

# 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;**

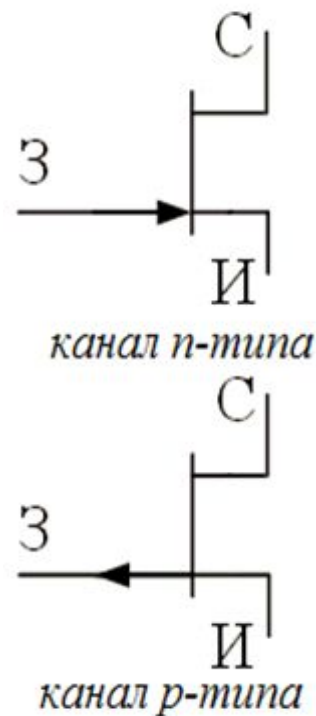
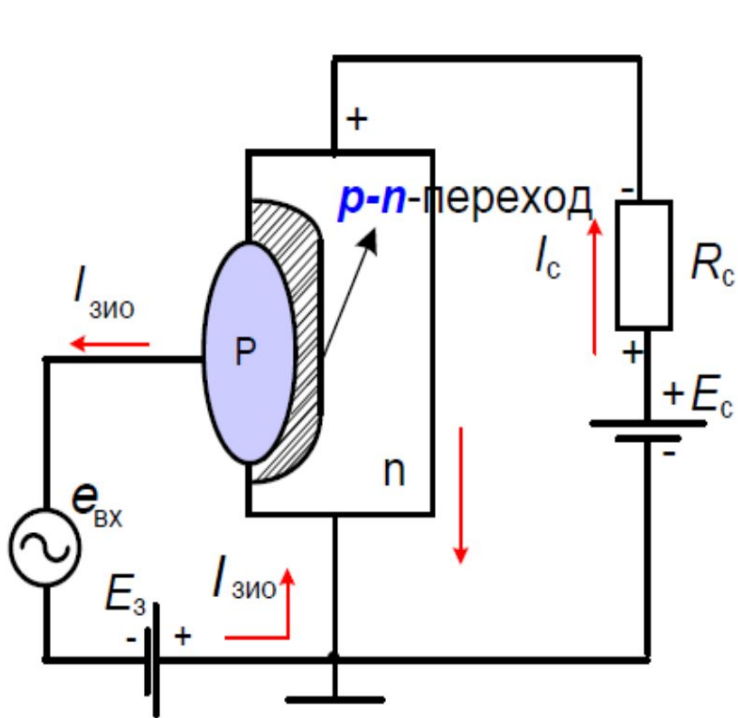
- с управляющим **p-n** переходом (бывают с каналом **n-типа** или с каналом **p-типа**)
- со структурой **металл-диэлектрик-полупроводник** (МДП-транзистор). Часто в качестве диэлектрика применяют окисел кремния, поэтому их часто называют **МОП-транзистор** (**металл-окисел-полупроводник**, *metal-oxide-semiconductor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

**МОП-транзисторы могут быть двух типов:**

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

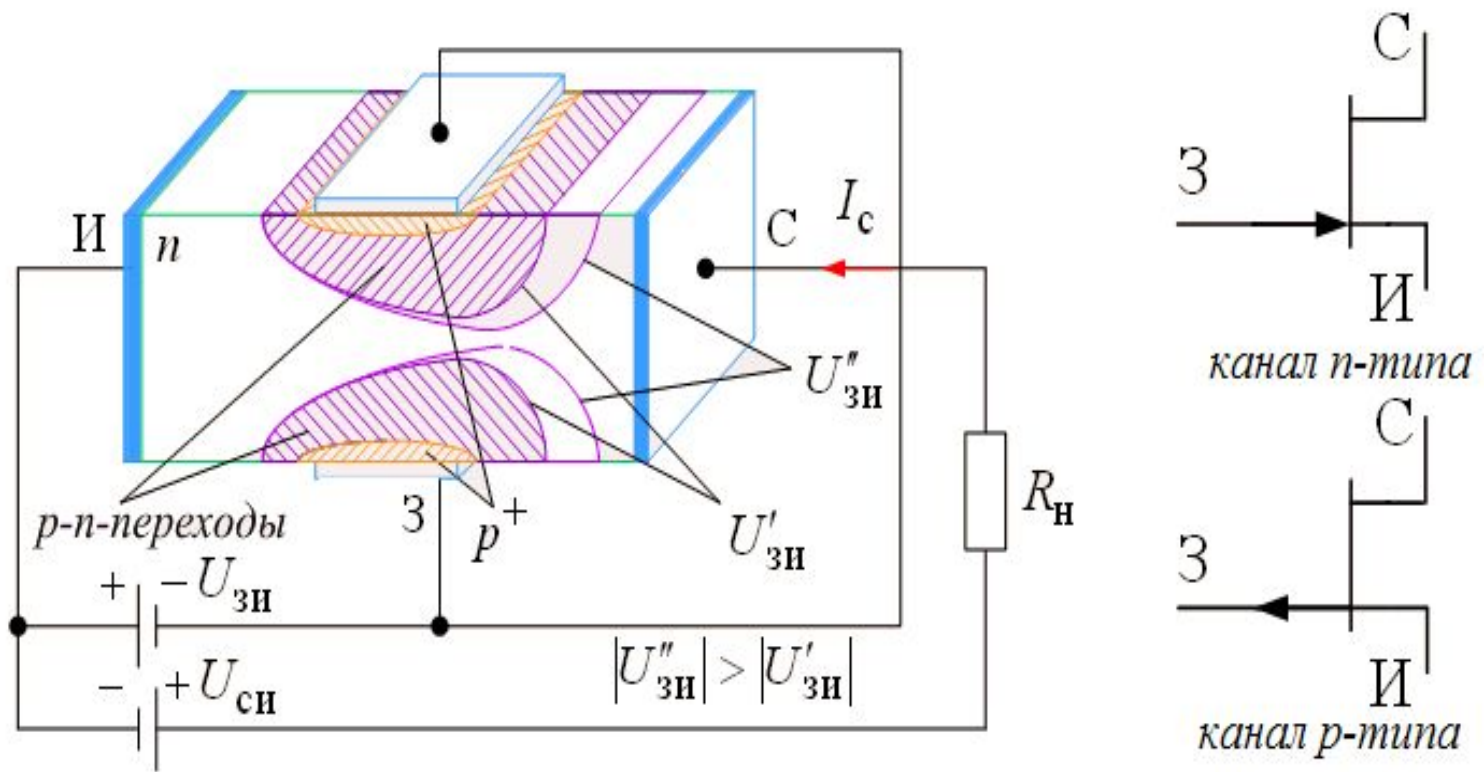
# Полевые транзисторы с управляющим p-n-переходом

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**.

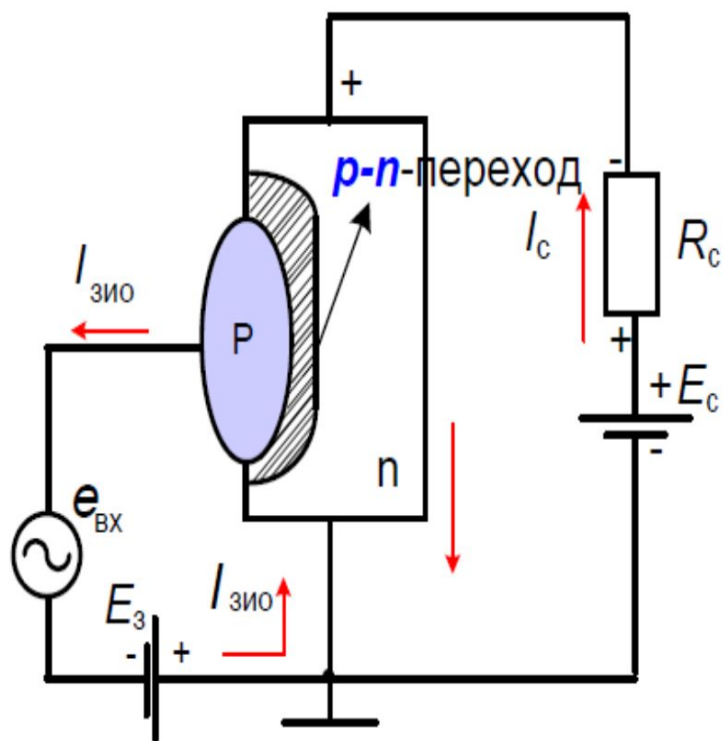


- Электрод, от которого движутся основные носители заряда в канале, называют истоком, а электрод, к которому движутся, - стоком. Управляющий электрод называют затвором.
- Для эффективного управления выходным током материал основного полупроводника должен быть высокоомным. Кроме того, начальная ширина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

# Полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом



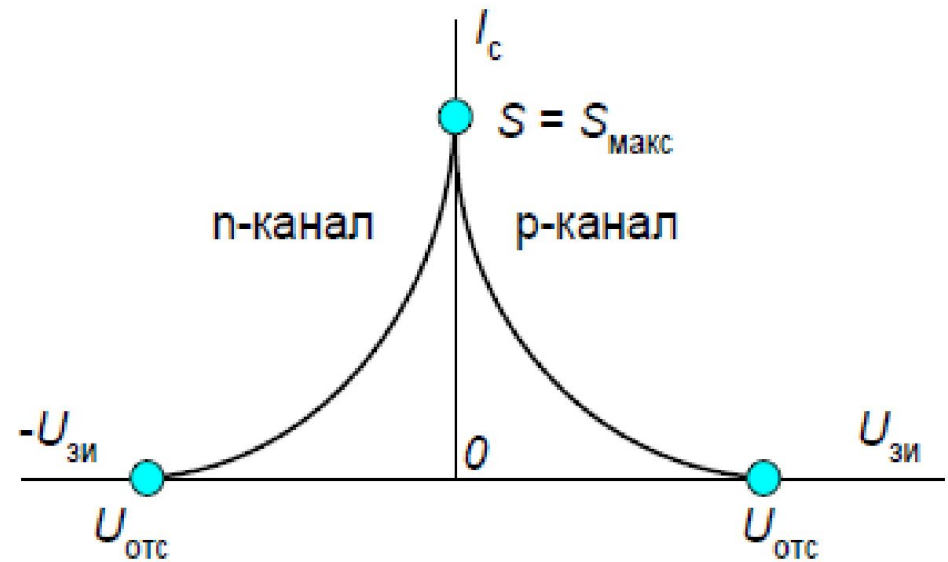
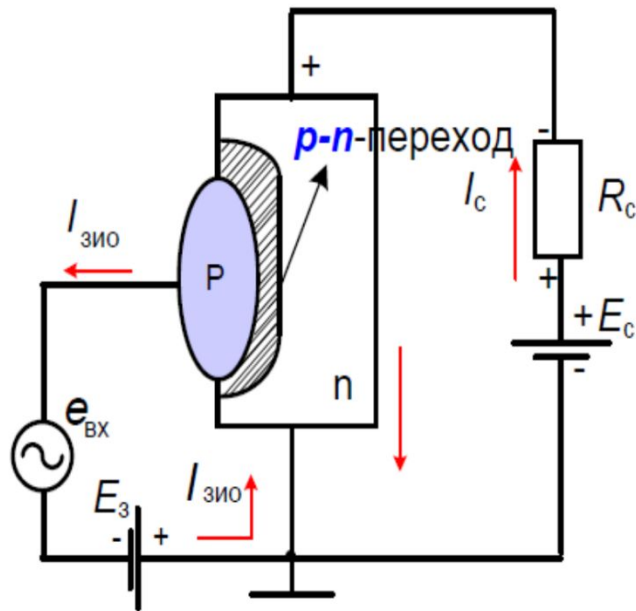
# Полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом



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.

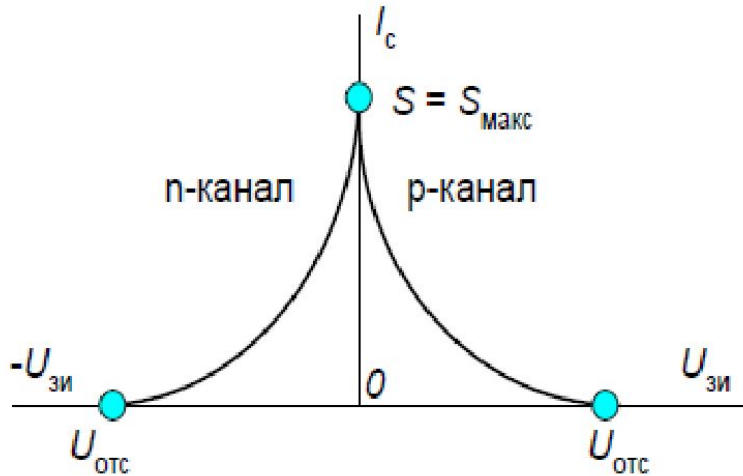
# Стоко-затворная характеристика канал n-типа

- 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.

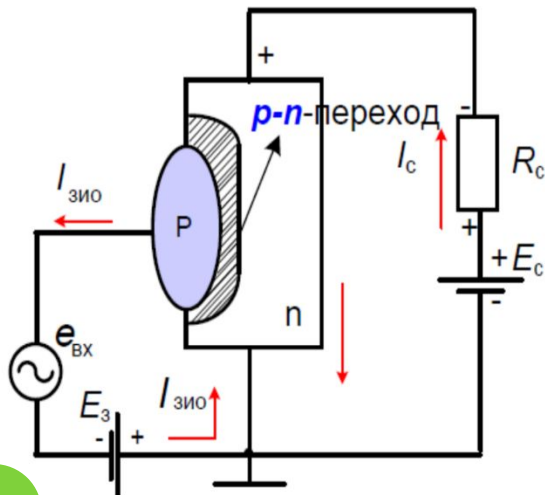
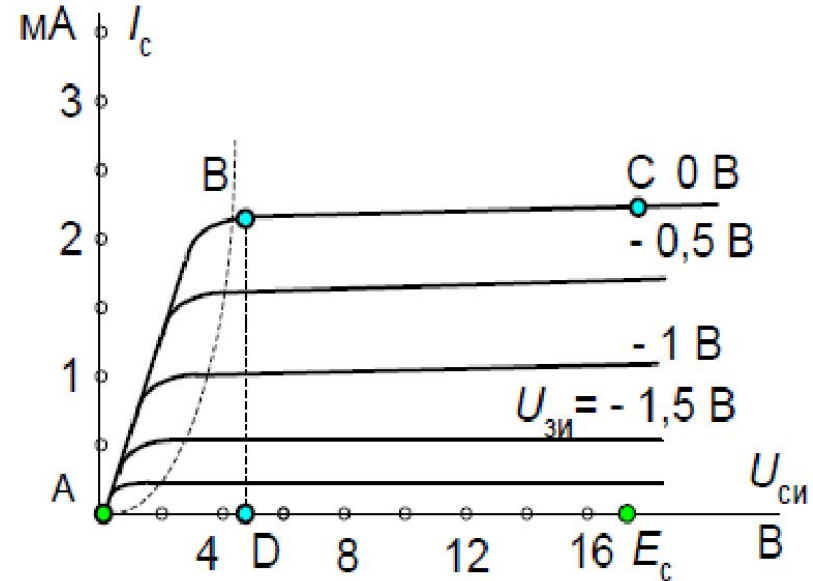


# Выходная характеристика канал n-типа

Стоко-затворная характеристика



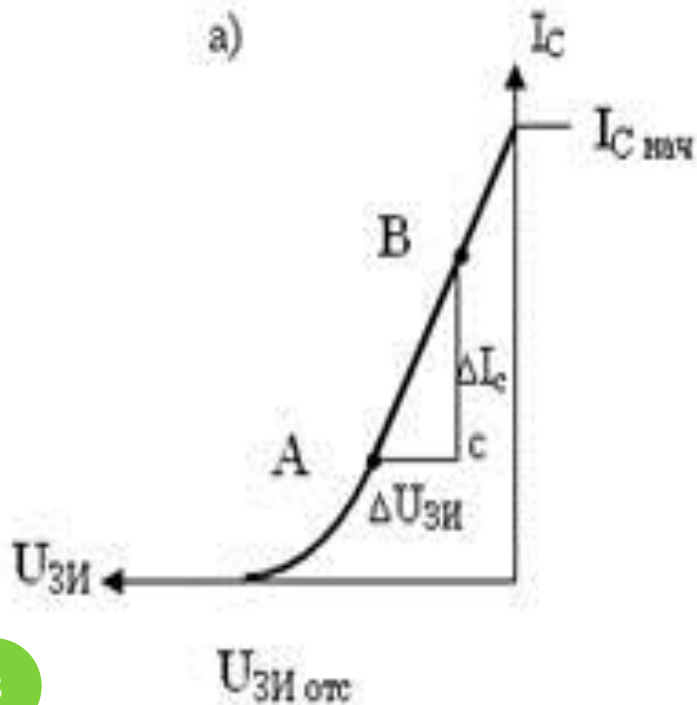
Выходная характеристика



- 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.

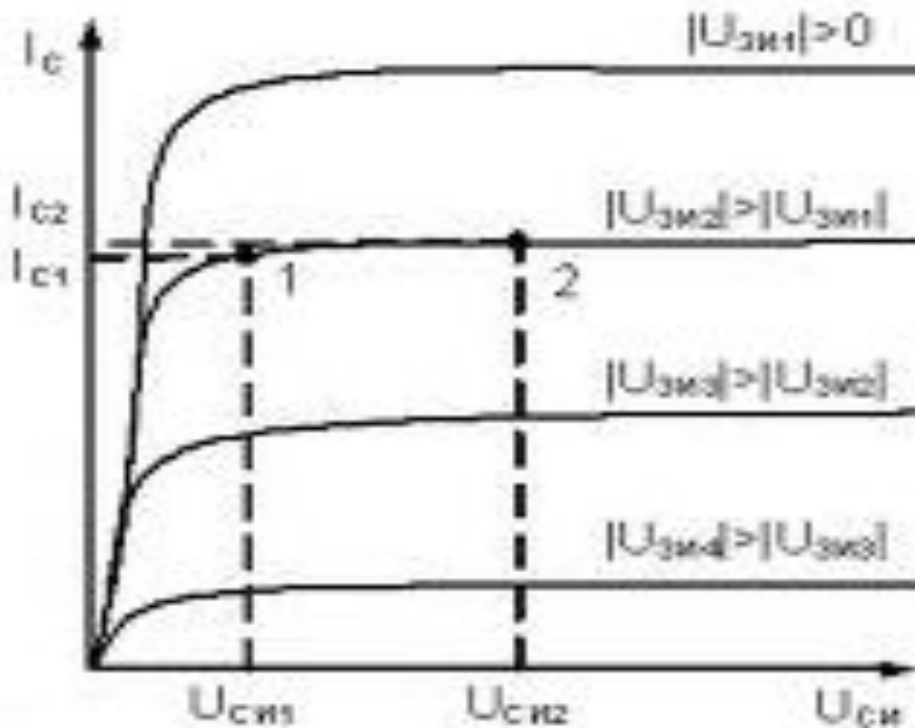


$$S = \Delta I_c / \Delta U_{зи} \text{ , mA/V}$$

при  $U_{си} = \text{const}$



3) Внутреннее сопротивление (или выходное) полевого транзистора.

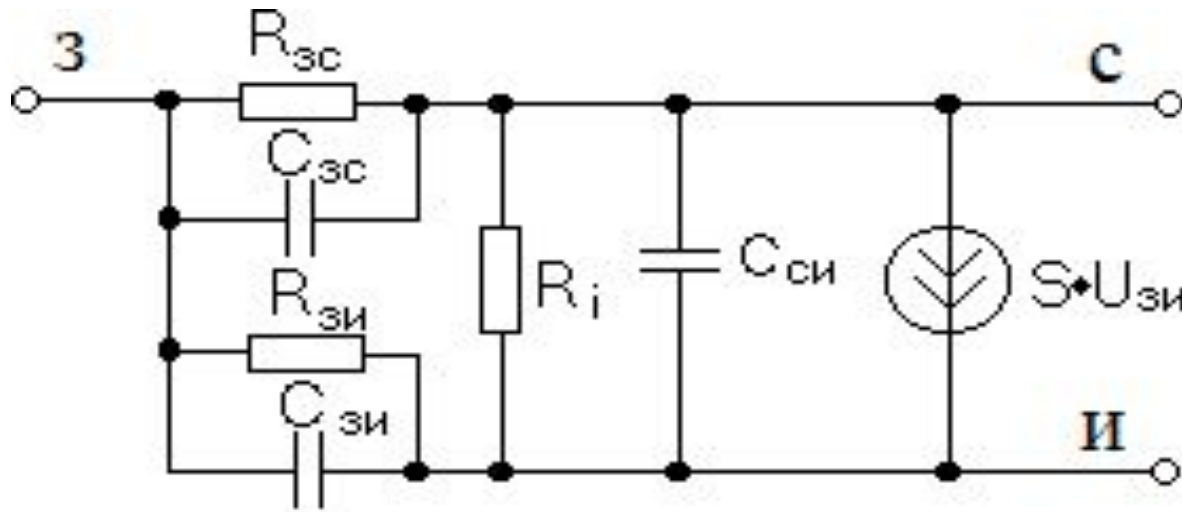


$$R_i = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \text{ при } U_{зи} = Const$$

4) Входное сопротивление

$$R_{вх} = \frac{\Delta U_{зи}}{\Delta I_3} \leq 10^9 \text{ Ом}$$

## 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;

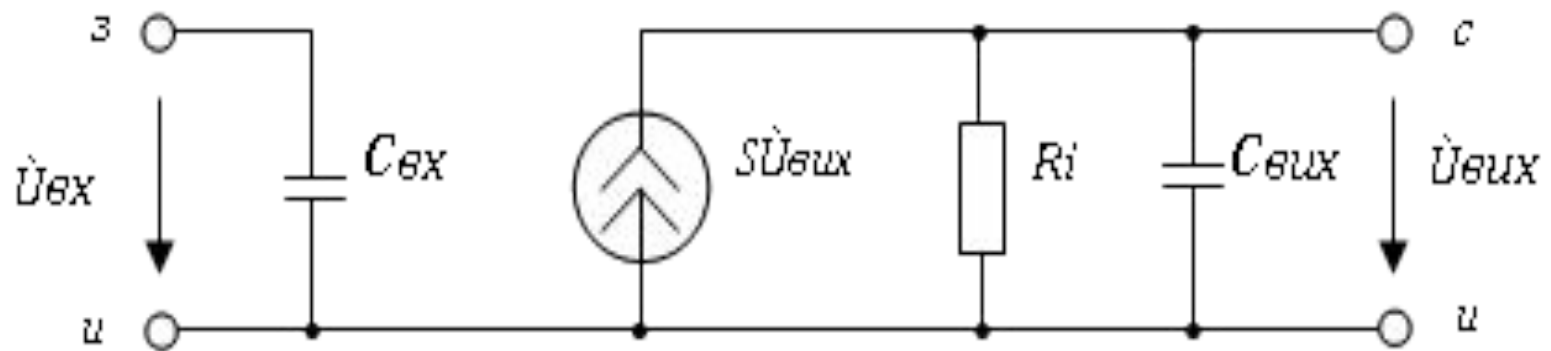
$C_{си}$  – емкость между стоком и истоком транзистора;

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

Усилительные свойства по напряжению характеризует коэффициент усиления:

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

# схема

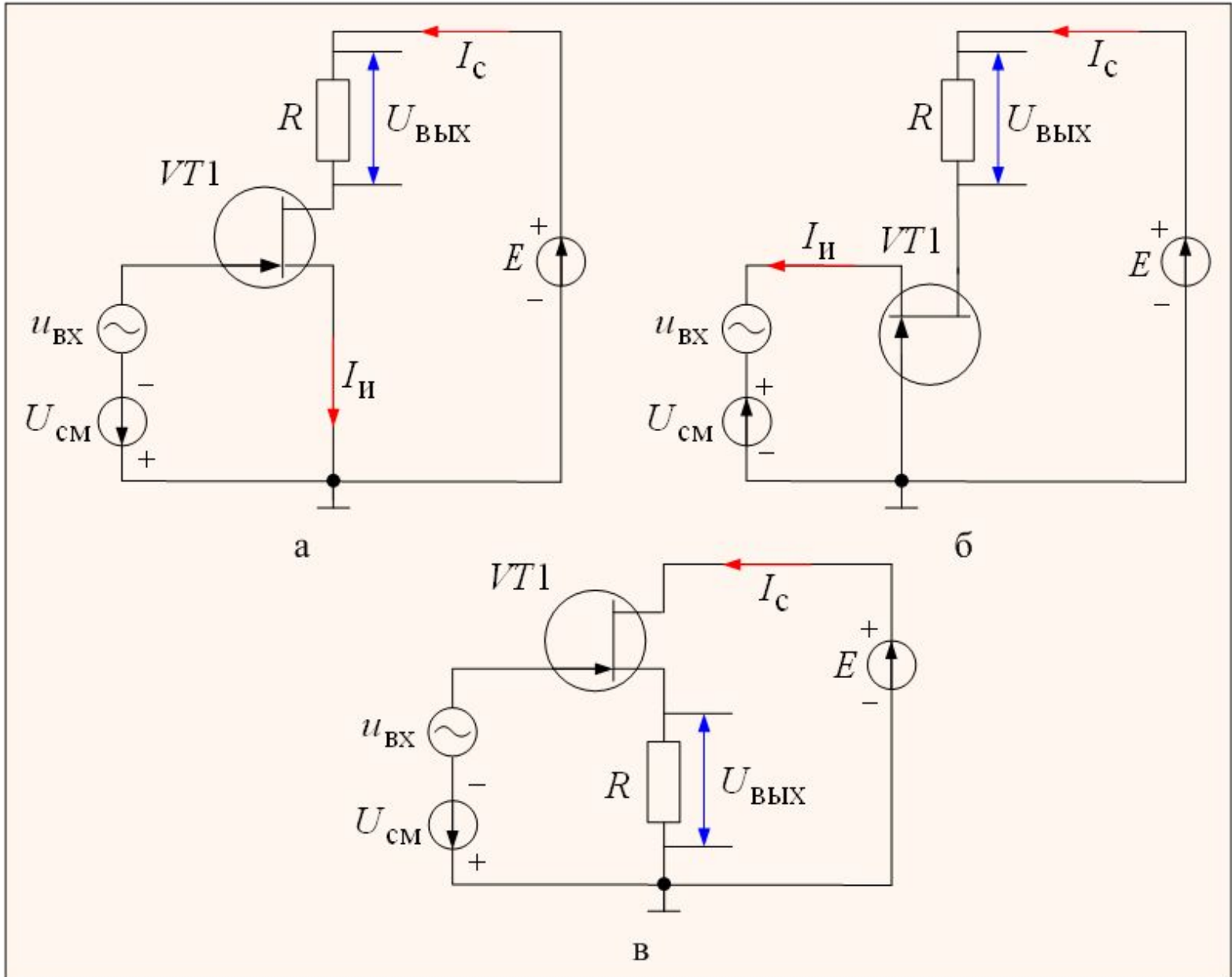


## Преимущества полевых транзисторов по сравнению с биполярными транзисторами:

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

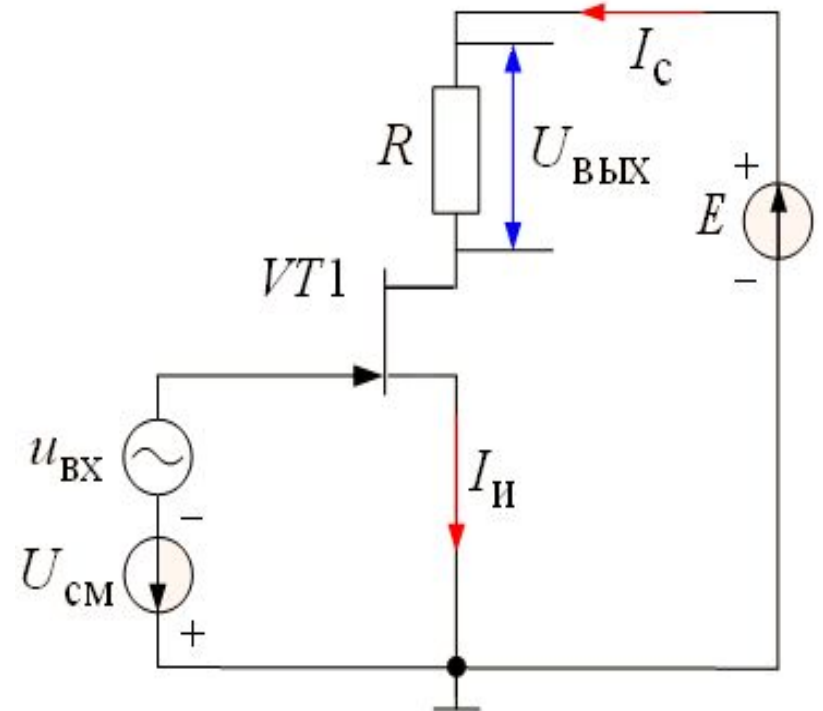
# Схемы включения

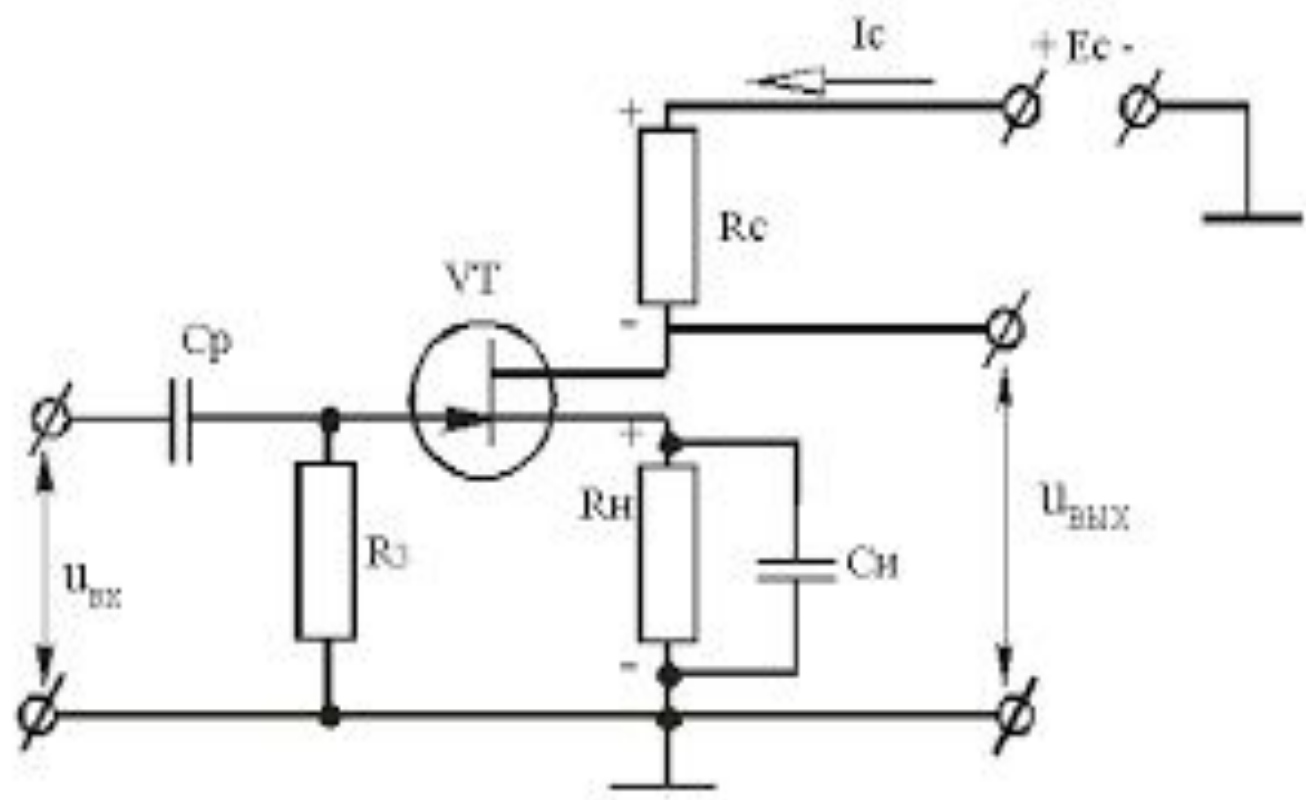
- а- ОИ
- б- ОЗ
- в- ОС



# Схема с общим истоком

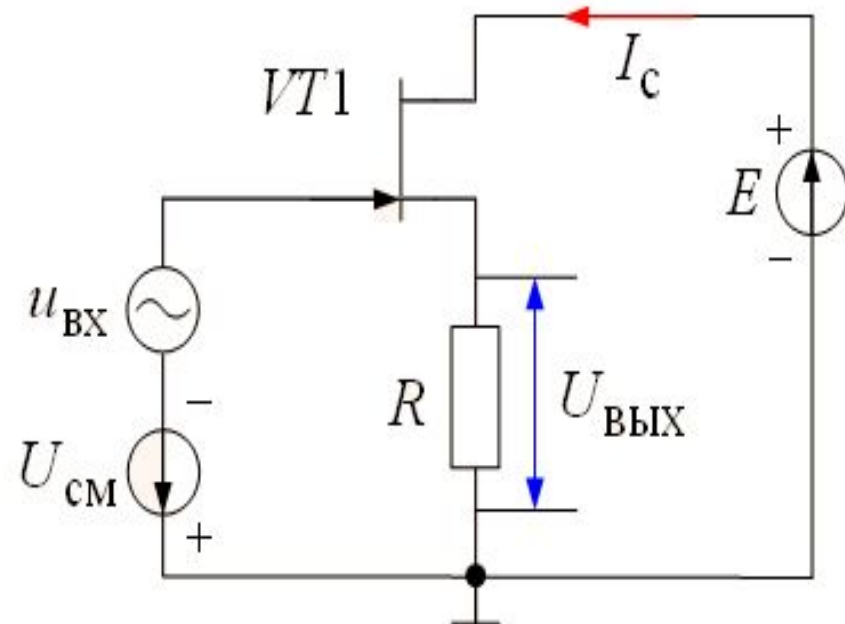
1. Имеет большой коэффициент усиления по току и по напряжению.
2. Изменяет фазу входного сигнала на 180 градусов.
3. Относительно большие входное и выходное сопротивления.





## 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.

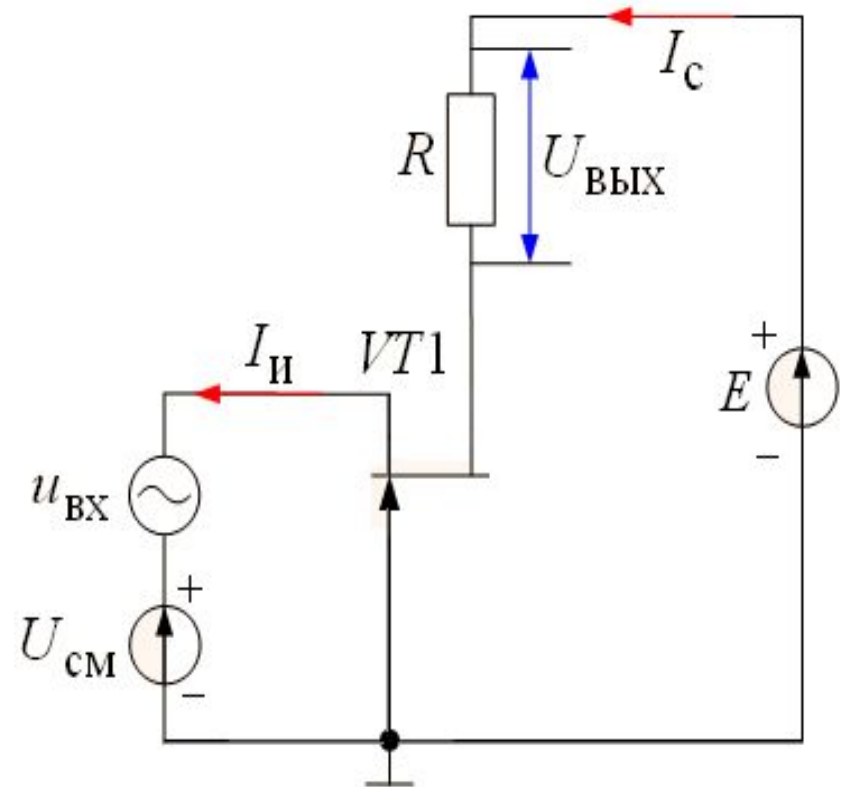




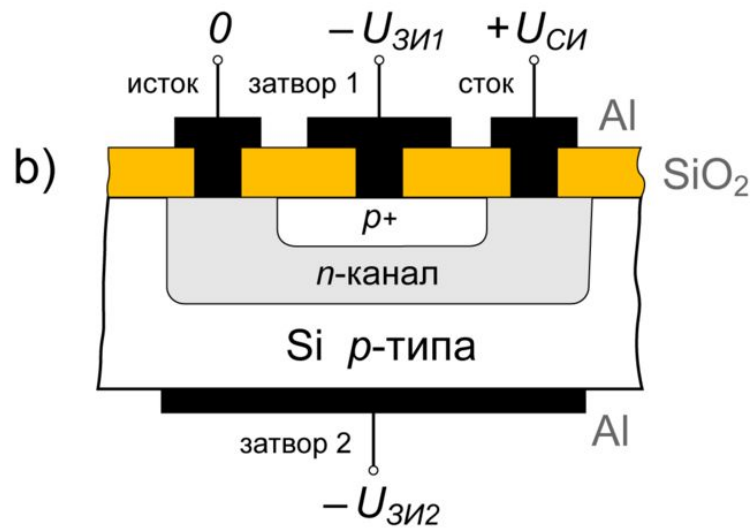
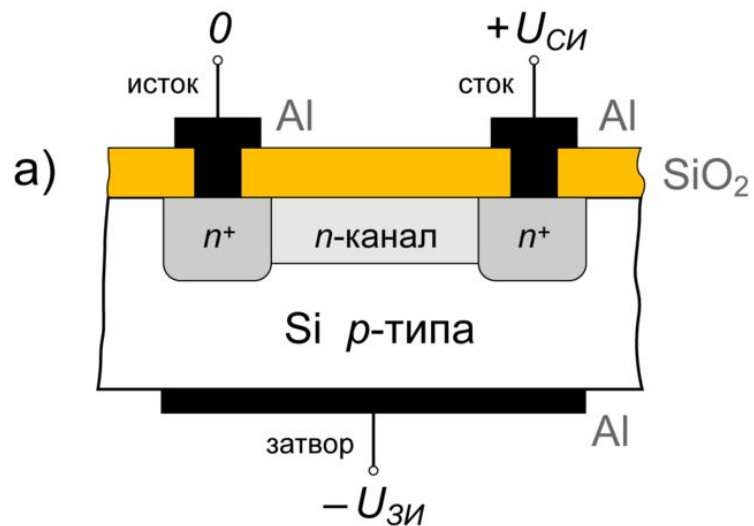
## Схема с общим затвором

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**

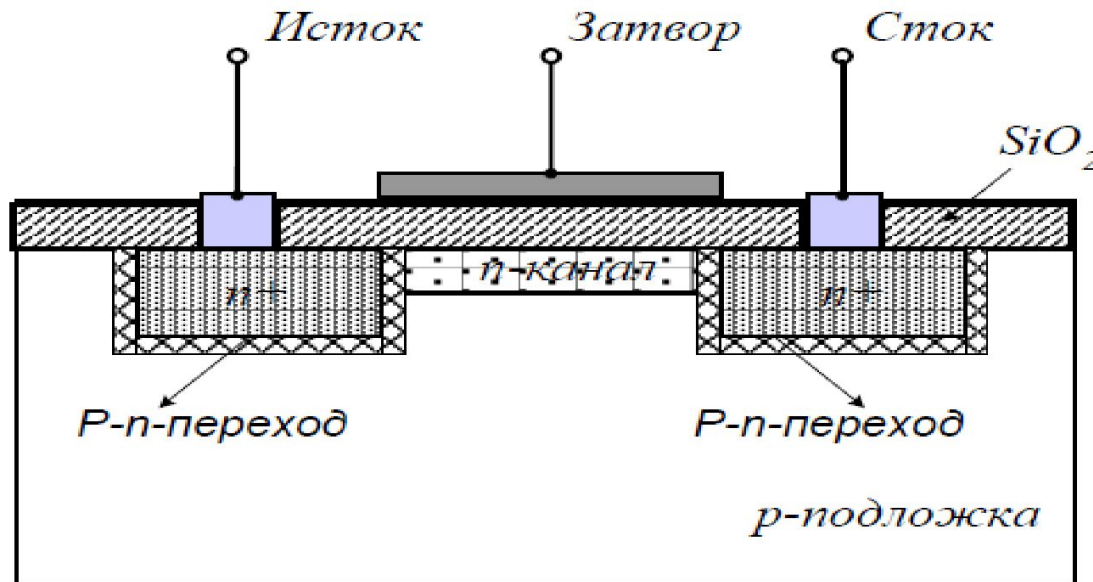


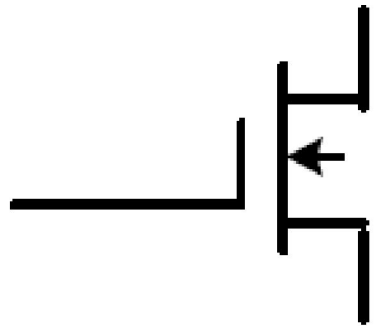
# Устройство полевого транзистора с управляющим р-п-переходом



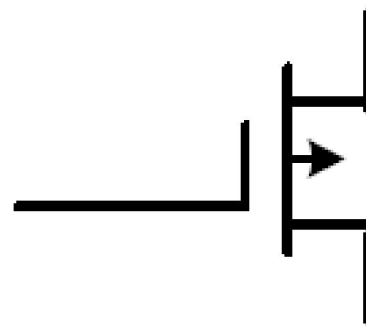
**МОП (МДП) транзистор с изолированным затвором**  
(*metal-oxide-semiconductor field effect transistor, Depletion- MOSFET, D-MOSFET*)

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.

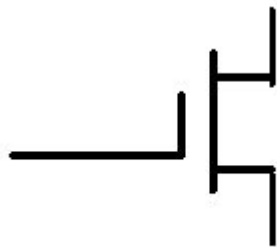




*Встроенный **n**-канал*

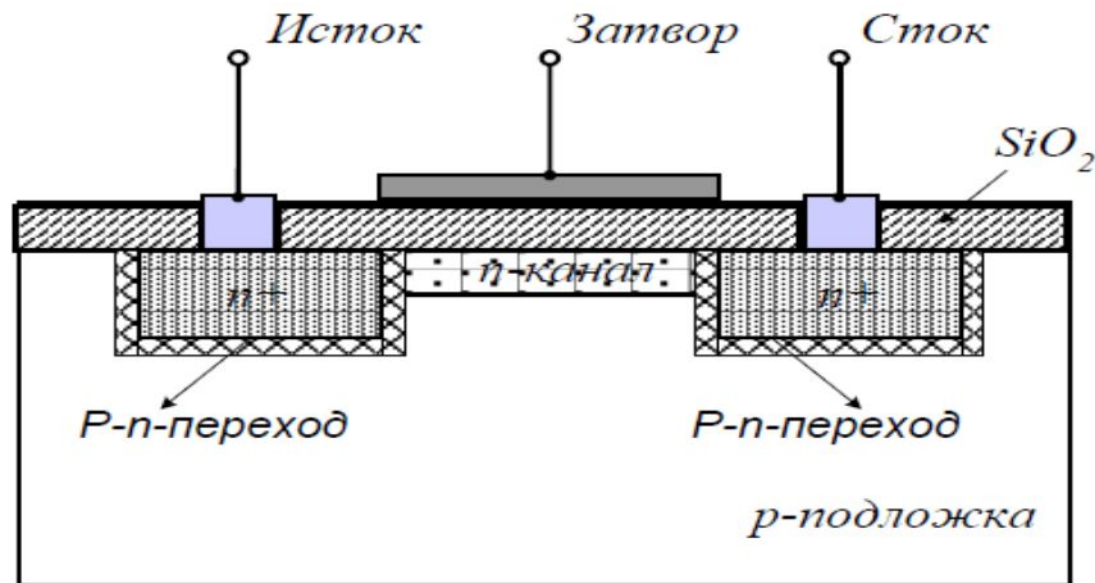


*Встроенный **p**-канал*

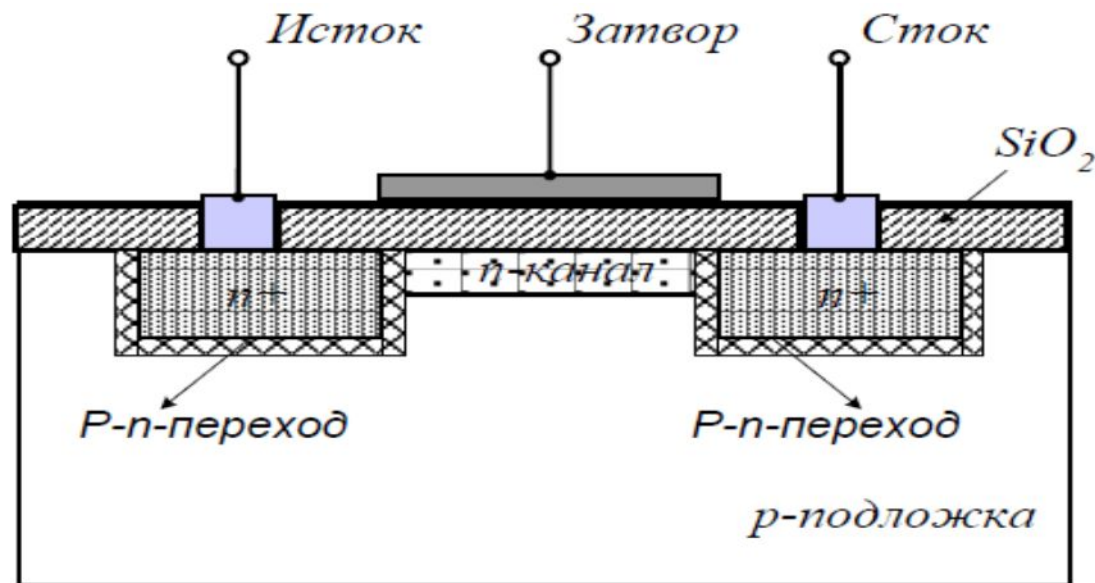


*Если подложка подключена к истоку*

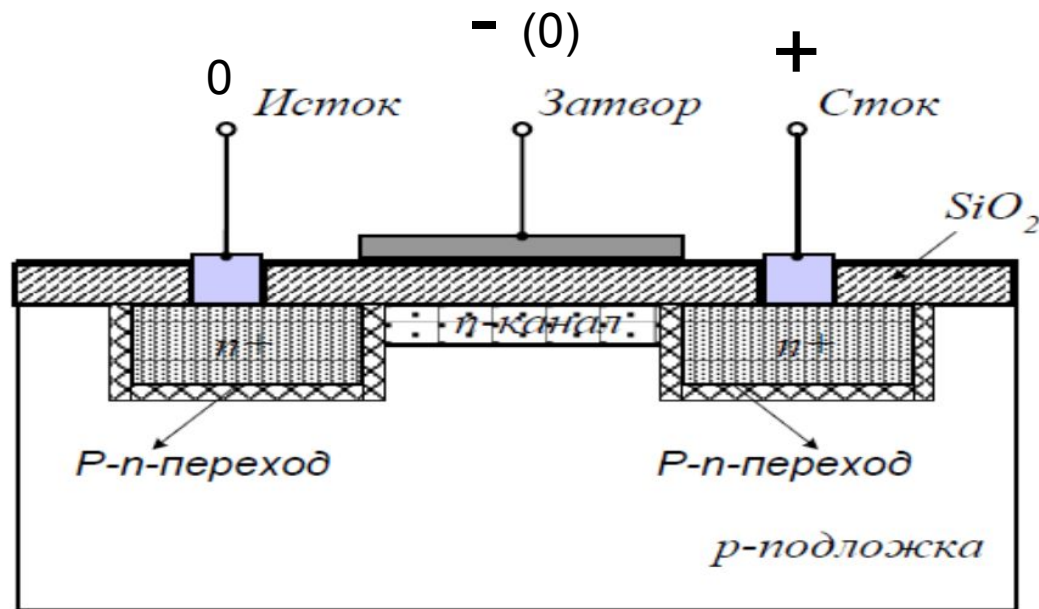
Основанием служит кремниевая пластинка с электропроводностью типа р. В ней созданы две области с электропроводностью  $n^+$  - типа с повышенной проводимостью. Эти области являются истоком и стоком. От них сделаны выводы. Между истоком и стоком имеется тонкий приповерхностный канал с электропроводностью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



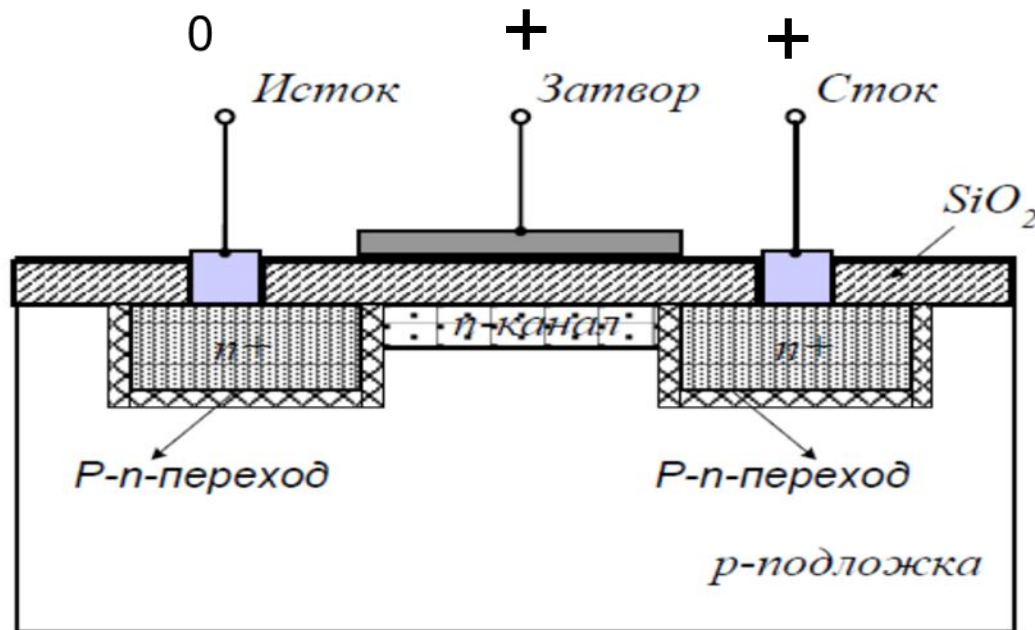
Длина канала от истока до стока обычно единицы микрометров, а его ширина — сотни микрометров и более, в зависимости от рабочего тока транзистора. Толщина диэлектрического слоя диоксида кремния (показан штриховкой) 0,1—0,2 мкм. Сверху диэлектрического слоя расположен затвор в виде тонкой металлической 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.



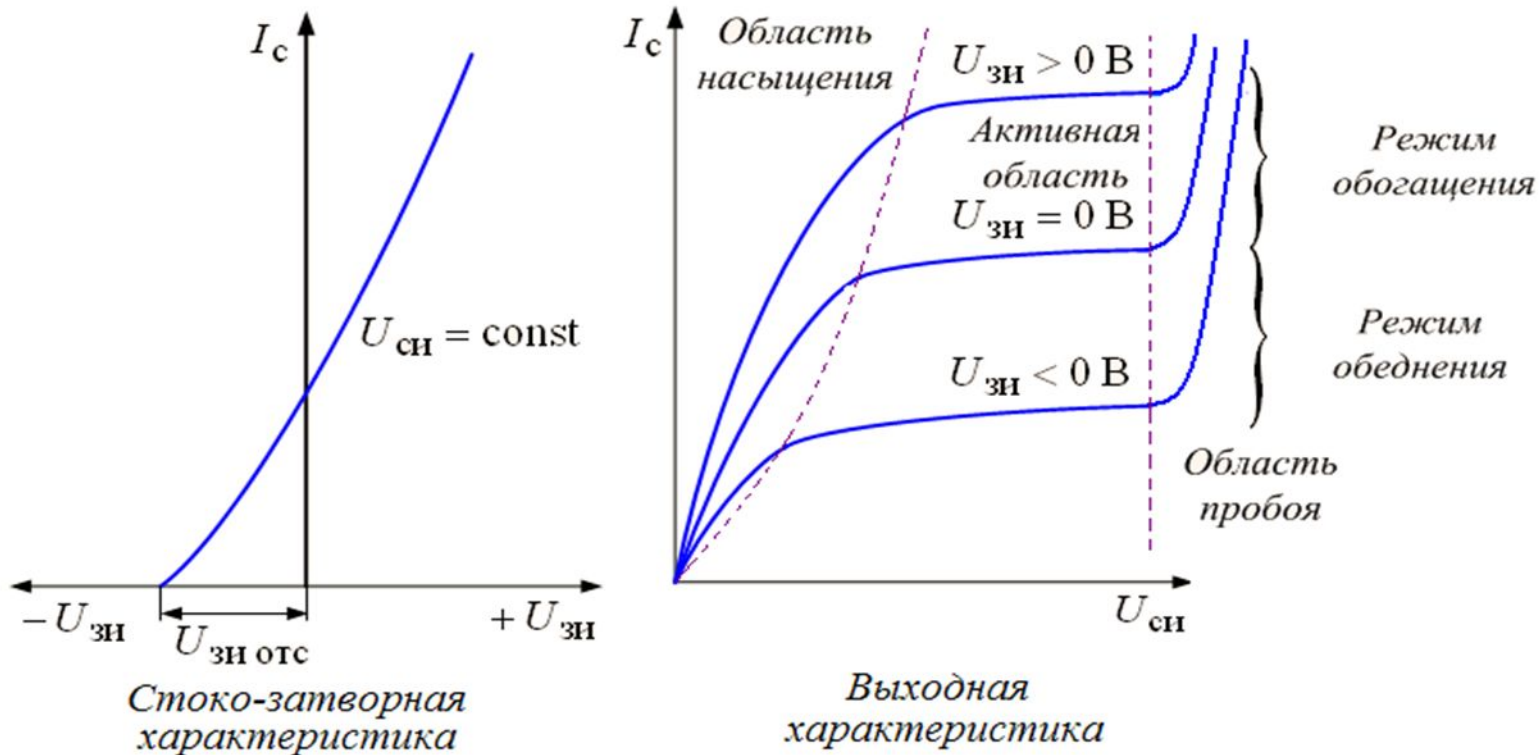
Если при нулевом напряжении затвора приложить между стоком и истоком напряжение, то через канал потечет ток, представляющий собой поток электронов. Через кристалл ток не пойдет, так как один из **p-n**-переходов находится под обратным напряжением. При подаче на затвор напряжения, отрицательного относительно 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.

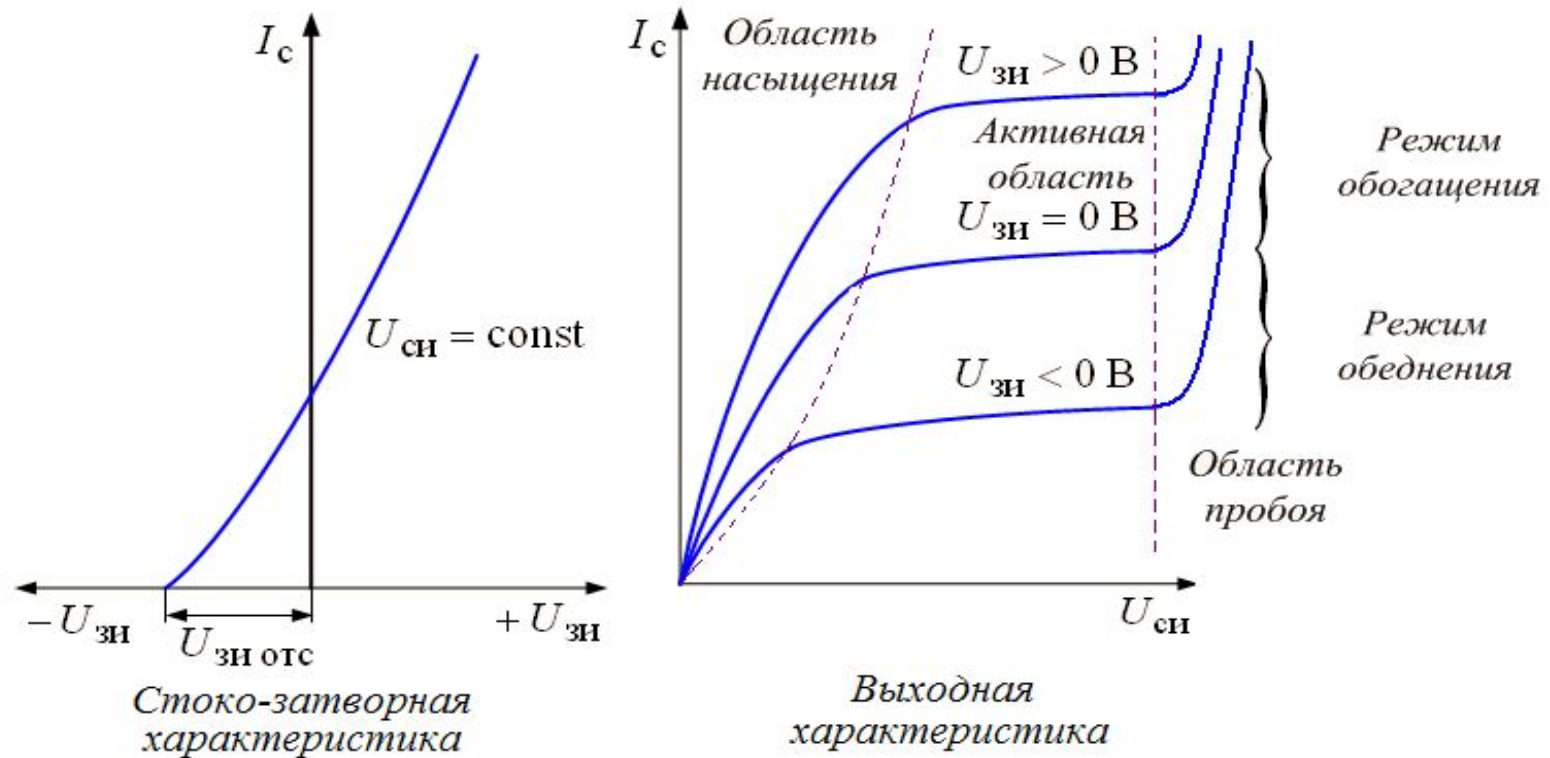






Выходные характеристики МДП-транзистора подобны выходным характеристикам полевого транзистора с управляющим р-п переходом. Это объясняется тем, что при возрастании напряжения  $U_{сн}$  и от нуля сначала действует закон Ома и ток растет приблизительно пропорционально напряжению, а затем, при некотором 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.

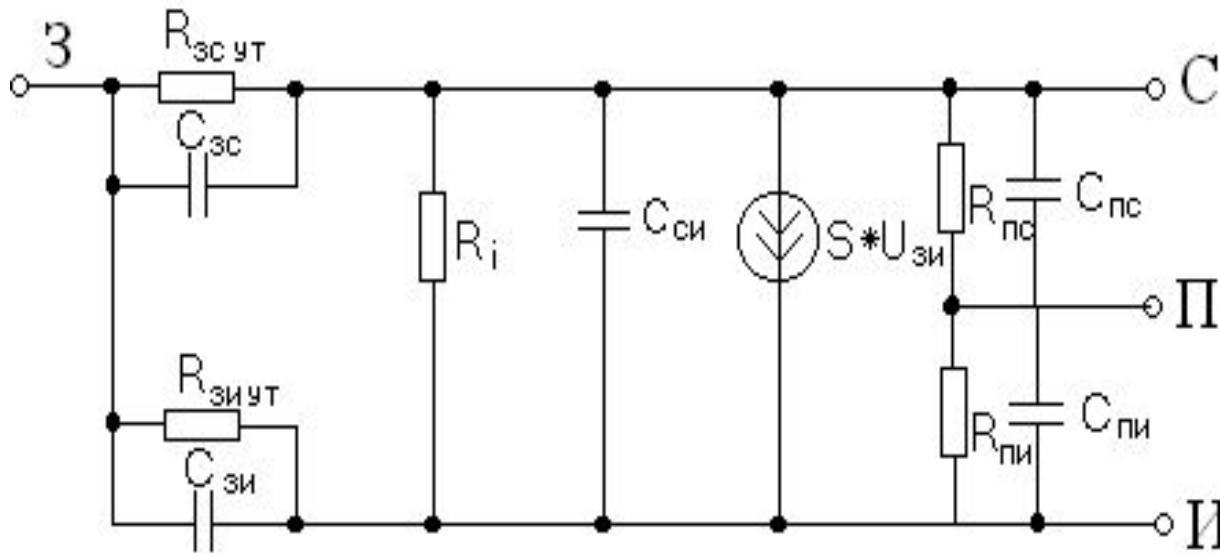
# Характеристики МДП-транзистора с встроенным каналом



$R_i = dU_{си} / dI_c$  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



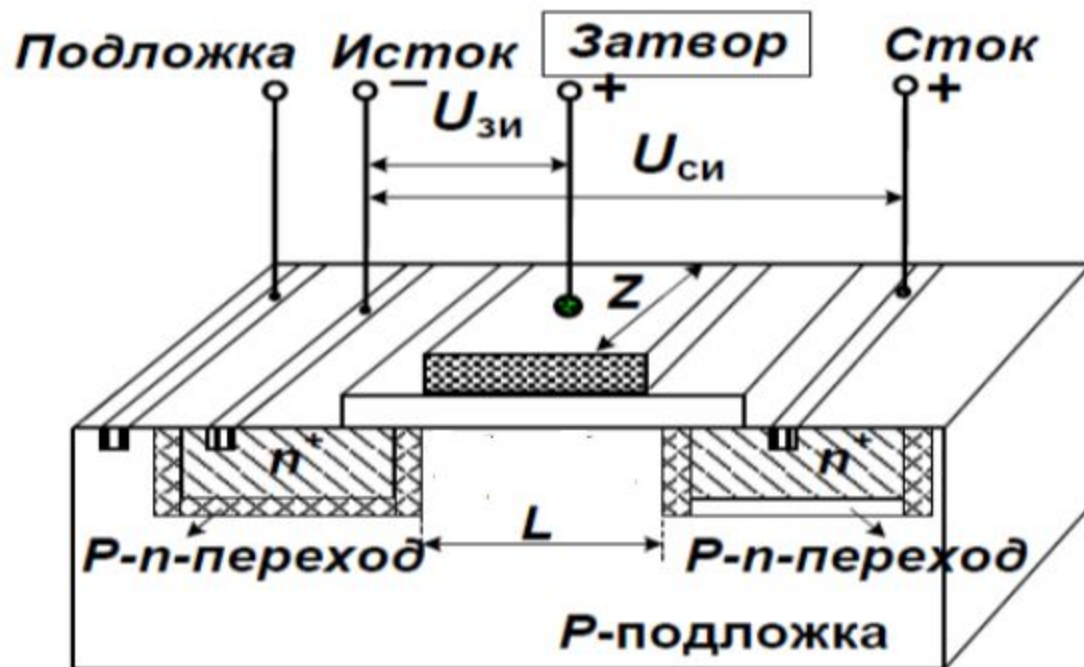
$R_{зс\text{ ут}}$ ,  $R_{зи\text{ ут}}$  и  $C_{зс}$ ,  $C_{зи}$  – сопротивление утечки и емкости между затвором и областями стока и истока соответственно;

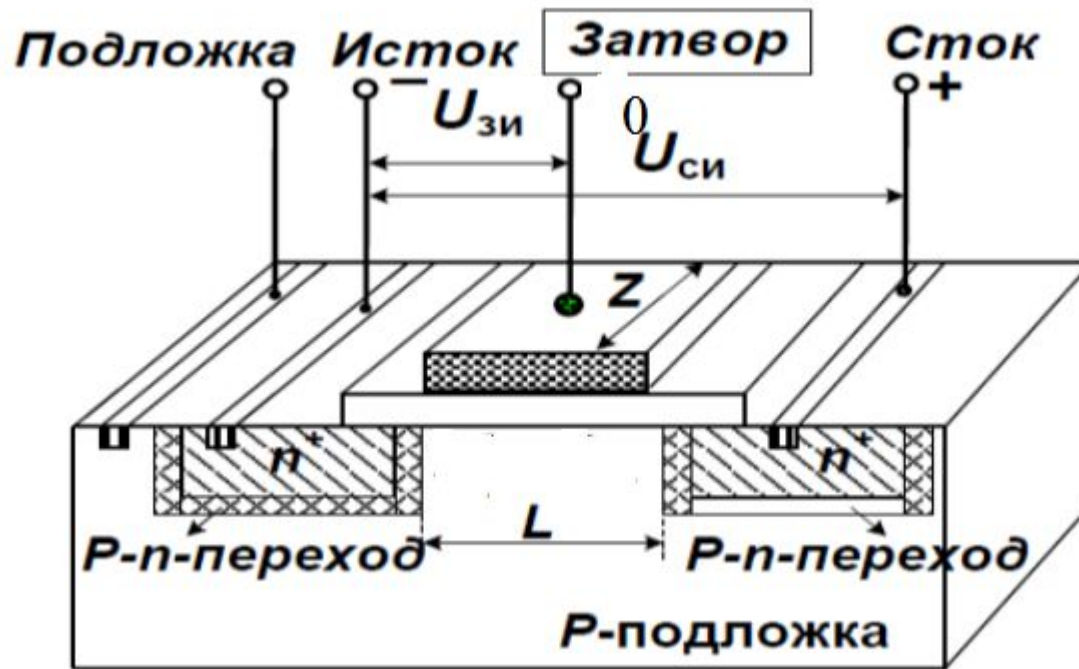
$C_{си}$  – емкость между стоком и истоком транзистора;

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

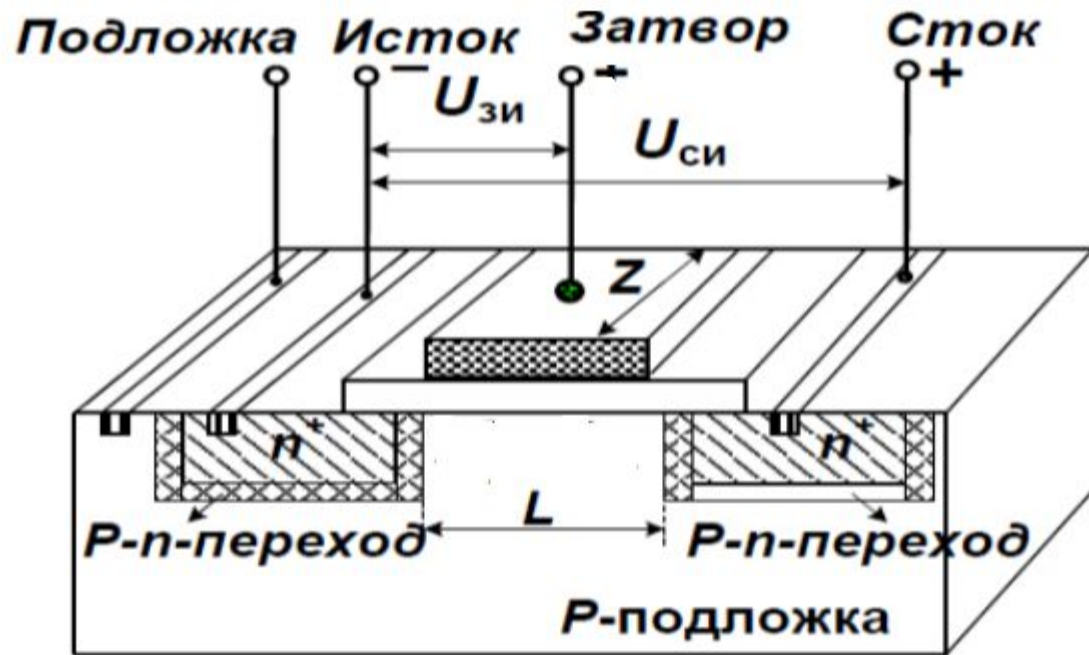
$R_{пс}$ ,  $R_{пи}$  и  $C_{пс}$ ,  $C_{пи}$  – сопротивление и емкости переходов подложка-сток и подложка-исток, включенных в обратном направлении.

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

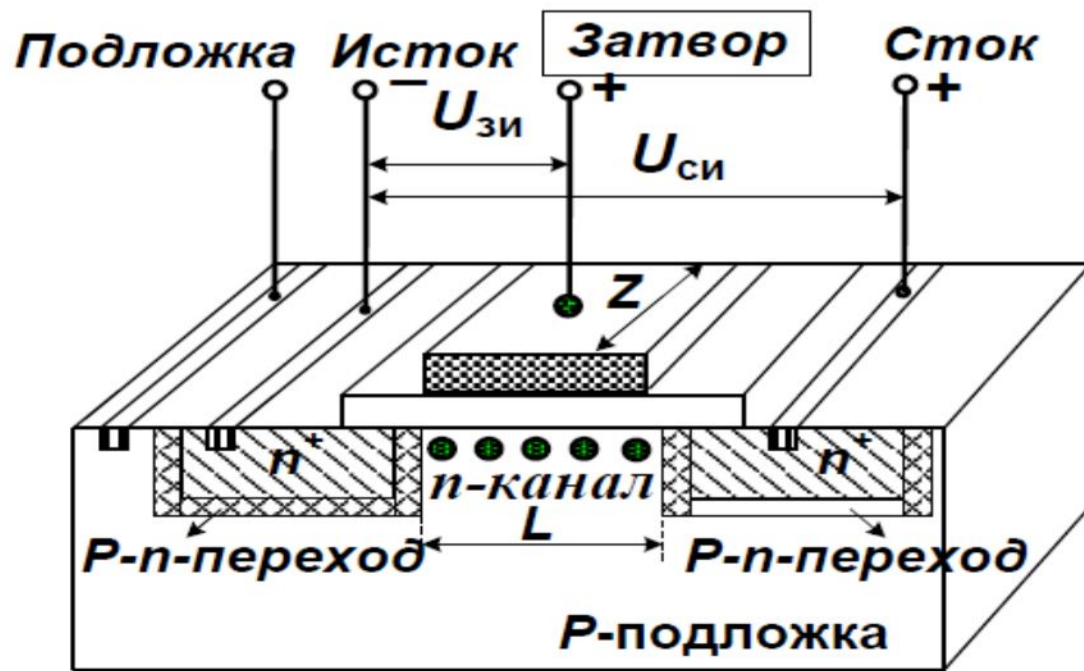




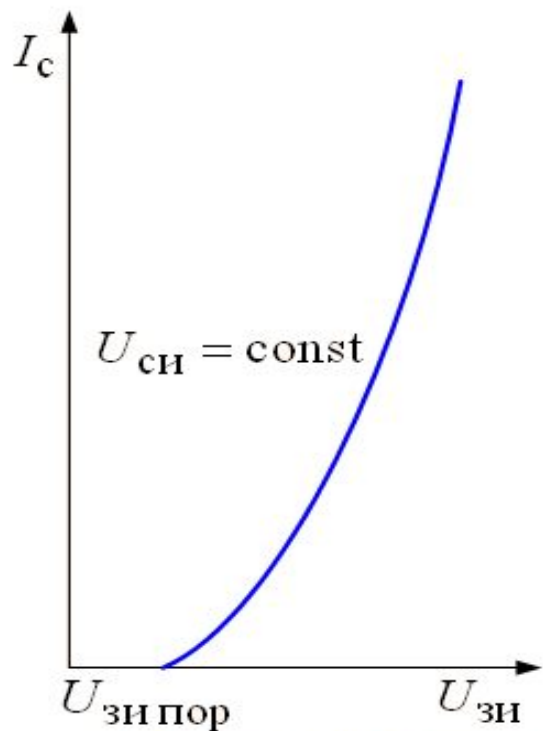
*Если* подать напряжение питания в цепь стока, а на затворе  $U_{зи} = 0$ , то ток в канале будет отсутствовать (за исключением тока неосновных носителей обратносмещённых переходов).



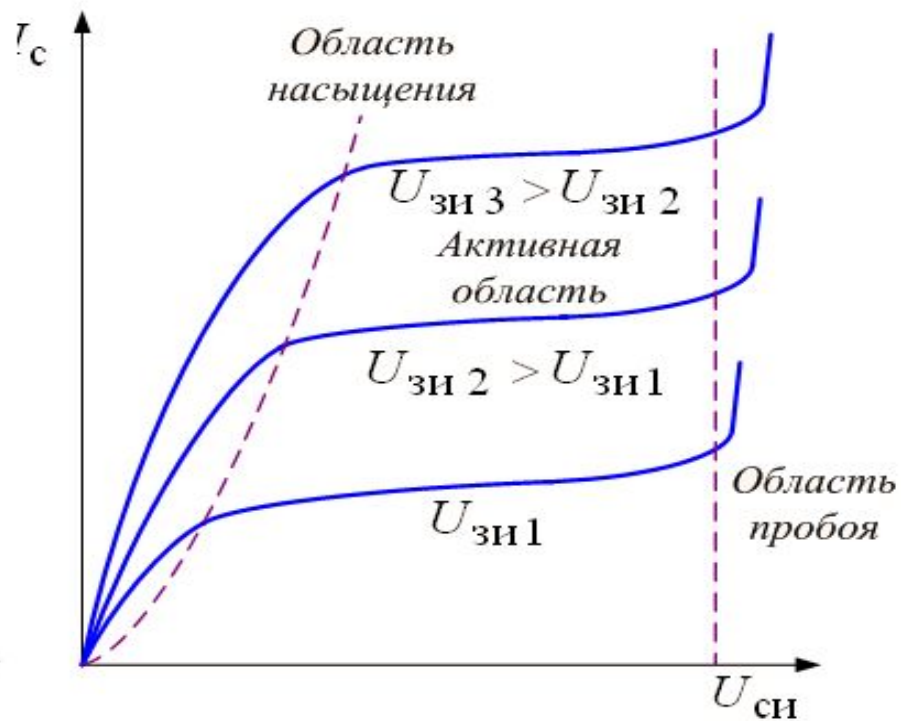
*Если* на затвор подать отрицательное напряжение, а на стоке сохранить положительное, то тока всё равно не будет: канал между стоком и истоком заполнится положительными зарядами, подтянутыми из *p*-подложки электрическим полем затвора.



*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.

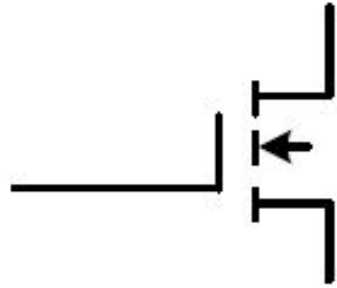


Стоко-затворная характеристика

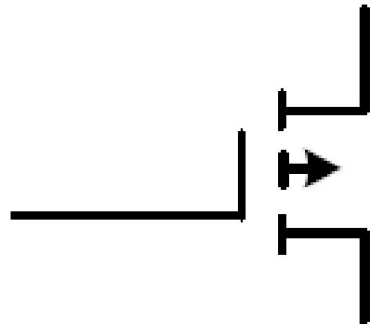


Выходная характеристика





*Индуцированный  
**n**-канал*



*Индуцированный **p**-канал*

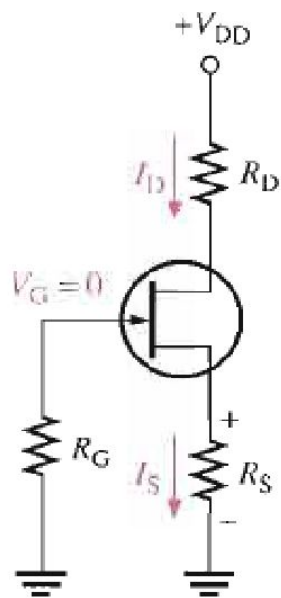
# Преимущества МДП-транзисторов

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

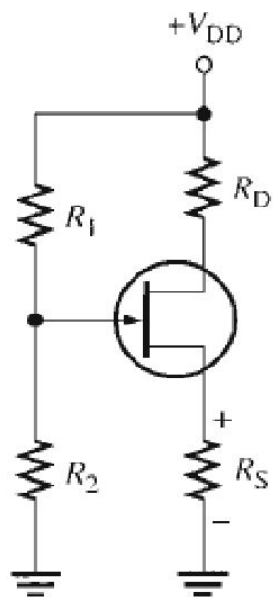
- лучшие температурные характеристики;
- лучшие шумовые характеристики;
- большое входное сопротивление (до  $10^{15}$  Ом) при любой полярности входного напряжения;
- меньшее значение входной емкости, следовательно, предельная частота может достигать сотен МГц;
- простота конструктивной реализации,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

# Включение ПТ в схемах

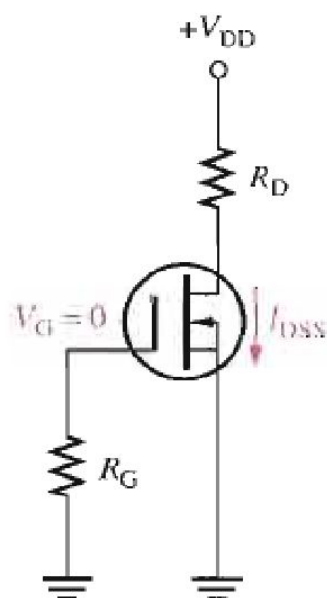
JFET



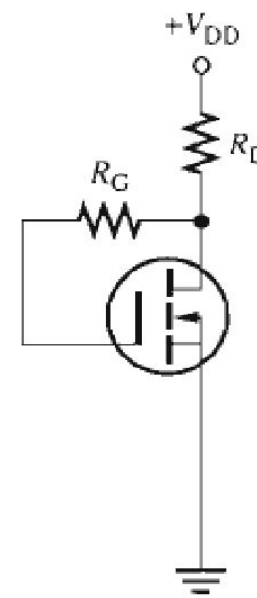
JFET



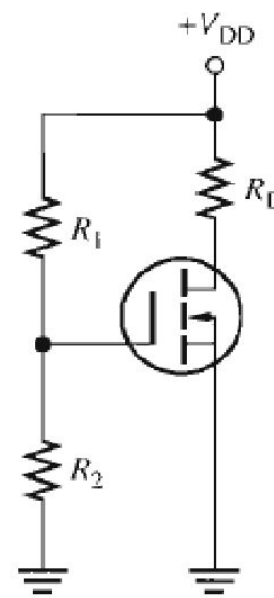
D-MOSFET



E-MOSFET



E-MOSFET



# Полевые транзисторы

с управляющим р-п переходом

канал п-типа



канал р-типа



с изолированным затвором

встроенный канал (обеднённые)

канал п-типа



канал п-типа  
2-х затворные



индуцированный канал (обогащённые)

канал п-типа

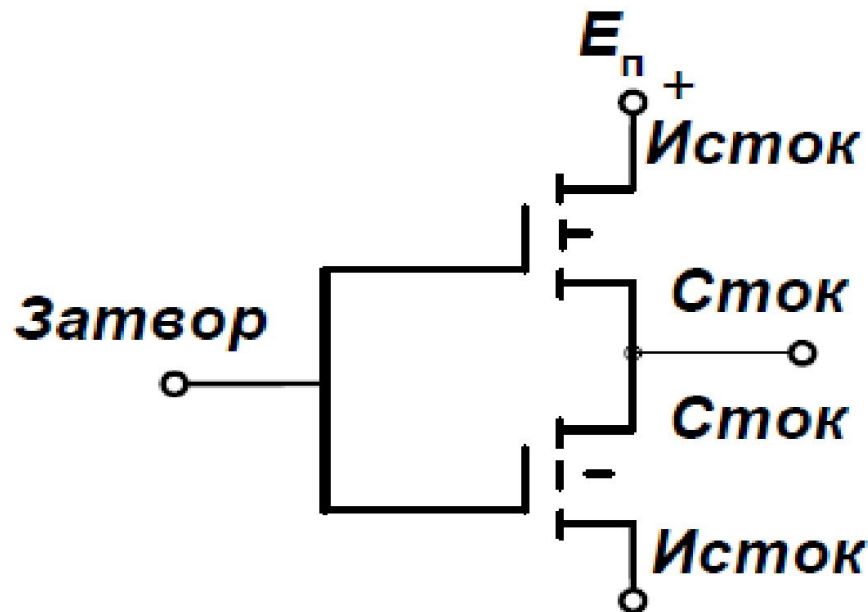


канал р-типа



# КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник; *CMOS, complementary metal-oxide-semiconductor*)

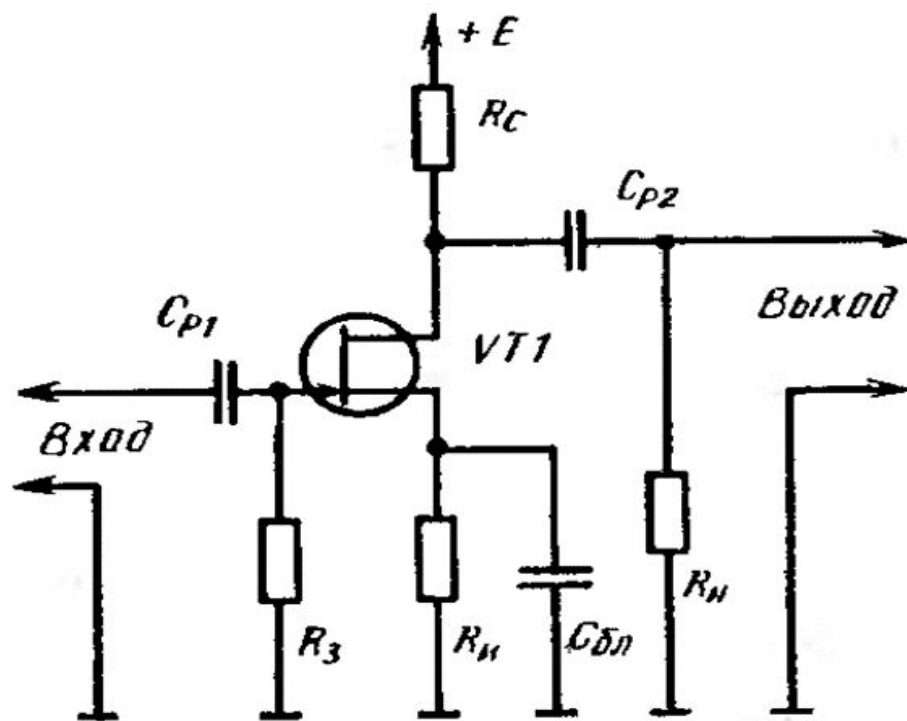
В более общем случае — КМДП (со структурой металл-диэлектрик-полупроводник). В технологии КМОП используются полевые транзисторы с изолированным затвором с каналами разной проводимости.

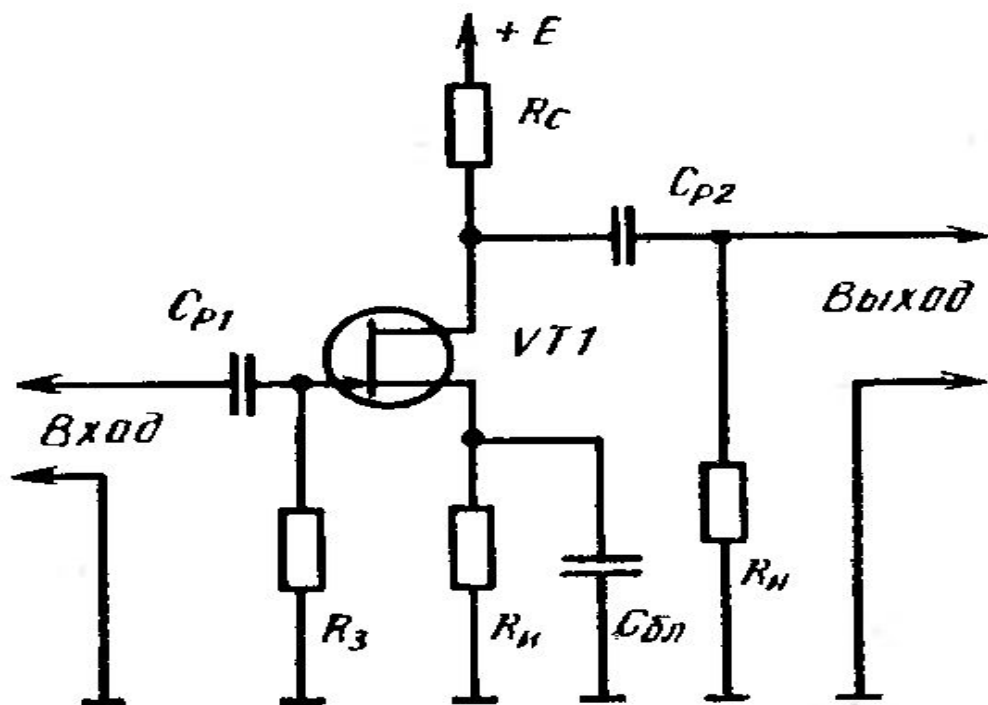


- Отличительной особенностью схем КМОП по сравнению с биполярными технологиями является очень малое энергопотребление в статическом режиме.
- Отличительной особенностью структуры КМОП по сравнению с другими МОП-структурами (N-МОП) отличительной особенностью структуры КМОП по сравнению с другими МОП-структурами (N-МОП, P-МОП) является наличие как n-, так и p-канальных полевых транзисторов;
- Как следствие, КМОП-схемы обладают более высокой скоростью действия и меньшим энергопотреблением, однако при этом характеризуются более сложным технологическим процессом изготовления и меньшей плотностью упаковки.
- Подавляющее большинство современных логических микросхем Подавляющее большинство современных логических микросхем, в том числе, процессоров, используют схемотехнику КМОП.

Схема усилителя на полевом транзисторе с общим истоком показана на рис. 4. Она характеризуется следующими параметрами:

1) коэффициентом усиления по напряжению  $K = SR_{\Sigma KB}$ , причем  $R_{\Sigma KB} = R_i \parallel R_C \parallel R_H$ , где  $R_i$  — внутреннее сопротивление полевого транзистора ( $R_i > 50$  кОм);  $R_C$  — сопротивление в цепи стока;  $R_H$  — сопротивление нагрузки. При  $R_i \gg R_C$  и  $R_H \gg R_C$   $K \approx SR_C$ ;

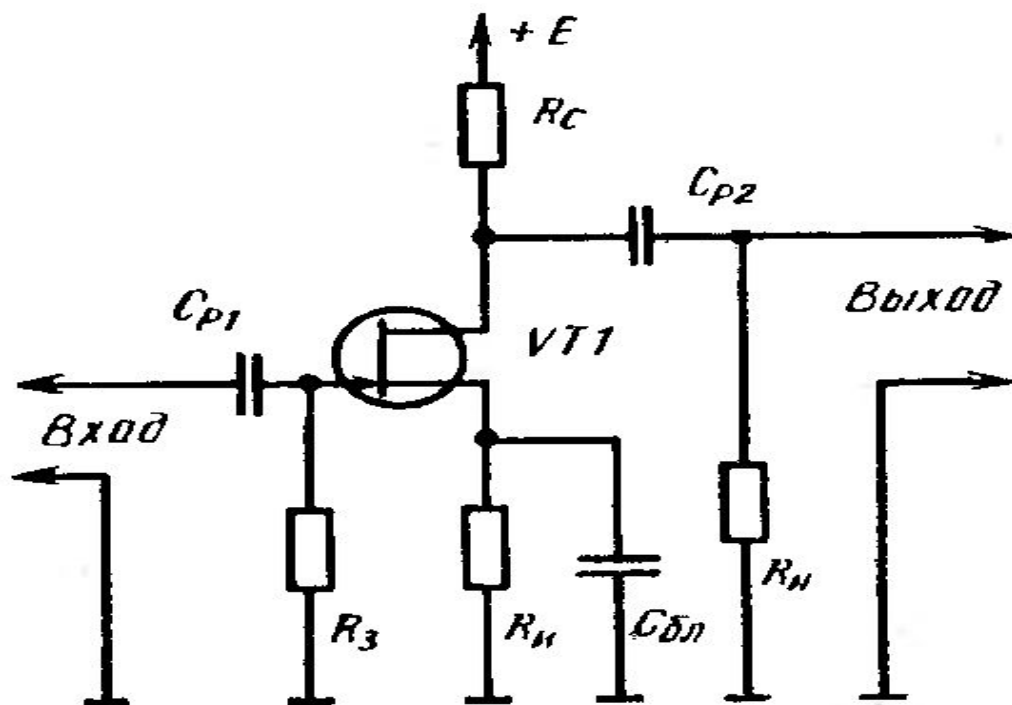




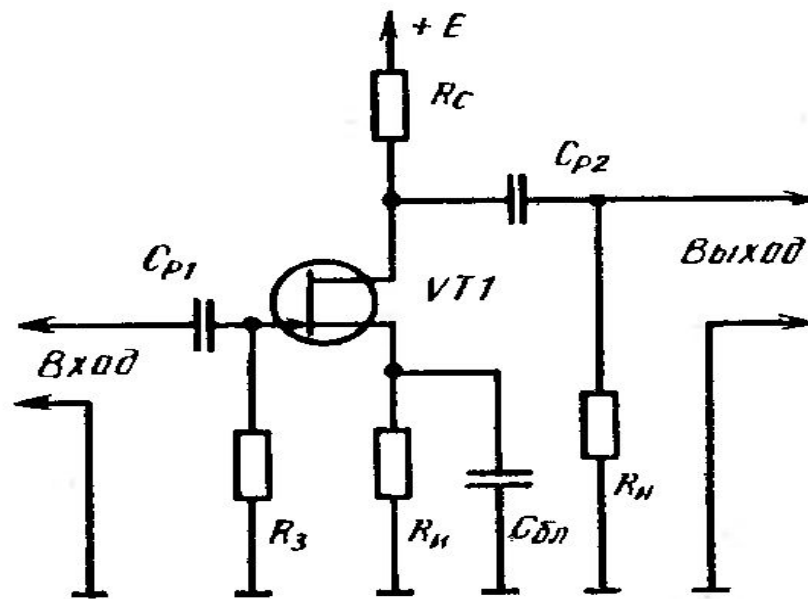
2) входным сопротивлением  $R_{вх} = R_3$ , где  $R_3$  — сопротивление в цепи затвора;

3) выходным сопротивлением  $R_{вых} = R_1 \parallel R_c$ , при  $R_1 \gg R_c$   $R_{вых} \approx R_c$ .





В качестве примера приведем расчет усилителя по схеме с общим истоком (см. рис. 4), который должен обеспечить коэффициент усиления  $K \geq 10$  в диапазоне частот 20 Гц... 20 кГц, входное сопротивление  $R_{вх} = 470$  кОм, действующее значение переменного напряжения  $U_{действ} = 6$  В на нагрузке 47 кОм. Считаем, что внутреннее сопротивление источника сигнала меньше 5 кОм. Порядок расчета усилителя по схеме с общим истоком:

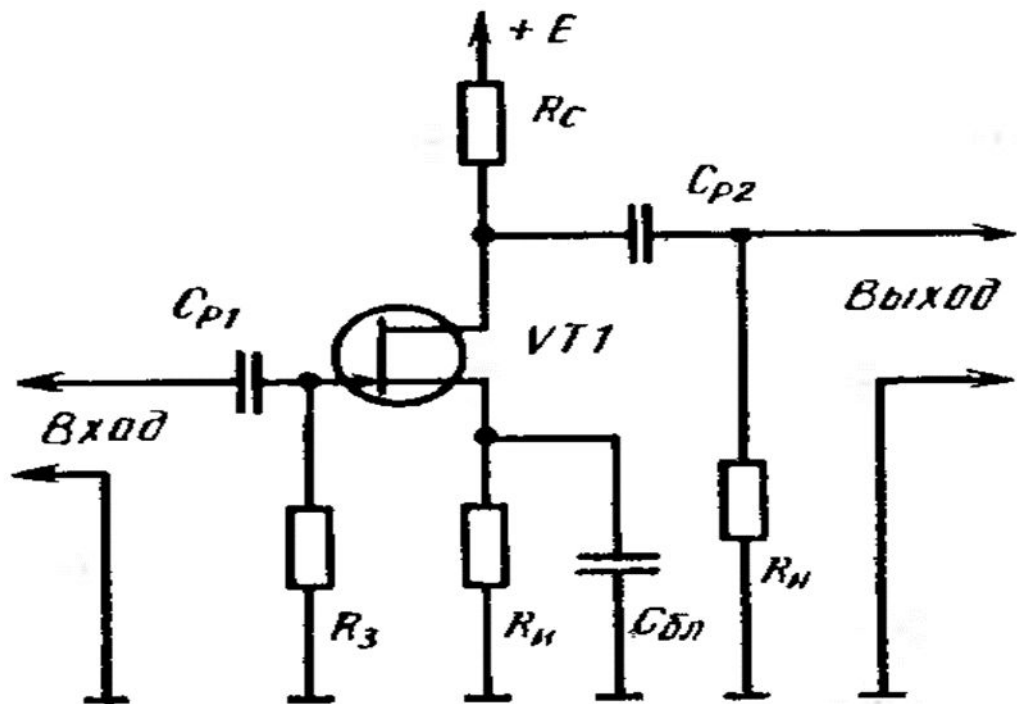


1. Выбираем транзистор типа КП303Д, имеющий  $S = 3 \text{ мА/В}$ .
2. Выбираем напряжение источника питания  $E = 3,5 U_{\text{действ}} = 3,5 \cdot 6 \text{ В} = 21 \text{ В}$ .
3. Задаем напряжение на стоке  $U_C = E/2 = 21 \text{ В}/2 = 10,5 \text{ В}$ .
4. Задаем ток покоя  $I_C = 3 \text{ мА}$ .

5. Определяем значение сопротивления  $R_C = \frac{E - U_C}{I_C} =$

$$= \frac{21 - 10,5}{3 \text{ мА}} = 3,5 \text{ кОм.}$$

Выбираем резистор из стандартного ряда

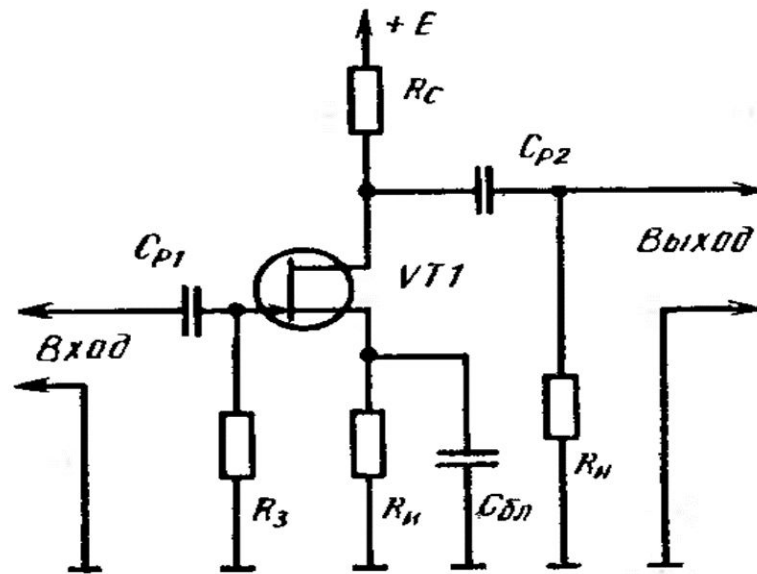


6. Сопротивление  $R_{и} = U_{зи} / I_c$

По выходной характеристике при  $I_c = 3 \text{ мА}$ ,  $U_{зи} = 0,8 \text{ В}$

$$R_{и} = 0,8 \text{ В} / 3 \text{ мА} = 266 \text{ Ом.}$$

Выбираем резистор 270 Ом.



7. Коэффициент усиления  $K \approx SR_C$ , при  $S = 3 \text{ мА/В}$   $K = (3 \text{ мА/В}) 3,6 \text{ кОм} = 10,8$ .

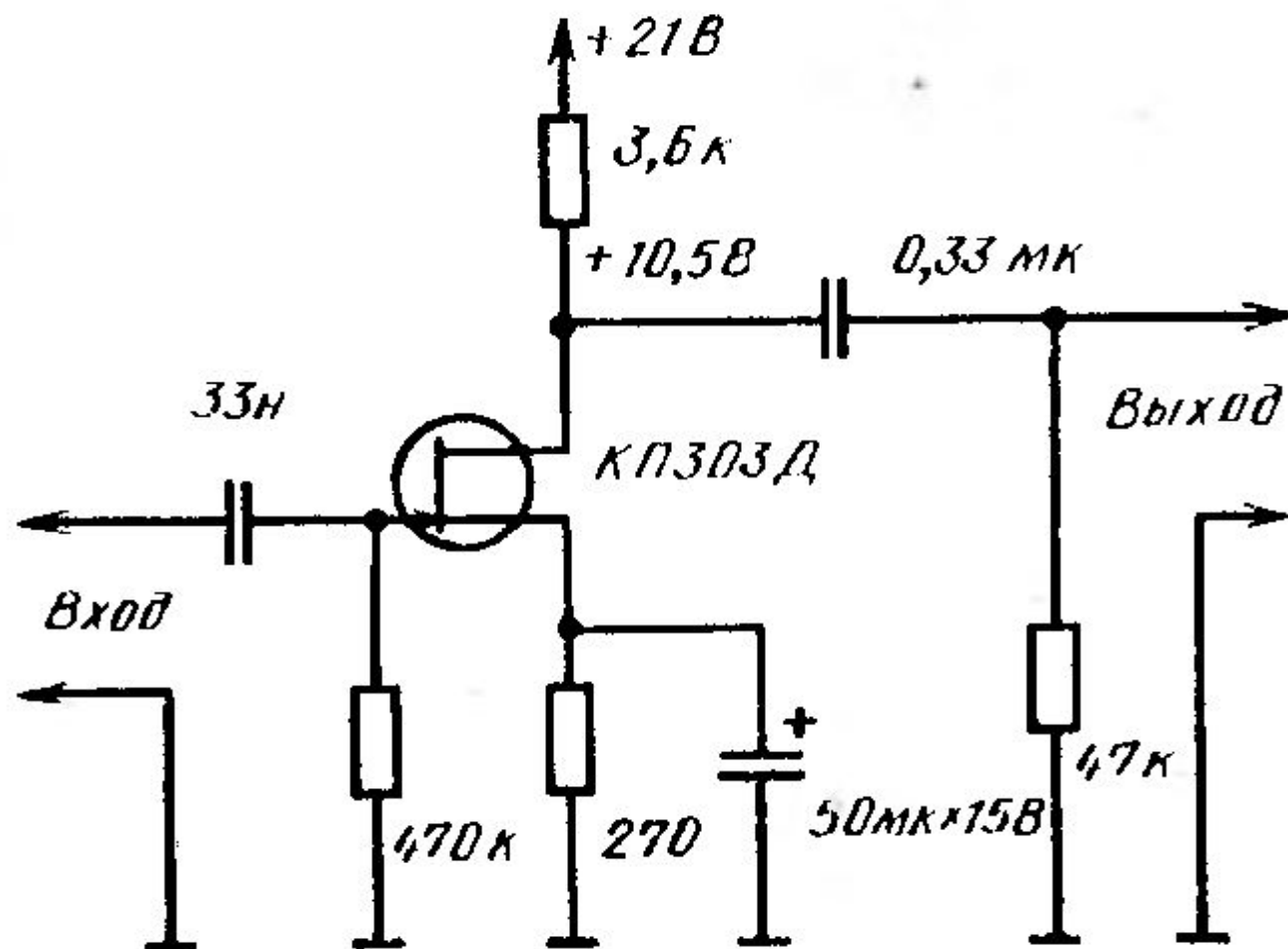
8. Выбираем  $R_3 = R_{вх} = 470 \text{ кОм}$ .

9. Так как схема содержит три фильтра верхних частот ( $C_{p1}R_3$ ,  $C_{бл}R_{н}$ ,  $C_{p2}R_{н}$ ), то целесообразно выбрать частоты среза  $F_{ср}$  этих фильтров равными. Тогда  $F_{ср} = 20 \text{ Гц}/\sqrt{3} = 11,5 \text{ Гц}$  [1], а номинальные значения конденсаторов:

$$C_{p1} = \frac{1}{2\pi F_{ср} R_3} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 11,5 \cdot 470 \cdot 10^3} \approx 0,033 \text{ мкФ};$$

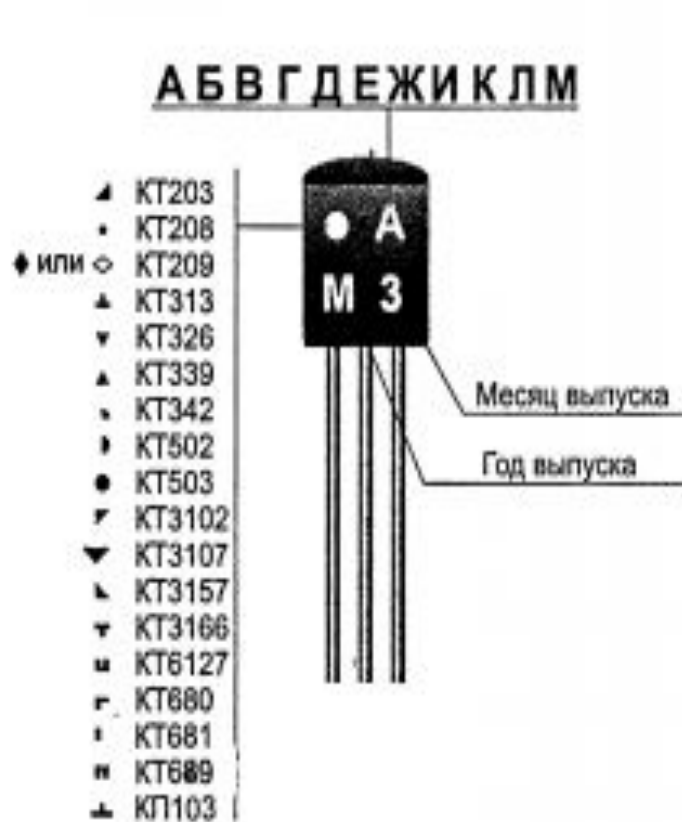
$$C_{бл} = \frac{S}{2\pi F_{ср}} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14 \cdot 11,5} \approx 50 \text{ мкФ};$$

$$C_{p2} = \frac{1}{2\pi F_{ср} R_{н}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 11,5 \cdot 47 \cdot 10^3} \approx 0,33 \text{ мкФ}.$$



# Конструкции транзисторов





Год выпуска

1986 — U  
 1987 — M  
 1988 — W  
 1989 — X  
 1990 — A  
 1991 — D  
 1992 — C  
 1993 — D  
 1994 — E  
 1995 — F  
 1996 — H  
 1997 — I  
 1998 — K  
 1999 — L  
 2000 — M

Месяц выпуска

Январь — 1  
 Февраль — 2  
 Март — 3  
 Апрель — 4  
 Май — 5  
 Июнь — 6  
 Июль — 7  
 Август — 8  
 Сентябрь — 9  
 Октябрь — O  
 Ноябрь — N  
 Декабрь — D

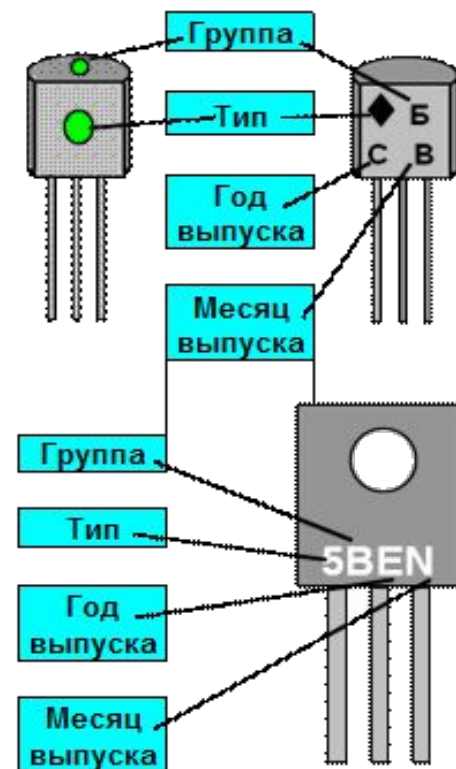
**Рис. 5.11.** Кодовая маркировка отечественных транзисторов в корпусе КТ-26 (1-й вариант)

Тип	Код	Цв. Точка сбоку
Для корпуса типа КТ-26		
КТ203		Темно-красная
КТ208		-
КТ209	или	Серая
КТ313		Оранжевая
КТ326		Коричневая
КТ339		Голубая
КТ342		Синяя
КТ3686м		Одна бел. или крас. две бел. или крас. точки сверху
КТ368ам		
КТ399		Две бел. Полоски
КТ502		Желтая
КТ503		Белая
КТ3102		Тёмно-зелёная
КТ3107		-
КТ3117		Белая полоса
КТ3157		-
КТ3166	Т	-
КТ3126	или	Зелёная
КТ3127		-
КТ632		Серебристая
КТ638		Оранжевая
КТ645	или	Белый
КТ680		-
КТ681		-
КТ698		-
КП103		-
КП364	А	Табачная
КП501		
Кр1157ен5	А5	
Кр1168ен15	Б15	
Кр1170ен6	Г6	
Кр1171ен3	В3	

Тип	Код	Цв. С торца
Для корпуса типа КТ-27		
КТ814	4	Серо-бежевый
КТ815	5	Серенево-фиолетовый
КТ816	6	Розово-красный
КТ817	7	Серо-зелёный
КТ683	8	Фиолетовый
КТ9115	9	Голубой
КУ112	12	-
КТ940	40	-
КТ972а		-
КТ972б		-
КТ973а		-
КТ973б		-
КТ646а		-
КТ646б		-

Год выпуска	Код	Месяц выпуска	Код
1986	U	Январь	1
1987	V	Февраль	2
1988	W	Март	3
1989	X	Апрель	4
1990	A	Май	5
1991	B	Июнь	6
1992	C	Июль	7
1993	D	Август	8
1994	E	Сентябрь	9
1995	F	Октябрь	O
1996	H	Ноябрь	N
1997	I	Декабрь	D
1998	K		
1999	L		
2000	M		

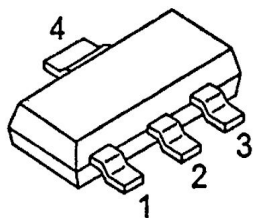
Группа	Цв. Точка сбоку
Для корпуса типа КТ-26	
А	Темно-красная
Б	Жёлтая
В	Темно-зелёная
Г	Голубая
Д	Синяя
Е	Белая
Ж	Тёмно-коричневая
И (-*)	Серебристая
К (-*)	Оранжевая
Л (И*)	Светло-табачная
М (К*)	Серая



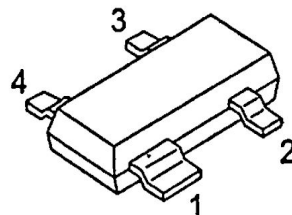


# Типы корпусов SMD - транзисторов

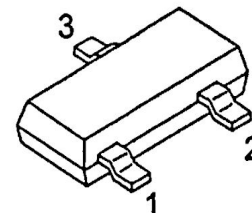
SOT223



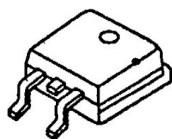
SOT143



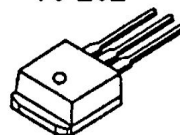
SOT23



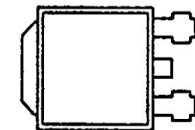
TO-263



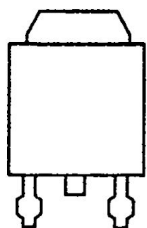
TO-262



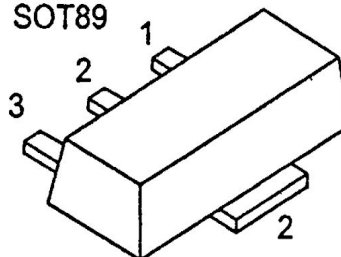
TO-252



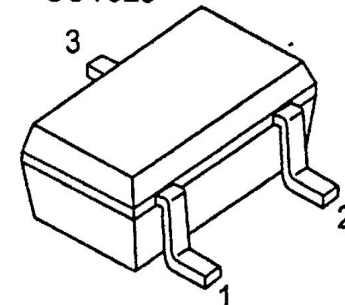
SC.63



SOT89



SOT323



# Кодировка SMD - транзисторов

Таблица 6.1. Варианты маркировки одинаковым кодом

Код	Наименование	Фирма	Корпус	Цоколевка	Эквивалент/ краткое описание
1A	BC846A	Philips, ИТТ, Motorola	SOT23	T1a	SI-N BC546A
1A	BC846AW	Motorola	SOT323	T1a	SI-N BC546A
1A	FMMT3904	Zetex	SOT23	T1a	SI-N 2N3904
1A	SXT3904	Infineon	SOT89	T3a	SI-N 2N3904 40В 200 мА
1A	MMBT3904	Motorola	SOT23	T1a	SI-N 2N3904
1A	IRLML2402	IR	SOT23	T1c	N-кан. полевой 20 В; 0,9 А

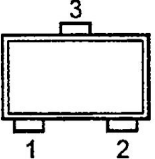
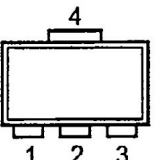
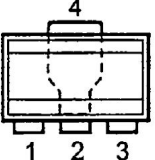
Чтобы идентифицировать тип SMD компонента, сначала определяют код, нанесенный на прибор. Затем находят первый символ кода в алфавитно-цифровом списке в левой части таблицы.

Даже один производитель может использовать один и тот же код для маркировки различных приборов. В этом случае следует использовать дополнительную информацию для его правильной идентификации. Так, некоторые производители используют дополнительные буквы, указывающие на собственный код идентификации. Так, фирма PHILIPS обычно добавляет к коду строчную букву р, а фирма SIEMENS — строчную букву s.

Например, если код прибора в корпусе SOT23 — 1Ar, то необходимо искать код 1A. Согласно табл. 6.1 имеется шесть вариантов с таким кодом.

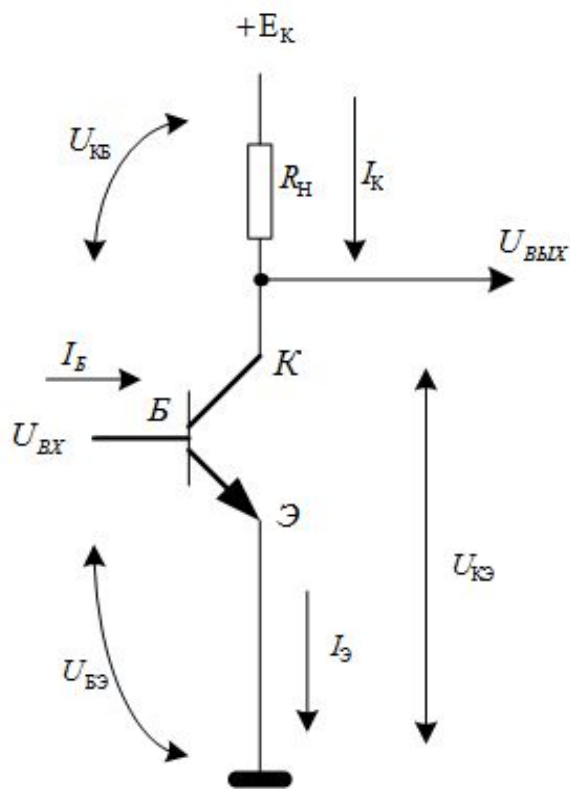
<b>GE</b>	— германий;
<b>SI</b>	— кремний;
<b>P</b>	— P-N-P
<b>N</b>	— N-P-N;
<b>DARL</b>	— составной транзистор (схема Дарлингтона);
<b>D</b>	— цифровой;
<b>FET</b>	— полевой;
<b>IGBT</b>	— биполярный с изолированным затвором;
<b>R</b>	— номинал встроенного сопротивления цифрового транзистора: одно значение — сопротивление резистора, включенного в цепь базы; два значения через дробь: первое — включенное в цепь базы, второе — включенное в цепь база-эмиттер.

Например, устройство, указанное как N-P-N 20В 0,1А 1Вт — это NPN транзистор с максимальным  $U_{кэ}=20$  В, максимальным током коллектора 100 мА и максимальной мощностью 1 Вт.

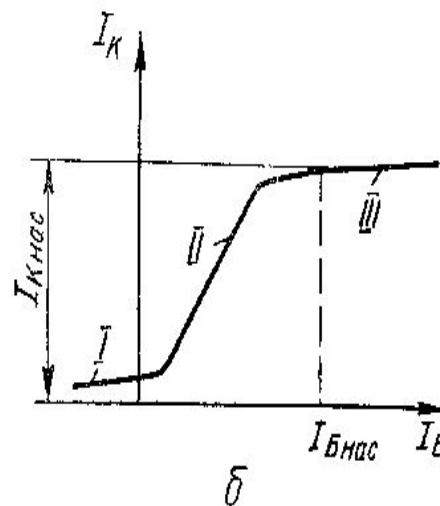
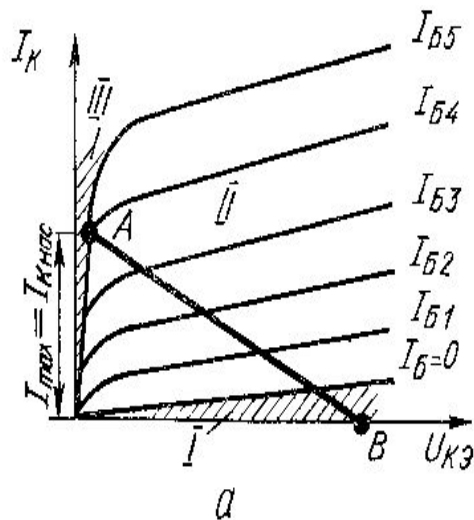
Тип корпуса	Код цоколевки	Номер вывода					
		1	2	3	4	5	6
SOT23 SOT323/SC70/UMT3 SC59, SC90 	T1a	B	E	C	нет	нет	нет
	T1b	E	B	C	нет	нет	нет
	T1c	D	S	G	нет	нет	нет
	T1d	G	S	D	нет	нет	нет
	T1e	G	D	S	нет	нет	нет
	T1f	S	D	G	нет	нет	нет
SOT223 	T2a	B	C	E	C	нет	нет
	T2b	G	D	S	D	нет	нет
	T2c	S	D	G	D	нет	нет
	T2d	D	G	S	G	нет	нет
SOT89/SC62/MPT3 	T3a	B	C	E	C	нет	нет
	T3b	E	C	B	C	нет	нет
	T3c	D	G	S	G	нет	нет
	T3d	S	D	G	D	нет	нет
	T3e	G	D	S	D	нет	нет
	T3f	G	S	D	S	нет	нет
	T3g	D	S	G	S	нет	нет

Код	Наименование	Фирма	Корпус	Цоколевка	Эквивалент/краткое описание
005	SSTPAD5	Siliconix	SOT23	D1f	PAD-5 5пА – ток утечки диода
010	SSTPAD10	Siliconix	SOT23	D1f	PAD-10 10пА – ток утечки диода
02	BST82	Philips	SOT23	T1d	N-кан. полевой МОП 80 В 175 мА
02	MRF5711L	Motorola	SOT143	T4a	Si NPN ВЧ MRF 571
02	DTCC114T	Rohm	SOT23	T1a	Si NPN 50В 100мА ключевой (резистор в цепи базы 10кОм)
020	SSTPAD20	Siliconix	SOT23	D1f	PAD-20 20пА – ток утечки диода
03	DTC143TUA	Rohm	SOT323	T1a	Si цифровой NPN 50В 100мА 200мВт f>250МГц (резистор в цепи базы 4,7кОм)
03	DTC143TKA	Rohm	SOT346	T1a	Si цифровой NPN 50В 100мА 200мВт f>250МГц (резистор в цепи базы 4,7кОм)
03	DTC143TE	Rohm	SOT416	T1a	Si цифровой NPN 50В 100мА 150мВт f>250МГц (резистор в цепи базы 4,7кОм)
04	DTC114TKA	Rohm	SOT346	T1a	Si цифровой NPN 50В 100мА 200мВт f>250МГц (резистор в цепи базы 10кОм)
04	DTC114TUA	Rohm	SOT323	T1a	Si цифровой NPN 50В 100мА 200мВт f>250МГц (резистор в цепи базы 10кОм)
04	DTC114TE	Rohm	SOT416	T1a	Si цифровой NPN 50В 100мА 150мВт f>250МГц (резистор в цепи базы 10кОм)
04	MRF4427	Motorola	SOT143	T4a	Si NPN 40В 400мА 220мВт f=1600МГц
04	MRF5211L	Motorola	SOT143	T4a	Si PNP СВЧ MRF 521 20В 70мА 300мВт 4200МГц
047	FCX1047A	Zetex	SOT89	T3a	Si NPN ключевой 10В 4А

## Транзистор в ключевом режиме



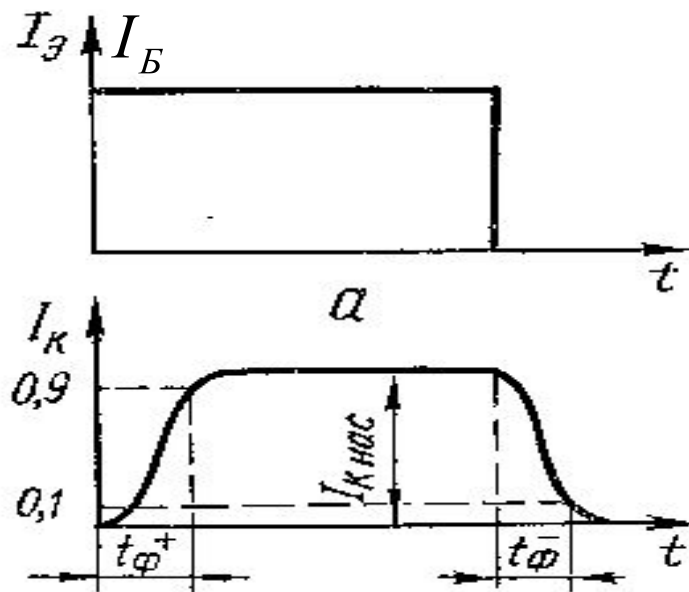
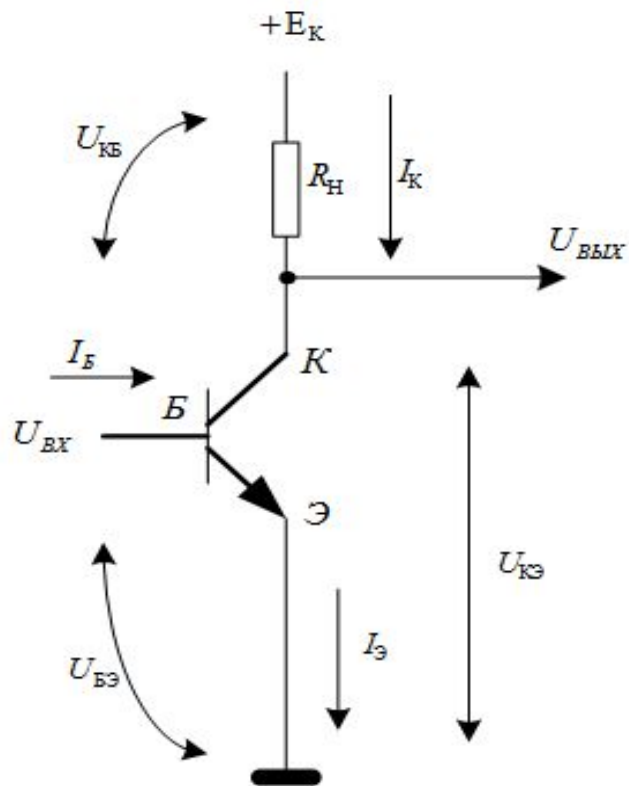
В ключевом режиме транзистор периодически переходит из открытого состояния (режим насыщения) в закрытое (режим отсечки) и наоборот, что соответствует двум устойчивым состояниям «0» и «1».



**Участок 1** – транзистор заперт  $I_K = 0$ ,  $U_{КЭ} = E_K$  – режим "отсечки"

**Участок 2** – переходный режим

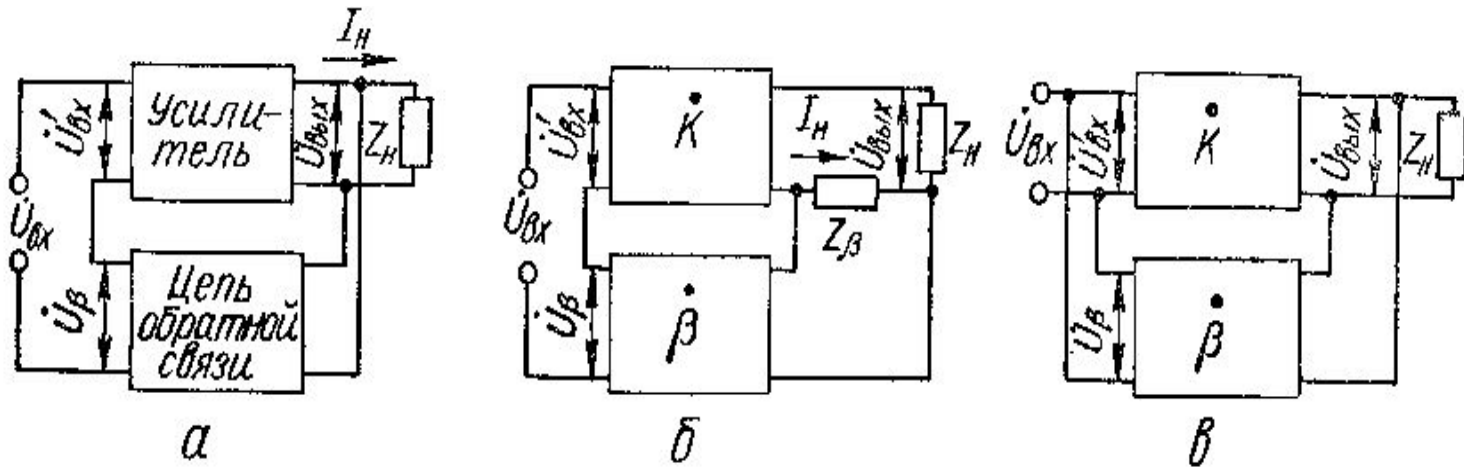
**Участок 3** -  $U_{КЭ} = 0$ ,  $I_K = E_K/R_H$  – режим "насыщения"



Качество транзисторного ключа определяется скоростью переключения, т.е. временем его перехода из одного состояния в другое. Чем выше частотные свойства транзистора, тем выше его быстродействие и тем лучше он работает в ключевом режиме

## Обратная связь в усилителях и генераторах

Обратной связью (ОС) называется такая электрическая связь между каскадами, при которой часть энергии усиленного сигнала с выхода усилителя подается обратно на его вход



По типу подачи входного сигнала : **последовательная и параллельная**

По типу снятия выходного сигнала : **по току и по напряжению**

а- последовательная по напряжению

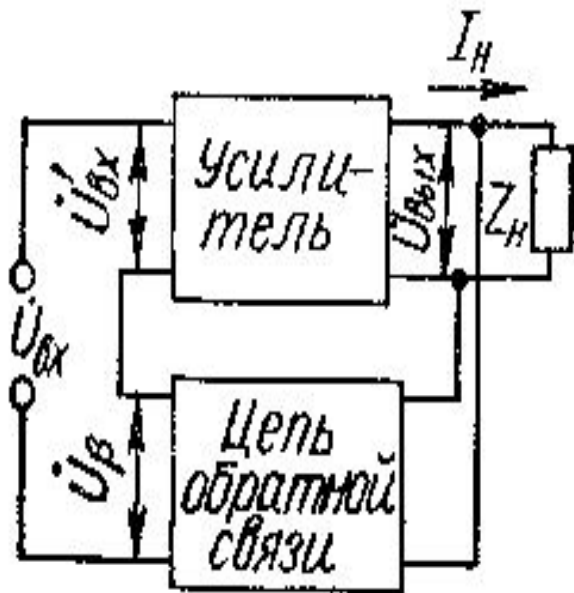
б- последовательная по току

в- параллельная по напряжению



## Влияние ОС на параметры усилителя

$$K_{CB} = \frac{\dot{U}_{ВЫХ}}{\dot{U}_{ВХ}} \quad \beta = \frac{\dot{U}_{\beta}}{\dot{U}_{ВЫХ}}$$



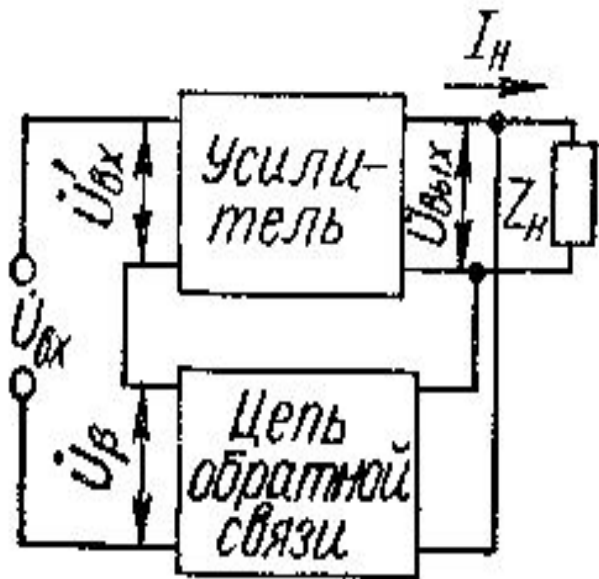
Положительная ОС  $\dot{U}_{\beta} = +\beta \dot{U}_{ВЫХ}$

Отрицательная ОС  $\dot{U}_{\beta} = -\beta \dot{U}_{ВЫХ}$

$$\dot{U}_{\beta} = \pm \beta \dot{U}_{ВЫХ}$$

$$\dot{U}'_{ВХ} = \dot{U}_{ВХ} + \dot{U}_{\beta}$$

$$\dot{U}'_{ВХ} = \dot{U}_{ВХ} + (\pm \beta \dot{U}_{ВЫХ})$$



$$\dot{U}_{ВХ} = \dot{U}'_{ВХ} - (\pm \beta \dot{U}_{ВЫХ})$$

$$\dot{K}_{СВ} = \frac{\dot{U}_{ВЫХ}}{\dot{U}'_{ВХ} - (\pm \beta \dot{U}_{ВЫХ})}$$

$$\dot{K}_{СВ} = \frac{\dot{K}}{1 - (\pm \beta \dot{K})}$$

$\pm \beta \dot{K}$  - Фактор обратной связи

**Положительная ОС  
в генераторах**

$$\dot{U}_{\beta} = +\beta \dot{U}_{ВЫХ}$$

$$\dot{K}_{СВ} = \frac{\dot{K}}{1 - \beta \dot{K}}$$

**Отрицательная ОС  
в усилителях**

$$\dot{U}_{\beta} = -\beta \dot{U}_{ВЫХ}$$

$$\dot{K}_{СВ} = \frac{\dot{K}}{1 + \beta \dot{K}}$$

Отрицательная ОС уменьшает коэффициент усиления усилителя, но уменьшает и нелинейные искажения, расширяет диапазон

$$K_{CB} = \frac{K}{1 + \beta K}$$

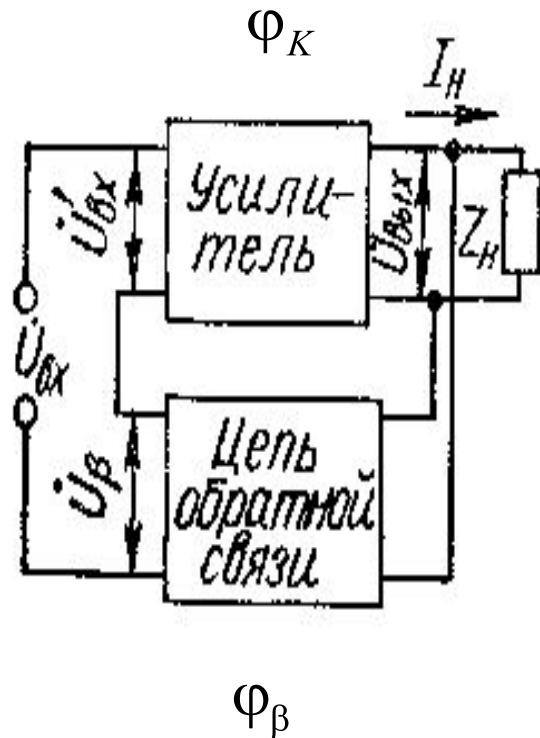
Последовательная отрицательная ОС по увеличивает входное сопротивление усилителя

$$R_{BX} = R'_{BX} (1 + \beta K)$$

Отрицательная ОС по напряжению уменьшает выходное сопротивление усилителя

$$R_{BЫX} = R'_{BЫX} / (1 + \beta K)$$

## Положительная ОС



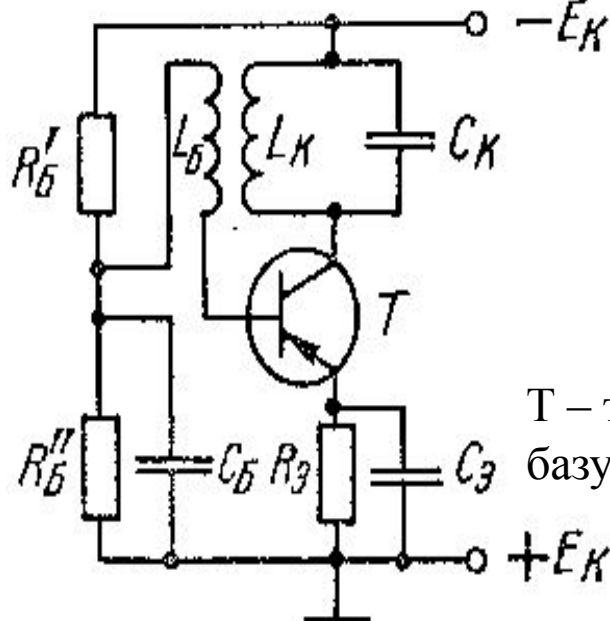
$$\dot{K}_{CB} = \frac{\dot{K}}{1 - \beta \dot{K}}$$

$$\beta K \rightarrow 1, K_{CB} \rightarrow \infty$$

Условия баланса фаз и баланса амплитуд

$$\varphi_K + \varphi_{\beta} = 0, 2\pi, \dots, \text{ и } \beta K > 1$$

## Принцип генерации сигналов



$L_K, C_K$  - параллельный колебательный контур  
в цепи коллектора

$L_B$  - катушка обратной связи, обеспечивающая  
подачу сигнала ОС на базу  $\varphi_B = \pi$

$R_B', R_B''$  - задают смещение на базу

$C_B$  - блокировочный конденсатор отводит  
переменную составляющую сигнала ОС  
на корпус, чтобы не изменялось смещение базы

$T$  - транзистор обеспечивает усиление тока, поступающего на  
базу и инвертирует входной сигнал, т.е.  $\varphi_K = \pi$  и  $\beta K \geq 1$

В схеме выполняются условия баланса фаз и  
баланса амплитуд

$$\varphi_K + \varphi_B = 0, 2\pi, \dots \text{ и } \beta K \geq 1$$

Это условие выполняется только на частоте резонанса параллельного контура (на этой частоте контур имеет только активный характер сопротивления и не вносит сдвига фаз, т. е. колебания генерируются только на этой частоте)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_K C_K}}$$