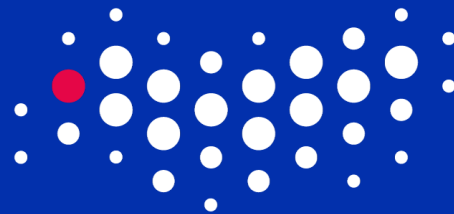


УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург, 2021



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

# Полупроводниковые приборы – полевые транзисторы.

Николаев Николай Анатольевич  
[nikolay.a.nikolaev@gmail.com](mailto:nikolay.a.nikolaev@gmail.com)

Санкт-Петербург, 2021



## Темы, освещенные в презентации

- ✓ Определение, общие сведения
- ✓ Полевой транзистор с управляющим р-n переходом
- ✓ МОП транзистор



# Определение полевого транзистора

*Полевыми транзисторами* называются полупроводниковые элементы, которые в отличие от обычных биполярных транзисторов управляются электрическим полем, т.е. практически без затрат мощности управляющего сигнала.

В биполярном транзисторе функционирование зависит от переноса неосновных носителей заряда через узкую область базы, действие полевых транзисторов основано на управлении основными носителями в канале приложенным полем.

Для того, чтобы управлять током в полупроводнике при постоянном электрическом поле, нужно менять либо удельную проводимость, либо его площадь. На практике используют оба способа, в обоих способах лежит эффект поля.

Существуют две больших группы полевых транзисторов:

✓ *Полевые транзисторы с управляющим р-п переходом*, в которых изоляция канала от источника управляющего напряжения обеспечивается обратным смещенным р-п переходом (обедненный слой создается с помощью р-п перехода).

✓ *Полевые транзисторы с МОП* (металл – окисел - полупроводник) *структурой*. В этих транзисторах изоляция канала от управляющего электрода обеспечивается с помощью диэлектрика (двуокиси кремния) (транзисторы с приповерхностным переходом имеют классическую структуру металл-диэлектрик-полупроводник).

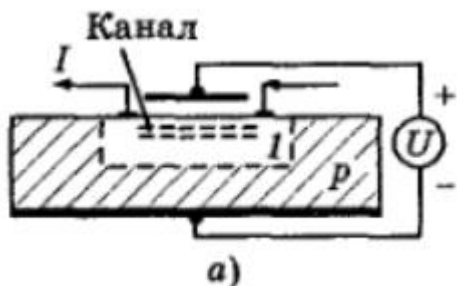
В настоящее время МОП-транзисторы наиболее широко применяются в цифровых интегральных схемах, т.к. могут функционировать как конденсатор, резистор, переключатель и усилитель.

## Определение полевого транзистора

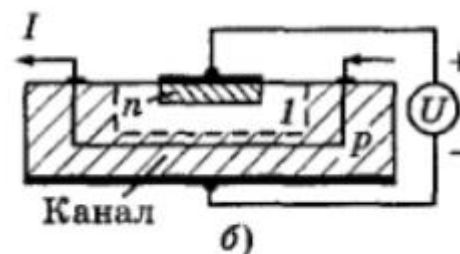
Проводящий слой, по которому проходит ток, называется **каналом**, который может быть приповерхностным и объемным:

-приповерхностный канал представляет собой либо обогащенные слои (обусловленные донорными примесями), либо инверсионные слои, образующиеся под действием внешнего поля;

- объемные каналы представляют собой участки однородного полупроводника, отделенного от поверхности обедненным слоем.



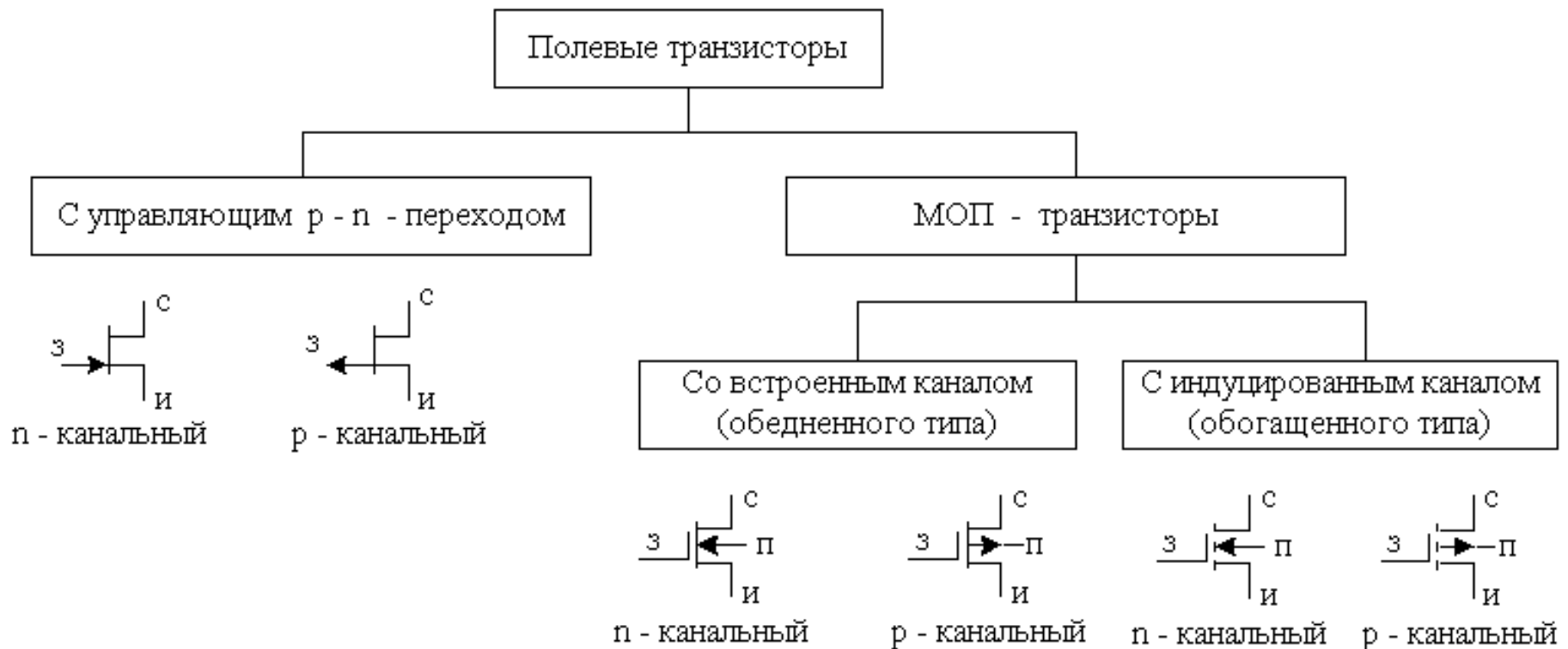
а) приповерхностный n-канал



б) объемный p-канал



# Классификация полевых транзисторов



## Полевой транзистор с управляющим р-n переходом

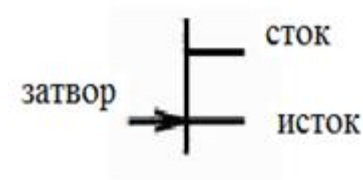
**Полевой транзистор** (ПТ) с управляющим р-n переходом – это униполярный транзистор, в котором работают только основные носители.

**Полевой транзистор** с управляющим р-n переходом – это устройство, управляемое напряжением.

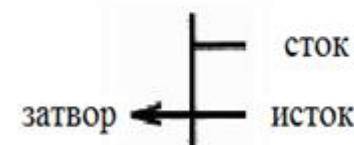
Полевые транзисторы с р-n переходом состоят из полупроводниковых материалов n- и р типа и способны усиливать электрические сигналы. На рисунках показано условное обозначение ПТ на схемах и обозначение выводов ПТ с р-n переходом

а) – с каналом n- типа,

б) – с каналом р- типа.



а)



б)

ПТ называются устройствами, работающими в режиме обеднения (носителями заряда), в отличие от биполярных, которые работают в режиме обогащения (оказывают меньшее сопротивление току, когда на базу подается управляющий ток).

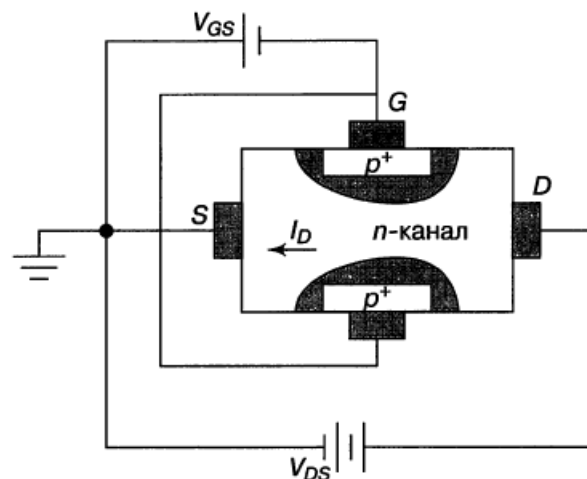
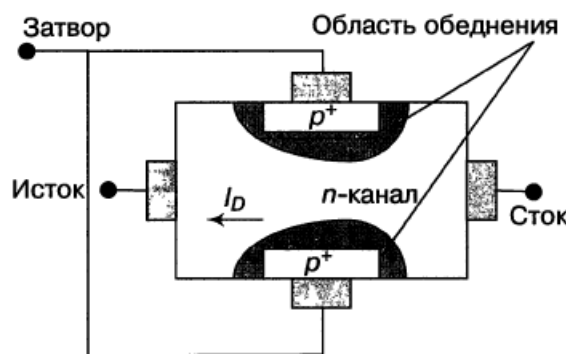
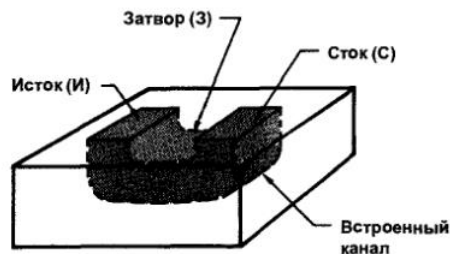
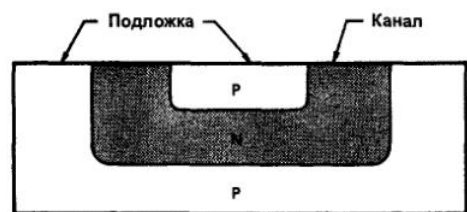


## Полевой транзистор с управляющим р-п переходом

Конструкция полевых транзисторов с р-п переходом начинается с подложки, или базы, слабо легированного полупроводникового материала. Подложка может быть р- или n- типа, р-п переход в подложке изготавливается как методом диффузии, так и методом выращивания.

U-образная область называется каналом. Когда канал сделан из материала n-типа в подложке из материала р-типа образуется полевой транзистор с каналом n-типа. Когда канал сделан из материала р-типа в подложке из материала n-типа образуется полевой транзистор с каналом р-типа.

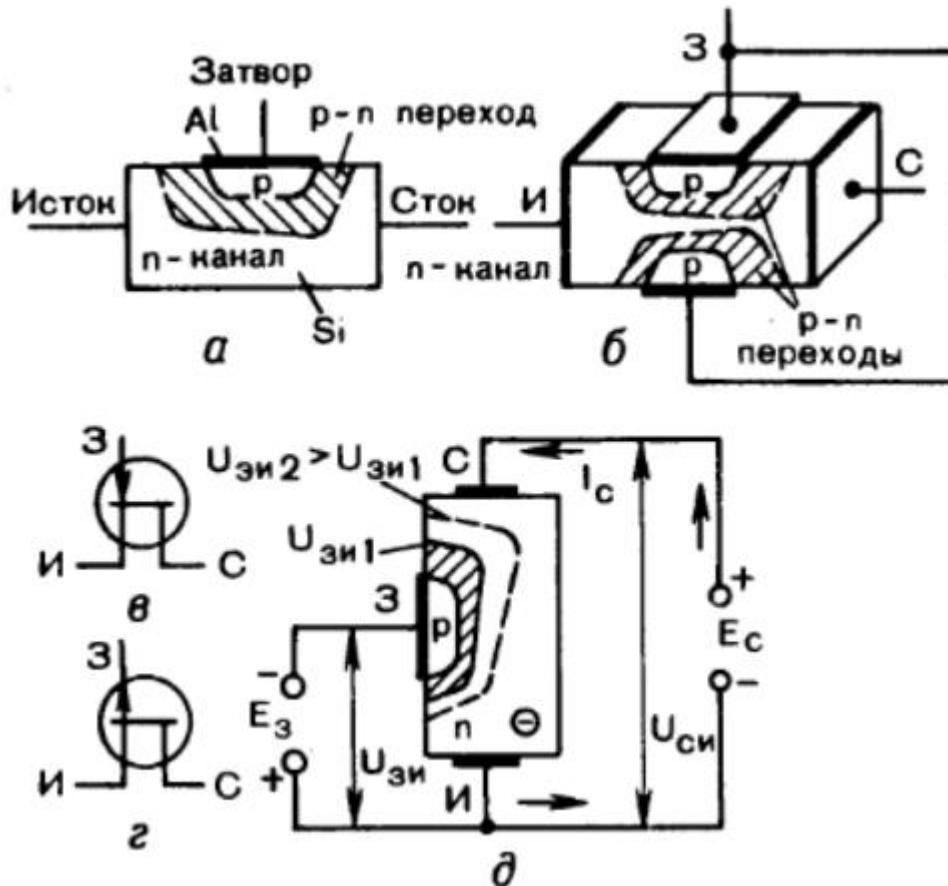
Полевой транзистор с р-п переходом имеет три вывода. Один вывод соединен с подложкой и образует затвор (З, G(gate)). Выводы, соединенные с концами канала образуют исток (И, S(source)) и сток (С, D(drain)). Не важно, какой из выводов соединен со стоком, а какой с истоком, так как канал симметричен.







## Полевой транзистор с управляющим p-n переходом



При создании p-n – перехода только с одной стороны пластины (а) канал n-типа образуется между областью p-n перехода и непроводящей подложкой, на которую укреплена пластина.

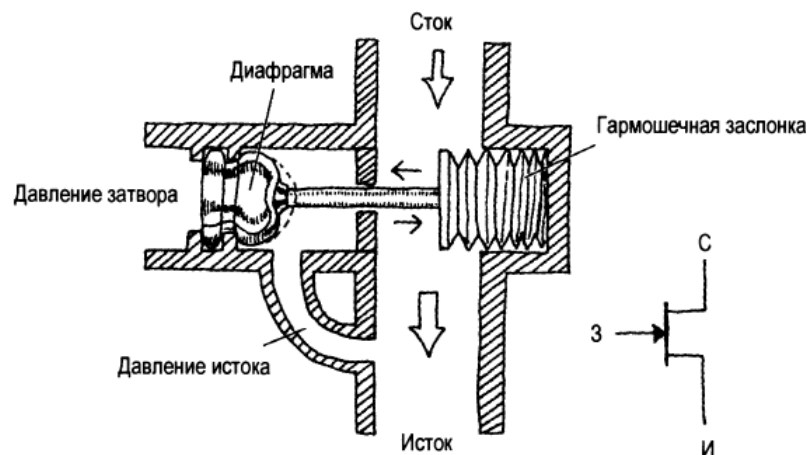
Чаще (б) создают p-nпереходы с двух сторон пластины на противоположных гранях – и электрически соединяют обе p-области в один вывод затвора.

в), г) – УГО полевых транзисторов с каналом n и p типа.

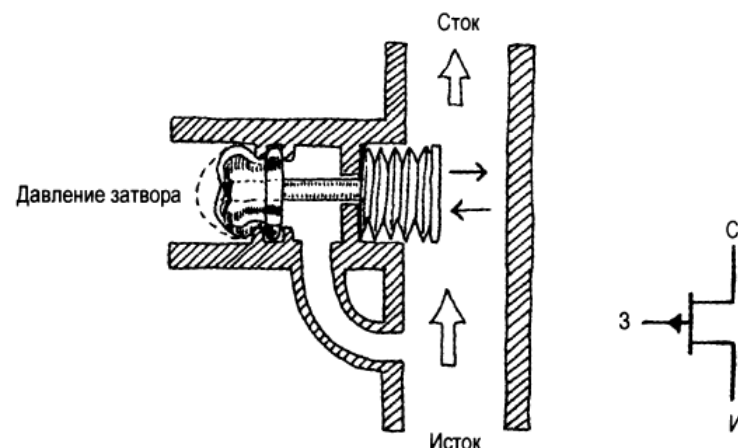
д) – схема включения полевого транзистора .

Между истоком и стоком подается напряжение такой полярности, чтобы основные носители заряда (электроны в канале n-типа) двигались по каналу в направлении от истока к стоку.

## Водяная аналогия ПТ с управляющим переходом



Водяная аналогия полевого транзистора с *n*-каналом



Водяная аналогия полевого транзистора с *p*-каналом

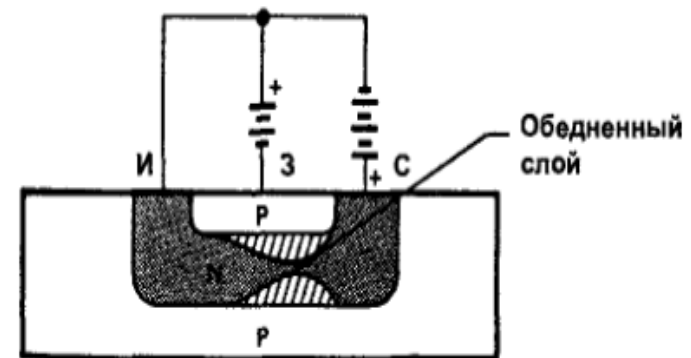
Когда на затворе водяного полевого транзистора устанавливается меньшее давление (отрицательное напряжение) относительно истока, диафрагма втягивается, увлекая за собой шток и заслонку, перекрывая канал.

Положительное давление (положительное напряжение) выталкивает заслонку в канал, уменьшая поток воды.

## Полевой транзистор с управляющим p-n переходом

Работа полевых транзисторов с p-n переходом требует двух внешних источников смещения. Один из источников ( $E_{СИ}$ ) подсоединяется между стоком и истоком, заставляя ток течь через канал. Другой источник ( $E_{ЗИ}$ ) подсоединяется между затвором и истоком. Он управляет величиной тока, текущего через канал. На рисунке показан правильно смещенный полевой транзистор с каналом n-типа. Напряжение затвор-исток ( $E_{ЗИ}$ ) подается таким образом, чтобы затвор имел отрицательный потенциал по отношению к истоку, это создает обедненный слой в окрестности p-n перехода (обратное включение p-n перехода). Размером обедненного слоя управляет напряжение ( $E_{ЗИ}$ ). При увеличении  $E_{ЗИ}$  толщина обедненного слоя увеличивается, при уменьшении толщина обедненного слоя уменьшается. Также  $E_{ЗИ}$  можно использовать для управления током стока  $I_C$ , который протекает через канал.

Увеличение  $E_{ЗИ}$  уменьшает ток.



## Полевой транзистор с управляющим p-n переходом

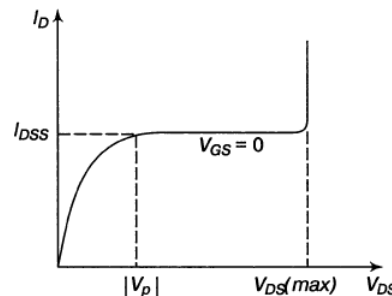
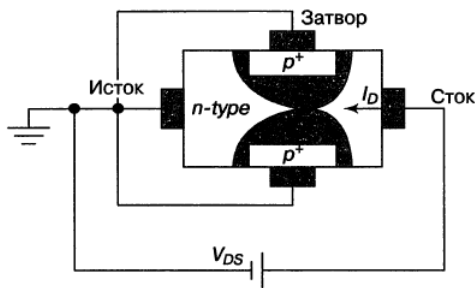
При обычной работе входное напряжение прикладывается между затвором и истоком. Результирующим выходным током является ток стока ( $I_C$ ). В полевом транзисторе с управляющим p-n переходом входное напряжение используется для управления выходным током.

Поскольку переход затвор-исток смещен в обратном направлении, полевой транзистор с управляющим p-n переходом имеет очень высокое входное сопротивление. Если переход затвор-исток сместить в прямом направлении, через канал потечет большой ток, что послужит причиной падения входного сопротивления и уменьшения усиления транзистора. Величина напряжения, требуемая для уменьшения тока  $I_C$  до нуля, называется **напряжением отсечки** затвор-исток ( $E_{\text{зиотс}}$ ). Это значение указывается производителем транзистора.

Напряжение сток-исток ( $E_{\text{си}}$ ) управляет размером обедненного слоя в полевых транзисторах с управляющим p-n переходом. При увеличении  $E_{\text{си}}$ , увеличивается также  $I_C$ . При некотором значении  $E_{\text{си}}$  величина  $I_C$  перестает расти, достигая насыщения при дальнейшем увеличении  $E_{\text{си}}$ . Значение  $E_{\text{си}}$ , при котором  $I_C$  достигает насыщения, называется **напряжением насыщения** ( $E_H$ ). Величина  $E_H$  обычно указывается производителем при значении  $E_{\text{зи}}$  равном нулю.



## Полевой транзистор с управляющим р-n переходом

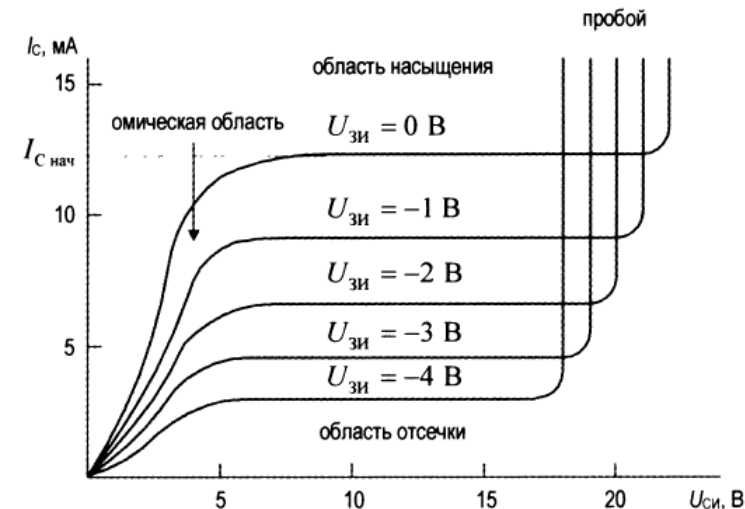
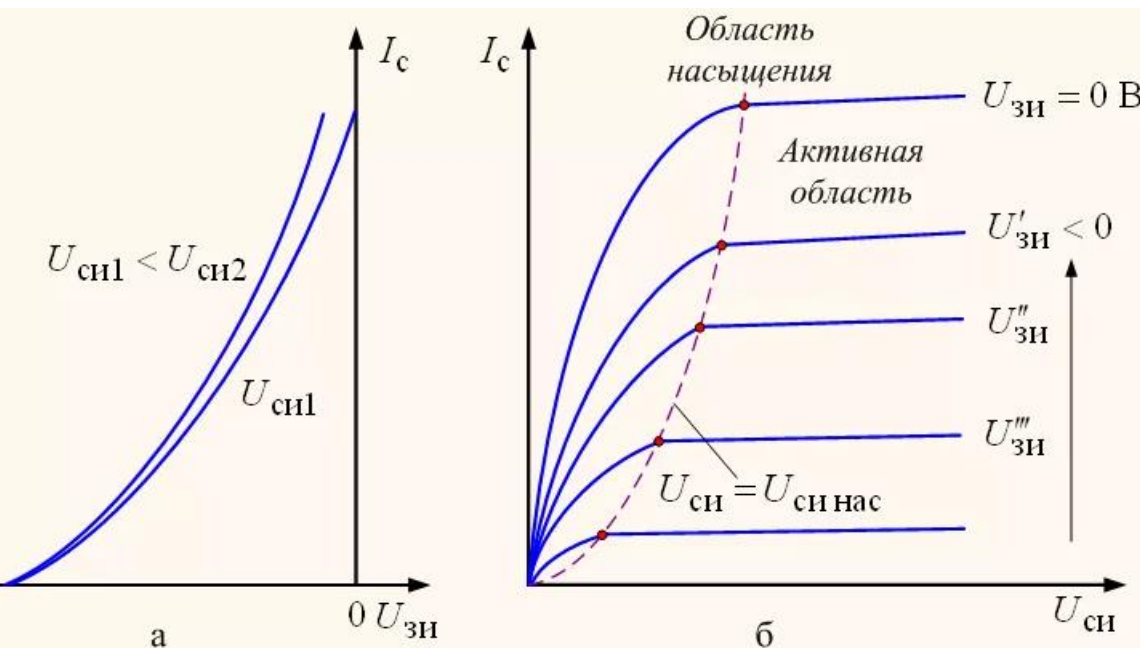


До точки отсечки справедливы  
соотношения

$$I_D = V_{DS} / R_{DS} \quad \text{Ток стока}$$

$$R_{DS} = \frac{L}{\sigma A}$$

Сопротивление канала  
A – площадь сечения  
канала



ПТ с n-каналом

## ВАХ полевого транзистора с управляющим р-п переходом

Основные ВАХ:

- выходные (стоковые);
- передаточные (стоко-затворные)

Стоковая характеристика –  $I_c = f(U_{си})$  при  $U_{зи} = \text{const.}$

При  $U_{зи}=0$  канал имеет максимальное рабочее сечение.

Начальный участок – малые значения  $U_{си}$  не влияют на

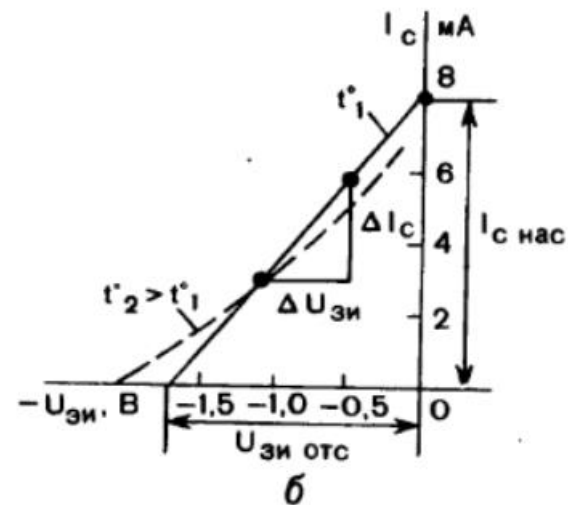
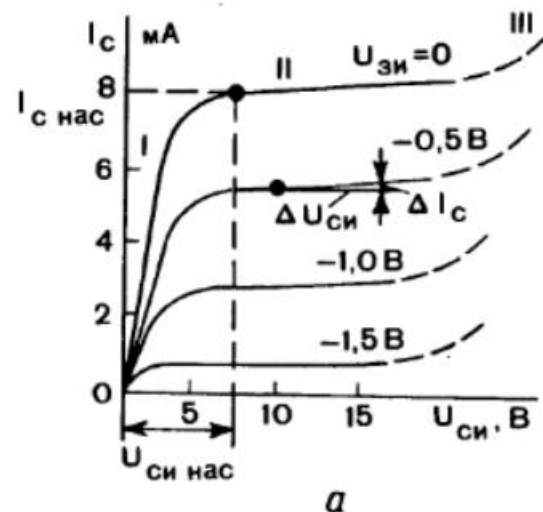
канал, канал полностью открыт,  $I_c$  прямо пропорционален  $U_{си}$ .

При дальнейшем увеличении  $U_{си}$  возрастает потенциал точек канала в направлении к стоку и рост обратного напряжения на р-п переходе, которое при  $U_{зи}=0$ , у стокового конца равно  $U_{си}$ .

По мере увеличения  $U_{си}$  происходит сужение канала, уменьшается проводимость, замедляется рост  $I_c$ .

Максимальное сужение канала называется перекрытием канала, режим насыщения, этот участок является рабочим в усилителях.

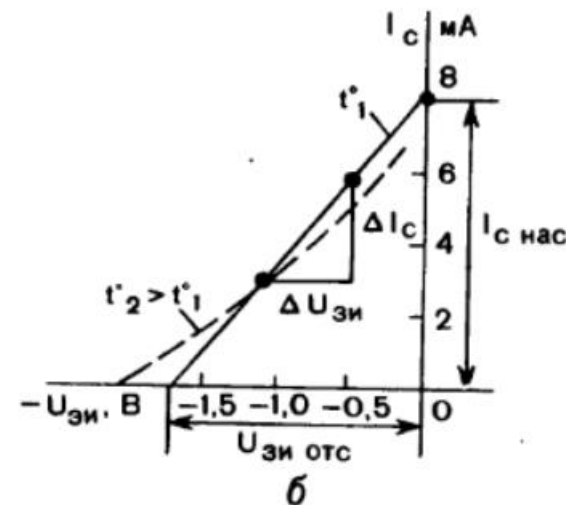
При дальнейшем увеличении  $U_{си}$  происходит лавинный пробой р-п перехода вблизи стока, где канал имеет наименьшее сечение.



## ВАХ полевого транзистора с управляющим р-п переходом

Стоко-затворная характеристика – зависимость тока стока от напряжения затвор-исток при неизменной величине напряжения  $U_{си}$   $I_c = f(U_{зи})$  при  $U_{си} = \text{const.}$  При данном постоянном значении  $U_{си}$ , взятом в рабочем режиме (на участке насыщения), и при  $U_{зи}=0$  точка характеристики лежит на оси тока и соответствует величине тока насыщения  $I_{нас}$ .

С увеличением напряжения  $U_{зи}$  по абсолютной величине проводимость канала уменьшается, что приводит к уменьшению тока.



Напряжение затвор-исток, при котором ток через канал прекращается, называют напряжением отсечки  $U_{зиотс}$ .

$$U_{си\text{ нас}} = U_{зи\text{ отс}} - U_{зи}.$$

Изменение температуры мало сказывается на работе полевого транзистора.



## Характеристики полевого транзистора с управляющим р-п переходом

**Статическая крутизна** характеристики  $S$  показывает влияние напряжения затвора на выходной ток транзистора и определяется как отношение приращения тока стока к вызвавшему его приращению напряжения затвор-исток при постоянном напряжении сток-исток.

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \text{ при } U_{си} = \text{const.}$$

**Внутреннее (дифференциальное) сопротивление**  $R_i$  показывает влияние напряжения сток-исток на выходной ток транзистора, определяется на участке насыщения как отношение приращения напряжения сток-исток к вызываемому им малому приращению тока стока при постоянном напряжении затвор-исток.

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

Усилительные свойства ПТ характеризуются **статическим коэффициентом усиления** по напряжению  $\mu = SR_i$ .

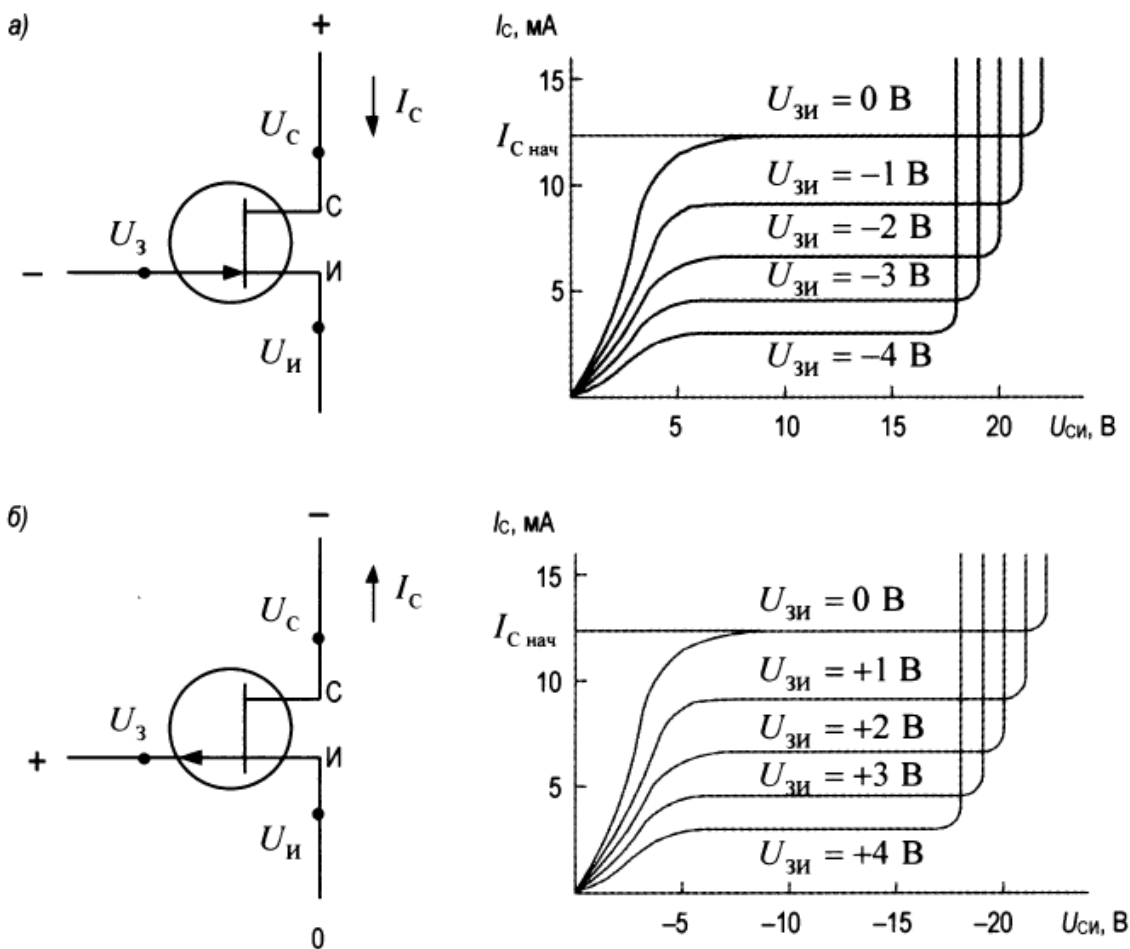
Коэффициент усиления показывает, во сколько раз изменение напряжения затвор-исток сильнее влияет на ток стока, чем такое же изменение напряжения сток-исток.

$$\mu = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}} \text{ при } I_c = \text{const.}$$





# ПТ с управляющим переходом. Резюме.





## ПТ с управляющим переходом. Резюме.

- ♦ **Омическая область.** Полевой транзистор только начинает сопротивляться протеканию через него тока. В данной области он функционирует подобно варистору.
- ♦ **Область насыщения.** В этой области полевой транзистор испытывает самое сильное воздействие напряжения затвор-исток и практически не испытывает воздействия напряжения сток-исток.
- ♦ **Напряжение отсечки** ( $U_{ЗИ\text{ отс}}, V_{GS,off}$ ). Определенное напряжение, при котором полевой транзистор функционирует подобно разрыву в цепи (сопротивление канала максимальное).
- ♦ **Напряжение пробоя** ( $U_{СИ\text{ проб}}, BV_{DS}$ ). Напряжение между стоком и истоком, вызывающее пробой (практически полное отсутствие сопротивления протеканию тока) в канале полевого транзистора.
- ♦ **Начальный ток стока** ( $I_{C\text{ нач}}, I_{DSS}$ ). Ток стока при нулевом напряжении затвор-исток (или при подсоединенном к стоку затворе,  $U_{ЗИ} = 0\text{ В}$ ).
- ♦ **Крутизна характеристики полевого транзистора** ( $S, g_m$ ). Скорость изменения тока стока в зависимости от изменения напряжения затвор-исток при определенном фиксированном значении напряжения  $U_{СИ}$ . Аналогично взаимной проводимости ( $1/r_{nc}$ ) биполярных транзисторов.



# ПТ с управляющим переходом. Резюме.

## Полезные формулы

| Название, формула  | Описание   |
|--|--|
| <p>Ток стока (омическая область)</p> $I_C = I_{C \text{ нач}} \left[ 2 \left( 1 - \frac{U_{\text{зи}}}{U_{\text{зи отс}}} \right) \frac{U_{\text{си}}}{-U_{\text{зи отс}}} - \left( \frac{U_{\text{си}}}{U_{\text{зи отс}}} \right)^2 \right]$                             | <p>Напряжение <math>U_{\text{зи отс}}</math> полевого транзистора с <math>n</math>-каналом отрицательное. Напряжение <math>U_{\text{зи отс}}</math> полевого транзистора с <math>p</math>-каналом положительное</p>  |
| <p>Ток стока (активная область)</p> $I_C = I_{C \text{ нач}} \left( 1 - \frac{U_{\text{зи}}}{U_{\text{зи отс}}} \right)^2$   | <p>Параметры <math>U_{\text{зи отс}}</math> и <math>I_{C \text{ нач}}</math> обычно известны (из таблицы параметров справочника или справочного листа устройства)</p>  |
| <p>Сопротивление сток-исток</p> $R_{\text{си}} = \frac{U_{\text{си}}}{I_C} \approx \frac{U_{\text{зи отс}}}{2I_{C \text{ нач}} (U_{\text{зи}} - U_{\text{зи отс}})} = \frac{1}{S}$   |  |
| <p>Сопротивление во включенном состоянии</p> $R_{\text{си отк}} = \text{const}$  |  |
| <p>Напряжение сток-исток</p> $U_{\text{си}} = U_C - U_{\text{и}}$  | <p>Типичные параметры полевого транзистора:</p> <p><math>I_{C \text{ нач}}</math>: от 1 мА до 1 А;</p> <p><math>U_{\text{зи отс}}</math>: от -0,5 до -10 В (<math>n</math>-канал); от 0,5 до 10 В (<math>p</math>-канал);</p> <p><math>R_{\text{си отк}}</math>: от 10 до 1000 Ом;</p> <p><math>U_{\text{си проб}}</math>: от 6 до 50 В;</p> <p><math>S</math> при 1 мА: от 500 до 3000 мкСм</p> |
| <p>Крутизна характеристики полевого транзистора</p> $S = \left. \frac{\partial I_C}{\partial U_{\text{зи}}} \right _{U_{\text{си}}} = \frac{1}{R_{\text{си}}} = S_0 \left( 1 - \frac{U_{\text{зи}}}{U_{\text{зи отс}}} \right) = S_0 \sqrt{\frac{I_C}{I_{C \text{ нач}}}}$ |  |
| <p>Крутизна характеристики полевого транзистора для короткозамкнутого затвора</p> $S_0 = \left  \frac{2I_{C \text{ нач}}}{U_{\text{зи отс}}} \right $  |  |
|  |  |

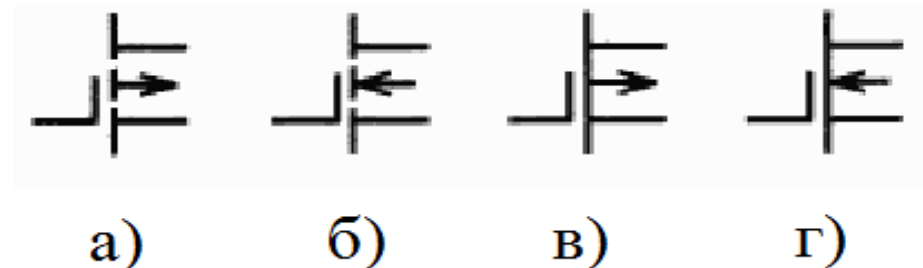
## МОП транзисторы

В полевых транзисторах с изолированным затвором не используют р-п переход. Вместо него применяется металлический затвор, электрически изолированный от полупроводникового канала тонким слоем окисла. Это устройство известно как полевой транзистор на основе структуры металл-окисел-полупроводник (МОП транзистор).

В зависимости от технологии изготовления различают две разновидности МДП-транзисторов: со встроенным каналом, созданным в процессе изготовления и с индуцированным каналом, который наводится электрическим полем под действием напряжения на затворе. Канал м.б. n-типа и p-типа.

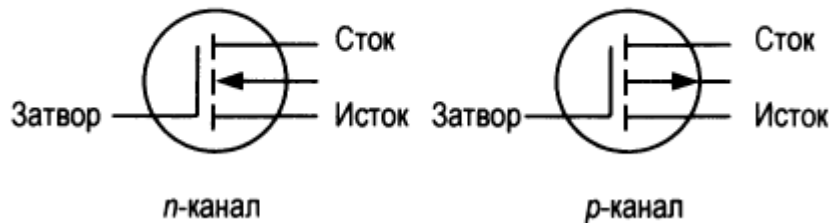
Существует два типа таких транзисторов: устройство n-типа с n-каналами и устройства p-типа с p-каналами. Устройства n-типа с n-каналами называются устройствами обедненного типа, так как они проводят ток при нулевом напряжении на затворе. Устройства p-типа с p-каналами называются устройствами обогащенного. Хотя полевые транзисторы обедненного типа с p-каналом и транзисторы обогащенного типа с n-каналом существуют, они обычно не используются. На рисунке показано УГО полевого транзистора с изолированным затвором:

- а) обогащенного типа с p-каналом,
- б) обогащенного типа с n-каналом,
- в) обедненного типа с p-каналом,
- г) обедненного типа с n-каналом.

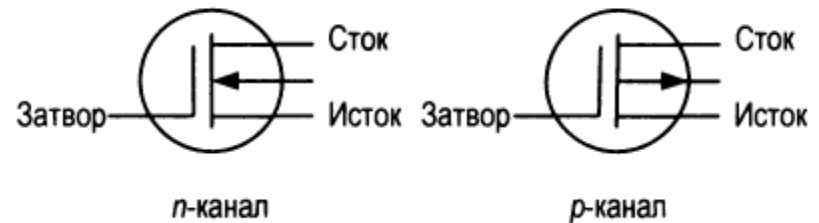


# МОП транзисторы

МОП-транзистор с обогащенным каналом



МОП-транзистор с обедненным каналом

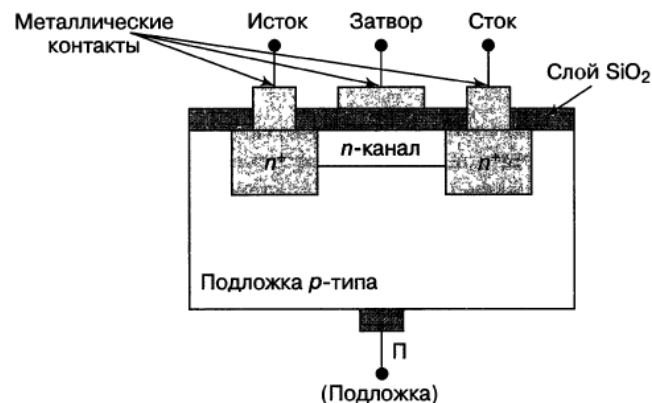


МОП-транзисторы с обедненным каналом нормально включены (по каналу сток-исток протекает максимальный ток), когда между затвором и истоком отсутствует разность потенциалов, а подача напряжения на затвор создает в канале сток-исток сопротивление протеканию тока, это поведение подобно поведению ПТ с управляющим переходом.

МОП-транзисторы с обогащенным каналом нормально выключены (по каналу сток-исток протекает минимальный ток), когда напряжение между затвором и истоком равно нулю. Подача напряжения между затвором и истоком уменьшает сопротивление протеканию тока в канале сток-исток.

## МОП транзисторы обедненного типа (со встроенным каналом)

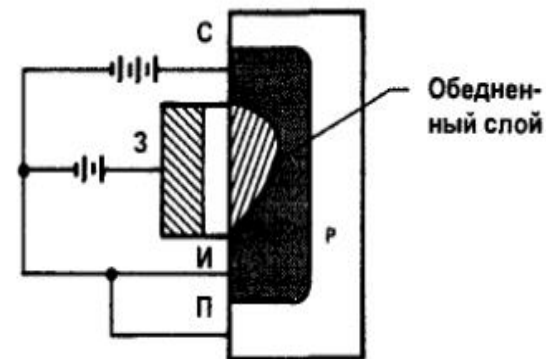
На рисунке приведено сечение полевого транзистора обедненного типа с  $n$ -каналом. Он образован имплантацией  $n$ -канала в подложку  $p$ -типа. После этого на канал наносится тонкий изолирующий слой двуокиси кремния, оставляющий края канала свободными для подсоединения выводов, стока и истока. После этого на изолирующий слой наносится тонкий металлический слой. Этот металлический слой служит затвором. Дополнительный вывод подсоединяется к подложке. Металлический слой изолирован от полупроводникового канала, так что затвор и канал не образуют  $p$ - $n$  – переход. Металлический затвор используется для управления проводимостью канала так же, как и в полевом транзисторе с  $p$ - $n$  – переходом.



## МОП транзисторы обедненного типа (со встроенным каналом)

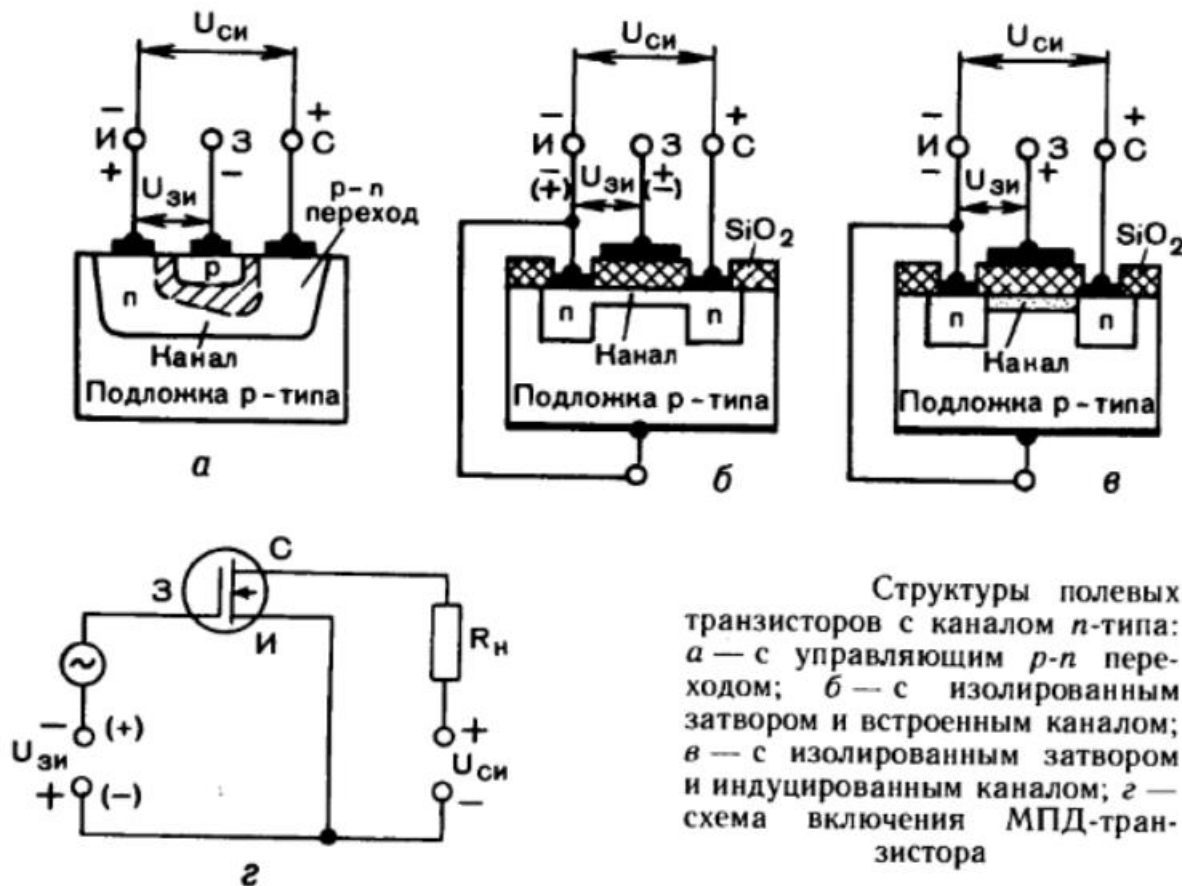
На рисунке изображен полевой транзистор с изолированным затвором и каналом n-типа при приложении напряжения смещения. В канале n-типа основными носителями являются электроны, обеспечивающие ток стока ( $I_C$ ). Величиной тока стока управляет напряжение смещения ( $E_{зи}$ ). Когда напряжение на истоке равно нулю, через устройство течет заметный ток стока, так как в канале имеется большое количество основных носителей (электронов). Когда на затворе отрицательный потенциал по отношению к истоку, ток стока уменьшается вследствие обеднения основных носителей. Если отрицательный потенциал достаточно велик, то ток стока падает до нуля.

Когда напряжение на затворе обедненного типа положительно, изолирующий слой предотвращает какой-либо ток через затвор. Отрицательное напряжение подается на затвор для обеднения n-канала МОП транзистора, он называется устройством обедненного режима. Когда напряжение на затворе равно нулю, через МОП транзистор течет большой ток стока. Все устройства обедненного типа обычно открываются при напряжении на затворе, равном нулю.





## МОП транзисторы обедненного типа (со встроенным каналом)







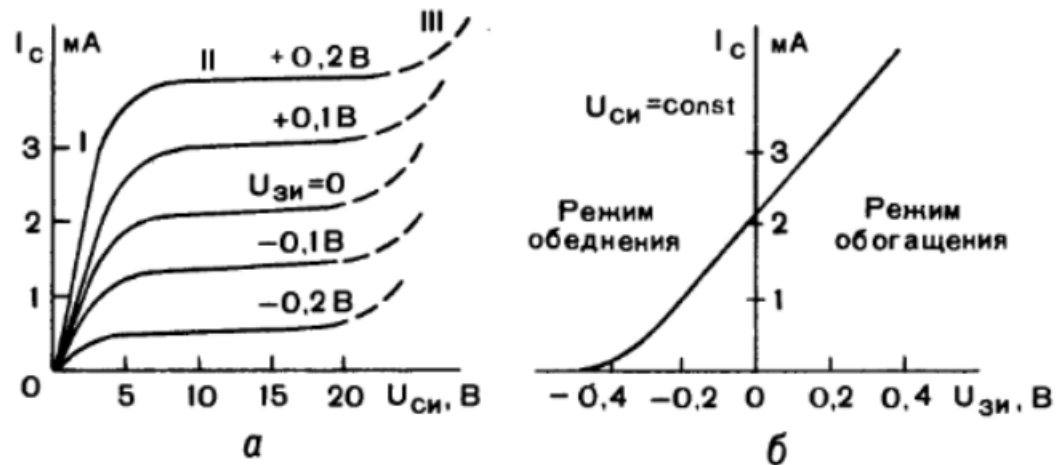
## МОП транзисторы обедненного типа (со встроенным каналом)

При  $U_{зи}=0$  через транзистор протекает ток под действием напряжения  $U_{си}$ . При увеличении  $U_{си}$  происходит пропорциональное увеличение  $I_c$ .

При дальнейшем увеличении  $U_{си}$  канал к стоку сужается, проводимость уменьшается, происходит плавный переход к насыщению – пологий участок кривой.

При подаче на затвор отрицательного напряжения относительно истока создается электрическое поле, которое отталкивает электроны, вытесняя их из канала в область подложки. Канал обедняется, проводимость его уменьшается.

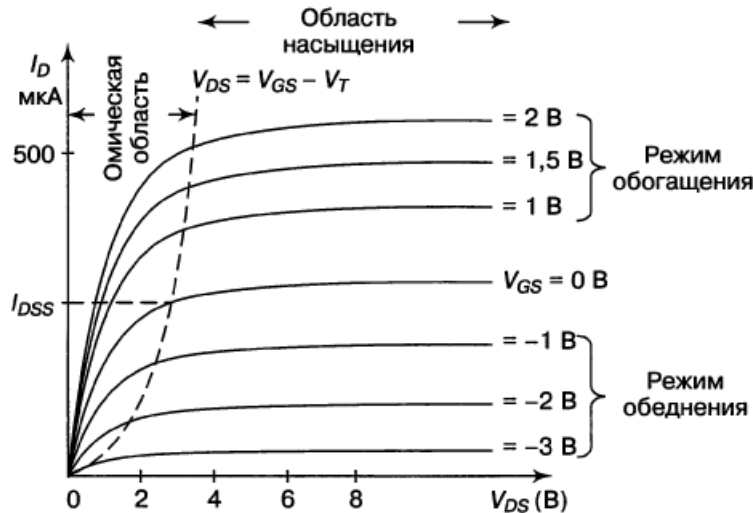
При подаче на затвор положительного напряжения относительно истока в транзисторе с каналом  $n$ -типа электрическое поле затвора притягивает электроны, втягивая их в канал из  $p$ -слоя и  $n$ -слоев истока и стока, канал обогащается, проводимость увеличивается.



Семейство стоковых характеристик (а) и стоко-затворная характеристика (б) МДП-транзистора со встроенным каналом  $n$ -типа

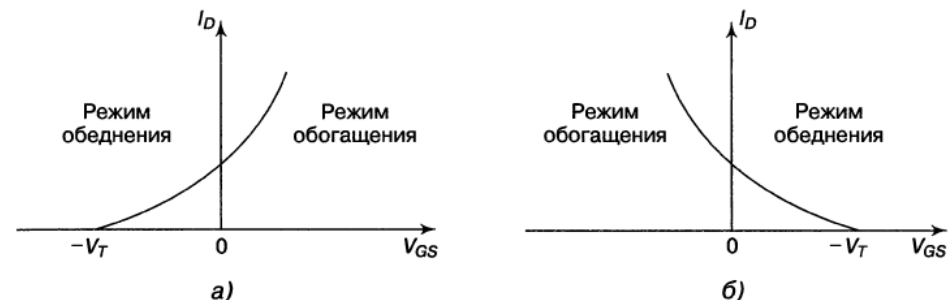


## МОП транзисторы обедненного типа (со встроенным каналом)



Отсутствие р-п перехода между затвором и областью канала у МОП-транзисторов допускает приложение положительного напряжения затвор-исток для обедненного n-МОП транзистора. Положительное напряжение создает поле, индуцирующее в канале больше подвижных отрицательных зарядов (электронов). Это повышает проводимость канала и увеличивает ток стока.

Говорят, что при положительном напряжении затвор-исток транзистор работает в режиме обогащения. Следовательно, обедненный МОП-транзистор может работать как в режиме обеднения, так и в режиме обогащения, и он называется обедненно-обогащенным МОП-транзистором.

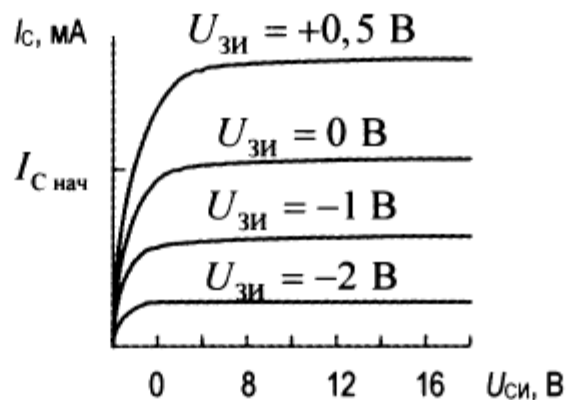
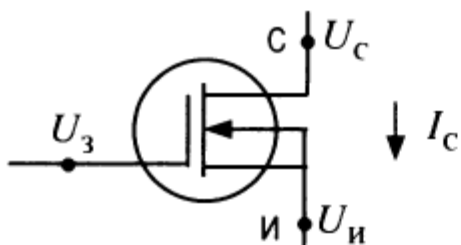


Передачная характеристика n-канального обедненного МОП-транзистора (а), передачная характеристика p-канального обедненного МОП-транзистора (б)

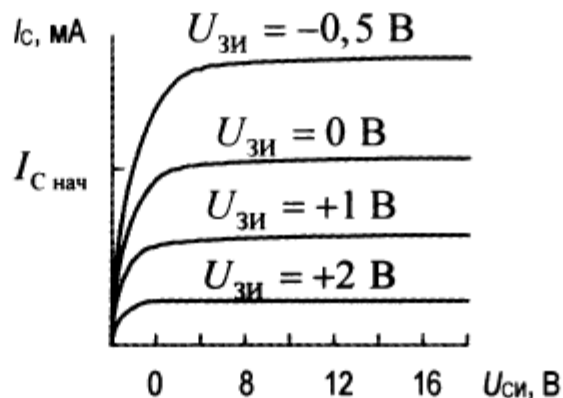
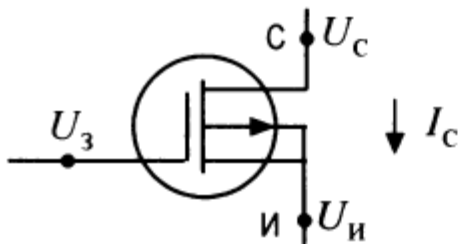


## МОП транзисторы обедненного типа (со встроенным каналом)

а)



б)



Кривые зависимости тока  $I_c$  полевых МОП-транзисторов с обедненным каналом  $n$ -типа (а) и  $p$ -типа (б) от напряжений на затворе и стоке



## МОП транзисторы обедненного типа (со встроенным каналом)

- ◆ **Омическая область.** Полевой МОП-транзистор только начинает сопротивляться протеканию через него тока. В этой области МОП-транзистор ведет себя подобно варистору.
- ◆ **Активная область.** В этой области полевой МОП-транзистор испытывает самое сильное воздействие напряжения затвор-исток ( $U_{зи}$ ) и практически не испытывает воздействия напряжения сток-исток ( $U_{си}$ ).
- ◆ **Напряжение отсечки** ( $U_{зи\text{отс}}, V_{GS,off}$ ). Часто называется также напряжением защемления ( $U_3$ , pinch-off voltage). Представляет определенное напряжение затвор-исток, заставляющее МОП-транзистор блокировать почти полностью протекание тока сток-исток.
- ◆ **Напряжение пробоя** ( $U_{си\text{проб}}, BV_{DS}$ ) — напряжение сток-исток ( $U_{си}$ ), вызывающее пробой током резистивного канала МОП-транзистора.
- ◆ **Начальный ток стока** ( $I_{с\text{нач}}, I_{DSS}$ ) — ток стока при нулевом напряжении затвор-исток (или при подсоединенном к стоку затворе,  $U_{зи} = 0$  В).
- ◆ **Крутизна характеристики транзистора** ( $S, g_m$ ) — скорость изменения тока стока в зависимости от изменения напряжения затвор-исток при определенном фиксированном значении напряжения сток-исток  $U_{си}$ . Аналогично взаимной проводимости ( $1/r_{пс}$ ) биполярных транзисторов.



# МОП транзисторы обедненного типа (со встроенным каналом)

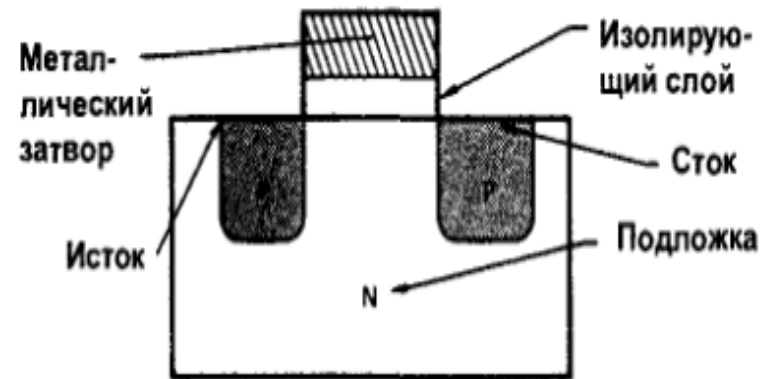
Полезные формулы для МОП-транзисторов с обедненным каналом

|  |   |
|--|---|
| <p>Ток стока (омическая область)</p> $I_C = I_{C \text{ нач}} \left[ 2 \left( 1 - \frac{U_{ЗИ}}{U_{ЗИ \text{ отс}}} \right) \frac{U_{СИ}}{-U_{ЗИ \text{ отс}}} - \left( \frac{U_{СИ}}{U_{ЗИ \text{ отс}}} \right)^2 \right]$           | <p>Напряжение <math>U_{ЗИ \text{ отс}}</math> полевого МОП-транзистора с <math>n</math>-каналом отрицательное. Напряжение <math>U_{ЗИ \text{ отс}}</math> полевого МОП-транзистора с <math>p</math>-каналом положительное</p>   |
| <p>Ток стока (активная область)</p> $I_C = I_{C \text{ нач}} \left( 1 - \frac{U_{ЗИ}}{U_{ЗИ \text{ отс}}} \right)^2$   | <p>Параметры <math>U_{ЗИ \text{ отс}}</math> и <math>I_{C \text{ нач}}</math> обычно известны (из таблицы параметров справочника или справочного листка устройства)</p>   |
| <p>Сопротивление сток-исток</p> $R_{СИ} = \frac{U_{СИ}}{I_C} \approx \frac{U_{ЗИ \text{ отс}}}{2I_{C \text{ нач}} (U_{ЗИ} - U_{ЗИ \text{ отс}})} = \frac{1}{S}$  |   |
| <p>Сопротивление во включенном состоянии</p> $R_{СИ \text{ отк}} = \text{const}$   |   |
| <p>Напряжение сток-исток</p> $U_{СИ} = U_C - U_{И}$  | <p>Типичные параметры полевого МОП-транзистора:</p> <p><math>I_{C \text{ нач}}</math>: от 1 мА до 1 А;</p> <p><math>U_{ЗИ \text{ отс}}</math>: от -0,5 до -10 В (<math>n</math>-канал); от 0,5 до 10 В (<math>p</math>-канал);</p> <p><math>R_{СИ \text{ отк}}</math>: от 10 до 1000 Ом;</p> <p><math>U_{СИ \text{ проб}}</math>: от 6 до 50 В;</p> <p><math>S</math> при 1 мА: от 500 до 3000 мкСм</p> |
| <p>Крутизна характеристики транзистора</p> $S = \left. \frac{\partial I_C}{\partial U_{ЗИ}} \right _{U_{СИ}} = \frac{1}{R_{СИ}} = S_0 \left( 1 - \frac{U_{ЗИ}}{U_{ЗИ \text{ отс}}} \right) = S_0 \sqrt{\frac{I_C}{I_{C \text{ нач}}}}$ |   |
| <p>Крутизна характеристики транзистора для короткозамкнутого затвора</p> $S_0 = \left  \frac{2I_{C \text{ нач}}}{U_{ЗИ \text{ отс}}} \right $  |   |

## МОП транзисторы обогащенного типа (с индуцированным каналом)

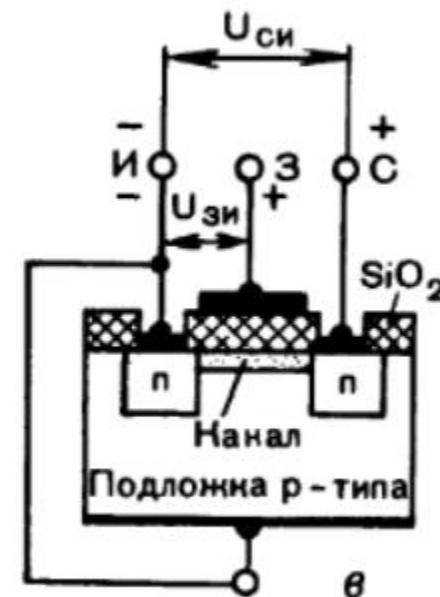
МОП транзистор обогащенного типа - это устройство, которое в нормальном состоянии закрыто, т.е. устройство, проводящее ток только тогда, когда приложено напряжение  $E_{зи}$  соответствующей величины. На рисунке изображен МОП транзистор, работающий как устройство, закрытое в нормальном состоянии. Он подобен МОП транзистору обедненного типа, но не имеет проводящего канала. Вместо этого в подложку внедрены отдельные области стока и истока. На рисунке показана подложка n-типа и области стока и истока p-типа. Может также быть использована и обратная конфигурация.

Расположение выводов такое же, как и у МОП транзистора обедненного типа.



## МОП транзисторы обогащенного типа (с индуцированным каналом)

МОП транзистор обогащенного типа с n-каналом должен быть смещен таким образом, чтобы на стоке был положительный потенциал по отношению к истоку. Когда к транзистору приложено только напряжение сток-исток ( $E_{си}$ ), ток стока отсутствует. Это обусловлено отсутствием проводящего канала между истоком и стоком. Когда на затвор подается положительный потенциал по отношению к истоку, дырки подложки от приповерхностного слоя под затвором отталкиваются в глубину полупроводника, а электроны притягиваются в этот слой к границе с диэлектриком, т.е. образуется (индуцируется) проводящий канал n-типа).



При увеличении отрицательного напряжения на затворе размер канала увеличивается, что позволяет увеличиваться и току стока. Увеличение напряжения на затворе позволяет увеличить ток стока.

Потенциал затвора МОП транзистора с p-каналом обогащенного типа может быть сделан положительным по отношению к истоку и это не повлияет на работу транзистора. Ток стока в нормальном состоянии равен нулю и не может быть уменьшен подачей положительного потенциала на затвор.

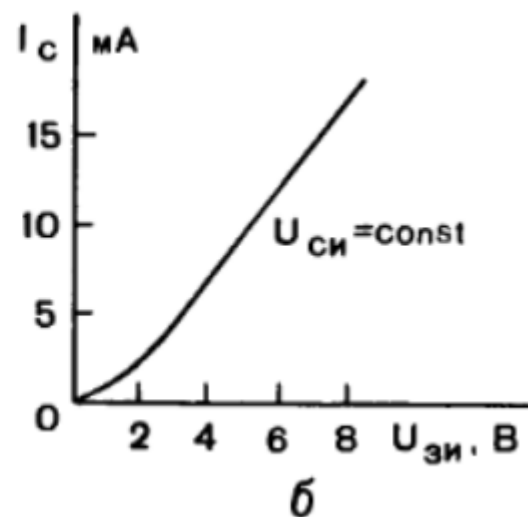
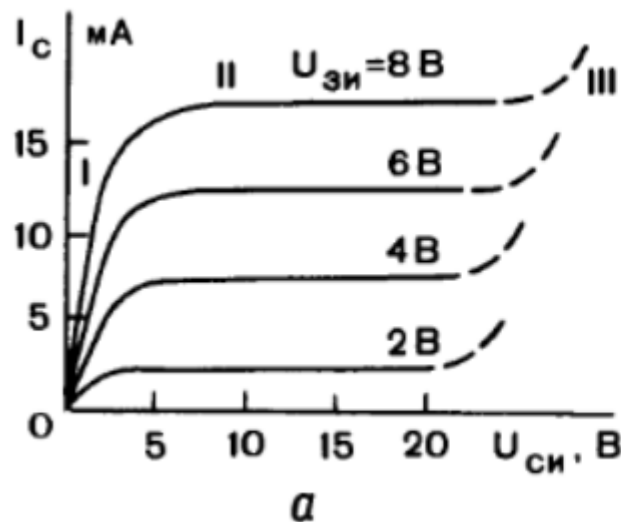




## МОП транзисторы обогащенного типа (с индуцированным каналом) Семейство ВАХ

Стоковая характеристика аналогична по виду характеристикам транзисторов с р-п переходом и МОП-транзисторов со встроенным каналом, но имеют иное расположение с изменением постоянного напряжения  $U_{зи}$ . При  $U_{зи}=0$   $I_c=0$ , поэтому характеристика сливается с осью абсцисс.

Стоко-затворная характеристика выходит из точки на оси напряжений, соответствующей пороговому значению напряжения затвор-исток  $U_{зи}$  пор. Характеристика идет сначала полого, затем практически линейно круто вверх







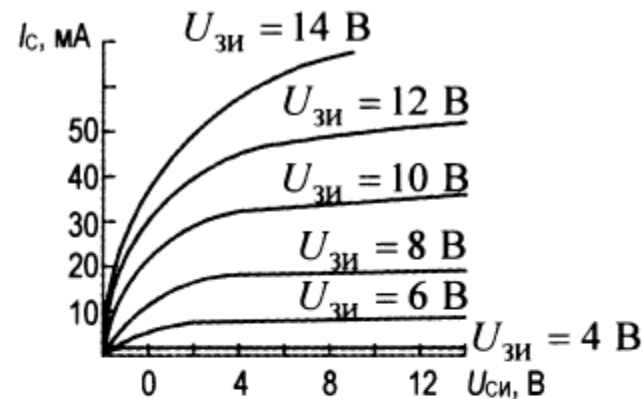
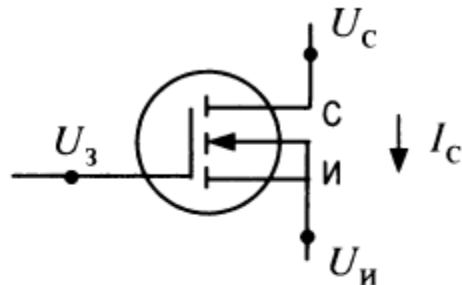
## МОП транзисторы обогащенного типа (с индуцированным каналом)

- ♦ **Омическая область.** Полевой МОП-транзистор только начинает проводить ток. В данной области он функционирует подобно варистору.
- ♦ **Активная область.** В этой области полевой МОП-транзистор испытывает самое сильное воздействие напряжения затвор-исток ( $U_{зи}$ ) и практически не испытывает воздействия напряжения сток-исток ( $U_{си}$ ).
- ♦ **Пороговое напряжение** ( $U_{зи\text{ пор}}, V_{GS,th}$ ) — определенное напряжение затвор-исток, при котором МОП-транзистор только начинает переходить в режим проводимости.
- ♦ **Напряжение пробоя** ( $U_{си\text{ проб}}, BV_{DS}$ ) — напряжение сток-исток ( $U_{си}$ ), вызывающее пробой током резистивного канала МОП-транзистора.
- ♦ **Начальный ток истока** ( $I_{C\text{ нач}}, I_{DSS}$ ) — ток стока  $I_C$  при определенном напряжении  $U_{зи}$ , которое указывается на справочных листках на изделие или в других справочных материалах.
- ♦ **Крутизна характеристики транзистора** ( $S, g_m$ ) — скорость изменения тока стока в зависимости от изменения напряжения затвор-исток при определенном фиксированном значении напряжения сток-исток  $U_{си}$ . Аналогично взаимной проводимости ( $1/r_{пс}$ ) биполярных транзисторов.

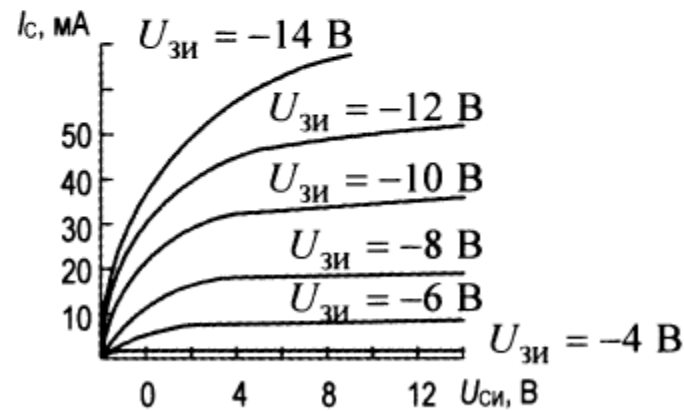
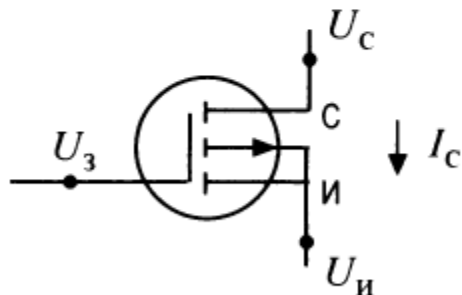


## МОП транзисторы обогащенного типа (с индуцированным каналом)

а)



б)



Кривые зависимости тока  $I_{с}$  полевых МОП-транзисторов с обогащенным каналом  $n$ -типа (а) и  $p$ -типа (б) от напряжений на затворе и стоке



## МОП транзисторы обогащенного типа (с индуцированным каналом)

Полезные формулы для МОП-транзисторов с обогащенным каналом

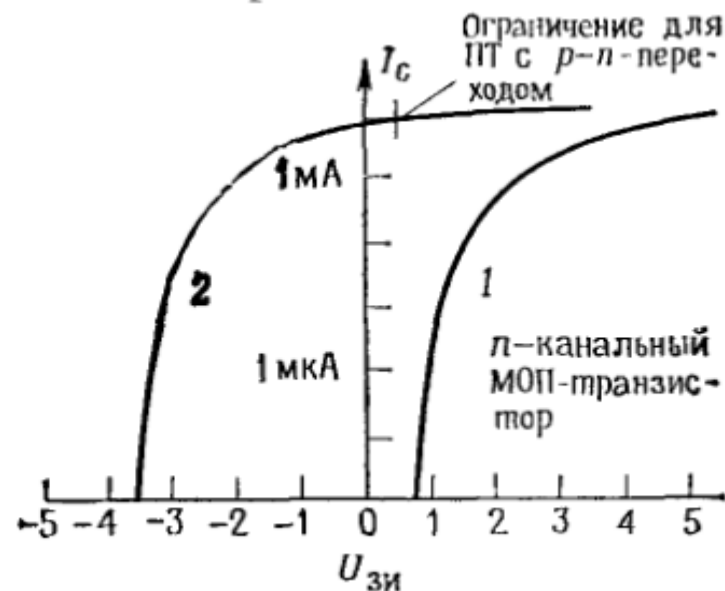
|  |  |
|--|--|
| <p>Ток стока (омическая область)</p> $I_C = k \left[ 2(U_{ЗИ} - U_{ЗИ\ пор})U_{СИ} - \frac{1}{2}U_{СИ}^2 \right]$  | <p>Значение параметра построения <math>k</math> пропорционально отношению ширина/длина канала транзистора и зависит от температуры. Его можно определить с помощью соответствующих уравнений</p>   |
| <p>Ток стока (активная область)</p> $I_C = k(U_{ЗИ} - U_{ЗИ\ пор})^2$  | <p>Пороговое напряжение <math>U_{ЗИ\ пор}</math> положительное для МОП-транзисторов с обогащенным каналом <math>n</math>-типа.<br/>Пороговое напряжение <math>U_{ЗИ\ пор}</math> отрицательное для МОП-транзисторов с обогащенным каналом <math>p</math>-типа</p>              |
| <p>Параметр построения</p> $k = \frac{I_C}{(U_{ЗИ} - U_{ЗИ\ пор})^2}$ $k = \frac{I_{C\ нач}}{(U_{ЗИ, ВКЛ} - U_{ЗИ\ пор})^2}$   | <p>Типичные значения:</p> <p><math>I_{C\ нач}</math>: от 1 мА до 1 А;<br/> <math>R_{СИ\ отк}</math>: от 1 Ом до 10 кОм;<br/> <math>U_{ЗИ\ отс}</math>: от 0,5 до 10 В;<br/> <math>U_{СИ\ проб(отс)}</math>: от 6 до 50 В;<br/> <math>U_{З\ проб(отс)}</math>: от 6 до 50 В</p> |
| <p>Крутизна характеристики транзистора</p> $S = \left. \frac{\partial I_C}{\partial U_{ЗИ}} \right _{U_{СИ}} = \frac{1}{R_{СИ}} = 2k(U_{ЗИ} - U_{ЗИ\ пор}) =$ $= 2\sqrt{kI_C} = S_0 \sqrt{\frac{I_C}{I_{C\ нач}}}$ | <p>Параметры <math>U_{ЗИ\ пор}</math>, <math>I_{C\ нач}</math> и <math>S</math> для определенного тока <math>I_C</math> обычно известны, их можно найти в справочнике технических характеристик или на упаковке изделия</p>  |
| <p>Сопротивление канала сток-исток</p> $R_{СИ} = 1/S$ $R_{СИ2} = \frac{U_{З1} - U_{ЗИ\ пор}}{U_{З2} - U_{ЗИ\ пор}} R_{СИ1}$  | <p>Сопротивление <math>R_{СИ1}</math> известно для данного напряжения <math>U_{З1}</math>. Сопротивление <math>R_{СИ1}</math> вычисляется для другого напряжения затвора <math>U_{З2}</math></p>   |

## График зависимости тока стока от напряжения между истоком и затвором

График зависимости тока стока от напряжения между истоком и затвором при постоянном значении напряжения стока приведен на рисунке:

обогащенные (1) и обедненные (2) ПТ

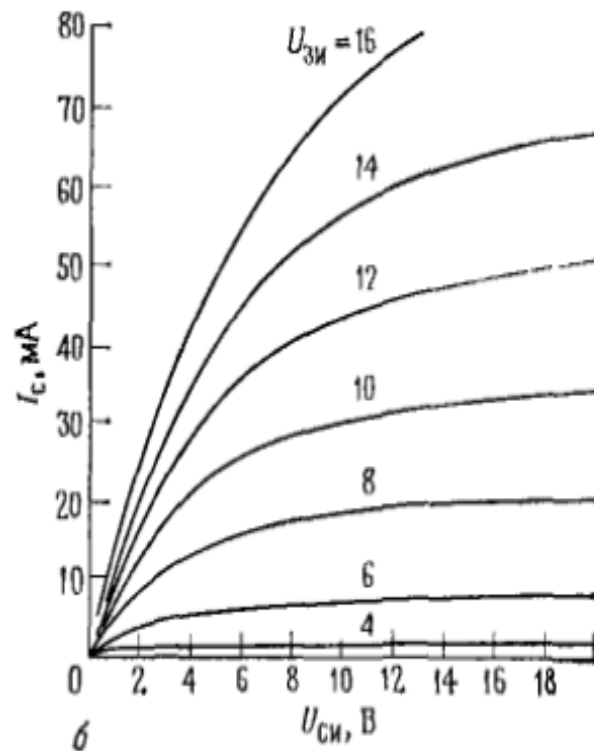
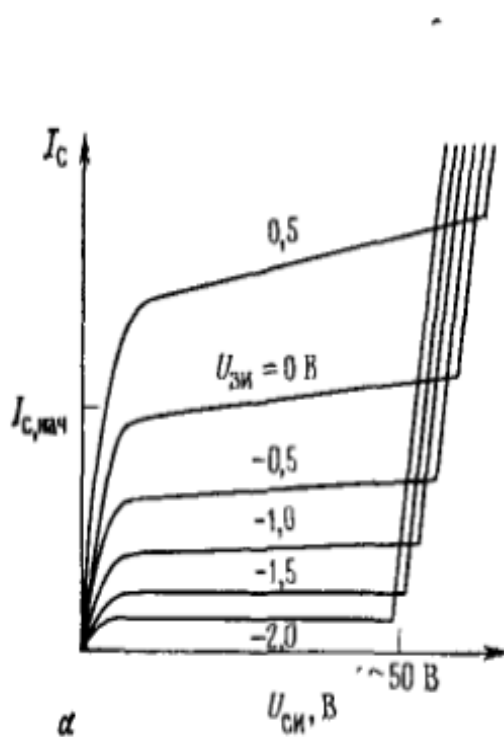
МОП транзистор обогащенного типа не дает тока, пока напряжение затвора не станет положительным по отношению к истоку, в то время, как МОП транзистор обедненного типа дает большой ток при одинаковом напряжении затвора и истока.





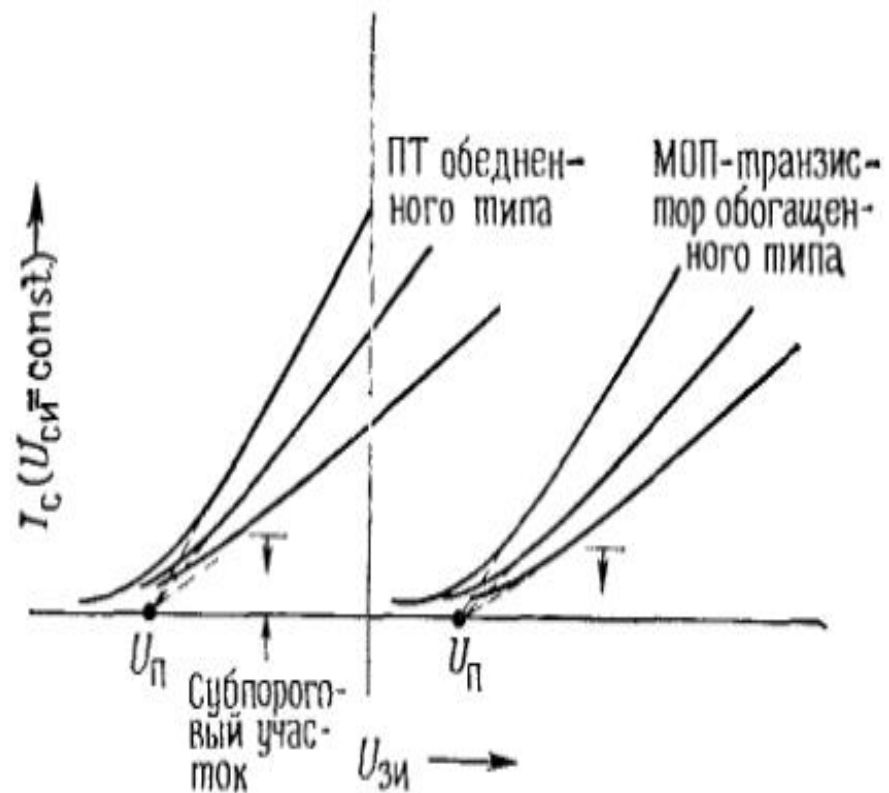
## Выходные характеристики ПТ

На рисунках показаны Выходные характеристики ПТ:  
а) п-канальный ПТ с р-п переходом; б) п-канальный МОП транзистор обогащенного типа



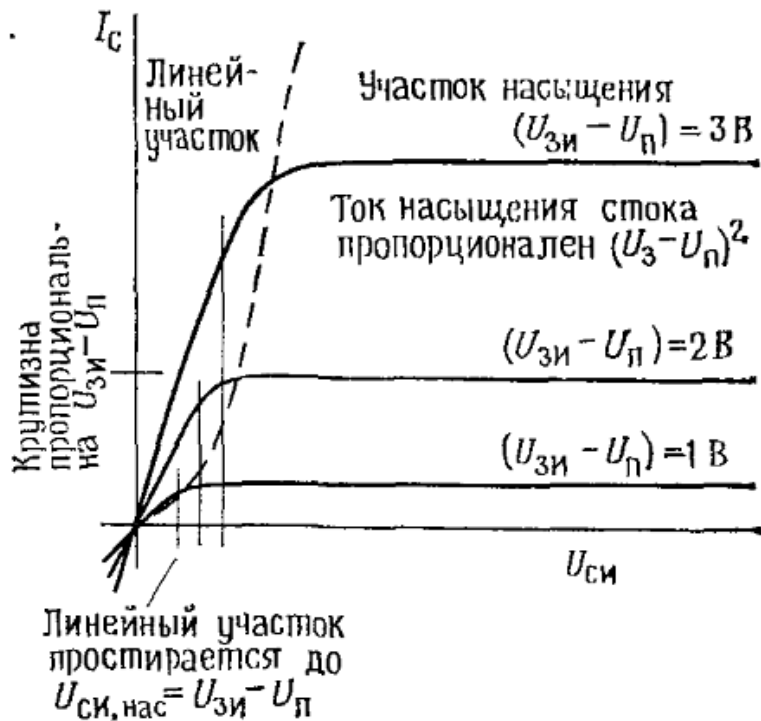
## Графики порогового напряжения

Пороговое напряжение (или напряжение отсечки для ПТ с р-п переходом) – это значение напряжения, при котором экстраполированный прямолинейный участок характеристики пересекает ось  $U_{зи}$ . Говоря другими словами, пороговое напряжение  $U_{п}$  указывается так, чтобы ток стока ПТ приблизительно определялся формулой:  $I_c = k(U_{зи} - U_{п})^2$  и чтобы большие отклонения имели место только в субпороговой области очень малых токов стока.

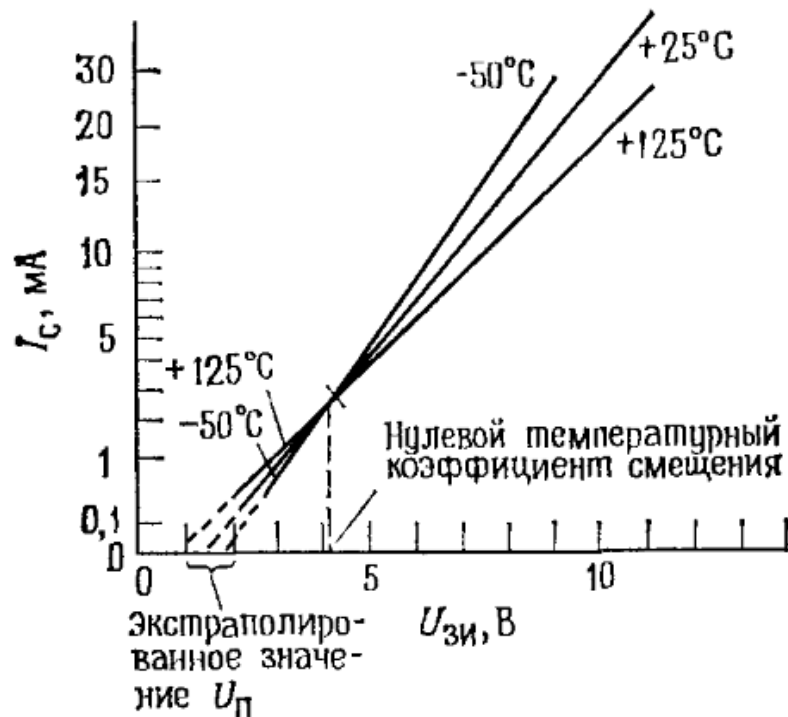




## Зависимость $I_c$ от $U_{зи}$ и $U_{си}$



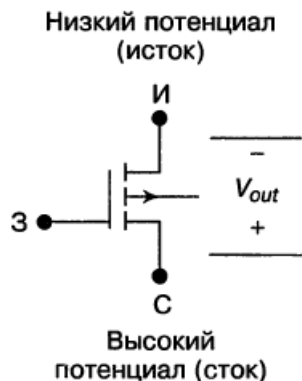
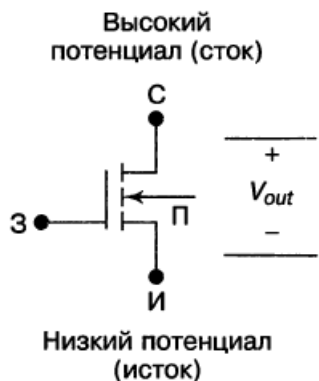
Зависимость  $I_c$  от  $U_{си}$



Зависимость  $I_c$  от  $U_{зи}$

## Симметрия МОП-транзисторов

МОП-транзистор имеет симметричную конструкцию, что позволяет менять между собой выводы стока и истока, если подложка внутри транзистора не подключена ни к одному концу канала.



В этом случае сток и исток теряют свою индивидуальность. Определить где исток, а где сток можно по их относительным потенциалам.

Например, у n-МОП транзистора сток должен быть при более высоком потенциале относительно истока. Вывод, обладающий более высоким потенциалом является стоком.



## Сравнение биполярных и полевых транзисторов

1. У полевых транзисторов чрезвычайно высокое входное сопротивление, обычно десятки и сотни МОм. Соответственно, полевым транзисторам для работы требуются чрезвычайно малые токи, что увеличивает их время работы от батареи.
2. В работе биполярных транзисторов доминируют диффузионные токи, а в полевых дрейфовые. Дрейф зарядов более быстрый процесс, чем диффузия зарядов. Полевые транзисторы удовлетворительно работают до очень высоких частот.
3. В интегральных схемах для формирования полевых транзисторов требуется меньшее число этапов, так как их структура проще. Они занимают в десять раз меньше места, чем биполярные транзисторы, что позволяет получить более высокую плотность размещения полевых транзисторов.
4. Полевые транзисторы менее чувствительны к ионизирующим излучениям. Биполярные транзисторы чувствительны к излучению, у них меняется коэффициент передачи тока.
5. При работе в качестве ключа у полевых транзисторов отсутствует смещение. Биполярным транзисторам, как минимум, требуется напряжение база-эмиттер 0,6 В.
6. Температурная стабильность полевых транзисторов лучше, они менее чувствительны к изменениям температуры.
7. У полевых транзисторов меньше коэффициент шума, они широко применяются в ЧМ-приемниках и входных каскадах усилителей малых сигналов.
8. Однако коэффициент усиления полевого транзистора меньше, они склонны к повреждению при обращении. Из-за высокого входного импеданса, малые токи производят большие напряжения.



## Контрольные вопросы

1. Какой прибор называют полевым транзистором, какие существуют виды полевых транзисторов и чем отличается их устройство?
2. Объясните принцип действия каждого вида полевых транзисторов.
3. Нарисуйте стоко-затворные характеристики каждого вида полевых транзисторов и объясните, чем они отличаются.
4. Покажите, как определяются по характеристикам основные параметров полевых транзисторов.
5. Приведите примеры обозначения биполярных и полевых транзисторов в зависимости от мощности и частоты.
6. На чем основано управление током стока в полевом транзисторе?
7. В каком направлении смещен электронно-дырочный переход полевого транзистора с управляющим р – п-переходом?
8. Чем принципиально отличается транзистор с изолированным затвором от обычного полевого транзистора с управляющим р-п-переходом.
9. Объяснить принцип действия полевого транзистора с управляющим р – п-переходом.
10. Как зависят параметры полевого транзистора от режима работы?

## Контрольные вопросы

11. Как зависят параметры полевого транзистора от температуры?
12. Чем отличается режим обеднения от режима обогащения?
13. Какой участок вольт-амперной характеристики полевого транзистора может использоваться для создания управляемого электрического сопротивления?
14. Какая структура у полевого транзистора с р-n – переходом? Как он работает?
15. Какие типы у полевых транзисторов с р-n – переходом?
16. Расскажите про отсечку в полевом транзисторе.
17. Что такое омическая область?
18. Что такое область насыщения?
19. Чем МОП-транзистор отличается от полевого транзистора с р-n – переходом?
20. Структура и принцип работы обедненного МОП-транзистора.
21. Структура и принцип работы обогащенного МОП-транзистора.
22. Как обедненный МОП-транзистор можно использовать в качестве обогащенного?



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**Спасибо за внимание!**

Санкт-Петербург, 2021