

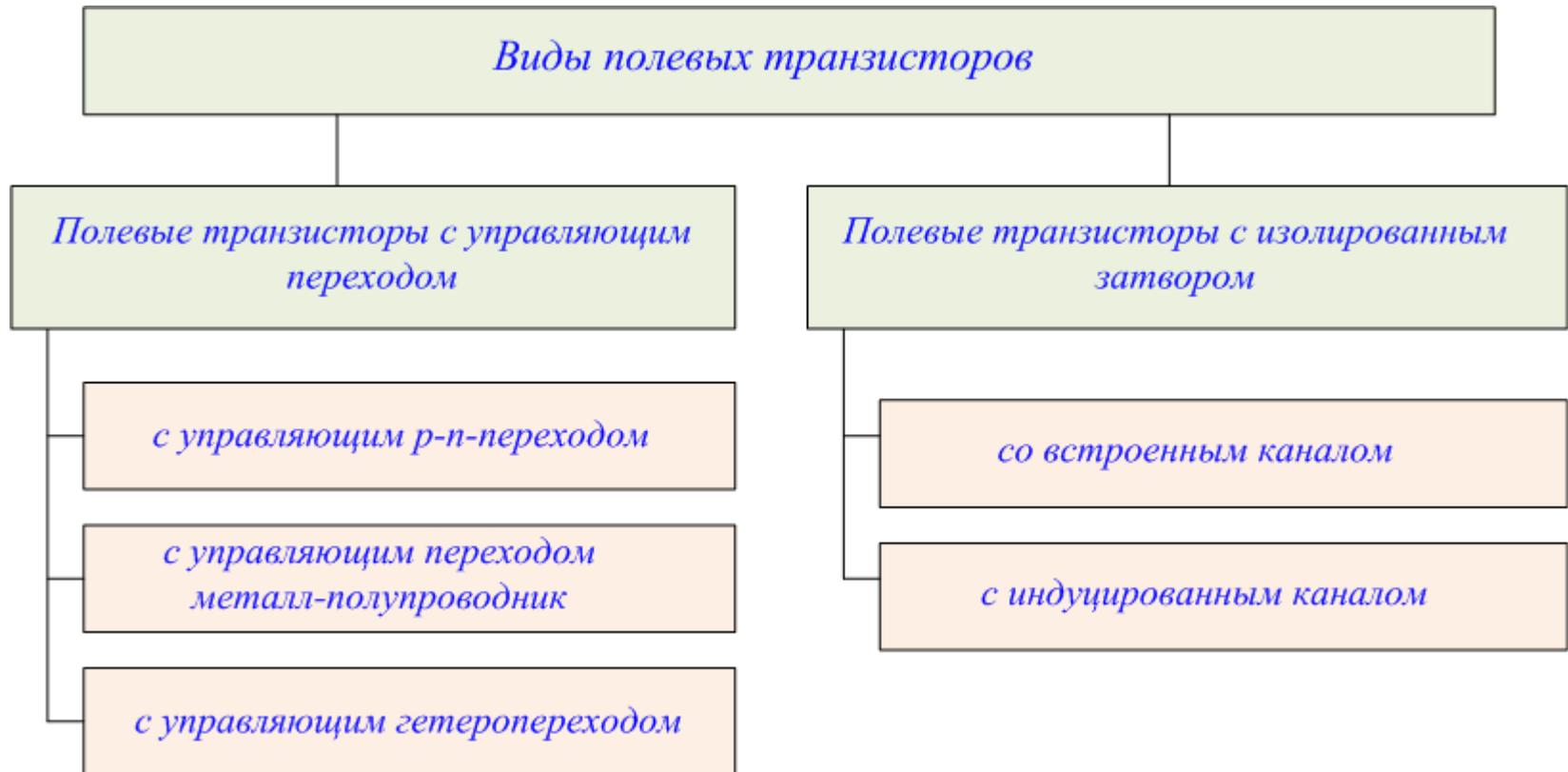
Дисциплина  
«Твердотельная электроника»  
ТЕМА 6: «Полевые транзисторы»



Легостаев Николай Степанович,  
профессор кафедры «Промышленная электроника»

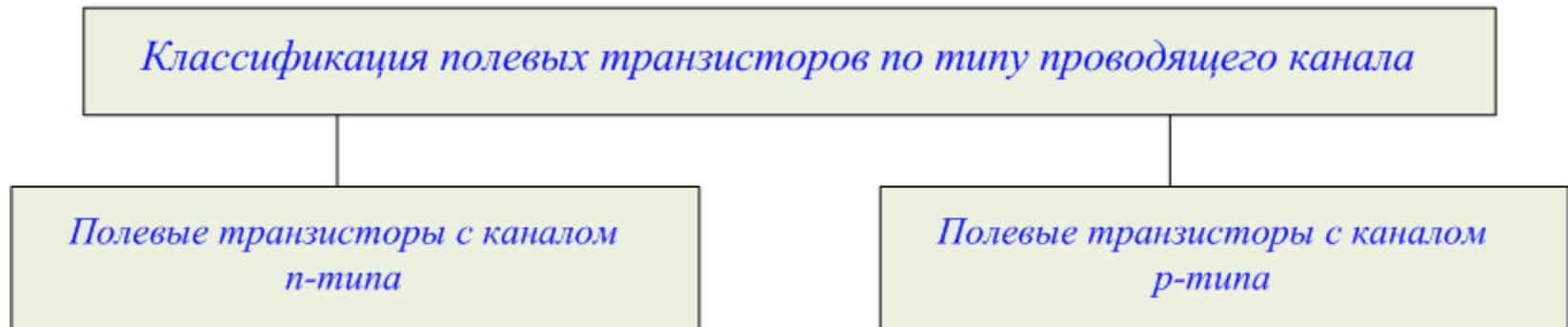
## Основные сведения о полевых транзисторах.

*Полевой (униполярный, канальный) транзистор – это активный полупроводниковый прибор, в котором используются эффект дрейфа основных носителей через проводящий канал под действием продольного электрического поля и эффект модуляции дрейфового тока поперечным электрическим полем.*



## Основные сведения о полевых транзисторах.

Название транзисторов «*униполярные*» обусловлено тем, что, в отличие от биполярных транзисторов, работа которых осуществляется за счет обоих типов подвижных носителей заряда (электронов и дырок), в основе работы полевых транзисторов лежит использование носителей заряда лишь одного знака (либо только электроны, либо только дырки).



*Канал* – область, в которой осуществляется дрейф основных носителей заряда и модуляция значения дрейфового тока. В большинстве структур полевых транзисторов канал представляет собой слаболегированный тонкий слой, расположенный либо непосредственно у поверхности подложки, либо на некотором расстоянии от поверхности и параллельно поверхности.

## Основные сведения о полевых транзисторах.

### Технологии изготовления управляющих переходов полевых транзисторов

#### Управляющий p-n-переход

на подложке из кремния p-типа создается эпитаксиальный слой n-типа, и методом диффузии формируются области затвора, стока и истока

#### Управляющий гетеропереход

изготавливают в основном методом эпитаксии химических соединений  $A^{III}B^V$  на кристаллы арсенида галлия.

#### Выпрямляющий переход металл-полупроводник

выполняют нанесением металла на кристаллы кремния, арсенида галлия или на различные гетероструктуры.

## Основные сведения о полевых транзисторах.

### Полупроводниковые области (электроды) полевых транзисторов

#### Подложка

пассивная область полупроводника, которая является конструктивной основой полевого транзистора

#### Сток

сильнолегированная область подложки, к которой дрейфуют основные носители заряда; также электрод, омически связанный с этой областью

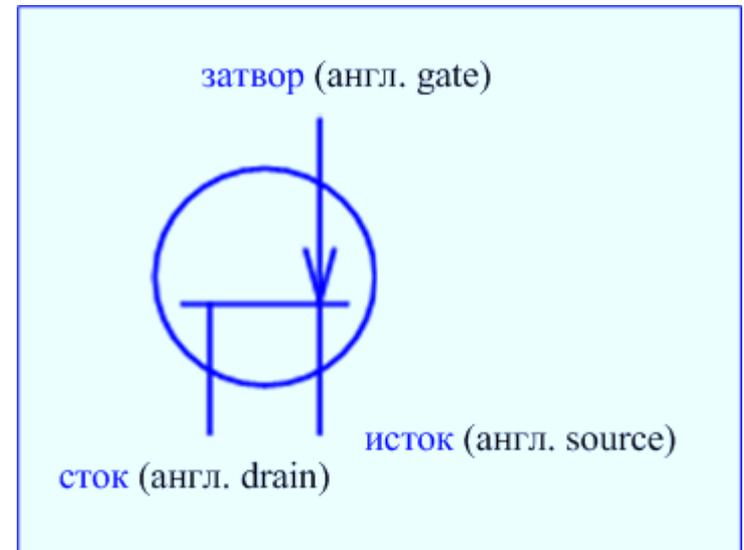
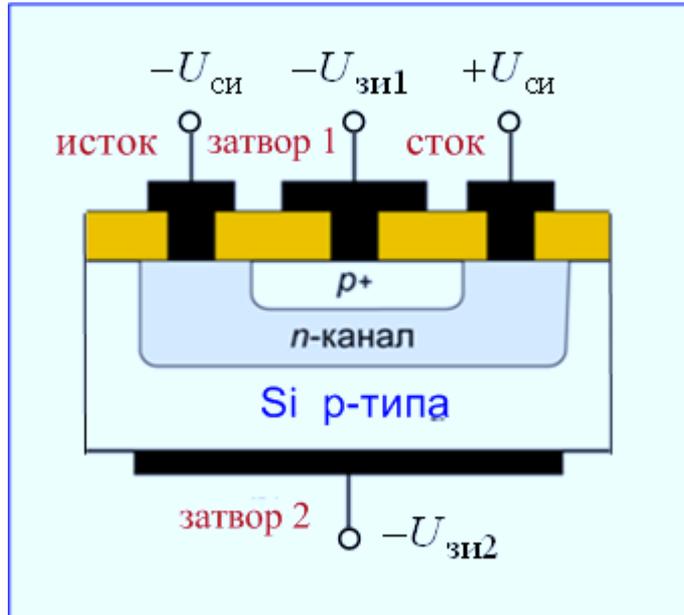
#### Исток

сильнолегированная область подложки, от которой дрейфуют основные носители заряда; также электрод, омически связанный с этой областью

#### Затвор

полупроводниковая или металлическая область, используемая для получения эффекта модуляции значения дрейфового тока при подаче управляющего напряжения.

## Основные сведения о полевых транзисторах.



Устройство полевого транзистора с управляющим p-n-переходом и каналом n-типа

Условное графическое обозначение (УГО) полевого транзистора с управляющим p-n-переходом и каналом n-типа

## Основные сведения о полевых транзисторах.

В различных видах полевых транзисторов и при различных внешних напряжениях затвор может оказывать два вида воздействий на проводимость канала:

*препятствует протеканию тока через канал, уменьшая число носителей зарядов, проходящих через канал (такой режим называют **режимом обеднения канала**);*

*стимулирует протекание тока через канал, увеличивая число носителей зарядов в канале (**режим обогащения канала**).*



*Классификация полевых транзисторов по физической структуре и способу управления проводимостью канала*

*Полевые транзисторы с управляющим p-n-переходом*

*В качестве затвора используется область, тип электропроводности которой противоположен типу электропроводности канала, в результате чего между затвором и каналом образуется p-n-переход.*



*канал n-типа*



*канал p-типа*

*Полевые транзисторы с изолированным затвором*

*Между металлическим затвором и проводящим каналом расположен тонкий слой диэлектрика так, что образуется структура металл-диэлектрик-полупроводник.*

*Со встроенным каналом*



*С индуцированным каналом*



## Основные сведения о полевых транзисторах.

### Основные параметры полевых транзисторов (ГОСТ 19095-73)

*Крутизна характеристики  
полевого транзистора*

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зп}} \quad \Bigg| \quad U_{сн} = \text{const}$$

*Отношение изменения тока стока к изменению напряжения на затворе при коротком замыкании по переменному току на выходе транзистора в схеме с общим истоком.*

*Максимально допустимый  
постоянный ток стока*

$$I_{с \max}$$

*Максимально допустимое  
напряжение сток-исток*

$$U_{сн \max}$$

*Под максимально допустимыми параметрами понимают значения конкретных режимов транзистора, которые потребитель не должен превышать при любых условиях эксплуатации и при которых обеспечивается заданная надежность.*

**ГОСТ 19095-73** (СТ СЭВ 2771-80) «ТРАНЗИСТОРЫ ПОЛЕВЫЕ. Термины, определения и буквенные обозначения параметров»

## Основные сведения о полевых транзисторах.

### Основные параметры полевых транзисторов (ГОСТ 19095-73)

*Напряжение отсечки полевого транзистора*

$$U_{\text{зи.отс}}$$

*Напряжение между затвором и истоком транзистора с p-n-переходом или с изолированным затвором, работающего в режиме обеднения, при котором ток стока достигает заданного низкого значения.*

*Пороговое напряжение полевого транзистора*

$$U_{\text{зи.пор}}$$

*Напряжение между затвором и истоком транзистора с изолированным затвором, работающего в режиме обогащения, при котором ток стока достигает заданного низкого значения.*

## Основные сведения о полевых транзисторах.

### Основные параметры полевых транзисторов (ГОСТ 19095-73)

*Дифференциальное сопротивление канала*

$$R_{\text{сн}} = \left. \frac{dU_{\text{сн}}}{dI_{\text{с}}} \right|_{U_{\text{зп}} = \text{const}}$$

*Представляет собой отношение малого приращения напряжения между стоком и истоком к малому приращению тока стока при постоянном напряжении между затвором и истоком*

*Коэффициент усиления по напряжению*

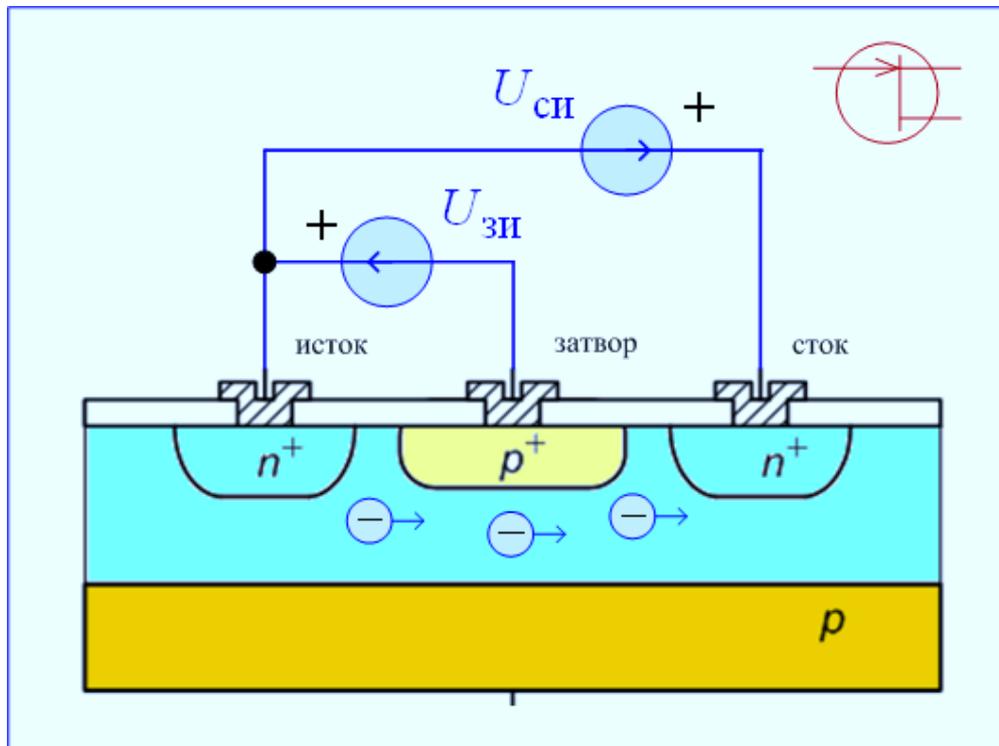
$$\mu = \left. \frac{dU_{\text{сн}}}{dU_{\text{зп}}} \right|_{I_{\text{с}} = \text{const}}$$

*Определяется отношением малого приращения напряжения между стоком и истоком к малому приращению напряжения между затвором и истоком полевого транзистора при постоянном токе стока*

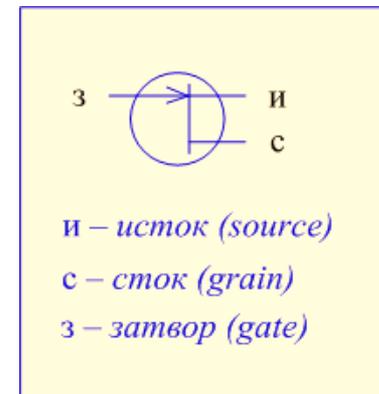
$\mu = SR_{\text{сн.нас}}$ , где  $R_{\text{сн.нас}}$  – дифференциальное сопротивление канала в режиме насыщения

## Полевой транзистор с управляющим p-n- переходом.

*Полевой транзистор с управляющим переходом* – это полевой транзистор, модуляция проводимости канала которого происходит за счет изменения толщины слоя объемного заряда выпрямляющего электрического перехода, смещенного в обратном направлении.



По каналу от истока к стоку движутся электроны, создавая в канале и во внешней цепи ток стока, направленный от стока к истоку.



Упрощенная структура полевого транзистора с управляющим p-n-переходом и каналом n-типа

## Полевой транзистор с управляющим p-n- переходом.

На подложке из кремния p-типа создается эпитаксиальный слой n-типа, и методом диффузии формируются области затвора ( $p^+$  - типа), стока ( $n^+$  - типа) и истока ( $n^+$  - типа), которые омическими контактами связываются с электродами транзистора затвор, сток и исток соответственно. Каналом является слой n-типа, заключенный между областью затвора и подложкой.

Между стоком и истоком полевого транзистора подается напряжение  $U_{СИ}$  такой полярности, чтобы *основные носители заряда двигались по каналу в направлении от истока к стоку*. На затвор относительно истока подается напряжение  $U_{ЗИ}$ , *сдвигающее p-n-переход в обратном направлении*.

Напряжение  $U_{ЗИ}$  между затвором и истоком создает электрическое поле, напряженность которого направлена поперечно по отношению к каналу. При изменении абсолютной величины напряжения  $U_{ЗИ}$  изменяется величина напряженности электрического поля, толщина обедненного слоя управляющего p-n-перехода, а значит, толщина проводящей части канала, его проводимость и ток стока. *С ростом абсолютной величины напряжения  $U_{ЗИ}$  расширяется обедненный слой перехода, сужается канал, уменьшаются его проводимость и ток стока*. Напряжение между затвором и истоком, при котором граница обедненного слоя достигает подложки и происходит перекрытие канала, *называют напряжением отсечки  $U_{ЗИ.отс}$  полевого транзистора*.

## Полевой транзистор с управляющим р-п- переходом.

*Напряжение отсечки полевого транзистора  $U_{3И.отс}$  (ГОСТ 19095-73)*

*Напряжение между затвором и истоком транзистора с р-п-переходом или с изолированным затвором, работающего в режиме обеднения, при котором ток стока достигает заданного низкого значения.*

*Ток стока  $I_C$  (ГОСТ 19095-73)*

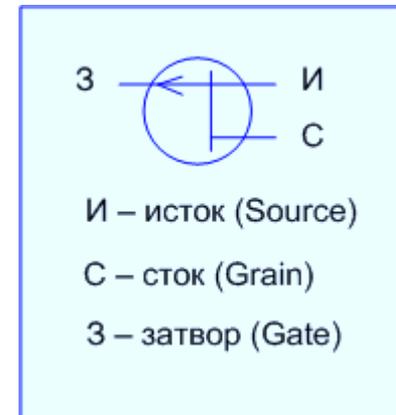
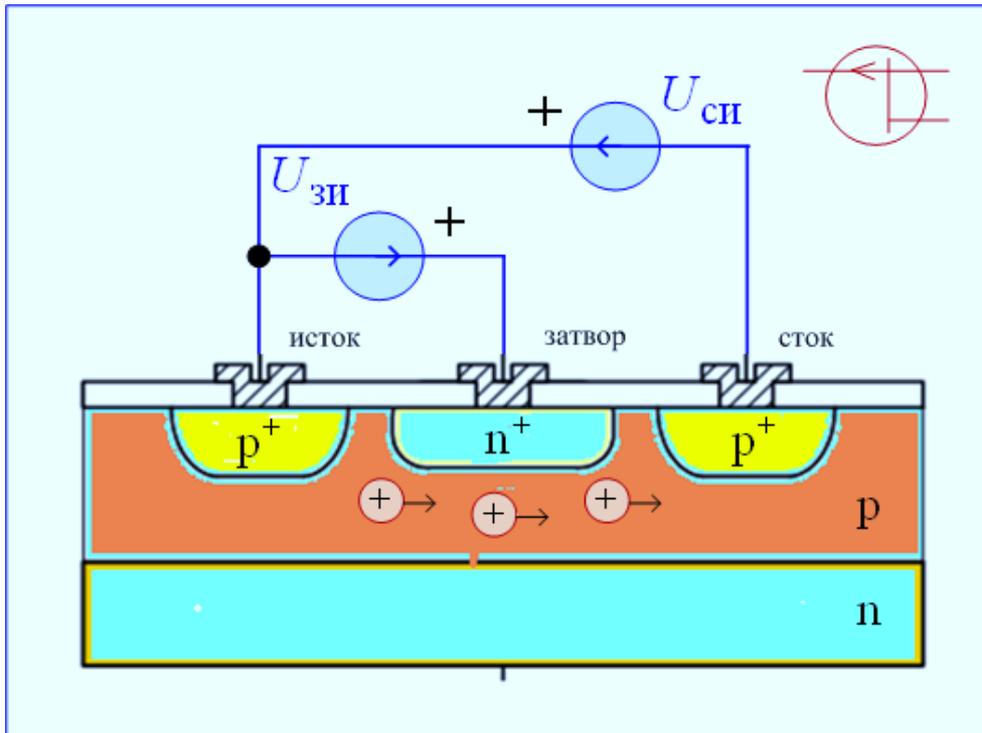
*Ток, протекающий в цепи сток – исток при напряжении сток – исток, равном или большем, чем напряжение насыщения, и при заданном напряжении затвор – исток..*

*Начальный ток стока  $I_{C.нач}$  (ГОСТ 19095-73)*

*Ток стока при напряжении между затвором и истоком, равном нулю, и при напряжении на стоке, равном или превышающем напряжение насыщения.*

## Полевой транзистор с управляющим р-п- переходом.

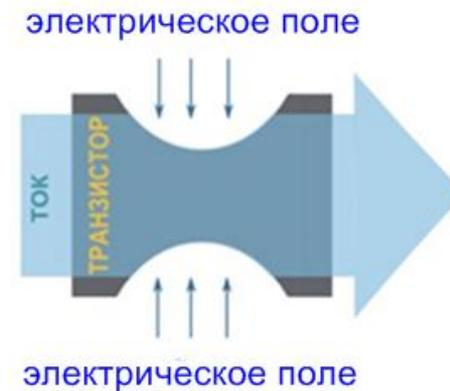
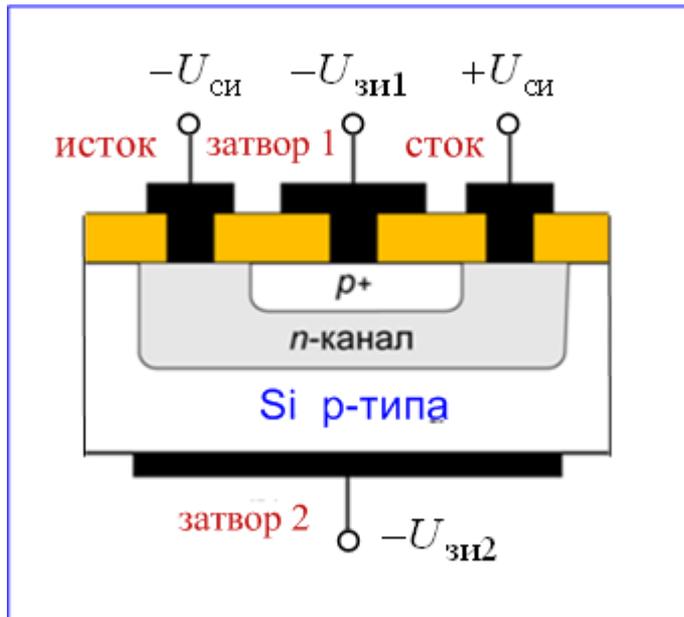
На затвор относительно истока подается напряжение  $U_{зИ}$ , смещающее р-п-переход в обратном направлении. Для транзистора с каналом р-типа на сток подается отрицательное, а на затвор – положительное напряжение относительно истока.



Упрощенная структура полевого транзистора с управляющим р-п-переходом и каналом р-типа

## Полевой транзистор с управляющим p-n- переходом.

Часто p-n-переходы создаются с двух сторон пластины (на противоположных гранях) и электрически соединяются в один вывод затвора. В этом случае проводящий канал образуется между областями двух p-n-переходов.



Упрощенная структура полевого транзистора с двумя управляющими p-n-переходами и каналом n-типа.

Из принципа действия полевого транзистора следует:

Полевой транзистор управляется напряжением  $U_{зи}$ .

Поскольку на затвор подается напряжение, смещающее p-n-переход в обратном направлении, то входное сопротивление полевого транзистора очень велико.

## Полевой транзистор с управляющим р-п- переходом. Статические выходные характеристики.

Важнейшими семействами статических характеристик для полевых транзисторов являются *семейство выходных статических характеристик* и *семейство статических характеристик передачи*:

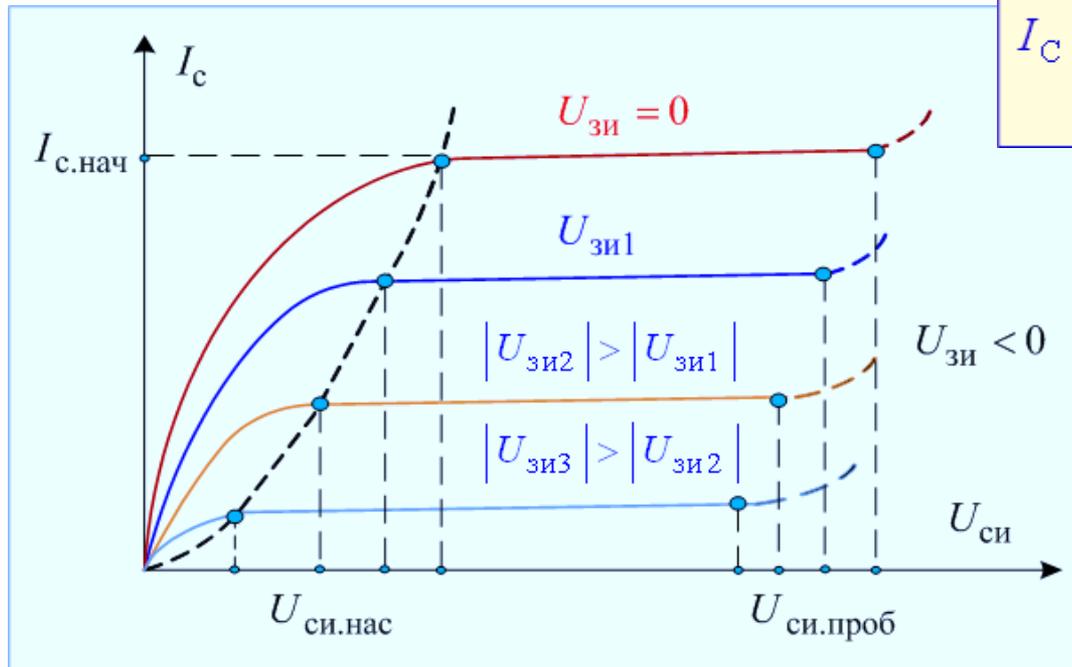
$$I_{\text{ВЫХ}} = f_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВЫХ}}) \quad \left| \quad U_{\text{ВХ}} = \text{const}$$

$$I_{\text{ВЫХ}} = f_{\text{пер}}(U_{\text{ВХ}}) \quad \left| \quad U_{\text{ВЫХ}} = \text{const}$$

*Выходные характеристики* полевого транзистора представляют собой зависимости

$$I_{\text{С}} = f_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{СН}}) \quad \left| \quad U_{\text{ЗН}} = \text{const}$$

## Полевой транзистор с управляющим р-п- переходом. Статические выходные характеристики.



$$I_c = f_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{СИ}}) \quad \Bigg| \quad U_{\text{ЗИ}} = \text{const}$$

Режим насыщения наступает, когда напряжение между затвором и каналом вблизи стока становится равным напряжению отсечки:

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

Семейство выходных характеристик полевого транзистора с управляющим р-п-переходом и каналом n-типа

$I_{\text{с.нач}}$  – ток стока при напряжении между затвором и истоком, равном нулю, и при напряжении на стоке, равном или превышающем напряжение насыщения.

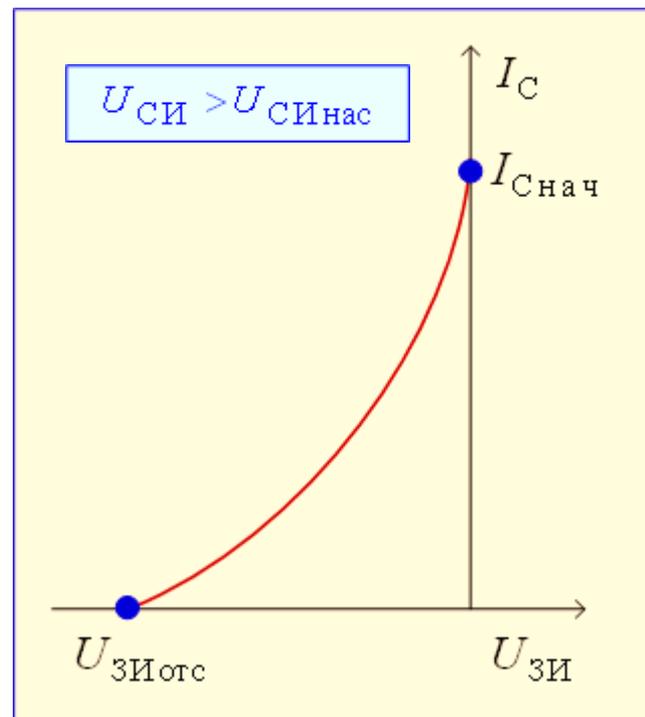
## Полевой транзистор с управляющим р-п- переходом. Статические передаточные характеристики.

$$I_C = f_{\text{пер}}(U_{\text{ЗИ}}) \quad \left| \quad U_{\text{СИ}} = \text{const}$$



При изменении напряжения  $U_{\text{СИ}}$  смещения характеристик практически не наблюдается в связи с малым изменением тока стока в области насыщения.

$$S = \frac{2I_{\text{с. нач}}}{U_{\text{ЗИ. отс}}} = S \quad \left| \quad U_{\text{ЗИ}} = 0$$

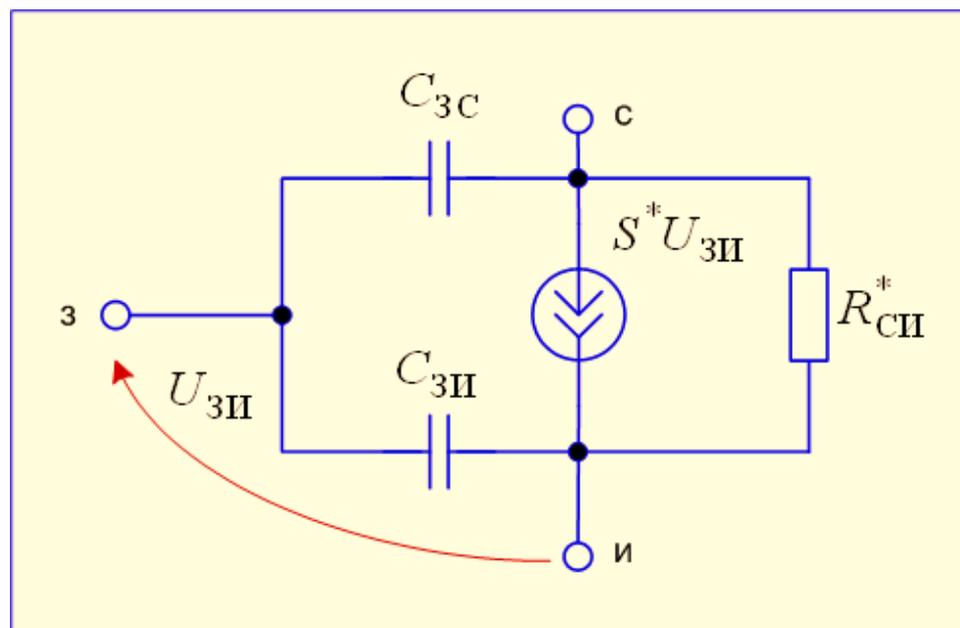


Передаточная характеристика полевого транзистора с управляющим р-п-переходом и каналом n-типа

$U_{\text{ЗИ.отс}}$  – напряжение между затвором и истоком транзистора с р-п-переходом или с изолированным затвором, работающего в режиме обеднения, при котором ток стока достигает заданного низкого значения.

## Полевой транзистор с управляющим p-n- переходом. Эквивалентная схема.

Полевые транзисторы представляют собой *структуры с распределенными параметрами*, распределенные модели которых достаточно сложны и могут использоваться только в численных экспериментах. По этой причине *для инженерной практики* разработано большое количество упрощенных моделей с *сосредоточенными параметрами*, имеющих ограниченные точность и области применения.



Упрощенная малосигнальная эквивалентная схема полевого транзистора с управляющим p-n-переходом

## Полевые транзисторы с изолированным затвором. Общие сведения.

*Полевой транзистор с изолированным затвором – это транзистор, затвор которого электрически изолирован от проводящего канала диэлектрическим слоем, а модуляция проводимости канала обусловлена изменением концентрации носителей заряда за счет эффекта поля в структуре металл-диэлектрик-полупроводник.*



*Реализация транзисторов с изолированным затвором на основе МДП-структур обусловила другое распространенное их название – транзисторы типа металл-диэлектрик-полупроводник или **МДП-транзисторы**.*

## Полевые транзисторы с изолированным затвором. Общие сведения.

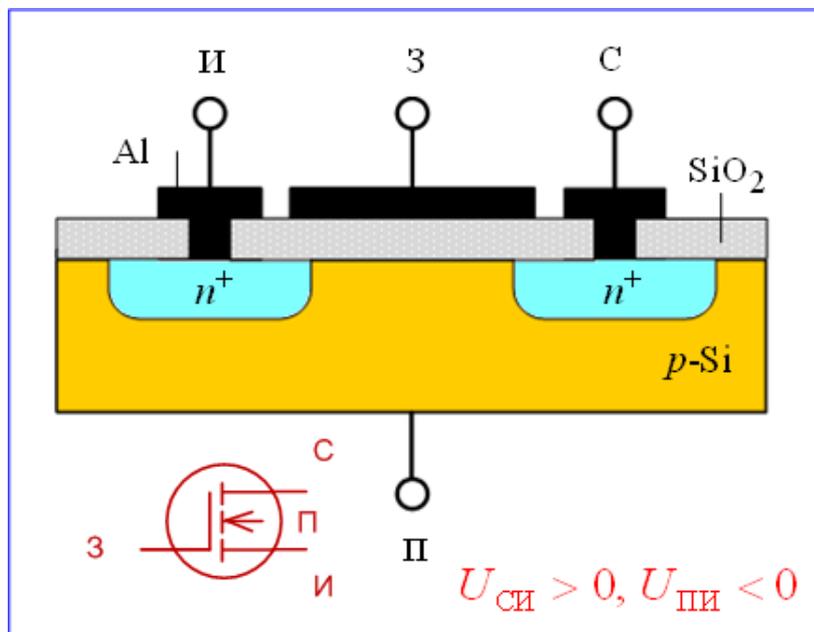
Как правило, МДП-транзисторы изготавливаются из кремния, а в качестве подзатворного диэлектрика используется тонкая пленка диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ , поэтому такие транзисторы называют транзисторами типа металл-оксид-полупроводник или **МОП-транзистор**. Если в транзисторе используется **двухслойный диэлектрик** (нитрид кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{SiO}_2$ ), то прибор называют **МНОП-транзистором** (металл-нитрид-оксид-полупроводник).

В МДП-транзисторах со **встроенным каналом токопроводящий канал** между областями стока и истока **формируется при изготовлении прибора** в виде тонкого приповерхностного инверсного по отношению к подложке слоя.

МДП-транзисторы со **встроенным каналом могут работать как в режиме обеднения канала** носителями заряда, когда проводимость канала уменьшается, так **и в режиме обогащения**, когда проводимость канала увеличивается.

В МДП-транзисторах с **индуцированным каналом токопроводящий канал между стоком и истоком изначально отсутствует, а возникает только под действием напряжения, приложенного к затвору**. Транзисторы с индуцированным каналом работают только в режиме обогащения канала носителями заряда.

## МДП-транзистор с индуцированным каналом. Устройство и принцип действия.



Структура МДП-транзистора с индуцированным каналом n-типа

Между стоком и истоком МДП-транзистора подается напряжение  $U_{СИ}$  такой полярности, чтобы при образовании канала основные носители заряда двигались в направлении от истока к стоку. Управляющее напряжение прикладывается к затвору относительно истока и может быть любой полярности, так как затвор изолирован от канала слоем диэлектрика. При наличии вывода подложки на него относительно истока можно подавать напряжение  $U_{ПИ}$  только такой полярности, которое обеспечивает смещение *p-n*-перехода исток-подложка в обратном направлении.

При  $U_{ЗИ} = 0$  токопроводящий канал отсутствует, а на участке между истоком и стоком находится два встречно включенных *p-n*<sup>+</sup>-перехода исток-подложка и сток-подложка. Поэтому при подаче напряжения  $U_{СИ} > 0$  в цепи стока будет протекать ток  $I_C \approx 0$ .

## МДП-транзистор с индуцированным каналом. Устройство и принцип действия.

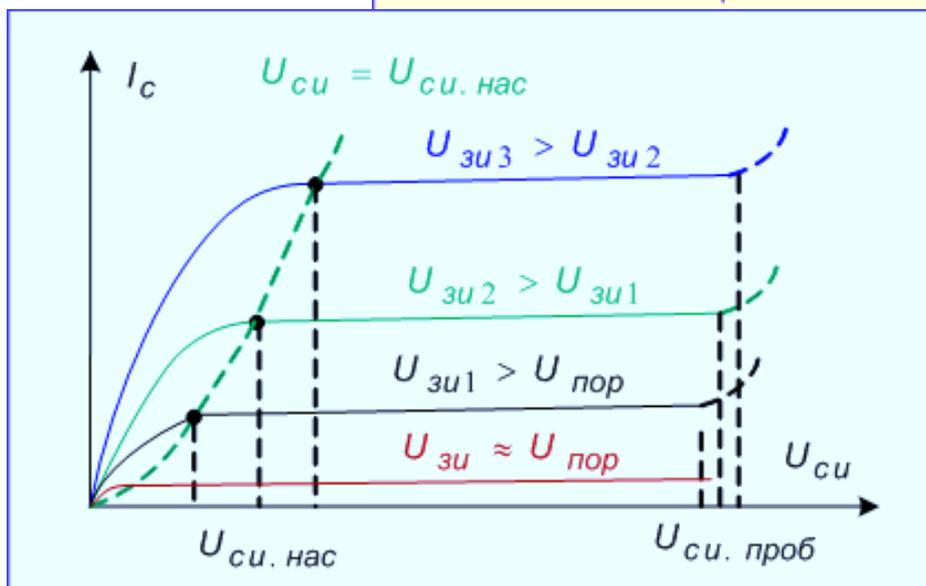
Если на затвор подать отрицательное напряжение  $U_{ЗИ} < 0$ , то приповерхностный слой подложки окажется в режиме обогащения дырками, образования токопроводящего канала не произойдет и ток стока практически не изменится.

Если же на затвор подавать возрастающее положительное напряжение  $U_{ЗИ} > 0$ , то сначала у поверхности подложки возникнет слой, обедненный дырками (область пространственного заряда нескомпенсированных ионизированных акцепторных атомов), а при напряжении  $U_{ЗИ} = U_{пор}$  возникнет инверсный слой электронов, который и является токопроводящим каналом. В результате подачи напряжения  $U_{СИ} > 0$  в канале создается продольное электрическое поле, под действием которого электроны инверсного слоя будут осуществлять дрейф от истока к стоку, создавая во внешней цепи ток стока  $I_C$ , направленный от стока к истоку. Дальнейшее увеличение напряжения  $U_{ЗИ} > U_{пор}$  вызывает увеличение концентрации носителей заряда в канале, что, в свою очередь, ведет к возрастанию проводимости канала, а следовательно, и росту тока стока.

При напряжении сток-исток  $U_{СИ} = U_{СИнас} = U_{ЗИ} - U_{пор}$  у области стока канал перекрывается.

## МДП-транзистор с индуцированным каналом. Статические выходные характеристики.

$$I_C = f_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{СИ}}) \quad | \quad U_{\text{ЗИ}} = \text{const}$$



В крутой области с увеличением напряжения  $U_{\text{СИ}}$  ток  $I_C$  сначала растет почти линейно, пока канал вблизи стока слабо деформирован. Углы наклона характеристик при этом увеличиваются с ростом напряжения  $U_{\text{ЗИ}}$ . Далее нарастание тока стока замедляется, поскольку канал вблизи стока сужается и его сопротивление растет. Наконец, при  $U_{\text{СИ}} = U_{\text{СИ.нас}}$  канал смыкается и начинается участок насыщения, на котором ток стока незначительно растет при увеличении напряжения сток-исток.

Семейство выходных характеристик полевого транзистора с индуцированным каналом  $n$ -типа

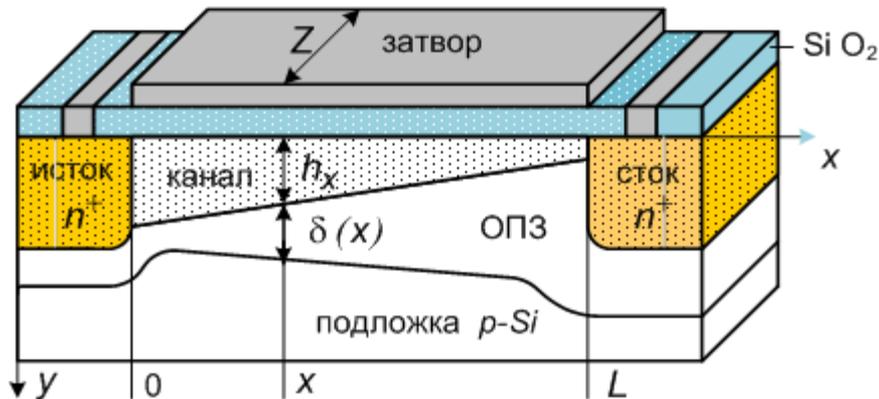
## МДП-транзистор с индуцированным каналом. Статические выходные характеристики.

*Внимание.* На семействе выходных характеристик транзистора с индуцированным каналом, в отличие от транзистора с управляющим переходом, отсутствует характеристика с параметрами  $U_{ЗИ} = 0 < U_{пор}$ , поскольку канал индуцируется при выполнении условия  $U_{ЗИ} > U_{пор}$ .

Характеристика при  $U_{ЗИ} \approx U_{пор}$  представляет собой характеристику обратно смещенного стокового р-п-перехода.

При больших напряжениях  $U_{СИ}$  возникает пробой МДП-транзистора, который может быть двух видов: пробой р-п-перехода сток-подложка или пробой подзатворного диэлектрика.

## МДП-транзистор с индуцированным каналом. Статические выходные характеристики.



Упрощенная структура рабочей части МДП-транзистора

Аналитическое описание выходных характеристик МДП-транзистора:

$$I_c = k \left[ (U_{зн} - U_{пор}) U_{сн} - \frac{U_{сн}^2}{2} \right], *$$

где  $k = \frac{Z \mu_n C_d}{L}$  — удельная крутизна

МДП-транзистора;  $C_d = \frac{\epsilon_0 \epsilon_d}{d}$  —

удельная емкость затвора.

Выражение ( \*) соответствует крутым участкам вольт-амперных характеристик МДП-транзистора. Выражение для вольт-амперных характеристик МДП-транзистора в режиме насыщения:

$$I_c = \frac{k}{2(1+\eta)} \left[ U_{зн} - U_{пор} - \frac{2}{3} \eta |U_{ш}| \right]^2, **$$

## МДП-транзистор с индуцированным каналом. Статические выходные характеристики.

Выражение для напряжения насыщения МДП-транзистора:

$$U_{\text{СИ.нас}} = \frac{1}{1+\eta} \left[ U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}} - \frac{2}{3} \eta |U_{\text{ШИ}}| \right]. \quad ***$$

В уравнениях (\*) – (\*\*\*\*):

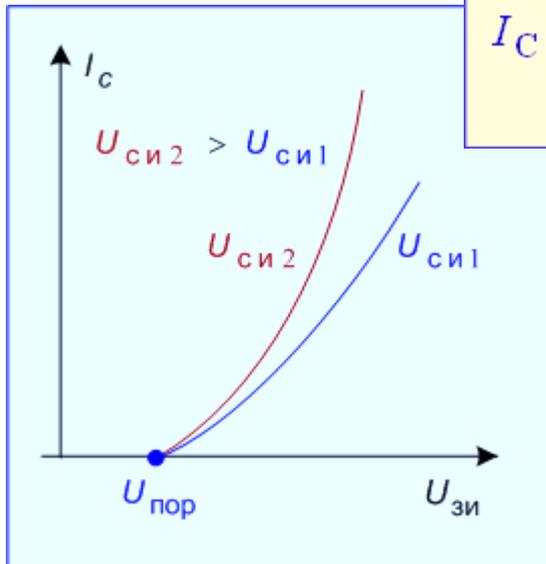
$\eta = \frac{1}{3C_{\text{д}}} \sqrt{\frac{q_e \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{II}} N_{\text{А}}}{\varphi_{\text{в}}}}$ , где  $\varphi_{\text{в}}$  – потенциал уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны;  $\varepsilon_{\text{II}}$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки.

Крутизна МДП-транзистора в области насыщения определяется выражением:

$$S = \frac{dI_{\text{с}}}{dU_{\text{зИ}}} = k (U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}}).$$

Крутизна МДП-транзистора однозначно связана с током стока:  $S = \sqrt{2kI_{\text{с}}}$ .

## МДП-транзистор с индуцированным каналом. Статические передаточные характеристики.

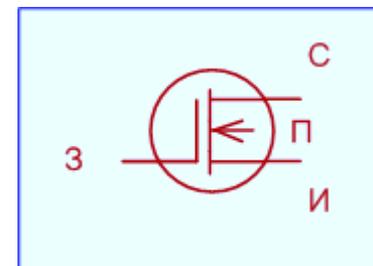
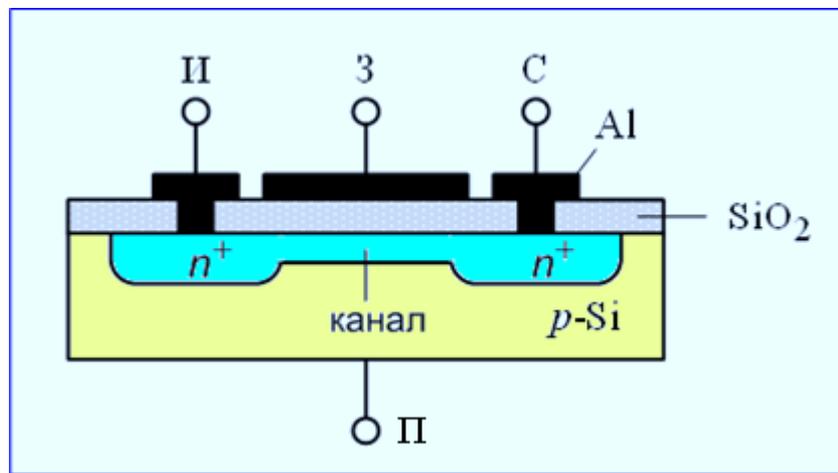


$$I_C = f_{\text{пер}}(U_{\text{ЗИ}}) \quad \left| \quad U_{\text{СИ}} = \text{const}$$

При  $U_{\text{ЗИ}} < U_{\text{пор}}$  токопроводящий канал отсутствует и ток стока  $I_C \approx 0$ . При  $U_{\text{ЗИ}} > U_{\text{пор}}$  характеристики монотонно возрастают, что следует из принципа действия транзистора. Поскольку с ростом напряжения  $U_{\text{СИ}}$  и при неизменном напряжении  $U_{\text{ЗИ}}$  ток стока возрастает даже в режиме насыщения, то передаточные характеристики с увеличением параметра  $U_{\text{СИ}}$  смещаются вверх.

Семейство передаточных стоко-затворных характеристик МДП-транзистора с индуцированным каналом n-типа

## МДП-транзистор со встроенным каналом. Устройство и принцип действия.

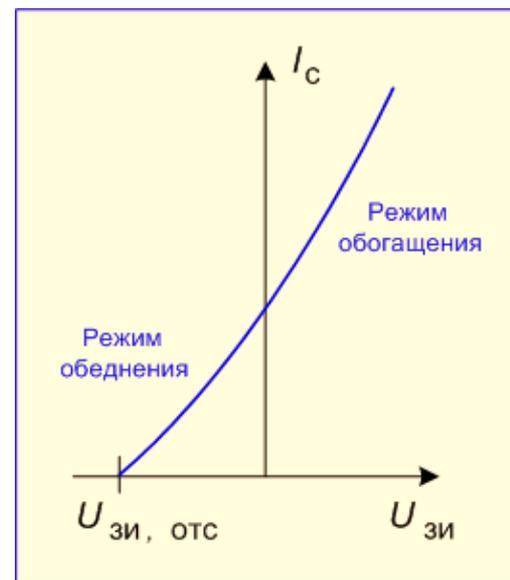
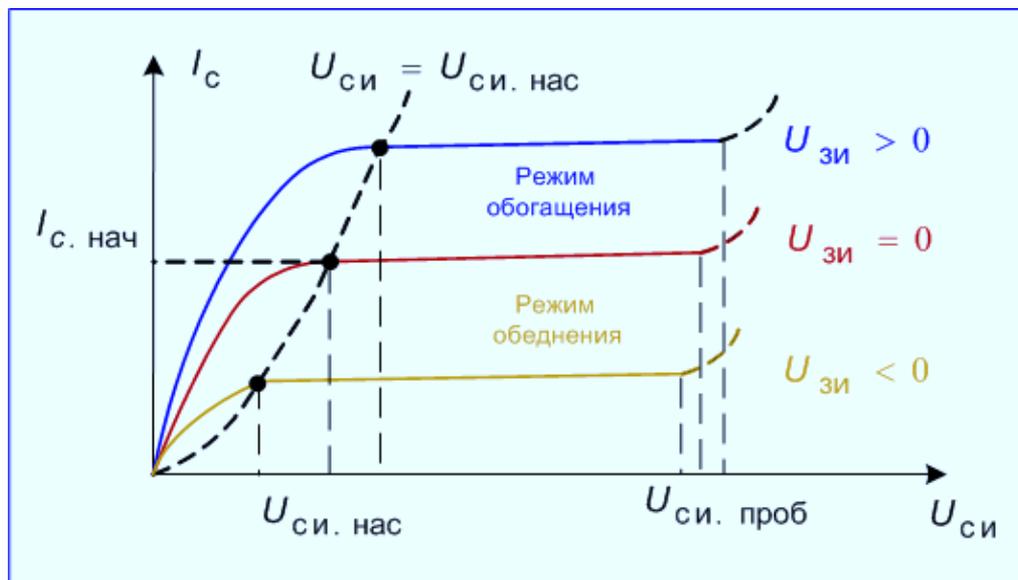


Структура и условное графическое обозначение МДП-транзистора со встроенным каналом *n*-типа

Наличие встроенного канала приводит к тому, что при отсутствии смещения на затворе ( $U_{зИ} = 0$ ) через транзистор под действием напряжения  $U_{СИ}$  протекает ток стока, определяемый исходной проводимостью канала. **Вывод.** МДП-транзистор со встроенным каналом представляет собой нормально открытый полупроводниковый прибор.

**Внимание.** Модуляция сопротивления проводящего канала происходит при обеих полярностях управляющего напряжения, подаваемого на затвор относительно истока.

## МДП-транзистор со встроенным каналом. Статические выходные характеристики.

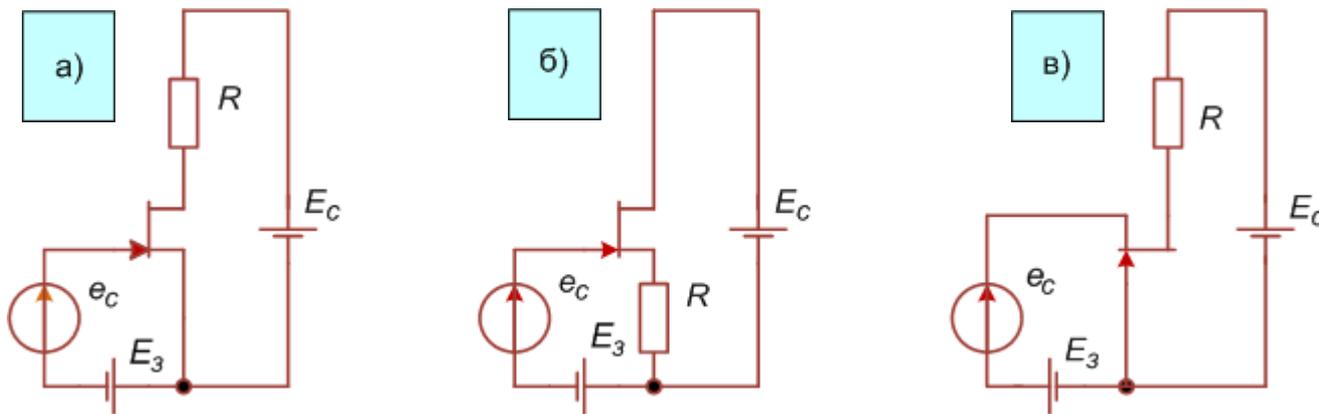


Выходные и передаточная характеристики МДП-транзистора со встроенным каналом  $n$ -типа

*Семейство выходных транзистора со встроенным каналом содержит характеристику с параметром  $U_{зи} = 0$ . Как и для транзистора с управляющим переходом, ток стока области насыщения этой характеристики называют начальным током стока  $I_{C.нач}$ . При  $U_{зи} \neq 0$  выходные характеристики смещаются либо вверх, либо вниз в зависимости от полярности напряжения  $U_{зи}$  и типа электропроводности канала.*

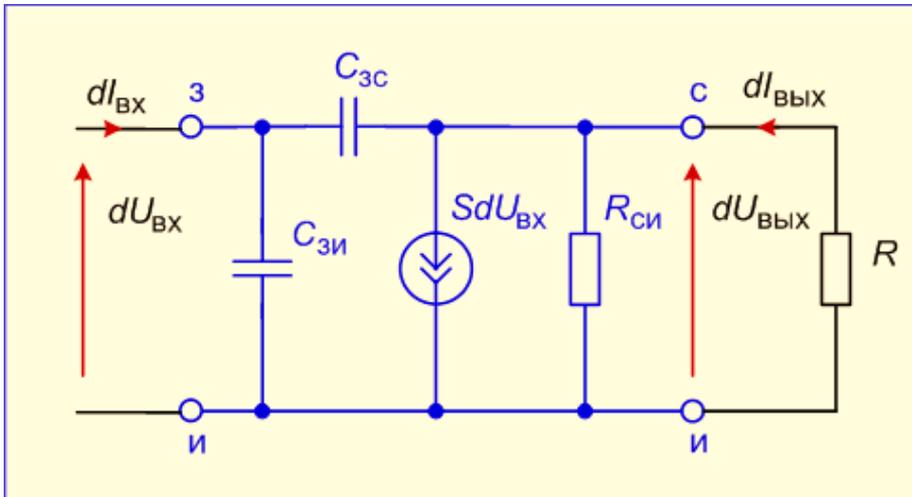
## Усилительные свойства полевых транзисторов.

Для усиления электрических сигналов с минимальными нелинейными искажениями на затвор и на сток транзистора необходимо подать постоянные напряжения соответствующей полярности и величины, обеспечивающие работу транзистора в области насыщения. Помимо постоянного напряжения в цепь затвора подается также переменное напряжение  $e_c$  усиливаемого сигнала, которое вызывает изменение во времени проводимости канала и, следовательно, тока стока.



Схемы включения полевых транзисторов: а – с общим истоком, б – с общим стоком, в – с общим затвором

## Усилительные свойства полевых транзисторов.



Малосигнальная схема замещения каскада с общим истоком

$$dI_{\text{ВХ}} = (pC_{\text{ЗИ}} + pC_{\text{ЗС}})dU_{\text{ВХ}} - pC_{\text{ЗС}}dU_{\text{ВЫХ}},$$

$$dI_{\text{ВЫХ}} = (S - pC_{\text{ЗС}})dU_{\text{ВХ}} + (G_{\text{СИ}} + pC_{\text{ЗС}})dU_{\text{ВЫХ}},$$

$$dI_{\text{ВЫХ}} = -GdU_{\text{ВЫХ}}.$$

Система уравнений в операторной форме для каскада с общим истоком

<i>Каскад с общим истоком</i>	
<i>Параметр</i>	<i>Значение параметра</i>
$k_{\text{и}}$	$-SR$
$y_{\text{ВХ}}$	$pC_{\text{ЗИ}} + (1 + SR_{\text{СИ}})pC_{\text{ЗС}}$
$y_{\text{ВЫХ}}$	$R_{\text{СИ}}^{-1}$

## Работа полевых транзисторов в импульсном режиме.

*Импульсный режим предполагает работу транзистора под действием больших импульсных сигналов, когда существенно проявляются его нелинейные свойства, а транзистор выступает в качестве ключевого элемента.*

*Такой режим работы наиболее характерен для МДП-транзисторов с индуцированным каналом, включенных по схеме с общим истоком.*

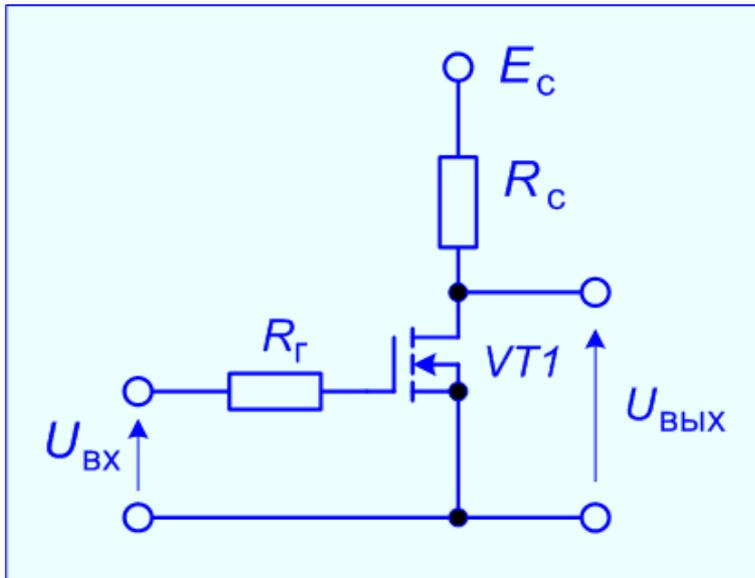
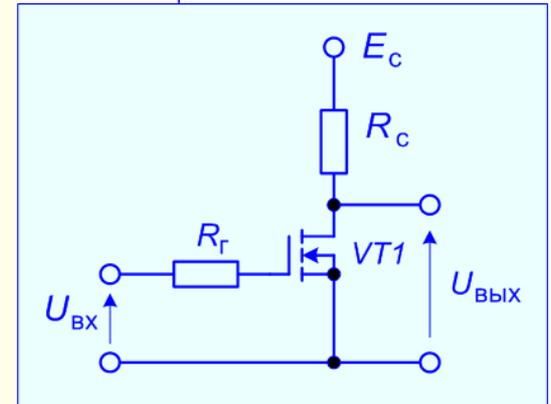
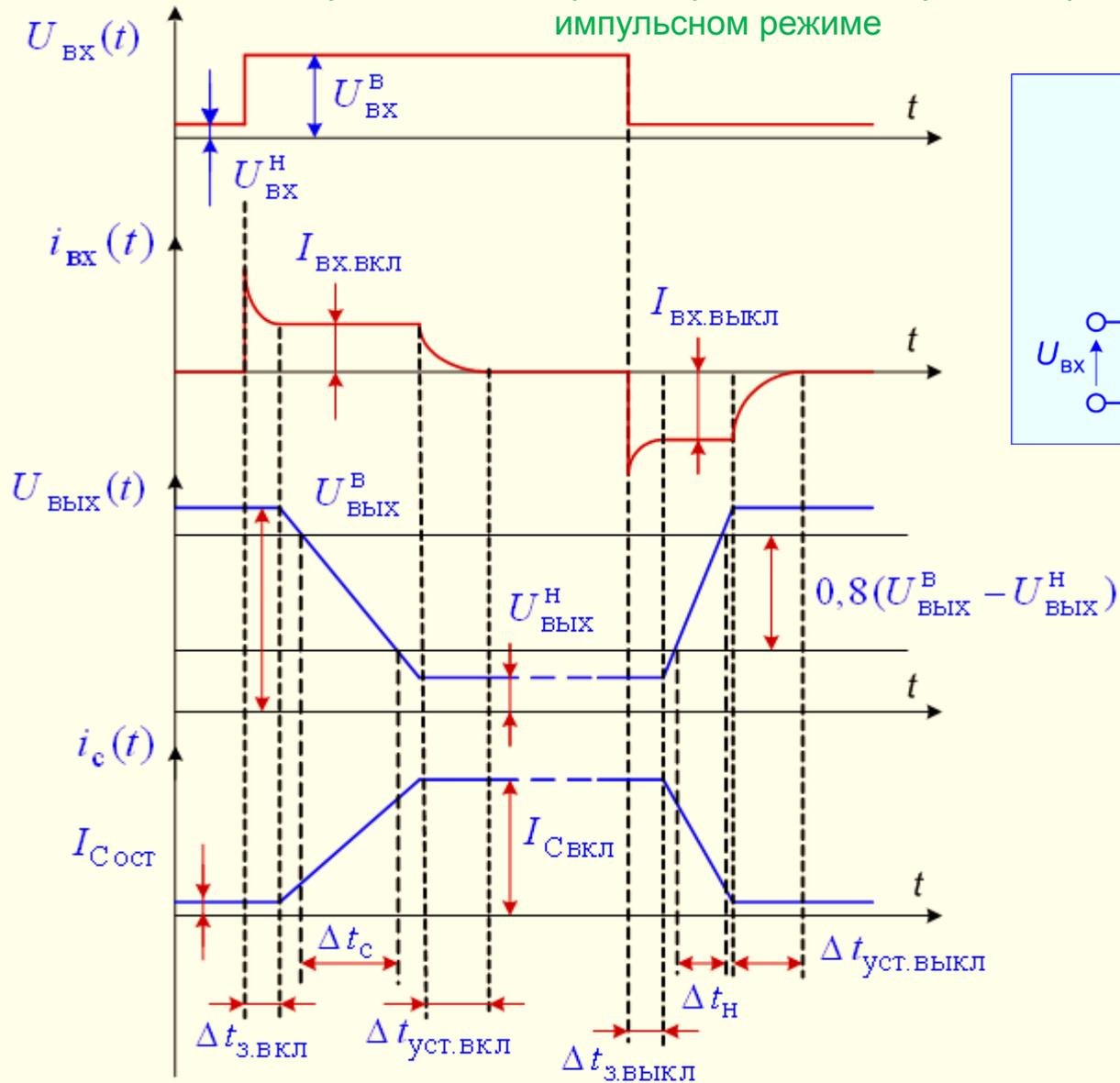


Схема ключа с общим истоком на МДП-транзисторе

В стационарном состоянии МДП-транзистор может находиться в выключенном либо во включенном состояниях, соответствующих низкому  $U_{ВХ}^H$  или высокому  $U_{ВХ}^B$  уровням входного управляющего напряжения.

Временные диаграммы работы МДП-транзистора в импульсном режиме



## Работа полевых транзисторов в импульсном режиме. Динамические параметры.

*Время задержки включения полевого транзистора  $t_{зд.вкл}$  – интервал времени между 10% - ным значением амплитуды фронта входного импульса, включающего полевой транзистор, и 10% - ным значением амплитуды фронта выходного импульса.*

*Время нарастания для полевого транзистора  $t_{нр}$  – интервал времени между 10% - ным и 90% - ным значениями амплитуды фронта импульса на выходе при включении полевого транзистора.*

*Время задержки выключения полевого транзистора  $t_{зд.выкл}$  – интервал времени между 90% - ным значением амплитуды среза входного импульса, вызвавшего включение полевого транзистора, и 90% - ным значением амплитуды среза выходного импульса.*

*Время спада для полевого транзистора  $t_{сп}$  – интервал времени между 90% - ным и 10% - ным значениями амплитуды среза выходного импульса при выключении транзистора.*

*Время включения полевого транзистора  $t_{вкл} = t_{зд.вкл} + t_{нр}$  – интервал времени являющийся суммой времени задержки включения и времени нарастания для полевого транзистора.*

## Вопросы для самоконтроля.

1. Электроды полевого транзистора маркированы А, В, С. Сопротивления, измеренное между выводами В и С при “оборванном” выводе А, равно 300 Ом и не зависит от полярности напряжения. При напряжении  $U_{AB} = -2\text{В}$  между выводами А и В протекает ток, равный  $10^{-10}\text{А}$ . Укажите вывод, соединенный с затвором и тип канала:

- а) А – затвор, канал р-типа;    б) А – исток, канал п-типа;
- в) А – затвор, канал п-типа;    г) В – затвор, канал р-типа;
- д) А – исток, канал р-типа.

2. Полевой транзистор с управляющим р-п-переходом используется в схеме истокового повторителя. Крутизна транзистора  $S = 2 \frac{\text{мА}}{\text{В}}$ , сопротивление резистора в цепи истока  $R = 500\text{ Ом}$ . Определите коэффициент передачи по напряжению.

## Вопросы для самоконтроля.

3. Напряжение затвор-исток полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом  $U_{зи} = -3\text{В}$ , напряжение сток-исток на границе насыщения  $U_{нас} = 3\text{В}$ . Определите напряжение отсечки по абсолютной величине.

4. Крутизна полевого транзистора  $S = 0,6 \frac{\text{мА}}{\text{В}}$ , дифференциальное сопротивление канала в режиме насыщения составляет 300 кОм. Определите коэффициент усиления по напряжению.

5. Начальный ток стока полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом  $I_{с.нач} = 3\text{мА}$ . Напряжение отсечки  $U_{зи.отс} = 3\text{В}$ . Определите максимальную крутизну транзистора.

## Вопросы для самоконтроля.

6. Пороговое напряжение МДП-транзистора с индуцированным каналом  $U_{\text{пор}} = 2\text{В}$ . Определите напряжение затвор-исток  $U_{\text{зи}}$ , при котором напряжение сток-исток на границе насыщения  $U_{\text{си.нас}} = 2\text{В}$ .

7. В МДП-транзисторе отношение ширины канала к его длине равно 10, приповерхностная подвижность электронов  $\mu_n = 500 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ , удельная емкость затвора  $C_{\text{д}} = 10 \frac{\text{нФ}}{\text{см}^2}$ . Определите удельную крутизну транзистора.

8. Определите крутизну МДП-транзистора с индуцированным каналом, если удельная крутизна МДП-транзистора  $k = 0,3 \frac{\text{мА}}{\text{В}^2}$ , пороговое напряжение  $U_{\text{пор}} = 2\text{В}$ , а напряжение затвор-исток  $U_{\text{зи}} = 2\text{В}$ .

## Рекомендуемая литература

- 1. Легостаев Н.С.** Твердотельная электроника: учебное пособие / Н.С. Легостаев, К.В. Четвергов. – Томск: Эль Контент, 2011. – 244 с. ISBN 978-5-4332-0021-0
- 2. Легостаев Н.С.** Твердотельная электроника: методические указания по изучению дисциплины / Н.С. Легостаев, К.В. Четвергов. – Томск: Эль Контент, 2012. – 52 с. ISBN 978-5-4332-0030-2
- 3. Шангина Л.И.** Оптоэлектронные системы и устройства: учеб. пособие / Л.И. Шангина. – Томск: Эль Контент, 2013. – 182 с. ISBN 978-5-4332-0138-5
- 4. Гуртов В.А.** Твердотельная электроника: учеб. пособие / В.А. Гуртов. – М.: Техносфера, 2008. – 512 с. ISBN 978-5-94836-187-1

Следующее занятие будет посвящено оптоэлектронным полупроводниковым приборам.

Для подготовки к занятию изучите материал, представленный в разделе 7 учебного пособия (Легостаев Н.С. Твердотельная электроника: учебное пособие / Н.С. Легостаев, К.В. Четвергов. – Томск: Эль Контент, 2011. – 244 с. ISBN 978-5-4332-0021-0) на страницах 203 – 213.

*Изучение необходимо начать с явлений внутреннего и внешнего фотоэффектов, которые лежат в основе работы всех фотоэлектрических приборов. После этого необходимо изучить принцип работы и параметры биполярных и полевых фототранзисторов. Необходимо знать устройство, принцип действия, параметры и эквивалентную схему оптоэлектронных пар.*

**Спасибо за внимание**