на переменном токе

$$\Delta u_{бэ} = h_{11} \cdot \Delta i_{б} + h_{12} \cdot \Delta u_{кэ}$$

$$\Delta i_{к} = h_{21} \cdot \Delta i_{б} + h_{22} \cdot \Delta u_{кэ}$$

Смысл h-параметров:

$h_{11}$  – входное сопротивление при кз на выходе

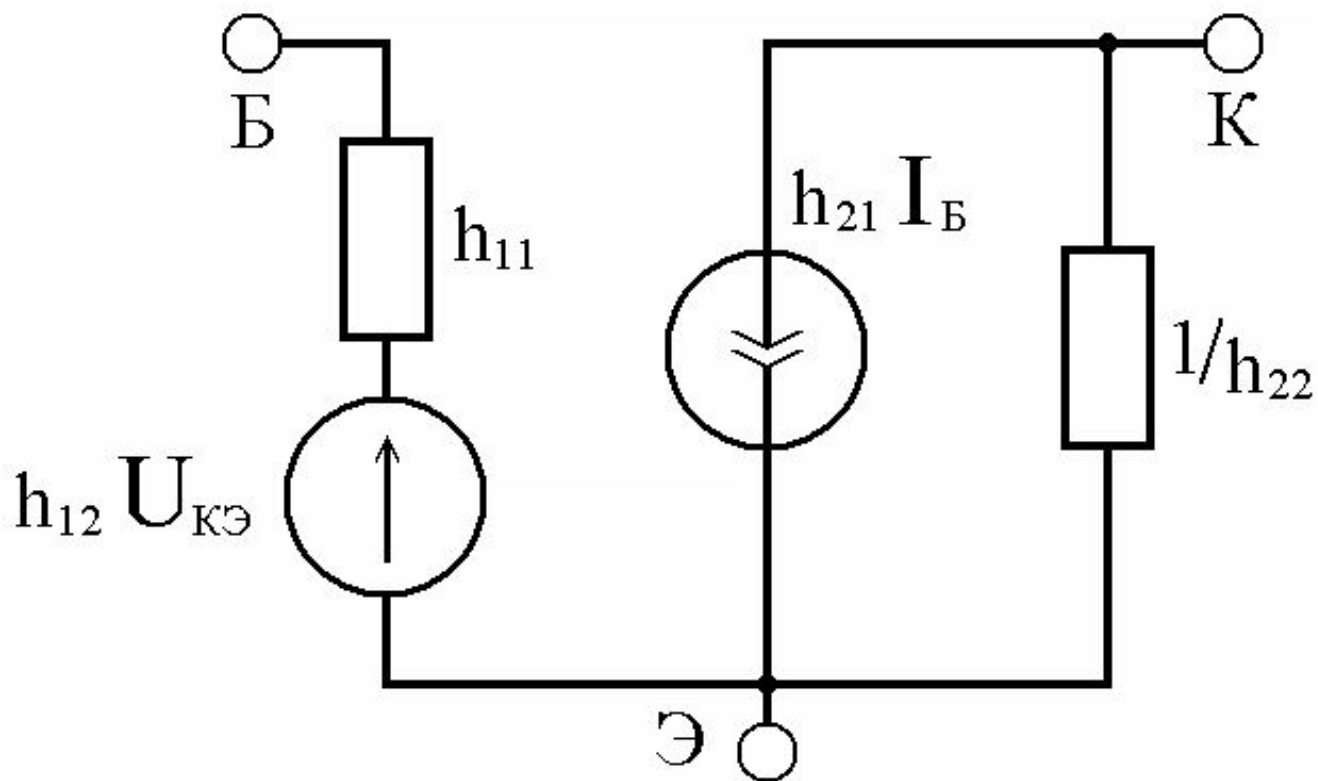
$h_{12}$  – коэффициент обратной связи по напряжению при хх на выходе

$h_{21}$  – коэффициент передачи по току при кз на выходе

$h_{22}$  – выходная проводимость при хх на входе

### 3.3. Схема замещения транзистора на переменном токе

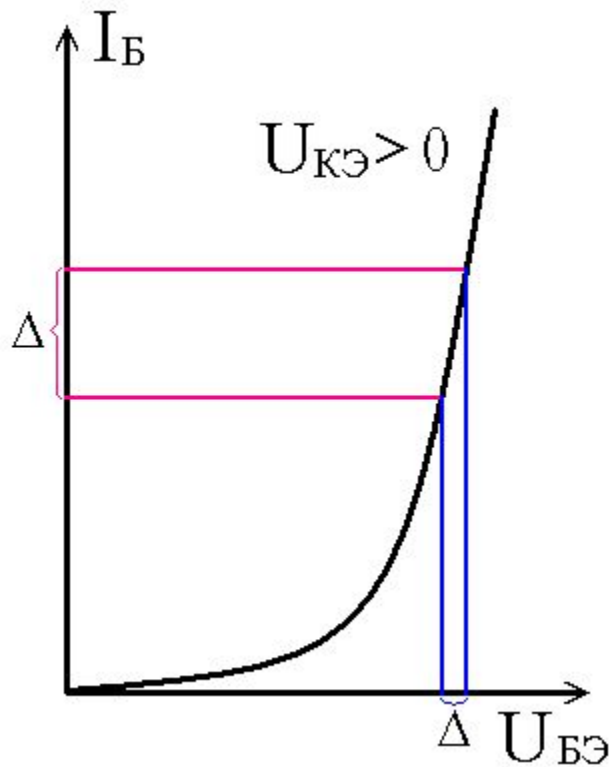
Схема замещения транзистора на переменном токе



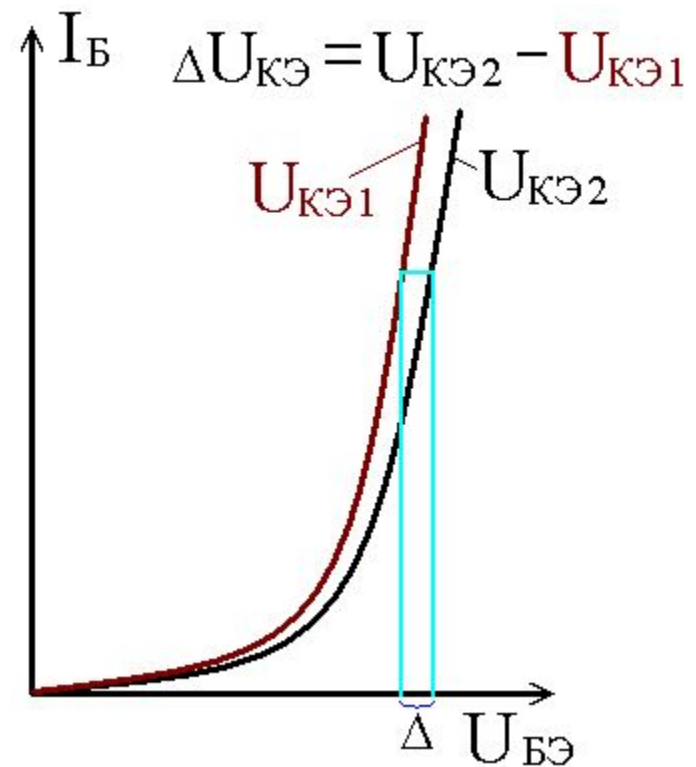
### 3.3. Схема замещения транзистора на переменном токе

## Определение h-параметров по характеристикам транзистора

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{\text{БЭ}}}{\Delta I_{\text{Б}}}$$



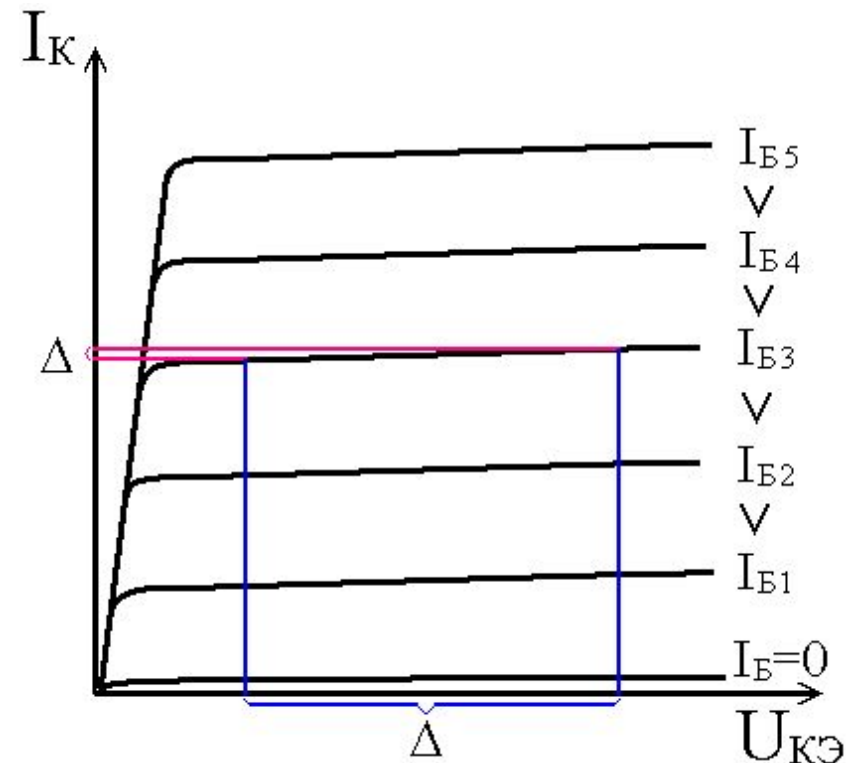
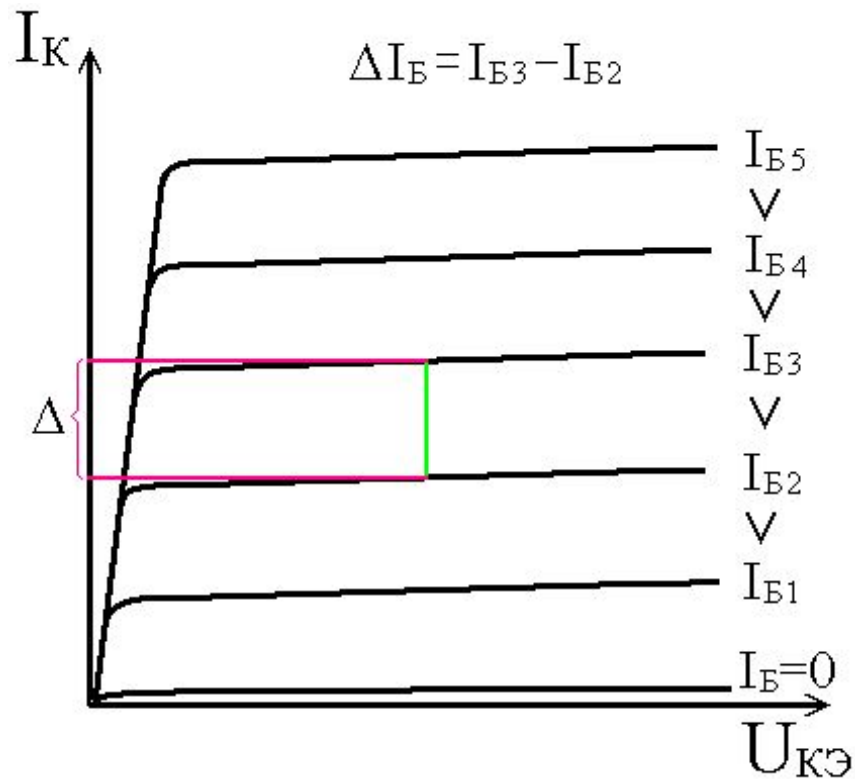
$$h_{12} = \frac{\Delta U_{\text{БЭ}}}{\Delta U_{\text{КЭ}}}$$



### 3.3. Схема замещения транзистора на переменном токе

$$h_{21} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}$$

$$h_{22} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{КЭ}}$$



### 3.3. Схема замещения транзистора на переменном токе

В паспортных данных транзистора указывают:

- $h_{11}$
- $h_{22}$
- $h_{21}$
- $I_{кmax}$
- $U_{кэmax}$
- $P_{кmax}$

# Униполярные (полевые) транзисторы

## Полевые транзисторы

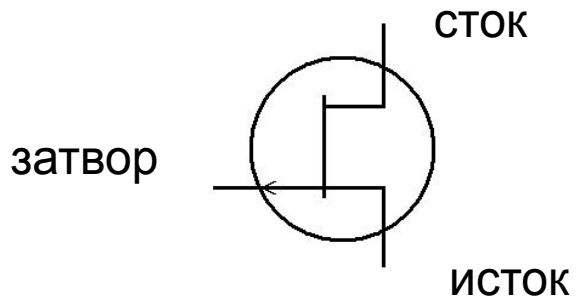
- Полевой транзистор – полупроводниковый прибор, ток которого управляется электрическим полем.
- В полевых транзисторах используются заряды только одного типа: либо электроны, либо дырки.
- Носители заряда перемещаются от электрода, называемого ИСТОКОМ к электроду, называемому СТОКОМ. Электрическое поле, регулирующее сопротивление в канале (и ток) формируется с помощью третьего электрода – ЗАТВОРА.

Полевые транзисторы делятся на:

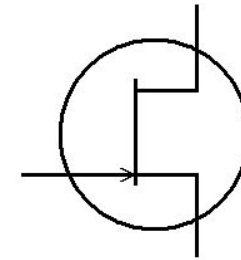
1. FET: С управляемым p-n переходом.
2. MOS: С изолированным затвором (с индуцированным каналом (МОП), со встроенным каналом (МДП)).



## 5.1. Устройство и принцип действия полевого транзистора с управляемым переходом

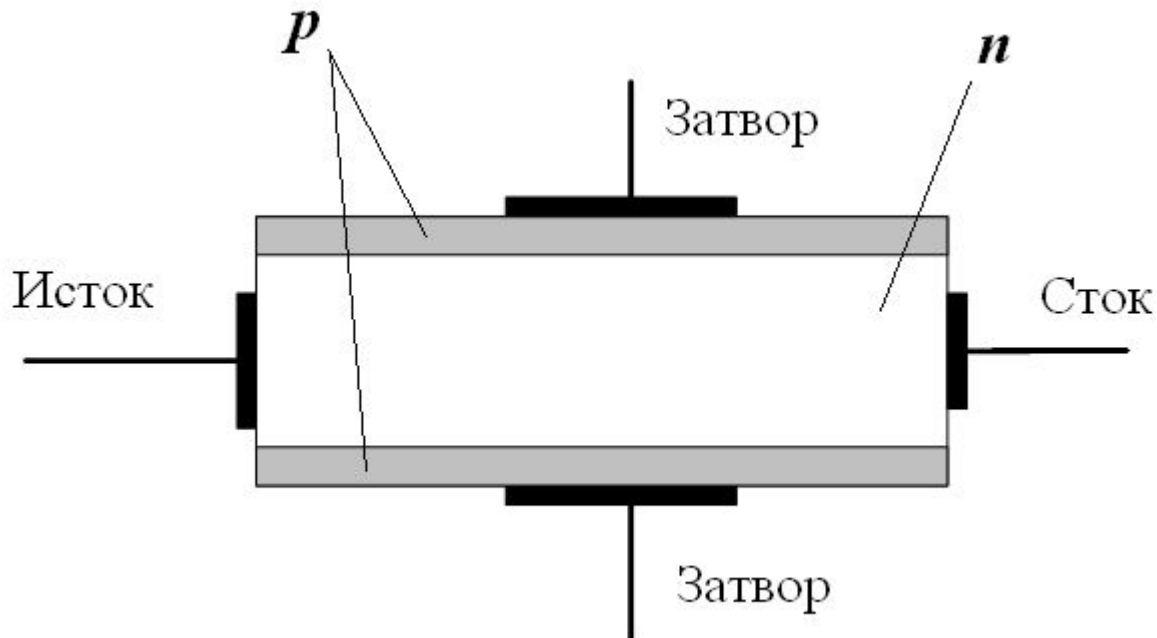


p - канал



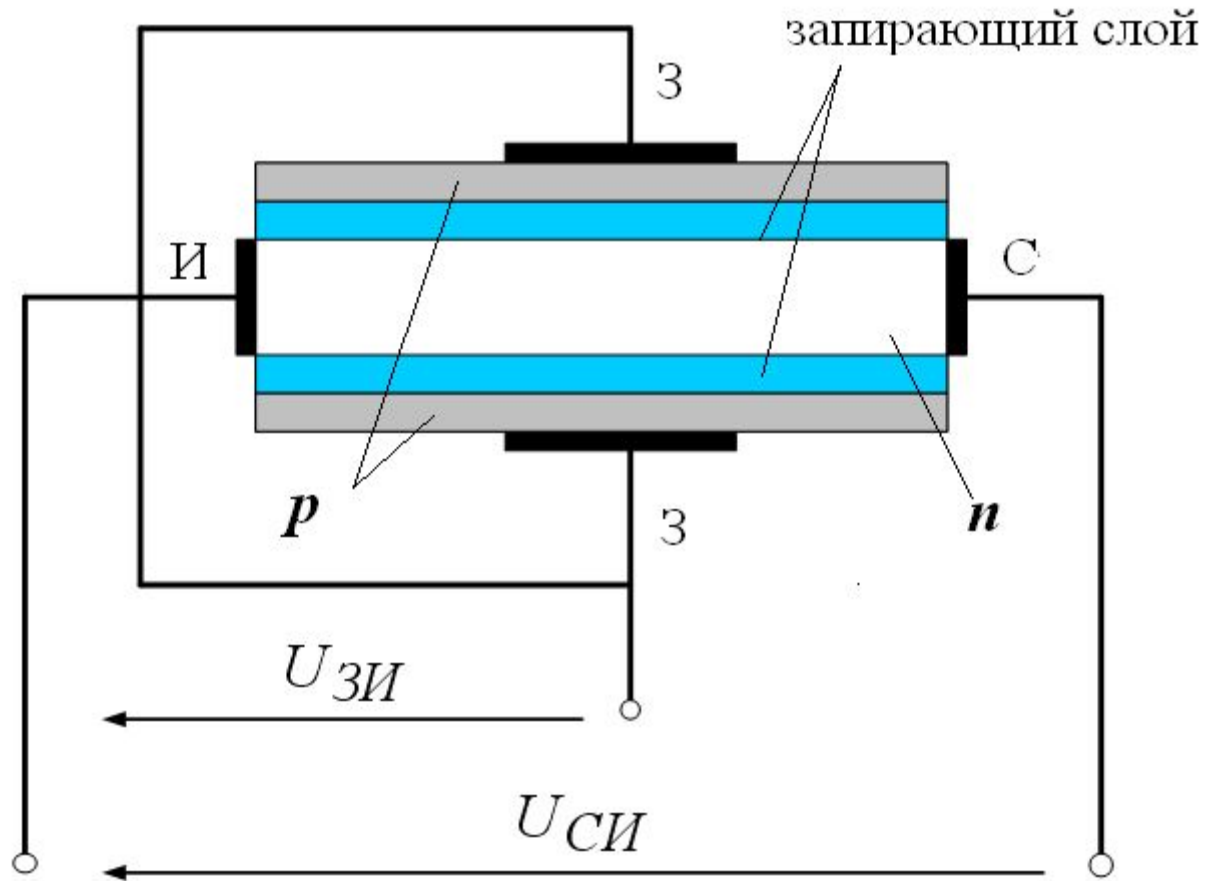
n - канал

### Транзистор с n-каналом



Полевые транзисторы

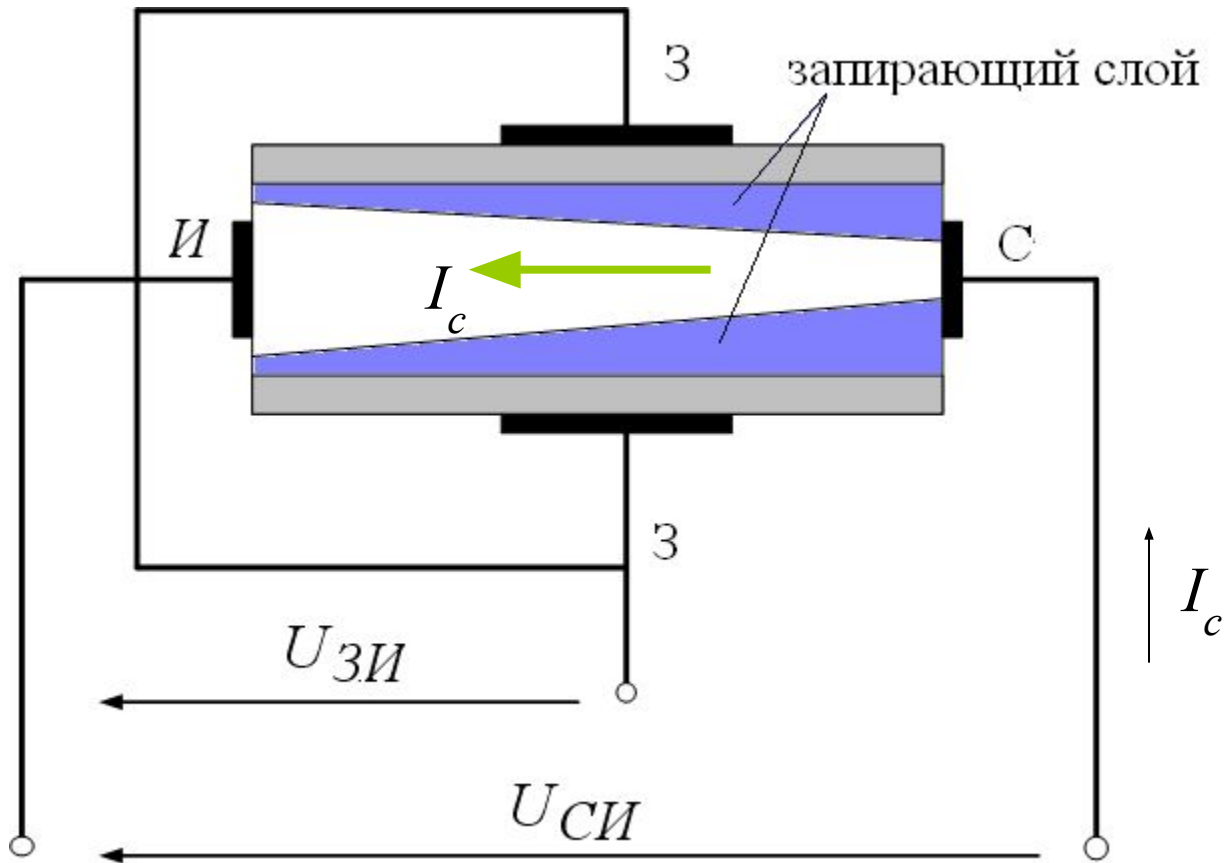
Подадим  $U_{ЗИ} < 0$ , чтобы закрыть р-п переходы и  $U_{СИ} = 0$



*Ширина n-канала уменьшилась, а его сопротивление выросло.*

## Полевые транзисторы

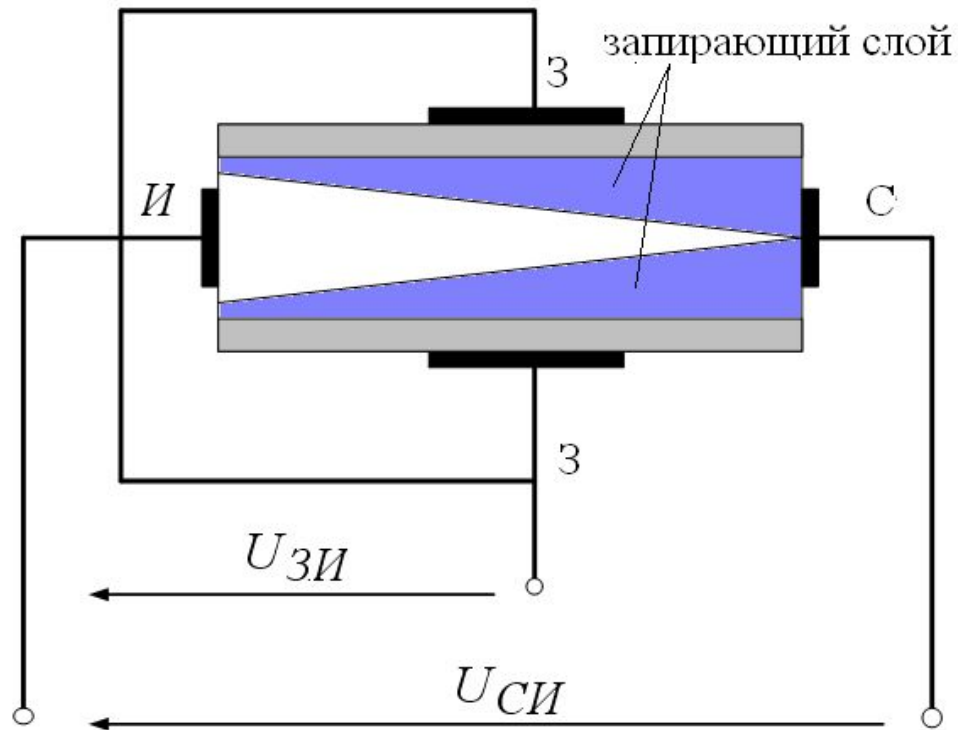
Теперь увеличим  $U_{СИ} > 0$ , появится ток в n-канале (ток стока)



*Минимальная ширина канала определяется как  $U_{ЗИ}$ ,  
так и  $U_{СИ}$*

## Полевые транзисторы

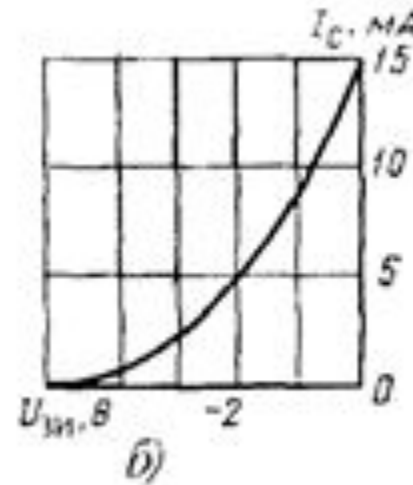
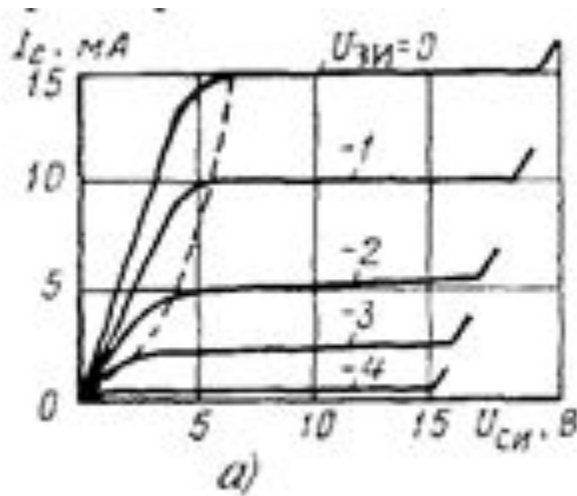
Существует такое  $U_{СИ} = U_{зап}$ , что сечение n-канала уменьшается до нуля, а электропроводность резко падает



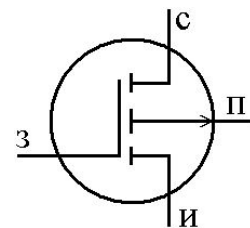
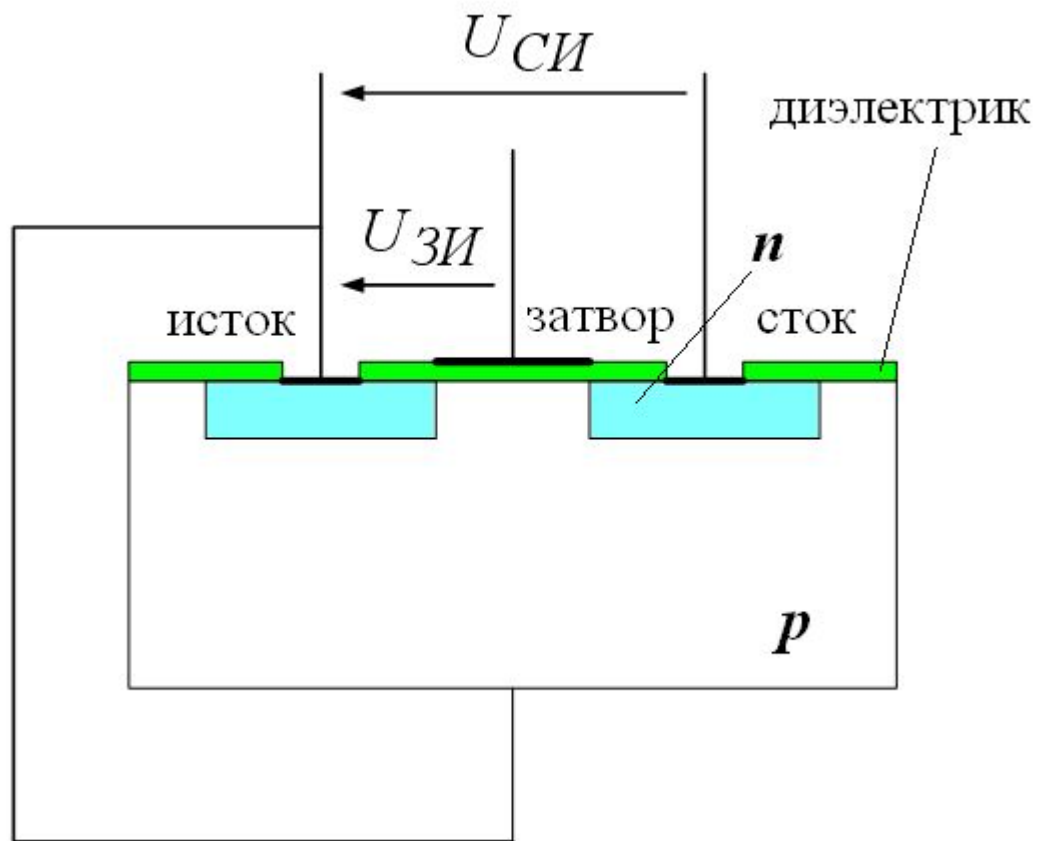
При дальнейшем увеличении  $U_{СИ}$  ток стока меняться не будет

## Полевые транзисторы

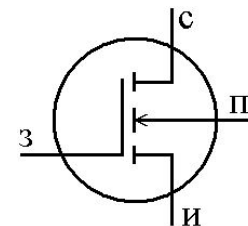
- При  $U_{ЗИ} < U_{зап}$  ток стока сильно зависит от  $U_{ЗИ}$ .
- Величина  $U_{зап}$  зависит от напряжения  $U_{ЗИ}$ . Чем меньше  $U_{ЗИ}$ , тем больше значения запирающего напряжения  $U_{зап}$ .



# МДП-транзисторы (металл-диэлектрик-полупроводник)

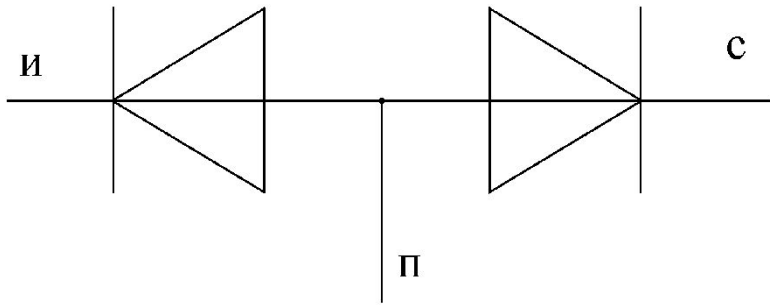
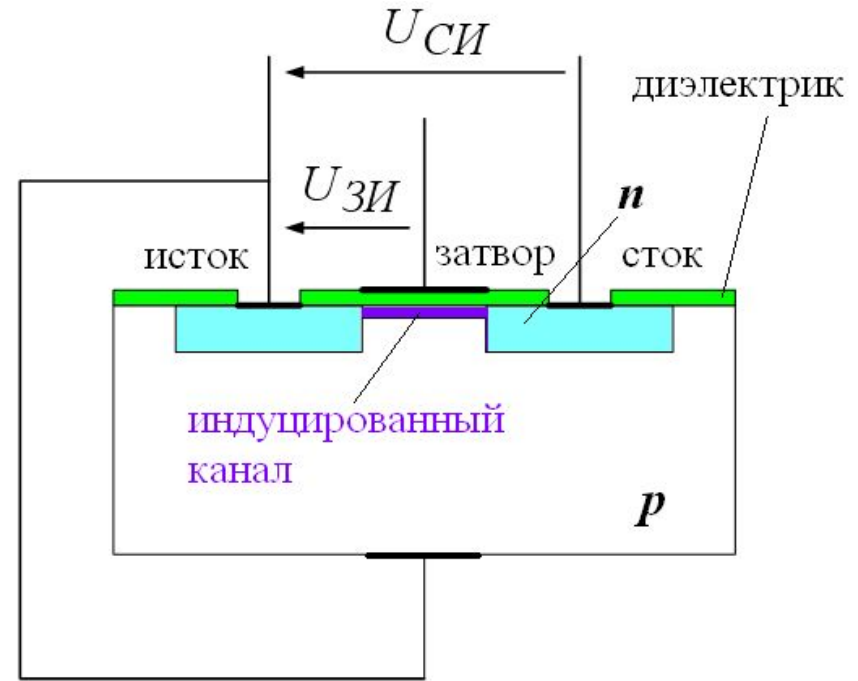
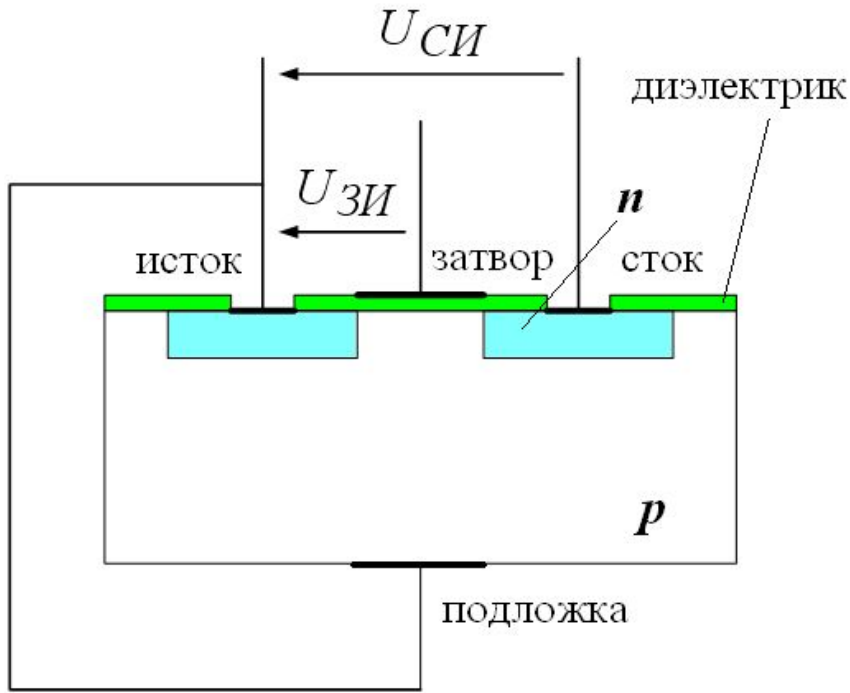


$p$  – канал



$n$  – канал

# МДП-транзисторы



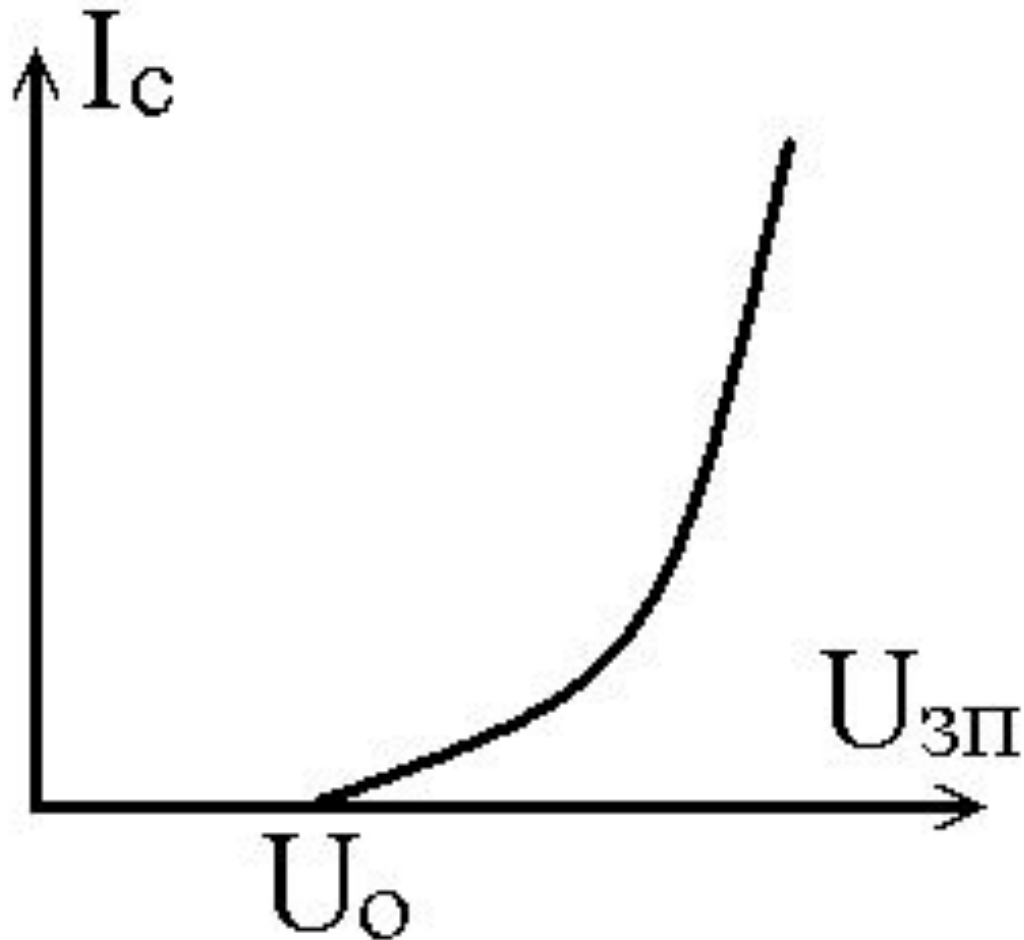
$$U_{ЗИ} = 0$$

$$U_{ЗИ} > 0$$

Дырки перемещаются от затвора к подложке, электроны – наоборот, около затвора формируется область, обогащенная электронами, возникает канал для тока стока.

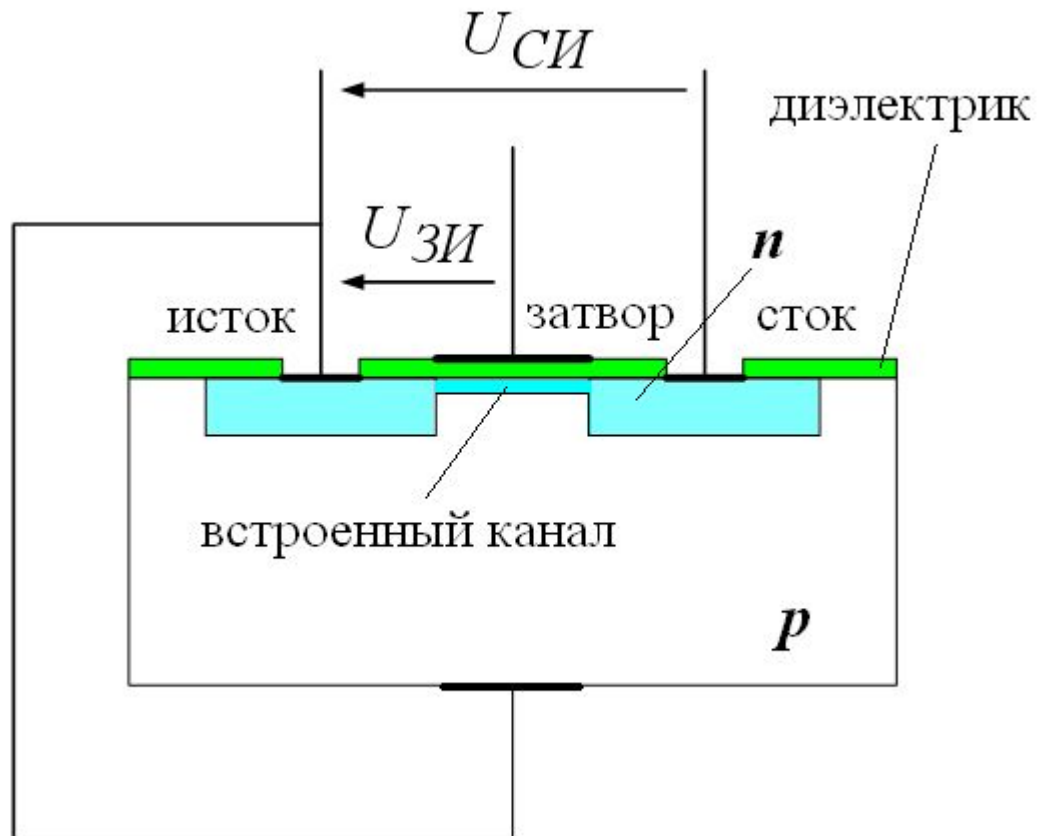
МДП-транзисторы

Сток - затворная характеристика



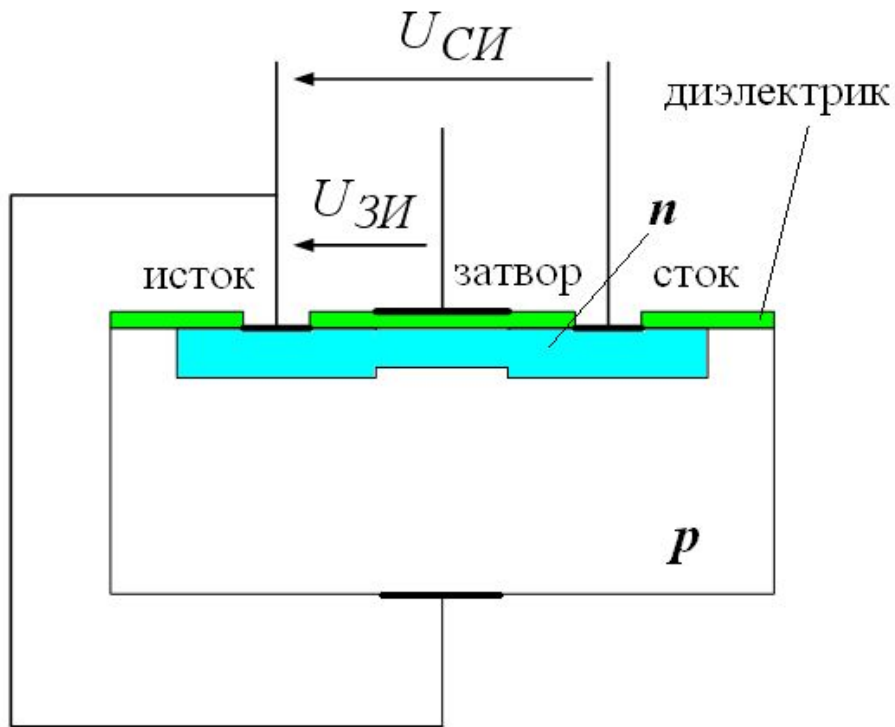


# МОП-транзистор со встроенным каналом



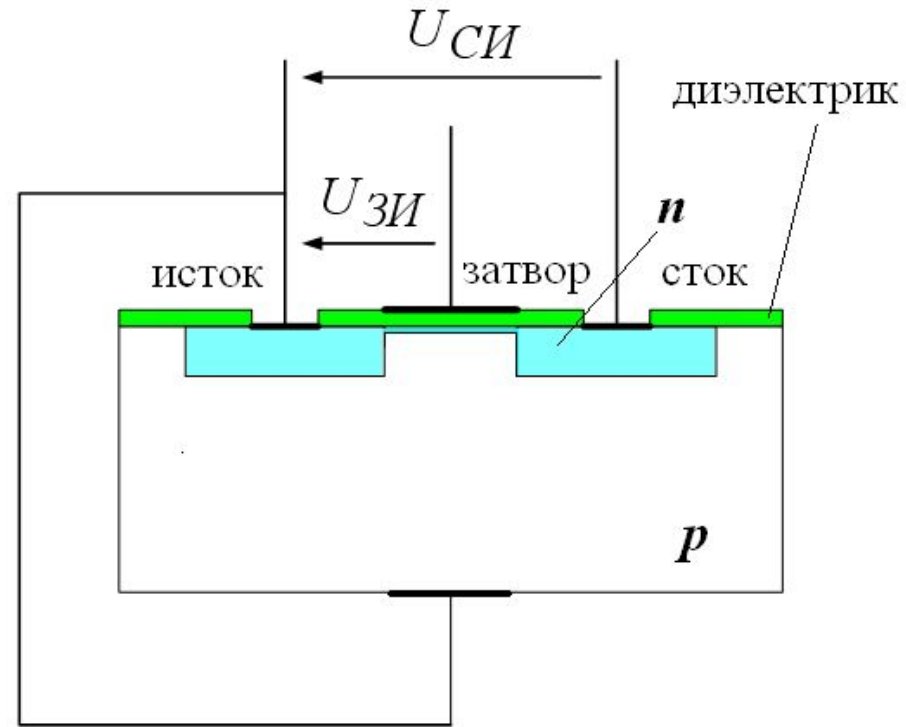
Канал встроен в структуру. При  $U_{ЗИ} = 0$  ток стока существует

# МОП-транзисторы



- $U_{ЗИ} > 0$

Сечение канала увеличивается, проводимость растет, увеличивается ток стока

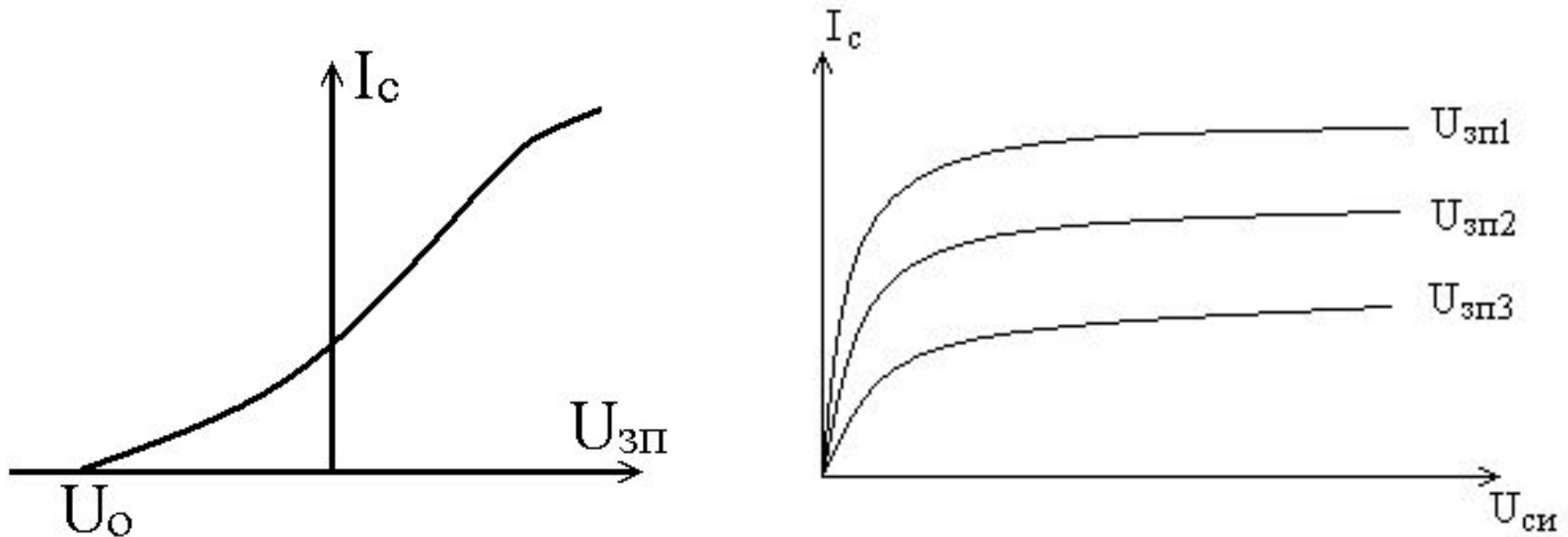


- $U_{ЗИ} < 0$

Сечение канала уменьшается, проводимость падает, снижается ток стока

## МОП-транзисторы

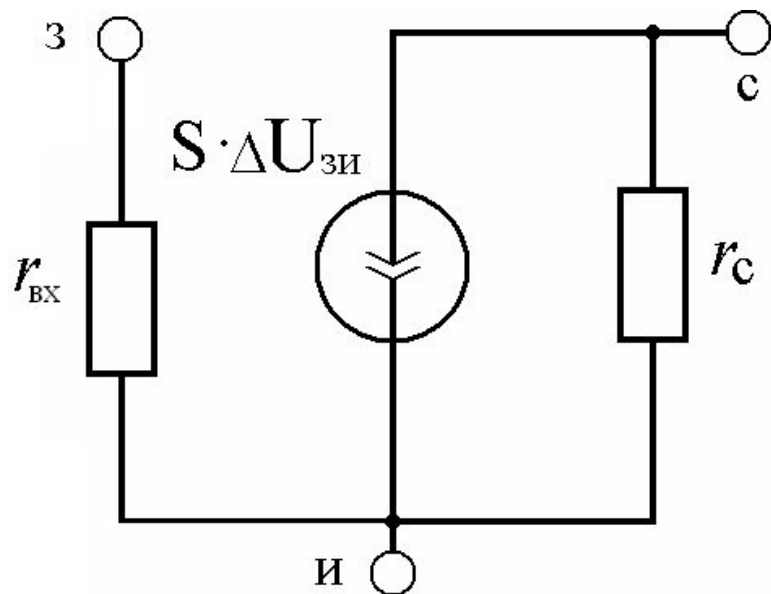
- Сток-затворная и выходная характеристики МОП-транзистора



*МДП-транзисторы управляются однополярным напряжением, МОП-транзисторы – двуполярным.*

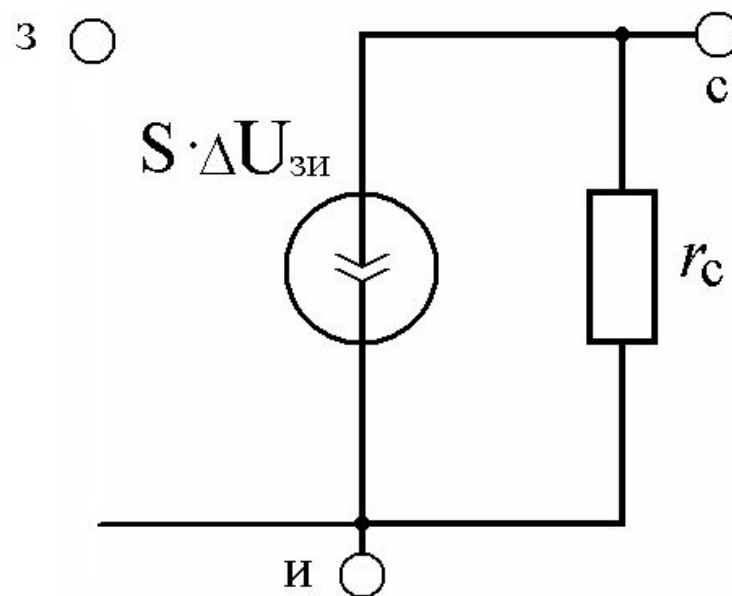
# Полевые транзисторы

## Схема замещения полевого транзистора в области средних частот



МДП-транзистор

$$R_{вх} \approx 10^9 \text{ Ом}$$



МОП-транзистор

$$R_{вх} \approx \infty$$

## Полевые транзисторы

- Полевые транзисторы могут использоваться в тех же устройствах, что и биполярные транзисторы.
- БПТ управляется током базы, полевые транзисторы – напряжением между затвором и истоком
- Входная цепь полевого транзистора не потребляет ток (в отличие от БПТ)!!!

# Усилитель на полевом транзисторе

