

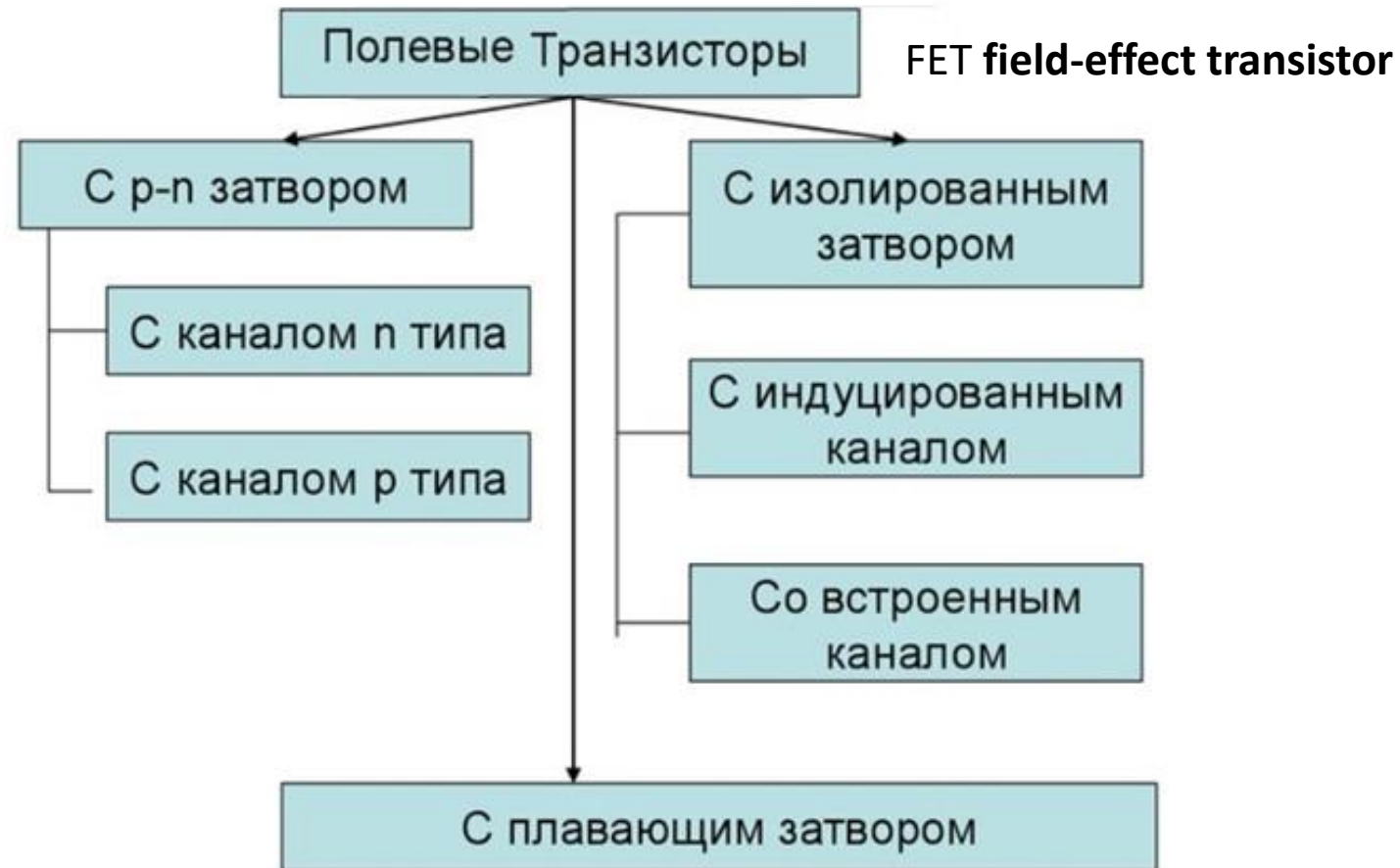
# Circuite și Dispozitive Electronice

## Электронные Цепи и Устройства

Тема 6 – Полевые транзисторы. Классификация. Характеристики.

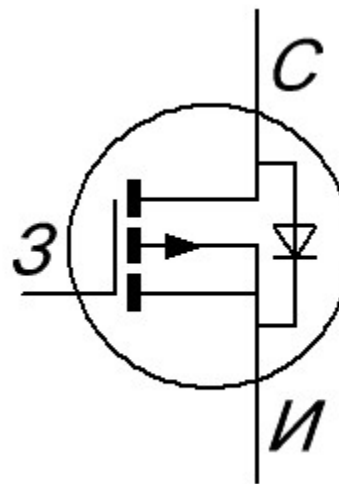
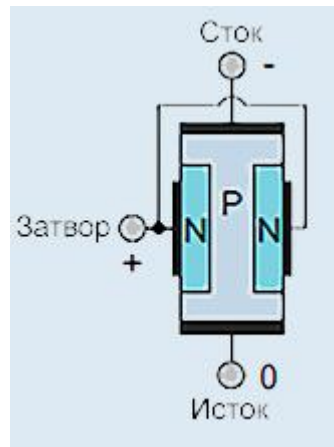
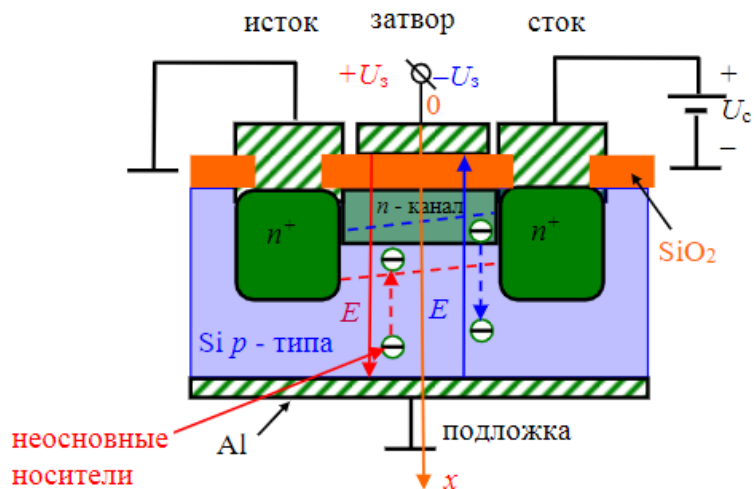
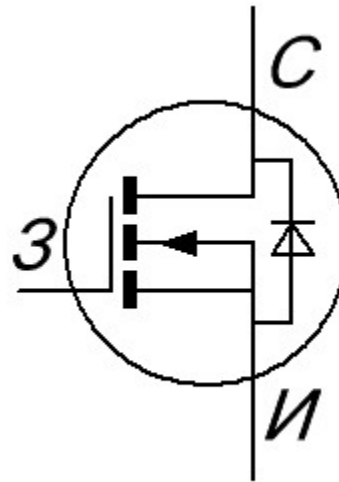
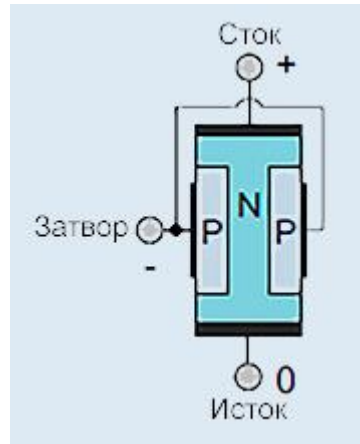
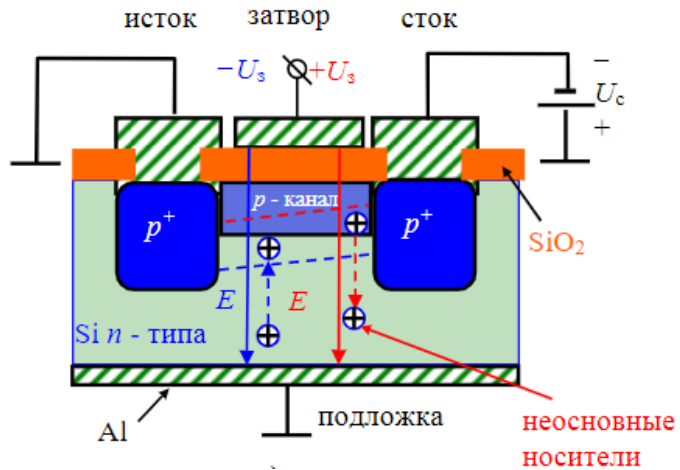
**Цель:** познакомиться с транзисторами ТЕС- $J$  и ТЕС- $MOS$ : Общие сведения. Принцип работы. Символы. Статические характеристики ТЕС- $J$ . Цепи поляризации.  $MOS$ -транзистор с начальным каналом.  $MOS$ -транзистор с индуцированным каналом. Поляризация  $MOS$ -транзисторов.

**Полевой транзистор (FET)** это **униполярный транзистор**, поскольку внутри него **электрическая проводимость обеспечивается полупроводниковым каналом с одним типом носителей заряда**: электронами или дырками. Они называются «эффектом поля», потому что сила тока между двумя выводами регулируется потенциалом электрического поля, создаваемым третьим выводом. Поэтому полевой транзистор является **активным элементом, управляемым по напряжению**.



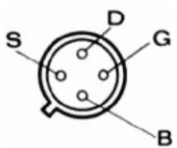
Полевые транзисторы бывают двух типов: **переходные полевые транзисторы (ТЕСJ)** и **полевые транзисторы металл-оксид-полупроводник (ТЕСМOS)**. Иногда ТЕСМOS также называют транзистором с изолированным полевым затвором. Каждая из двух категорий может быть с **каналом n**-типа или **p**-типа, причем два типа дополняют друг друга как по внутренней структуре, так и по работе..

# ПЕРЕХОДНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ (ТЕС-Т)



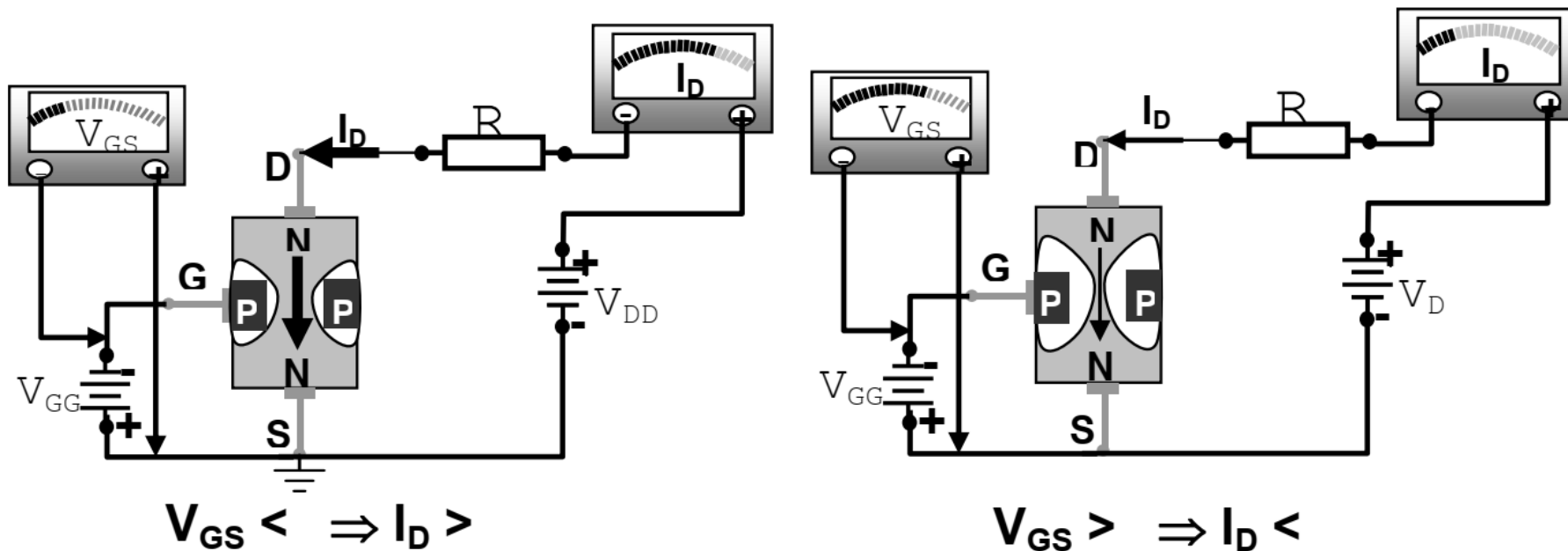
Полевой транзистор - это электронное устройство с тремя выводами (некоторые типы имеют 4 вывода), которые называются **стоком**, **источником** и **затвором** (подложка).

Исток и сток подключаются к концам канала. **Исток** обеспечивает несущие нагрузки и **сток** собирает несущие нагрузки. Ток, протекающий между истоком и стоком, называется **током стока** и обозначается  $I_b$ . **Затвор** контролирует ток стока в соответствии с напряжением, приложенным между затвором и истоком.  $V_{gs}$ .

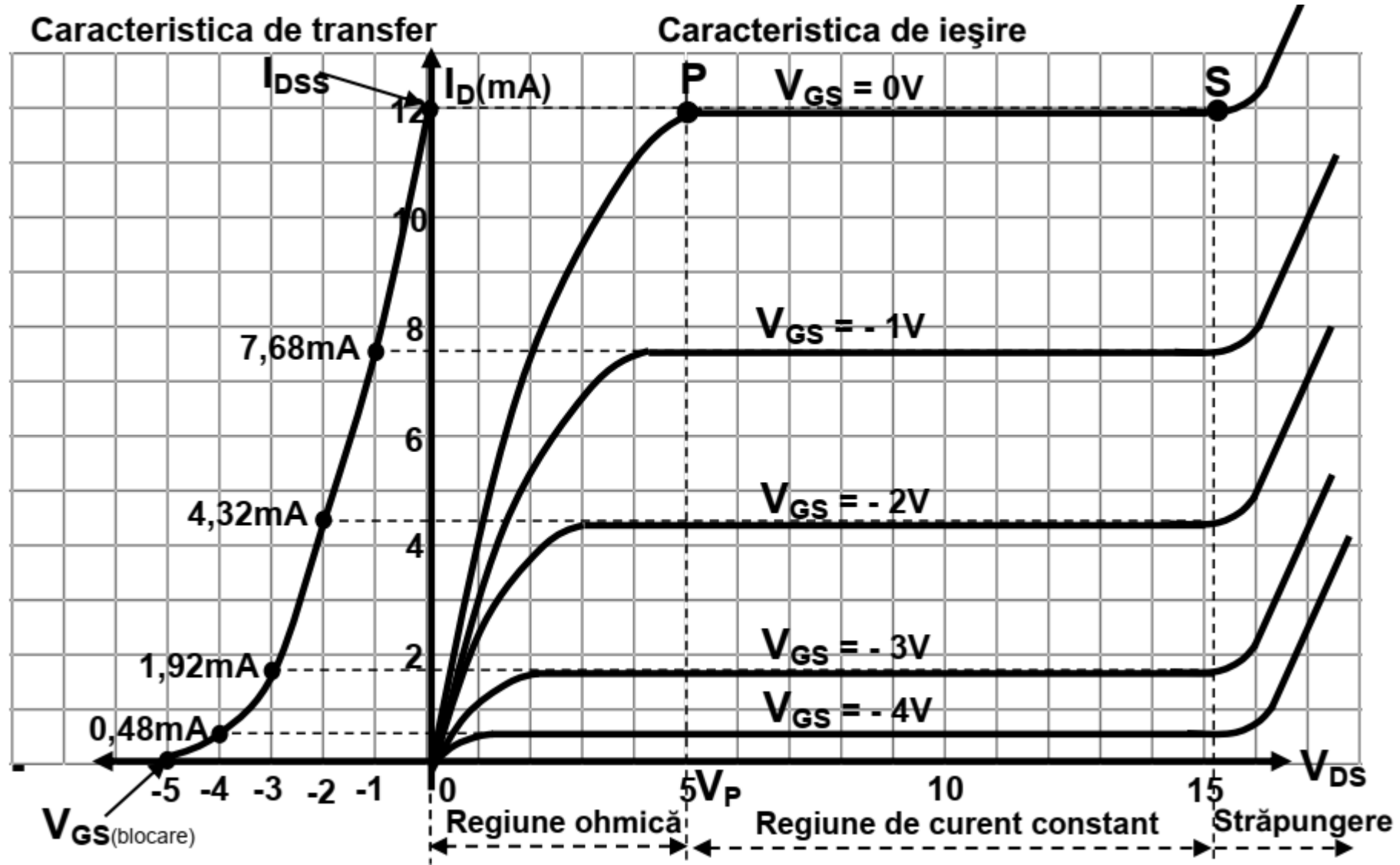


$V_{GG}$  - это управляющее напряжение, при котором pn переход «затвор -исток» имеет обратную поляризацию. Обратная поляризация перехода затвор-источник с отрицательным напряжением на сетке создает вокруг перехода полую область, которая простирается в менее легированный полупроводник в области канала, увеличивая его сопротивление за счет его сужения. Таким образом, транзистор имеет очень высокое входное сопротивление между затвором и истоком. По этой причине ток затвора очень мал (порядка десятков наноампер). Шириной канала, а неявно его сопротивлением, можно управлять, изменяя напряжение затвора-источника.

$V_{DD}$  - это напряжение между стоком и истоком, которое обеспечивает ток стока  $I_D$ , который течет от стока к истоку. Этот ток контролируется напряжением источника затвора. Чем выше напряжение  $U_{GG}$  затвора-исток, тем уже канал и ниже значение тока стока  $I_D$ .



Поскольку переход затвор-исток имеет обратное смещение, эти транзисторы не имеют входной характеристики.  
 Выходная характеристика будет представлена ниже  $I_D = f(V_{DS})$  и характеристик передачи  $I_D = f(V_{GS})$



для транзистора **BC264** который имеет следующие данные каталога :

- напряжение сток-исток  $V_{DS} = 15V$ ;

- напряжение блокировки затвор-исток  $V_{GS}$  (блокировка) =  $-5V$ ;

- **Напряжение блокировки** - представляет собой значение напряжения  $V_{GS}$  для которого ток  $I_D = 0$ ;

- максимальный ток стока  $I_{DSS} = 12 mA$

Чтобы построить график **передаточной характеристики**, необходимо определить координаты  $I_D$  в зависимости от значений  $-V_{GS}$ . Формула используется для их определения:

$$I_D = I_{DSS} \cdot \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(blocare)}}\right)^2$$

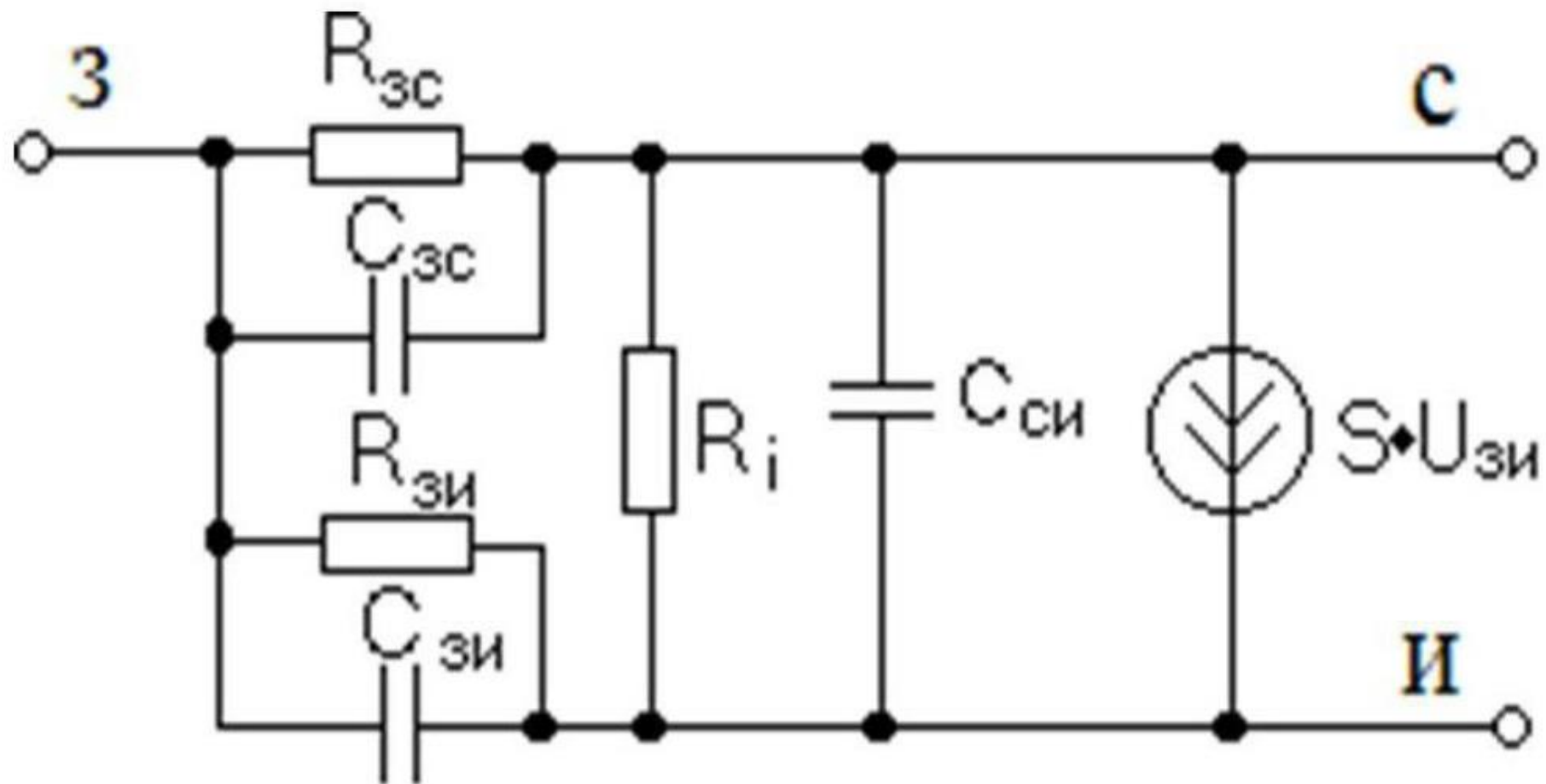
$$V_{GS} = 1 \Rightarrow I_D = 12 \cdot \left(1 - \frac{-1}{-5}\right)^2 = 7,68mA$$

$$V_{GS} = 2 \Rightarrow I_D = 12 \cdot \left(1 - \frac{-2}{-5}\right)^2 = 4,32mA$$

$$V_{GS} = 3 \Rightarrow I_D = 12 \cdot \left(1 - \frac{-3}{-5}\right)^2 = 1,92mA$$

$$V_{GS} = 4 \Rightarrow I_D = 12 \cdot \left(1 - \frac{-4}{-5}\right)^2 = 0,48mA$$

# Эквивалентная схема полевого транзистора с управляющим р-п-переходом



# Параметры эквивалентной схемы полевого транзистора

$R_{zc}$ ,  $R_{zu}$  и  $C_{zc}$ ,  $C_{zu}$  – сопротивление и емкости р-п-переходов, включенных в обратном направлении;  $R_i = dU_{cu}/dI_c$  при  $U_{zu} = const$  – дифференциальное (внутренне) сопротивление канала транзистора (сотни килоом);  $C_{cu}$  – емкость между стоком и истоком транзистора;  $S = dI_c/dU_{zu}$  при  $U_{cu} = const$  – крутизна характеристики, определяющая управляющее действие затвора;  $S * U_{zu}$  – генератор тока, характеризующий усилительные свойства транзистора. Усилительные свойства по напряжению характеризует коэффициент усиления:

$$\mu = dU_{cu}/dU_{zu} = (dU_{cu}/dI_c) * (dI_c/dU_{zu}) = R_i * S.$$

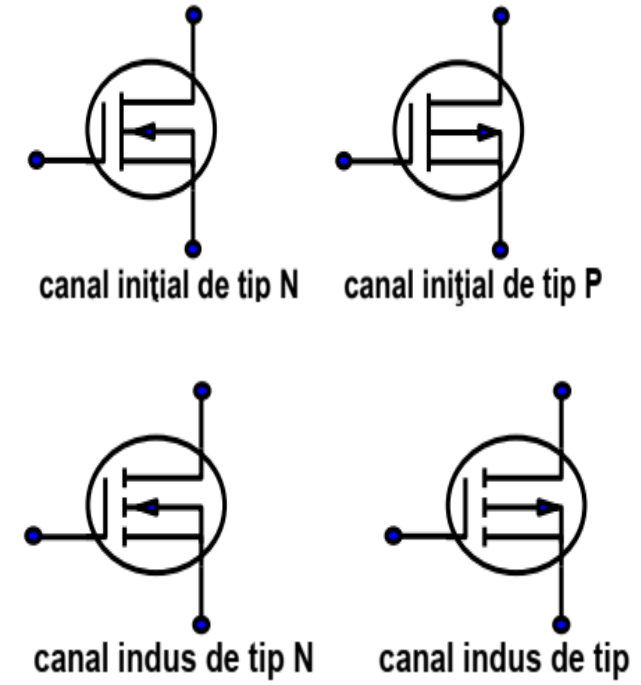
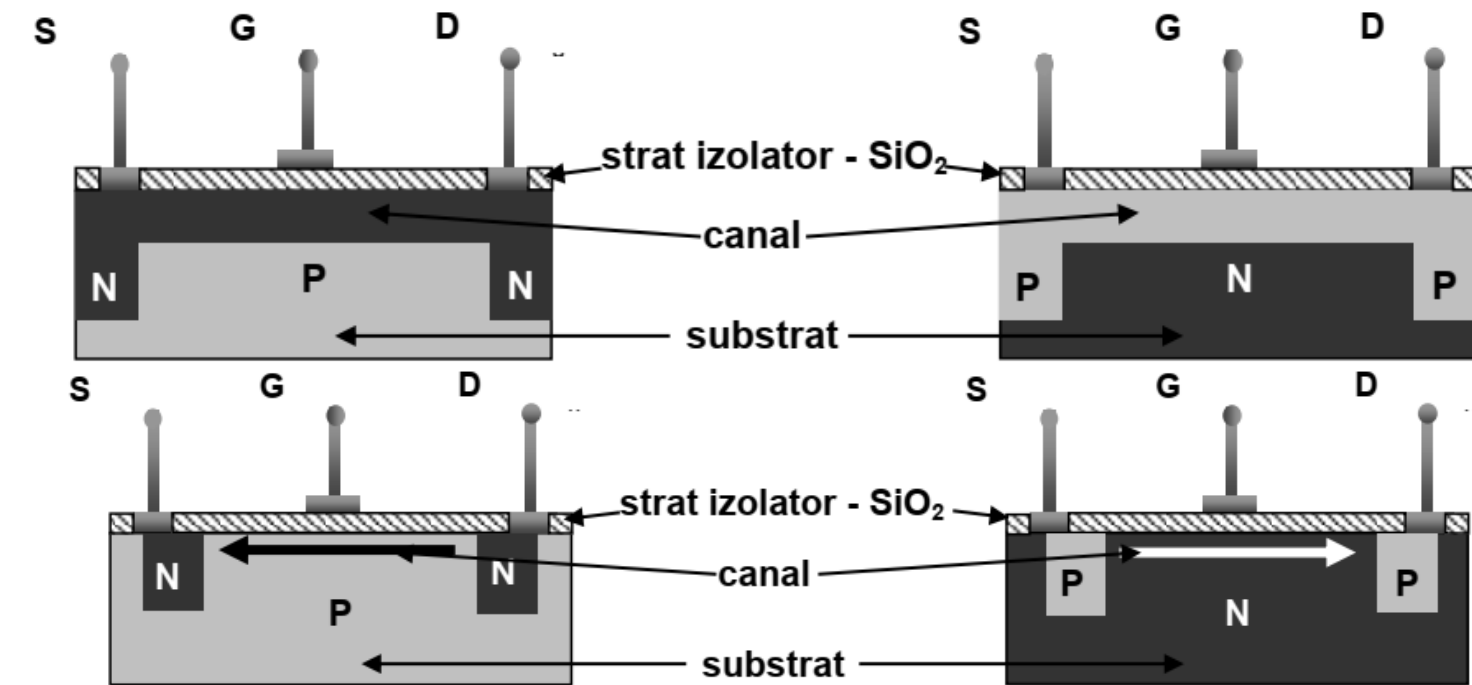


# ТРАНЗИСТОРЫ С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ (ТЕС-MOS)

Структура ТЕС-MOS отличается от структуры ТЕС-J тем, что **затвор** (сетка) транзистора изолирован от канала тонким слоем диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ). Из-за изоляции, выполненной оксидным слоем, эти транзисторы имеют очень высокое входное сопротивление (порядка  $10^{15}$  Ом) и чрезвычайно низкий ток затвора (порядка  $10^{-15}$  А).

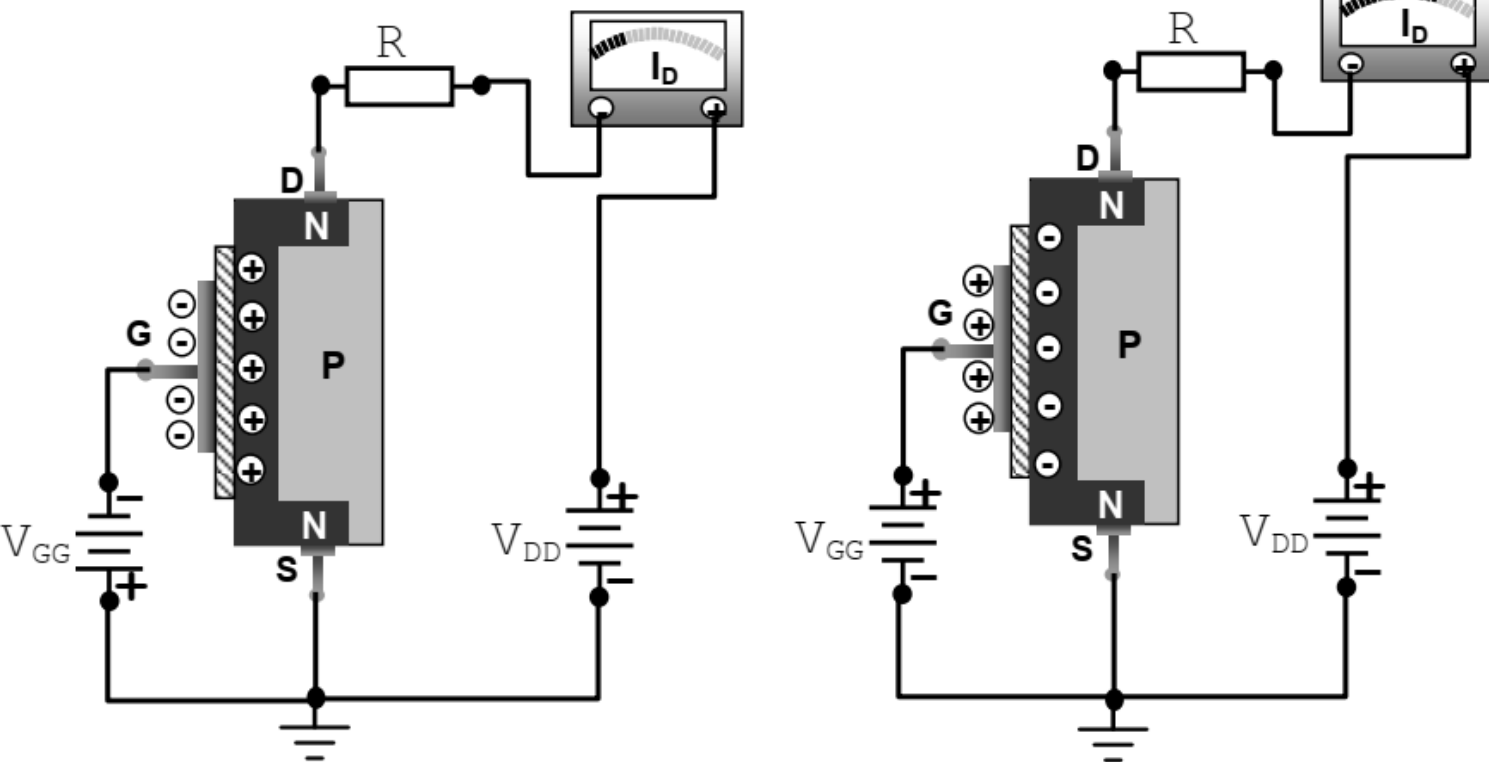
В зависимости от режима работы существует две категории ТЕС-MOS. :

- **ТЕС-MOS с начальным каналом** - для этого типа транзисторов канал всегда присутствует, выполненный технологическими средствами;
- **ТЕС-MOS с индуцированным каналом** - в этом типе транзисторов канал появляется в условиях, в которых транзистор правильно поляризован.



TEC-MOS, в зависимости от режима поляризации сети, может работать в режиме **обеднения** или **обогащения**. Если напряжение, приложенное к затвору, отрицательное, транзистор работает в **режиме истощения**, а если напряжение, приложенное к затвору, положительное, транзистор работает в **режиме обогащения**.

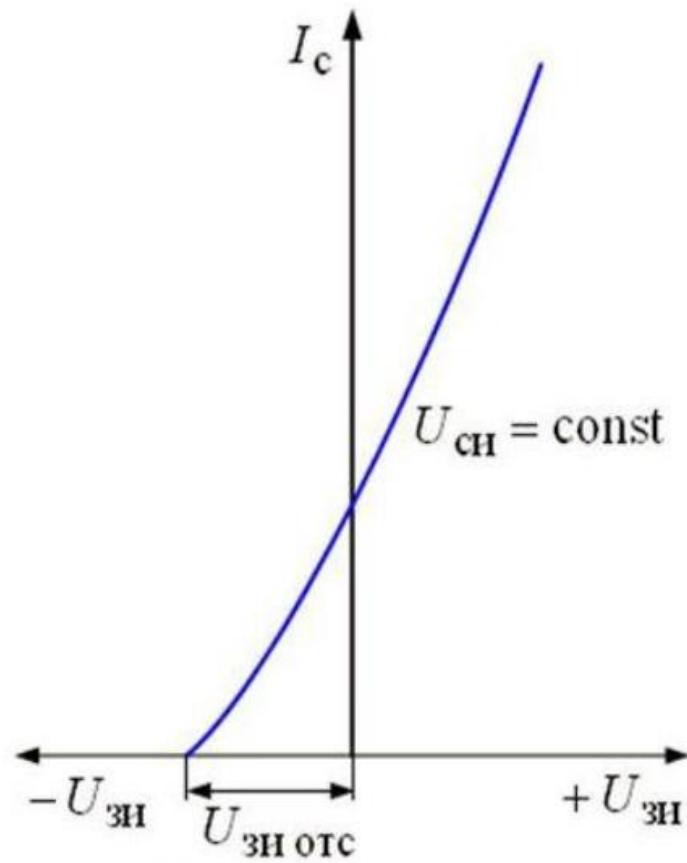
### TEC-MOS с начальным каналом



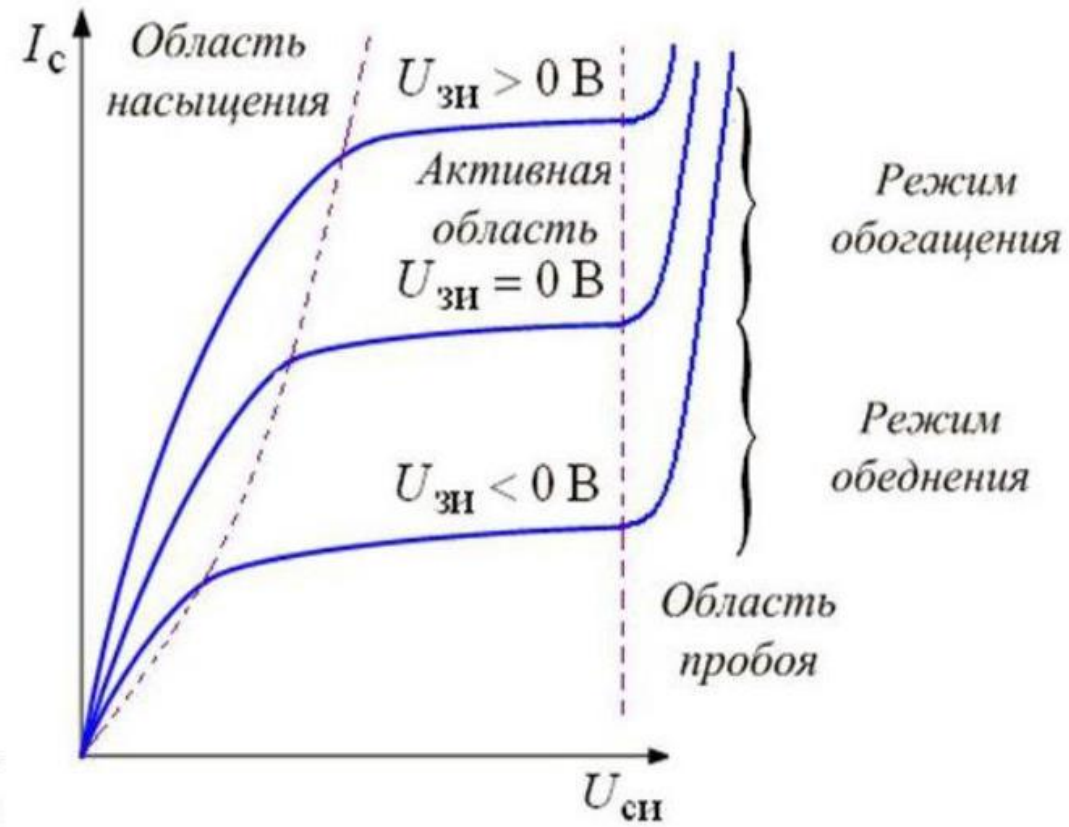
Если на затвор подается отрицательное напряжение, отрицательные заряды на затвор удаляют электроны проводимости из канала n, в результате чего остаются зазоры. Поскольку канал остается обедненным электронами, его проводимость уменьшается, что снижает интенсивность тока стока  $I_D$ . Чем выше напряжение  $V_{GG}$ , тем ниже ток  $I_D$ , пока канал не станет полностью пустым и ток  $I_D$  не станет нулевым.

Если к затвору приложено положительное напряжение, положительные заряды на затворе притягивают электроны проводимости из канала n. По мере обогащения канала электронами его проводимость увеличивается, что увеличивает интенсивность тока стока  $I_D$ . Чем выше напряжение  $V_{GG}$ , тем выше ток  $I_D$ . В случае TEC-MOS с начальным каналом P транзисторы работают аналогично, за исключением того, что полярности напряжений меняются. В большинстве случаев эти транзисторы используются в режиме обеднения.

# Характеристики МДП-транзистора с встроенным каналом

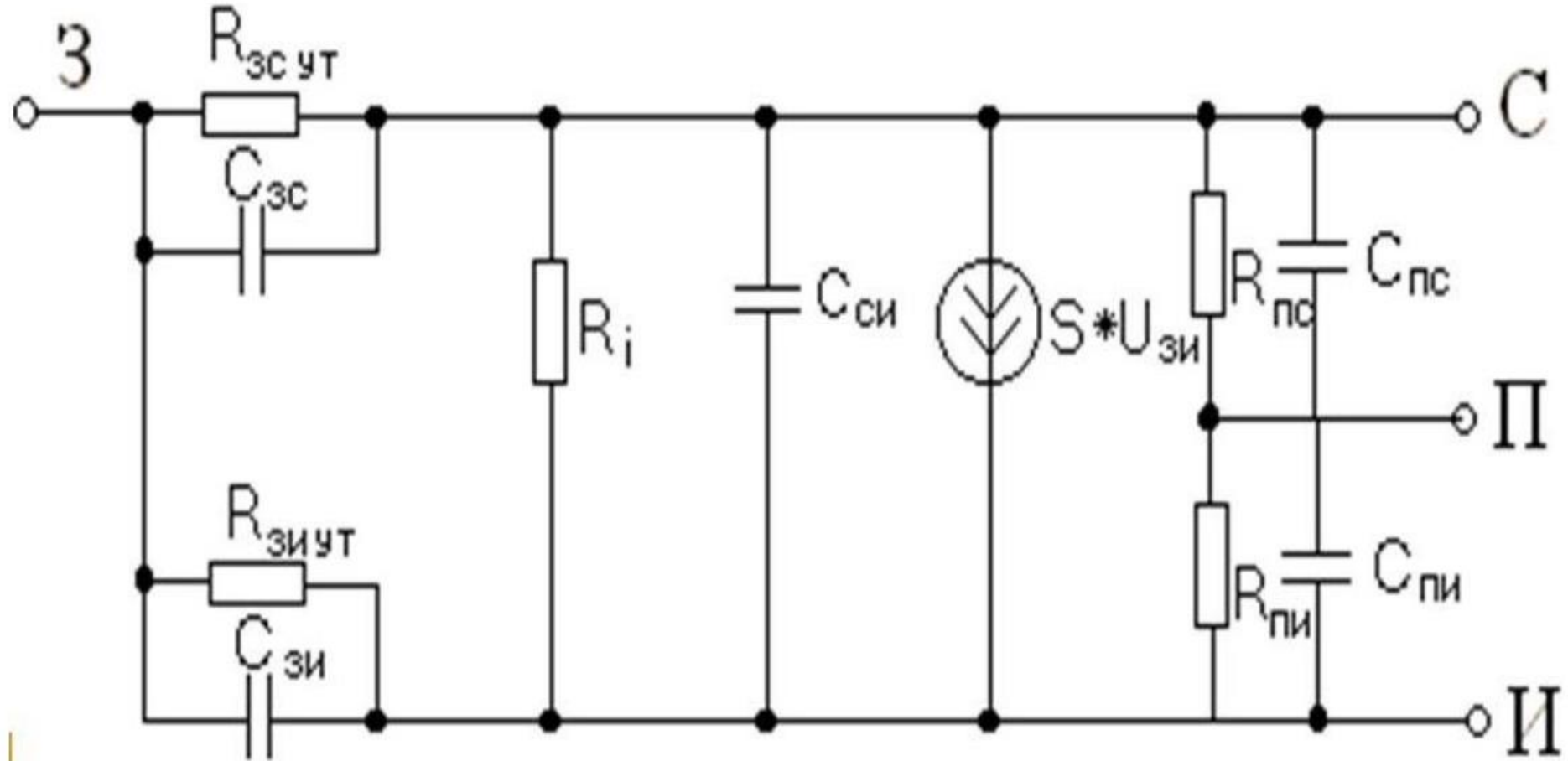


Стоко-затворная характеристика



Выходная характеристика

# Эквивалентная схема МДП-транзистора с встроенным каналом



## Параметры эквивалентной схемы

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

$R_i = dU_{cu}/dI_c$  при  $U_{zu} = \text{const}$  – дифференциальное (внутренне) сопротивление канала транзистора (сотни килоом);

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

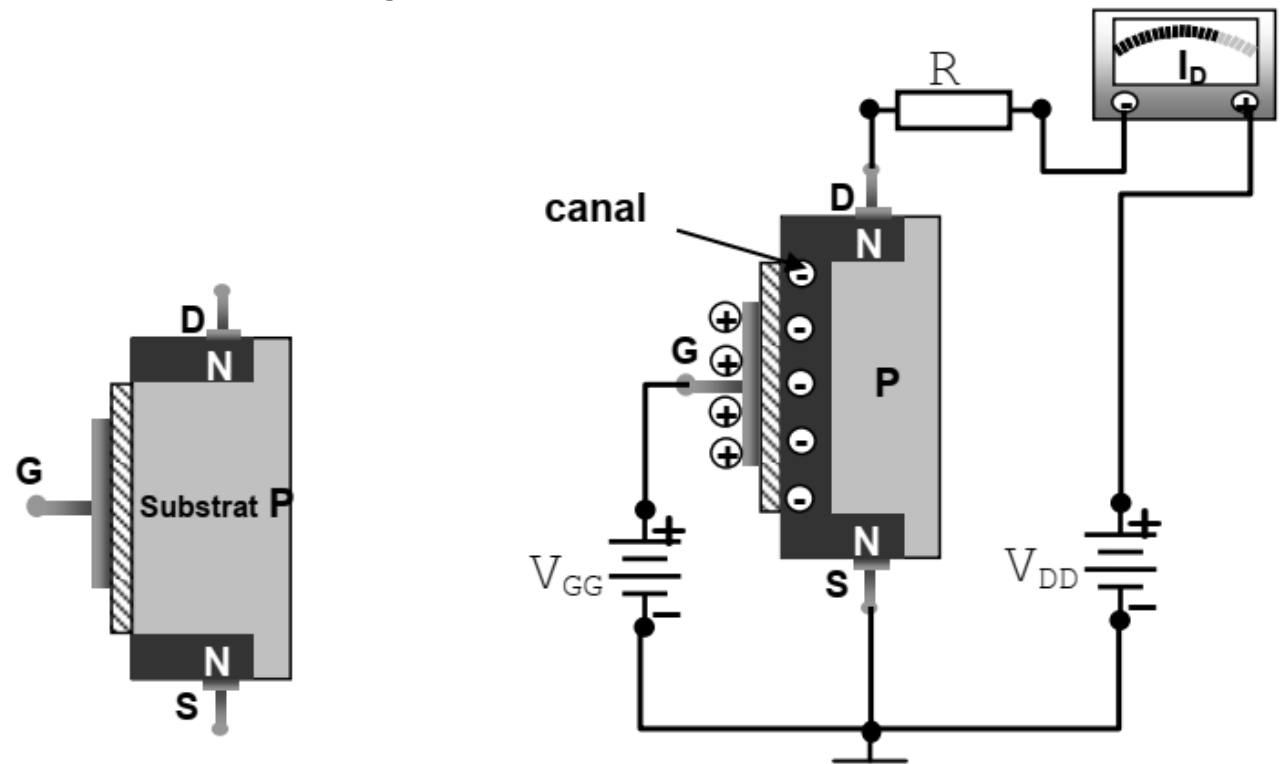
$S = dI_c/dU_{zu}$  при  $U_{cu} = \text{const}$  – крутизна характеристики, определяющая управляющее действие затвора;

$S * U_{zu}$  – генератор тока, характеризующий усилительные свойства транзистора.

$R_{nc}$ ,  $R_{ni}$  и  $C_{nc}$ ,  $C_{ni}$  – сопротивление и емкости переходов подложка-сток и подложка-исток, включенных в обратном направлении;

У этих транзисторов канал проводимости не выполнен конструктивно. Канал проводимости индуцируется, если транзистор правильно смещен с напряжением источника затвора выше порогового напряжения. TEC-MOS с индуцированным каналом работает только в режиме обогащения

## TEC-MOS с индуцированным каналом



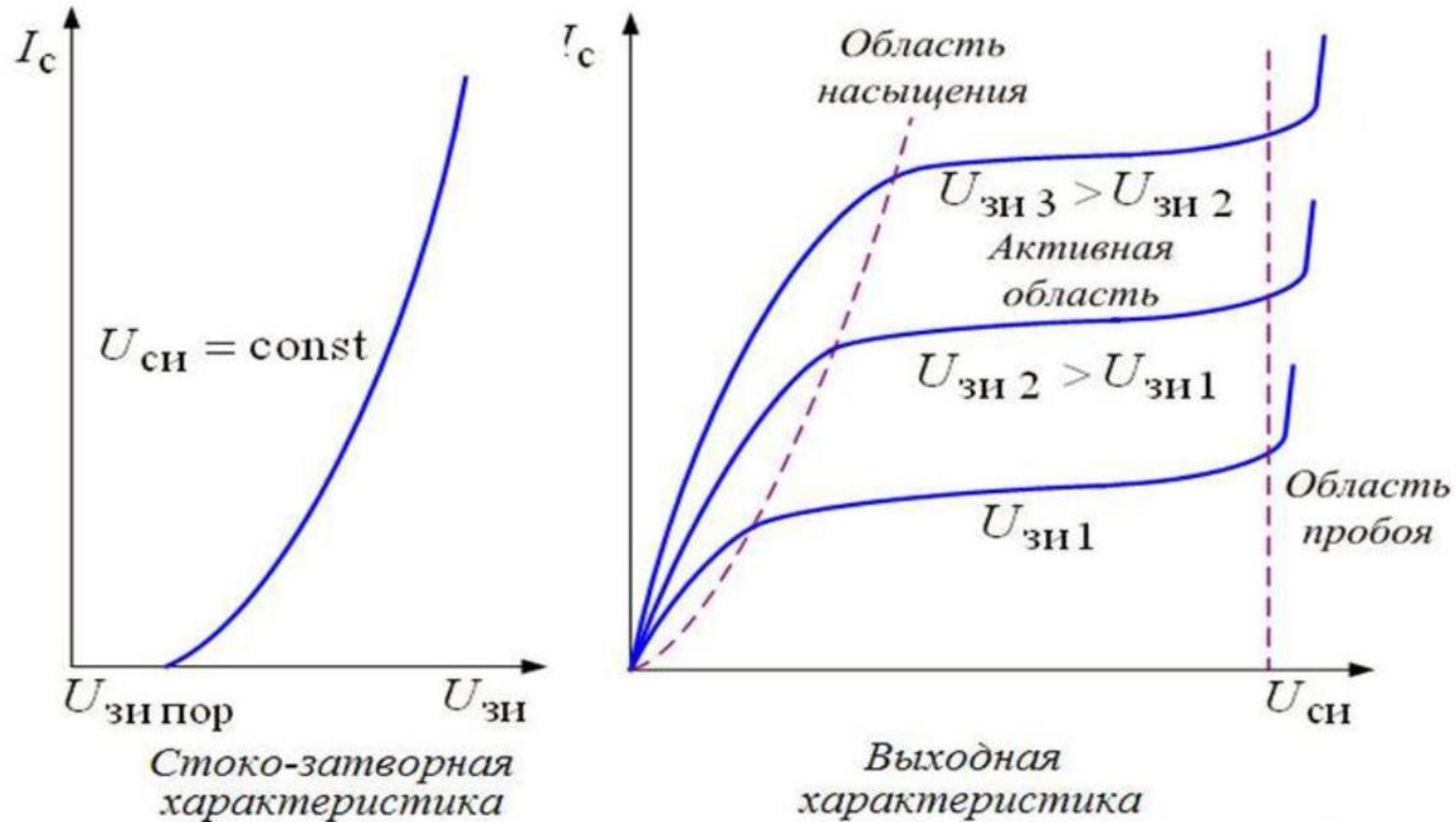
Если на затвор транзистора подается положительное напряжение, превышающее пороговое, он генерирует тонкий слой отрицательных зарядов на поверхности подложки в области подложки в непосредственной близости от затвора. Это создает канал между стоком и истоком, проводимость которого увеличивается с увеличением напряжения затвор-истока.

Чем выше напряжение  $V_{GG}$ , тем выше ток  $I_D$ . Обычный TEC-MOS имеет узкий и длинный канал проводимости, что приводит к высокому сопротивлению сток-исток. Это ограничивает использование транзисторов в слаботочных цепях. Для использования транзисторов в силовых цепях размеры и форма канала должны быть изменены в зависимости от конструкции. Расширяя и укорачивая канал, его сопротивление уменьшается, что позволяет получить более высокие напряжения и токи.

Устройства TEC-MOS легко разрушаются из-за электростатических разрядов. Для предотвращения этой ситуации необходимо принять следующие меры предосторожности. :

- Устройства TEC-MOS должны храниться в антистатической упаковке с короткозамкнутыми клеммами с фольгой или тонким металлическим проводником;
- короткое замыкание между выводами снимается только после того, как транзистор был припаян;
- не допускается подача входного сигнала на затвор транзистора, если цепь, в которой он находится, не питается постоянным током.

# МДП-транзистор с индуцированным каналом



# Схемы включения полевых транзисторов

Различают три схемы включения полевых транзисторов.

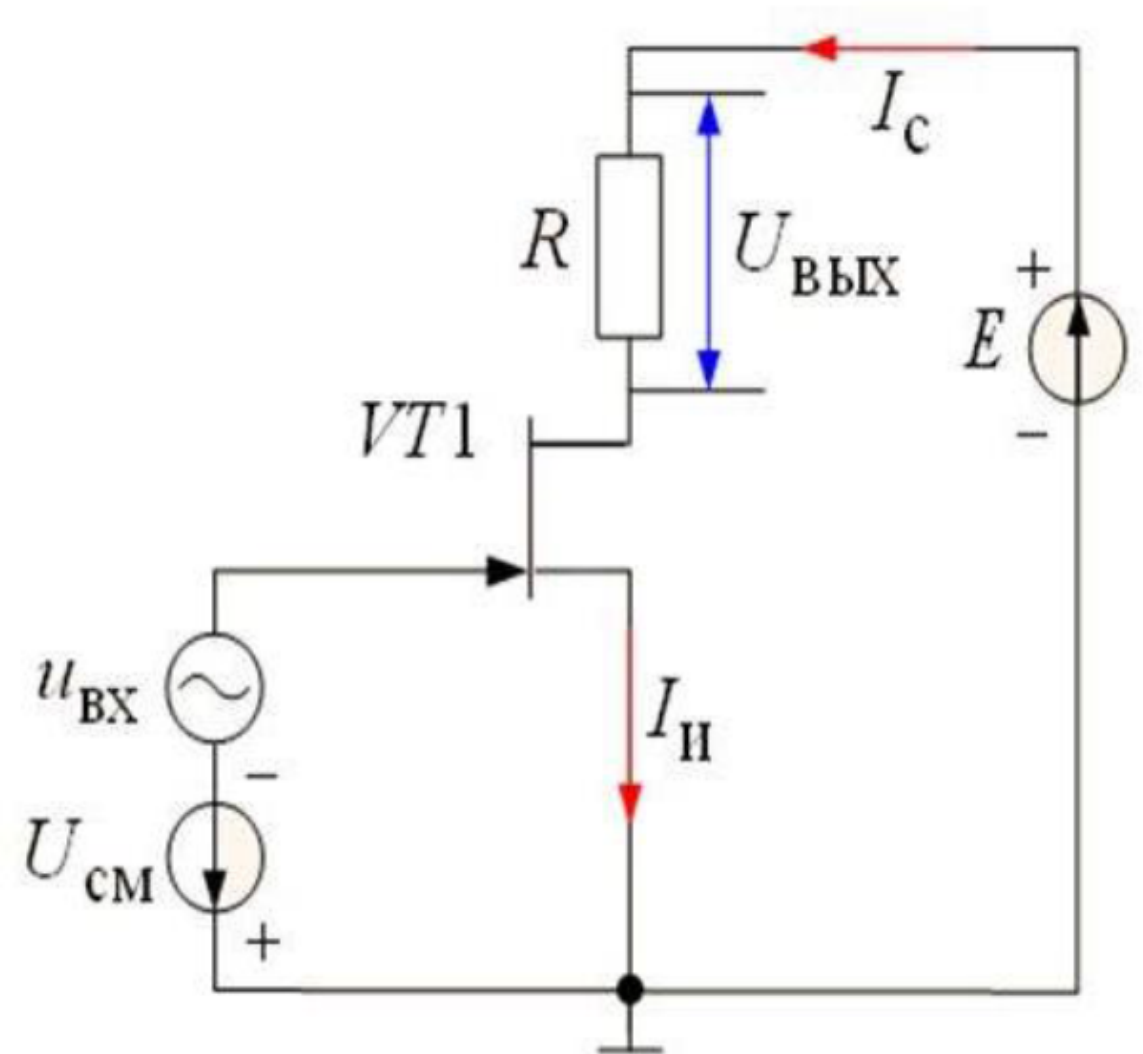
Это схемы с общим:

- 1 истоком;
- 2 стоком;
- 3 затвором.

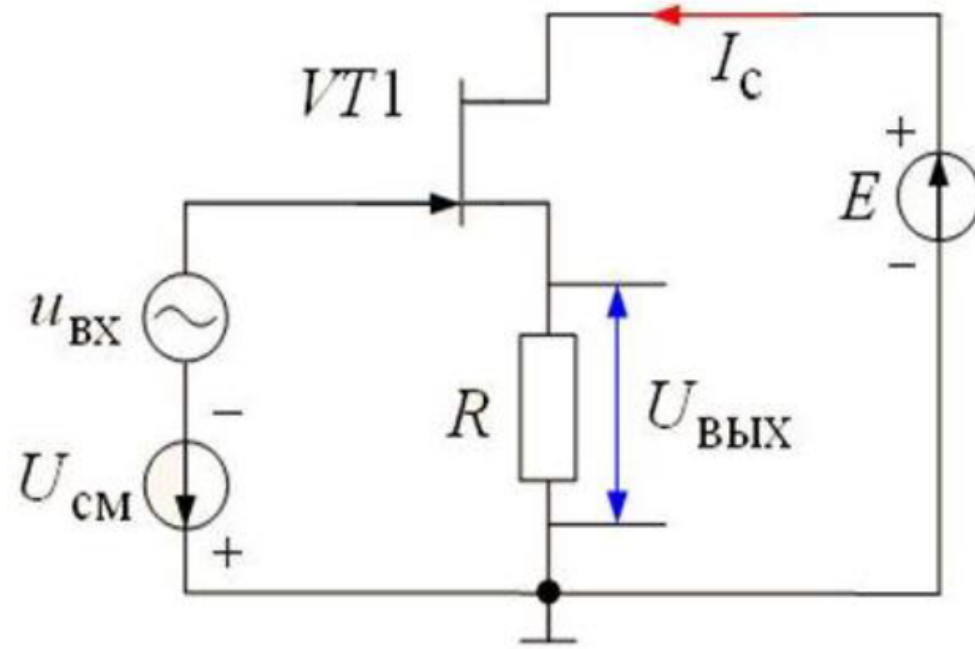


## Схема с общим истоком

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

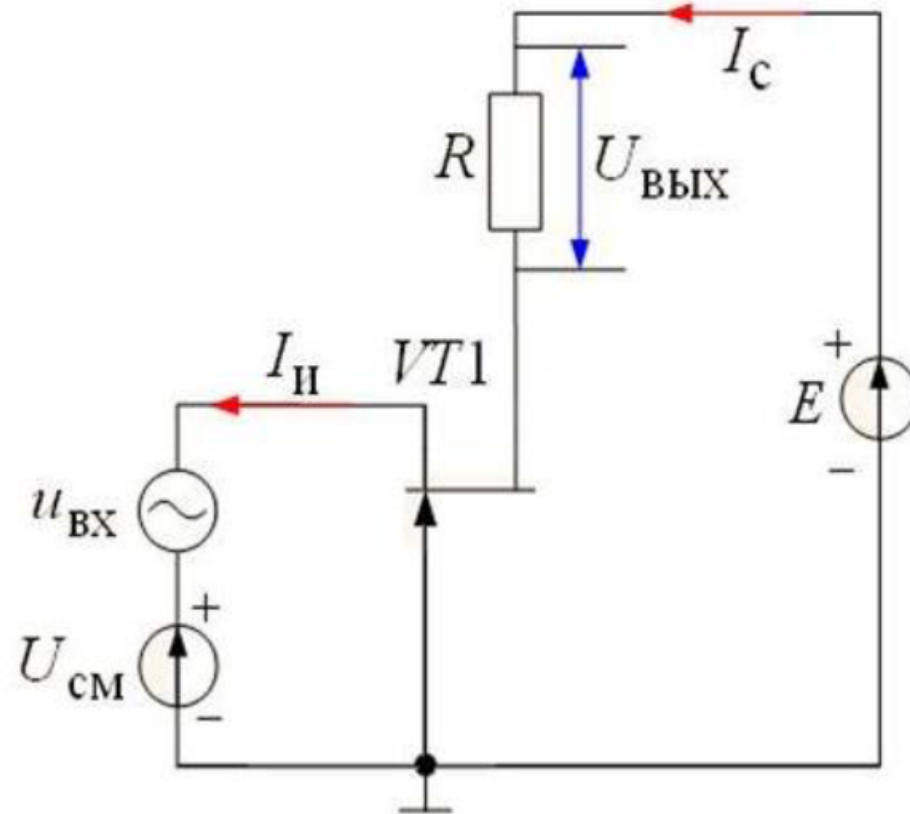


## Схема с общим стоком



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

## Схема с общим затвором



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

## Сравнение схем включения полевых транзисторов

Из трех рассмотренных схем не находит практического применения схема с общим затвором из-за малого входного сопротивления и незначительного коэффициента усиления по мощности.

# Сравнение ВАХ полевых транзисторов

Тип транзистора	С каналом n-типа		С каналом p-типа	
	Полярность напряжений	Вольт-амперная характеристика	Полярность напряжений	Вольт-амперная характеристика
С управляющим p-n-переходом				
МДП со встроенным каналом				
МДП с индуцированным каналом				

	Полевой транзистор (FET)	Биполярный переходной транзистор (BJT)
1	Низкое усиление напряжения	Усиление высокого напряжения
2	Высокий коэффициент усиления по току	Низкое усиление тока
3	Очень высокий входной импеданс	Низкое входной импеданс
4	Высокое выходной импеданс	Низкое входной импеданс
5	Низкий уровень шума	Средний уровень шума
6	Быстрое время переключения	Среднее время переключения
7	Легко повреждается статически	Надежный
8	Некоторым нужен вход для переключения "ВЫКЛ"	Требуется нулевой вход для переключения "ВЫКЛ"
9	Устройство, управляемое напряжением	Устройство, управляемое током
10	Обладает свойствами резистора.	
11	Дороже биполярного	Дешево
12	Трудно поляризовать	Легко поляризовать

- **Bipolar Junction Transistor (BJT)** представляет собой трехслойное устройство, выполненное в виде двух соединенных полупроводниковых диодных переходов, одного с прямой поляризацией и одного с обратной поляризацией..
- Есть два основных типа транзисторов с биполярным переходом, (BJT) NPN și PNP.
- Транзисторы с биполярным переходом - это «**устройства с током**», где гораздо меньший базовый ток вызывает более высокий ток, протекающий от эмиттера к коллектору..
- Стрелка в символе транзистора представляет обычный ток..
- Наиболее распространенное соединение транзисторов - это конфигурация с общим эмиттером (ЕС), но также доступны общая база (СВ) и общий коллектор (СС)..
- Требуется напряжение смещения для работы усилителя АС.
- Переход база-эмиттер всегда прямо поляризован, а переход коллектор-база всегда имеет обратную поляризацию..
- Стандартное уравнение для токов, протекающих в транзисторе, имеет вид :  $I_E = I_B + I_K$
- Характеристики выходного сигнала или кривые коллектора могут использоваться для определения  $I_b$ ,  $I_c$  или  $\beta$ , для которых можно построить линию нагрузки, чтобы определить подходящую рабочую точку Q, с вариациями базового тока, определяющими рабочий диапазон.
- Транзистор также может использоваться в качестве электронного переключателя между областями насыщения и отсечки для управления такими устройствами, как лампы, двигатели, соленоиды и т. д.
- Индуктивные нагрузки, такие как двигатели постоянного тока, реле и соленоиды, требуют наличия обратно поляризованного диода «Маховик», расположенного над нагрузкой. Это помогает предотвратить образование наведенных обратных напряжений (ЭДС) при отключении нагрузки, что может привести к повреждению транзистора.
- Транзистор NPN требует, чтобы база была более положительной, чем эмиттер, в то время как тип PNP требует, чтобы эмиттер был более положительным, чем база.

## Полевой транзистор (*Field Effect Transistor*)

- **Полевые транзисторы**, являются «работающими под напряжением устройствами» и могут быть разделены на два основных типа: устройства с затворным переходом, называемые JFET, изолированные затворные устройства, называемые IGFET, или более известные как MOSFET.
- Устройства с затворной изоляцией также можно разделить на тип улучшения и тип истощения. Все формы доступны как в N-канальной, так и в P-канальной версиях..
- Полевые транзисторы имеют очень высокие входные резисторы, поэтому на входной клемме течет очень мало или совсем не ток (типы MOSFET), что делает их идеальными для использования в качестве электронных переключателей..
- Входное сопротивление MOSFET даже выше, чем JFET из-за изолирующего оксидного слоя, и поэтому статическое электричество может легко повредить устройства MOSFET, поэтому при обращении с ними необходимо соблюдать осторожность..
- Когда на затвор усовершенствованного полевого транзистора не подается напряжение, транзистор находится в состоянии «ВЫКЛ», аналогичном «разомкнутому переключателю».
- Выхлопной полевой транзистор по своей природе является проводящим и находится в состоянии «ВКЛ», когда не применяется напряжение затвора, подобное «замкнутому переключателю».
- Полевые транзисторы имеют гораздо более высокий коэффициент усиления по току по сравнению с транзисторами с биполярным переходом.
- Наиболее распространенным соединением FET является конфигурация с общим источником (ОИ), но также доступны конфигурации с общим затвором (ОЗ) и общим стоком (ОС).
- МОП-транзисторы могут использоваться как идеальные переключатели из-за очень высокого сопротивления канала «ВЫКЛ» и низкого сопротивления «ВКЛ».
- Чтобы выключить JFET-транзистор с N-каналом, необходимо подать отрицательное напряжение на затвор.
- Чтобы выключить P-канальный JFET-транзистор, на затвор необходимо подать положительное напряжение.
- N-канальные MOSFET с истощением находятся в состоянии «ВЫКЛ.», Когда на затвор подается отрицательное напряжение для создания области истощения.
- MOSFET с истощением с P-каналом находятся в состоянии «ВЫКЛ.», Когда на затвор подается положительное напряжение для создания области истощения.
- N-канальные полевые МОП-транзисторы находятся во включенном состоянии, когда на затвор подается положительное (положительное) напряжение.
- MOSFET с P-каналом находятся во включенном состоянии, когда на затвор подается отрицательное (отрицательное) напряжение.



Полевые транзисторы имеют следующие преимущества перед биполярными транзисторами:

- имеет очень высокий входной импеданс (потому что они управляются напряжением);
- могут использоваться как резисторы с регулируемым напряжением;
- хорошая линейность схемы;
- пониженный шум;
- уменьшенный размер.

Шум TEC-MOS-транзисторов довольно высок, и в результате они не подходят для приложений с низким уровнем сигнала. Однако TEC-MOS имеет лучшую линейность, чем БТ. Также коммутаторы с TEC-MOS имеют более быстрое переключение по сравнению с БТ, которое имеет значительную задержку из-за входа в насыщение.

Таким образом, биполярный транзистор отношения имеет преимущества :

- более высокий ток и емкость напряжения;
- небольшое падение напряжения в проводимости,  $V_{CEON}$ .

С другой стороны, более важными недостатками являются :

- относительно долгое время переключения;
- высокий ток и мощность управления;
- наличие насыщения;
- опасность разрушения вторым пробоем.

Транзистор MOSFET выгоден по причинам:

- короткое время переключения;
- контроль напряжения;
- отсутствие насыщения и второго пробоя;
- относительно низкая емкость по напряжению и току.

## Области применения ПТ:

- для работы во входных каскадах усилителей низкой частоты и постоянного тока с высоким входным сопротивлением
- для работы во входных каскадах усилителей низкой частоты и постоянного тока с высоким входным сопротивлением
- для применения в широкополосных усилителях в диапазоне частот до 150 МГц, а также в переключающих и коммутирующих устройствах
- для применения в охлаждаемых каскадах предусилителей устройств ядерной спектрометрии, и т.д.