

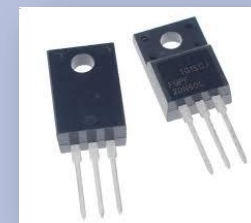
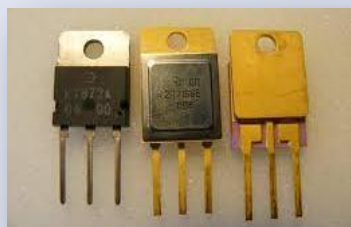
ЭЛЕКТРОНИКА

Лектор:

к.ф.-м.н. Алимгазинова Назгуль Шакаримовна

ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Полевой транзистор – транзистор, в котором сила проходящего через него тока регулируется внешним электрическим полем, т.е. напряжением.



Классификация полевых транзисторов

ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ (FET: Field-Effect-Transistors)

с управляющим р-п переходом
(JFET: Junction-FET)

с изолированным затвором
(MOSFET: Metal-Oxid-Semiconductor-FET)

с изолированным каналом

со встроенным каналом

Электроды ПТ

И – источник –
source (S)

– электрод, от которого движутся
носители заряда

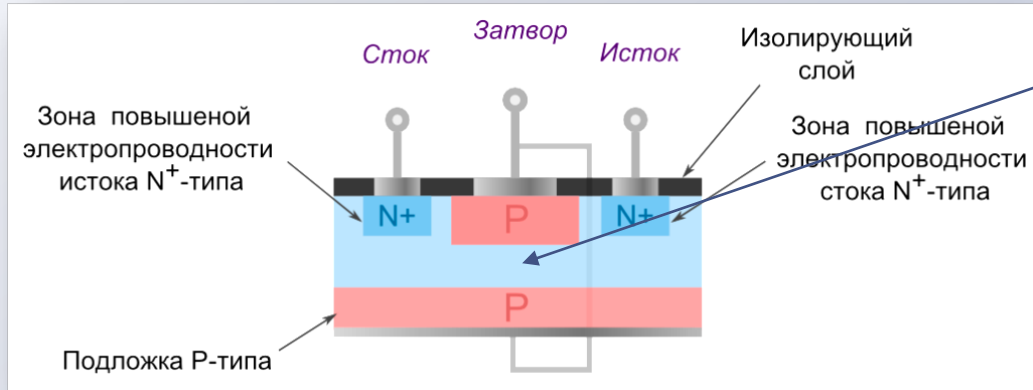
З – затвор –
gate (G)

– электрод, управляющий сечением канала, а
следовательно сопротивлением канала

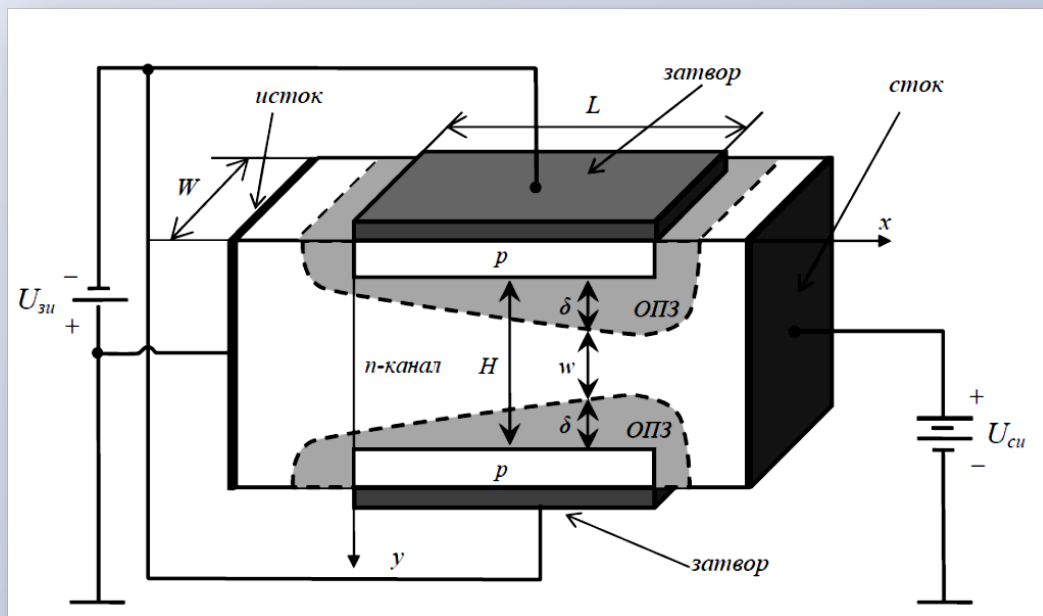
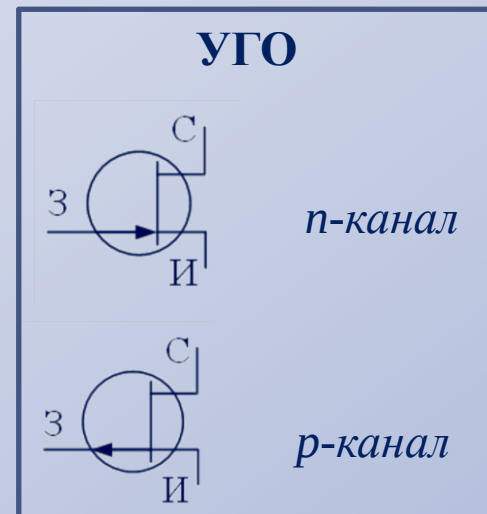
С – сток –
drain (D)

– электрод, к которому движутся носители
заряда

Полевой транзистор с управляющим *p-n*-переходом



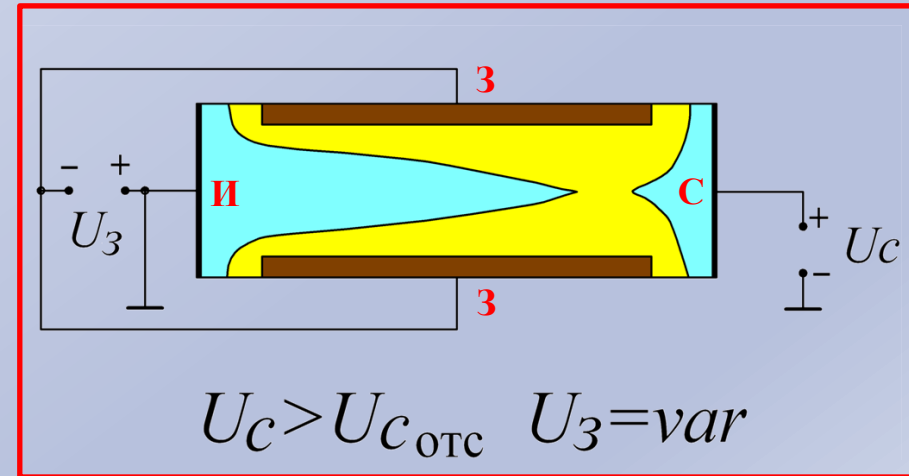
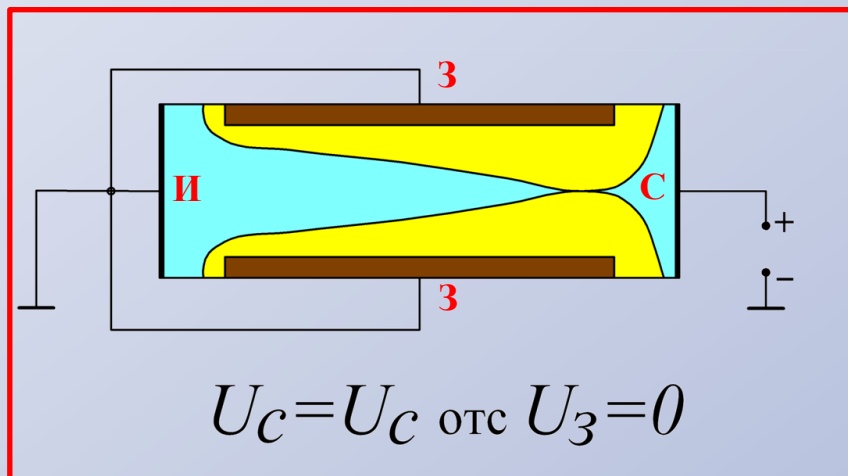
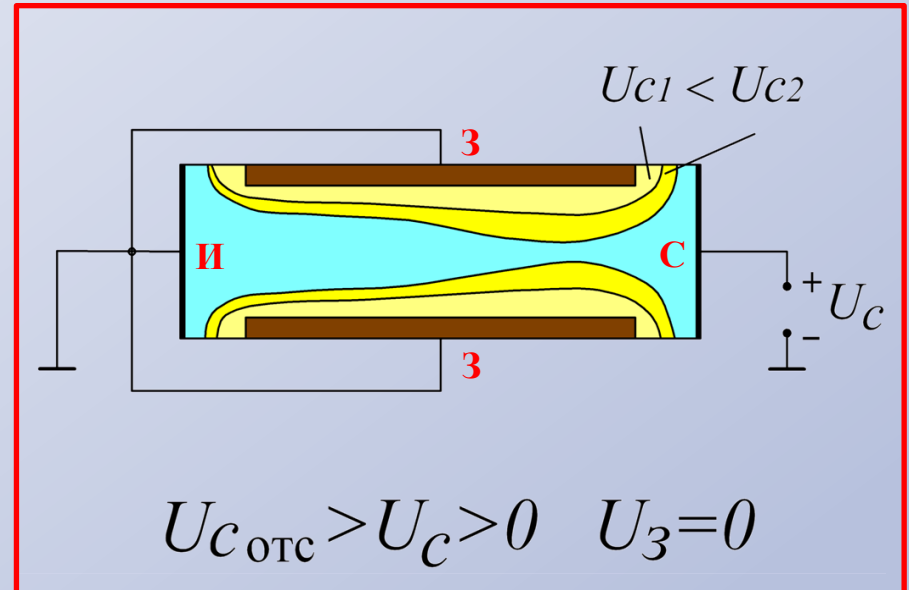
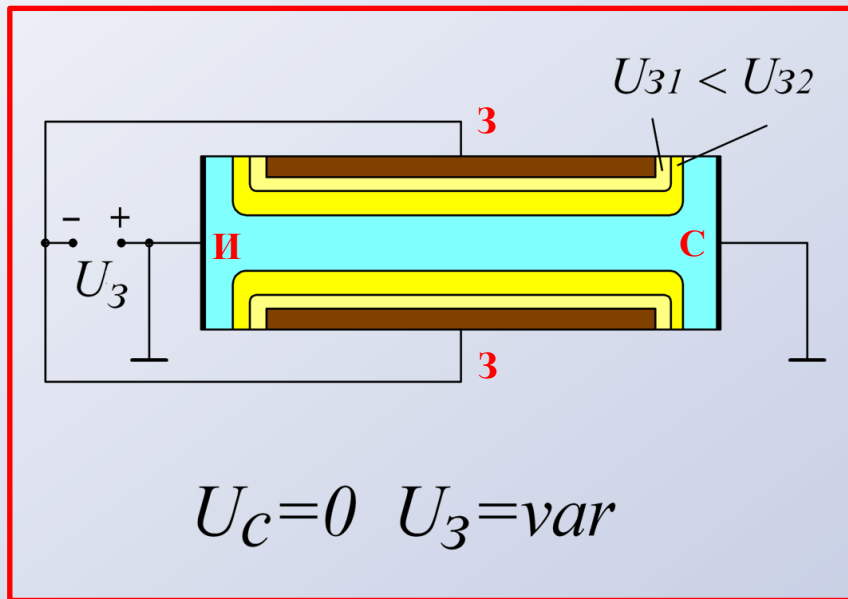
Канал протекания тока - слой проводника, заключенный между двумя p - n -переходами.



L – длина канала,
 W – ширина канала,
 δ – толщина ОПЗ,
 w – толщина канала,
 H – вертикальный размер кристалла

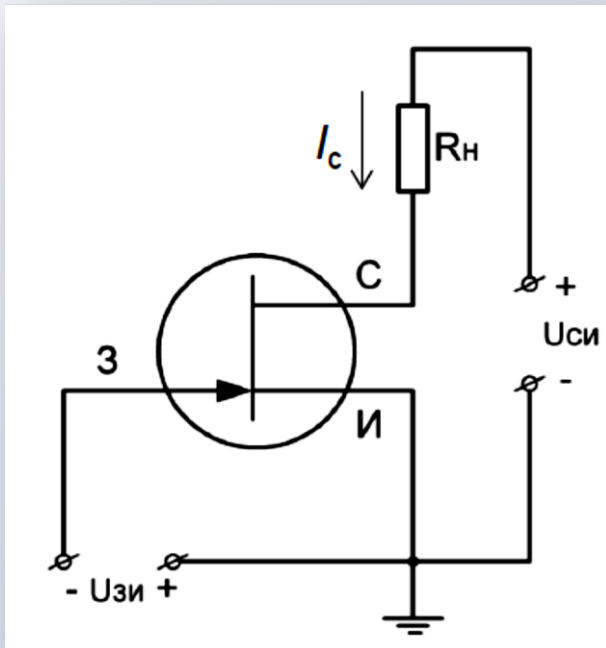
Форма канала при различных значениях напряжений на затвор-истоке и сток-истоке

ПТ с n-каналом

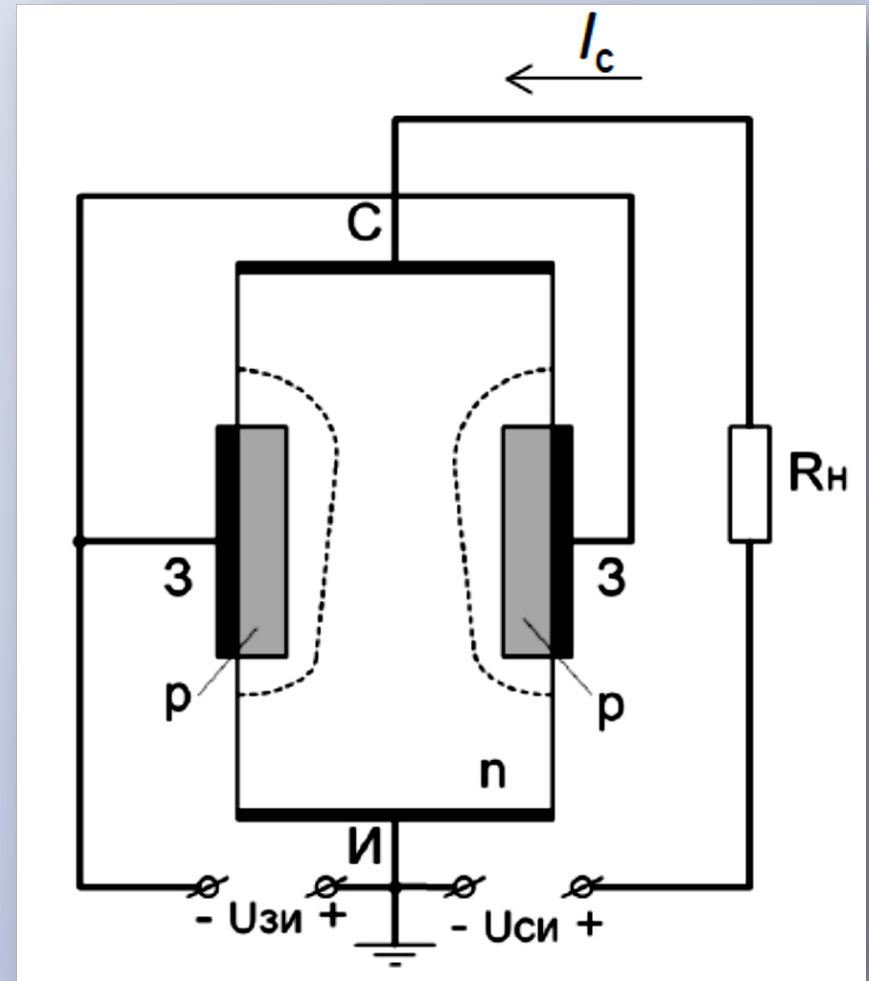


Работа полевого транзистора с управляющим р-п-переходом

ПТ с п-каналом



На затвор необходимо подавать обратное напряжение для переходов. Это напряжение — управляющее для транзистора данного типа транзисторов.



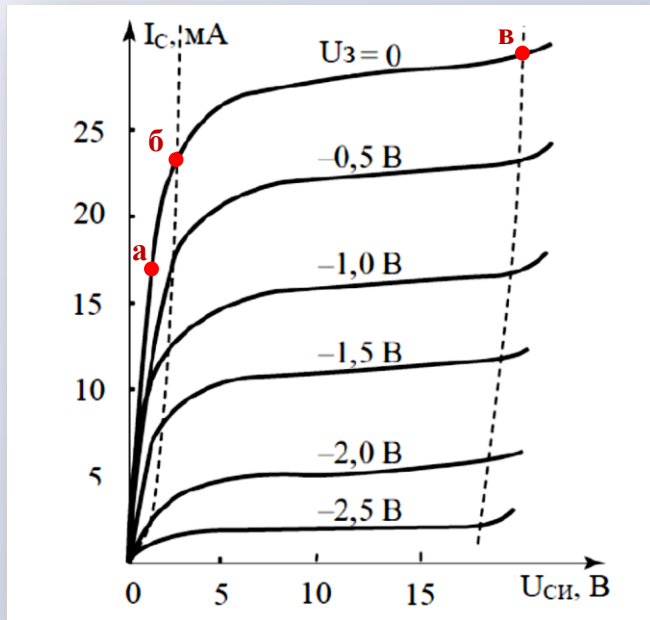
Если на затвор подать напряжение $U_{зи}$ с полярностью, противоположной указанной на рисунке, то оба перехода получат прямое смещение и входное сопротивление транзистора будет мало. Такой режим для данного транзистора – **НЕРАБОЧИЙ !!!**

ВАХ ПТ с управляющим р-п-переходом

Стоковые (выходные) характеристики

$$I_c = f(U_{си}) \Big|_{U_{зи} = \text{const}}$$

I II III



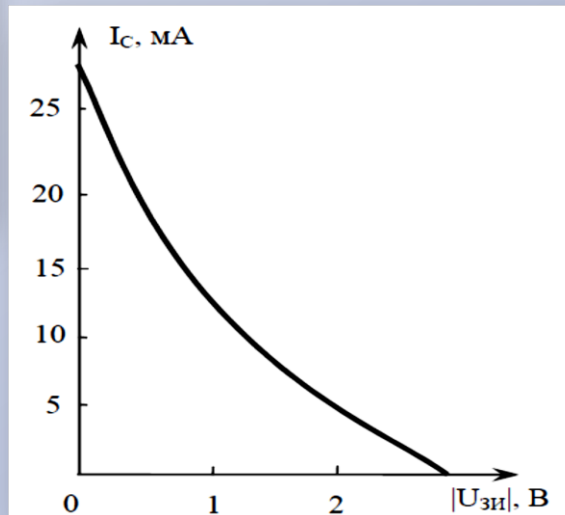
Штриховой линией показаны напряжения перекрытия канала.

I. Начальная область. Ток I_c меняется практически линейно (отрезок $0-a$). Канал транзистора еще не сомкнулся и напряжение $U_{си}$ растет быстрее, чем сопротивление канала. Данная область используется, когда *полевой транзистор используется в качестве управляемого сопротивления*.

II. Пологая область. В точке b переходы смыкаются. На участке $a-b$ по мере возрастания $U_{си}$ влияние сопротивления канала на ток I_c все больше и больше возрастает. Начиная с точки b , увеличение $U_{си}$ ведет к увеличению сопротивления канала. Таким образом имеют место два взаимно противоположных процесса: начиная с точки b , с одной стороны, увеличивается $U_{си}$, следовательно ток I_c возрастает; с другой стороны, увеличение сопротивления канала ведет к уменьшению тока I_c . Область II используется в *усилительной технике*.

III. Область лавинного пробоя

Стоко-затворная характеристика



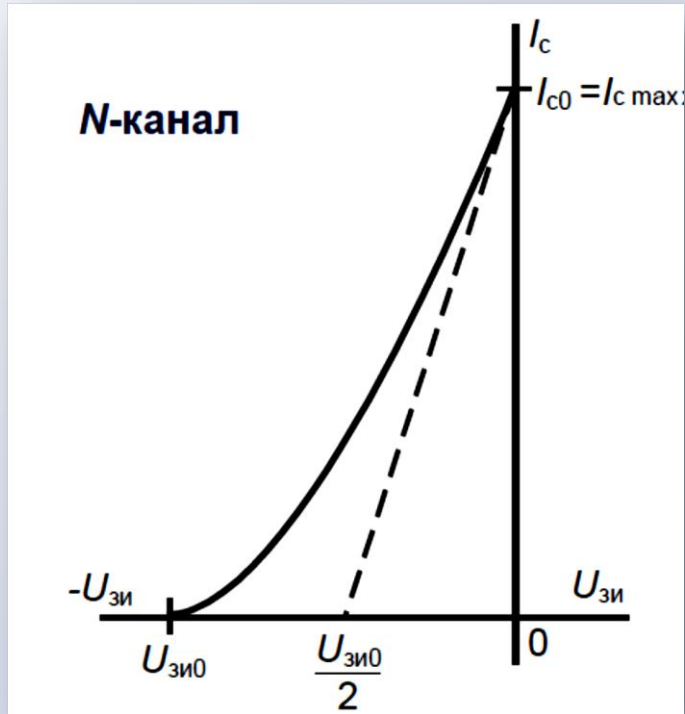
$$I_c = f(U_{зи}) \Big|_{U_{си} = \text{const}}$$

Данная характеристика демонстрирует *управляющее свойство транзистора*. Она соответствует *второй области на стоковых ВАХ ПТ*. В этом режиме ПТ можно представить *источником тока, управляемым напряжением*.

Параметры ПТ с управляющим р-п-переходом

1) $U_{зи0}$ – **пороговое напряжение** (напряжение запирания, напряжение отсечки) – напряжение, при котором ток I_c практически равен нулю – справочный параметр.

$$U_{зи0} = 0,8 \div 10В.$$



2) $I_{c \max}$ (I_{c0}) – **максимальное значение тока стока**, наблюдающееся при $U_{зи} = 0$ – справочный параметр.

$$I_c = I_{c0} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зи0}} \right)^2; \quad U_{зи} = U_{зи0} \left(1 - \sqrt{\frac{I_c}{I_{c0}}} \right).$$

$$U_{зи} = 0; I_c = I_{c \max} = I_{c0}.$$

3) **Крутизна сток-затворной характеристики** отражает влияние $U_{зи}$ на выходной ток I_c транзистора. Обозначается g_m или S , и измеряется в mA/V (миллиАмпер/Вольт).

$$S = \frac{\partial I_c}{\partial U_{зи}} = - \frac{\partial I_c}{\partial |U_{зи}|}.$$

$$S = 0,3 \div 7 mA/B.$$

$$S = \left. \frac{dI_c}{dU_{зи}} \right|_{U_{си} = \text{const}} = \frac{2I_{c0}}{U_{зи0}} \cdot \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зи0}} \right)$$

При $U_{зи} = 0$

$$S_{\max} = S_0 = S_{\text{нач}}$$

4) r_i - **внутреннее сопротивление** характеризует наклон выходной характеристики (II область); показывает динамическое сопротивление канала – справочный параметр.

$$r_i = \left. \frac{dU_{си}}{dI_c} \right|_{U_{зи}=\text{const}} \cong \left. \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \right|_{U_{зи}=\text{const}}$$

$$r_i = 0,02 \div 0,5 \text{ МОм}$$

5) r_{ex} - **входное сопротивление** определяется сопротивлением обратносмещенных p-n-переходов.

$$r_{ex} = \left. \frac{dU_{зи}}{dI_3} \right|_{U_{си}=\text{const}}$$

$$r_{ex} = 10^8 \div 10^9 \text{ Ом}$$

6) $C_{зи}$, $C_{си}$, $C_{зс}$ – **межэлектродные емкости**, обусловленные наличием p-n-переходов, примыкающих к истоку и к стоку.

$$C_{зи} = C_{си} = 6 \div 20 \text{ пФ}; C_{зс} = 2 \div 8 \text{ пФ}.$$

7) **Коэффициент усиления по напряжению μ** определяется отношением малого приращения напряжения между стоком и истоком к малому приращению напряжения между затвором и истоком полевого транзистора при постоянном токе стока

$$\mu = \left. \frac{dU_{cu}}{dU_{зи}} \right|_{I_c=\text{const}}$$

При $I_c = \text{const}$

$$\mu = SR_{cu}.$$

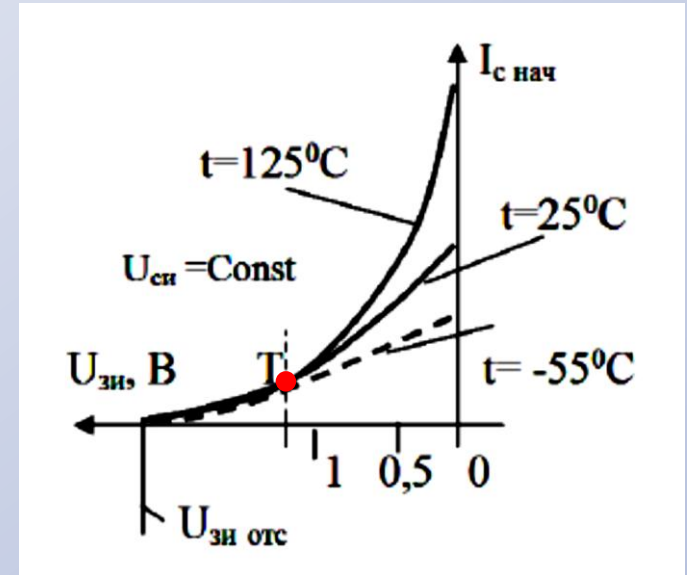
Полевые транзисторы с управляющим p-n-переходом выпускаются на токи до 50 мА и напряжения до 50В.

Температурные свойства ПТ с управляющим p – n -переходом

Изменение параметров и характеристик ПТ с изменением температуры обусловлено **ИЗМЕНЕНИЕМ:**

- *обратного тока p – n -перехода;*
- *контактной разности потенциалов;*
- *удельного сопротивления канала.*

Особое свойство ПТ с управляющим p – n -переходом – наличие термостабильной точки $T!!!$



Это свойство обусловлено тем, что с ростом температуры удельное сопротивление канала увеличивается, вызывая уменьшение тока стока. Это дает возможность правильным выбором режимов взаимно компенсировать изменения тока стока, вызванные изменением контактной разности потенциалов и удельного сопротивления канала. При этом можно добиться, чтобы ток I_c оставался неизменным в широком диапазоне изменения температур. Это объясняется тем, что **контактная разность потенциалов с увеличением температуры уменьшается** приблизительно на 2,2 мВ/град, что должно (при неизменном $U_{зи}$) приводить к увеличению тока стока. Увеличение удельного сопротивления канала должно приводить к уменьшению этого тока. Ориентировочное положение термостабильной точки на стоко-затворной характеристике определяется значением: $|U_{зи \text{ т}}| = |U_{зи \text{ отс}}| - 0,63 \text{ В}$.

Недостаток этого режима – малая крутизна характеристик.

Полевой транзистор с изолированным затвором

Полевой транзистор с изолированным затвором – это транзистор, затвор которого электрически изолирован от проводящего канала полупроводника слоем диэлектрика. Поэтому, у них высокое входное сопротивление (у некоторых моделей оно достигает 10^{17} Ом).

В зависимости от **физической структуры**

МОП-транзистор (Металл-Оксид-Полупроводник)

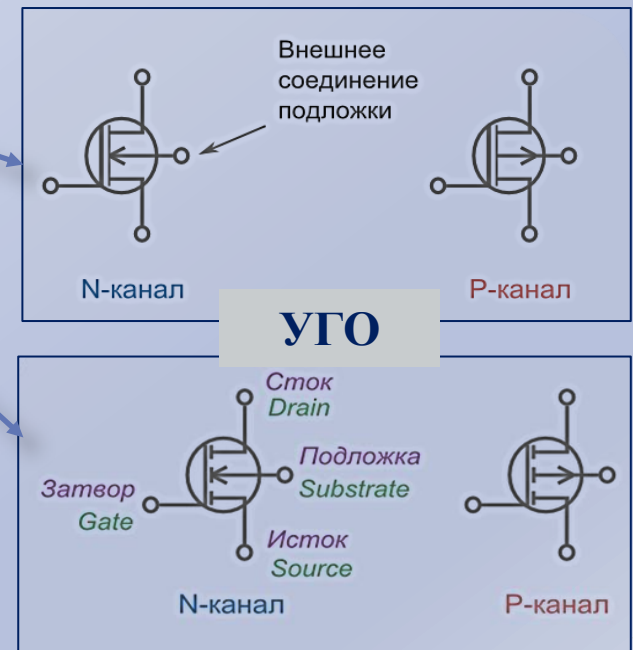
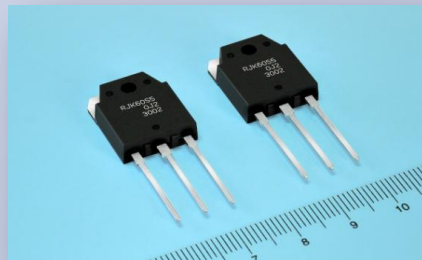
МДП-транзистор (Металл-Диэлектрик-Полупроводник)

MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistor)

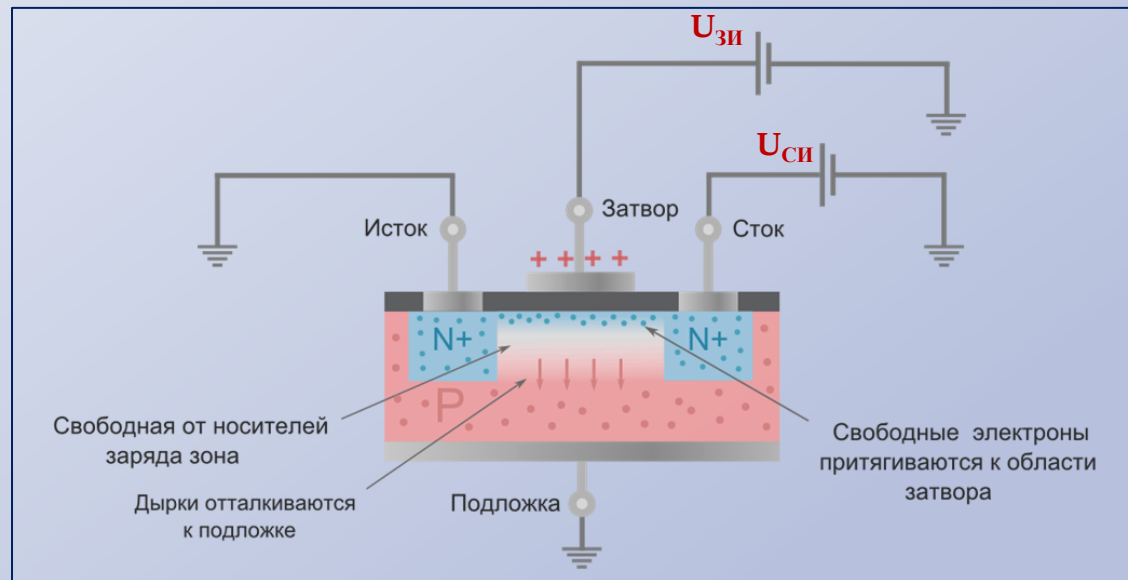
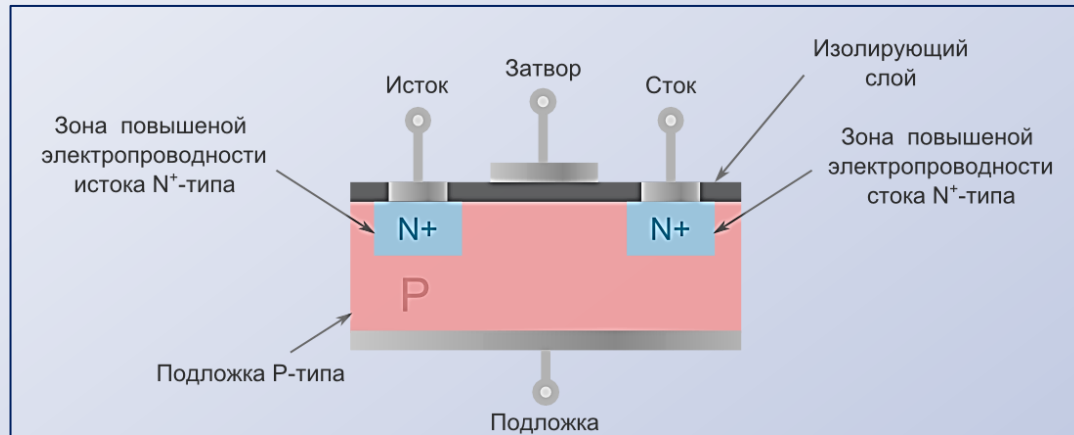
МДП-транзисторы

со **встроенным каналом**

с **индуцированным каналом**



МДП-транзистор с индуцированным каналом



ВАХ МДП-транзистора с индуцированным каналом

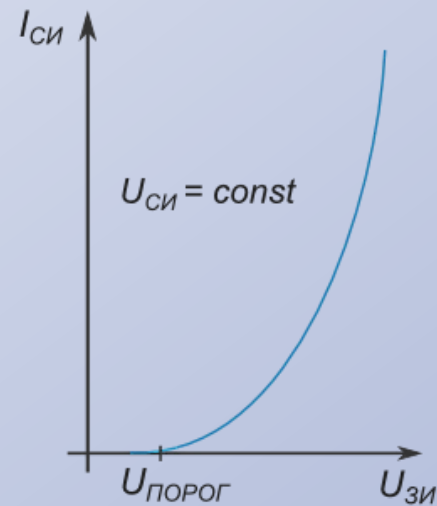
Стоковые (выходные) характеристики

$$I_c = f(U_{си})|_{U_{зи}=\text{const}}$$



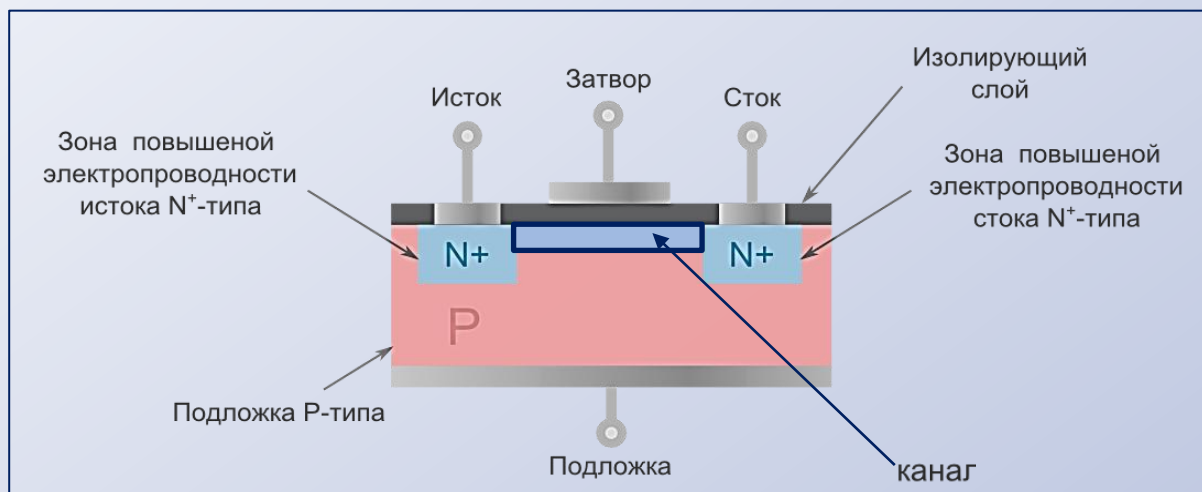
Стоко-затворная характеристика

$$I_c = f(U_{зи})|_{U_{си}=\text{const}}$$



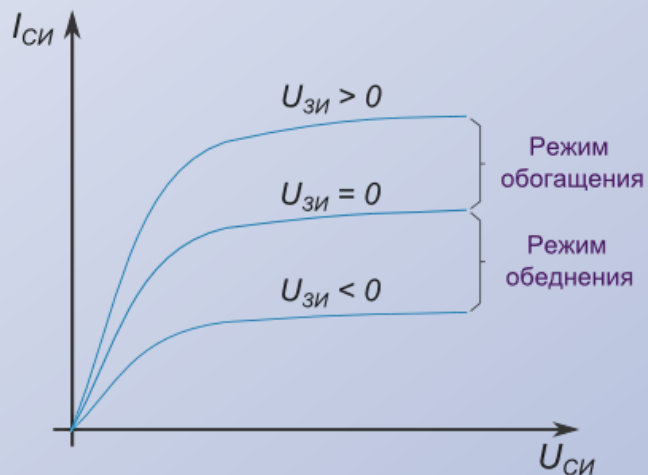
МОП-транзисторы с индуцированным каналом являются доминирующими элементами современных сверхбольших интегральных схем

МДП-транзистор со встроенным каналом



Стоковые (выходные) характеристики

$$I_c = f(U_{си}) \Big|_{U_{зи} = \text{const}}$$



Стоко-затворная характеристика

$$I_c = f(U_{зи}) \Big|_{U_{си} = \text{const}}$$

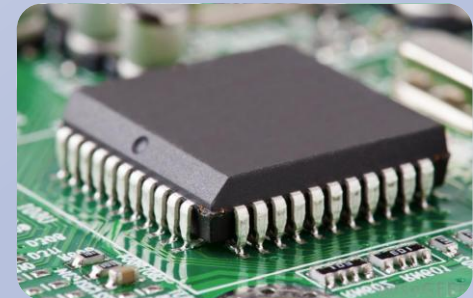
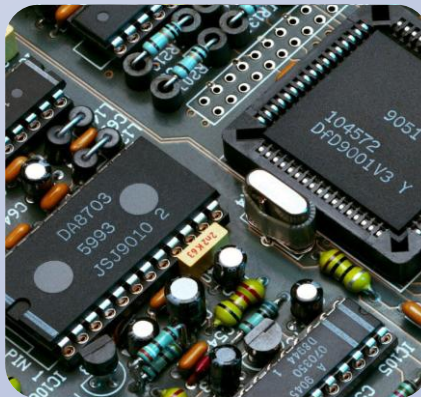
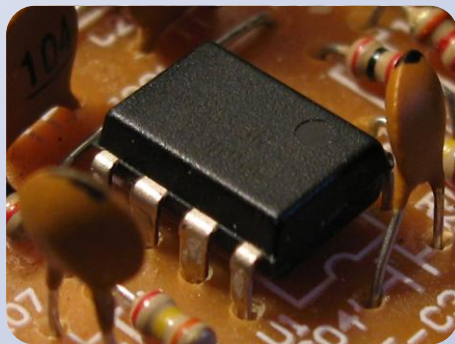


При $U_{зи} < 0$ поле затвора выталкивает носители заряда – электроны из токопроводящего канала, тем самым обедняя его носителями, что приводит к снижению его проводимости, а $\Rightarrow$ и тока I_c . Данный режим работы транзистора называют **режимом обеднения канала носителями**.

При $U_{зи} > 0$ поле затвора притягивает электроны из р-области и слоев стока и истока, тем самым увеличивая концентрацию носителей заряда в канале (обогащение носителями канала), и увеличивая его проводимость, $\Rightarrow$ ток I_c повышается. Такой режим получил название **режим обогащения канала носителями**.

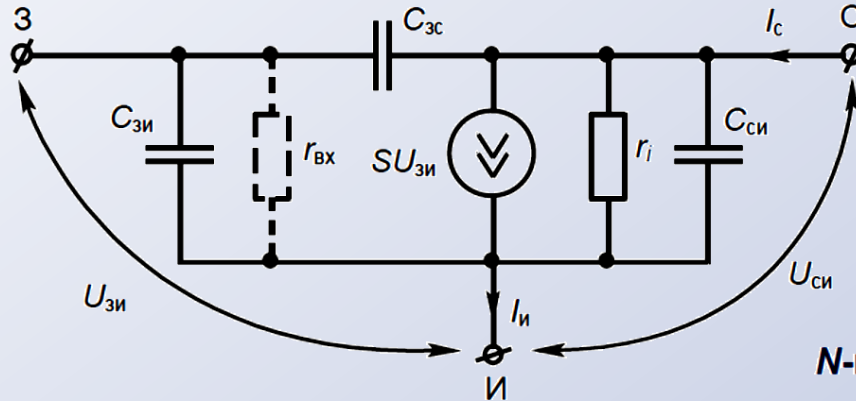
Особенности применения полевых транзисторов

1. **n-канальные транзисторы обладают большей крутизной S , чем р-канальные, и поэтому чаще используются в практических схемах.**
2. **Наиболее часто на практике применяются МДП-транзисторы с индуцированным каналом.**
3. **Отсутствие принципиальной разницы по малосигнальным параметрам (свойствам) между МДП-транзисторами и ПТ с управляющим р-п-переходом.**
4. **Имеется различие между МДП-транзисторами со встроенным и индуцированным каналами и полевым транзистором с управляющим р-п-переходом при задании рабочей точки транзистору.**



Малосигнальная схема замещения полевого транзистора

Приведенная схема замещения справедлива для всех типов полевых транзисторов и характеризует работу транзистора во II-ой области ВАХ для переменных составляющих тока и напряжения.



$C_{зи}$, $C_{зс}$, $C_{си}$ – межэлектродные емкости – оказывают влияние в области верхних частот.

$SU_{зи}$ – источник тока, отражающий влияние $U_{зи}$ на ток I_c .
 r_i – внутреннее сопротивление – учитывает влияние напряжения $U_{си}$ на ток I_c .

$r_{вх}$ – входное сопротивление транзистора (пренебрегаем).

N-канал

Конструкция ПТ

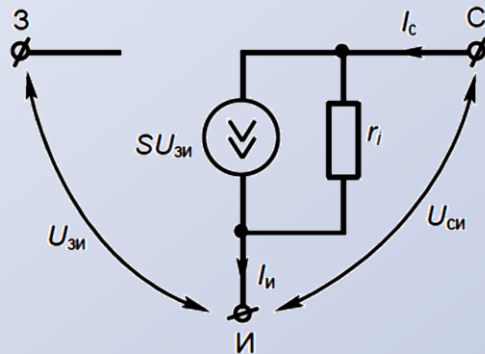
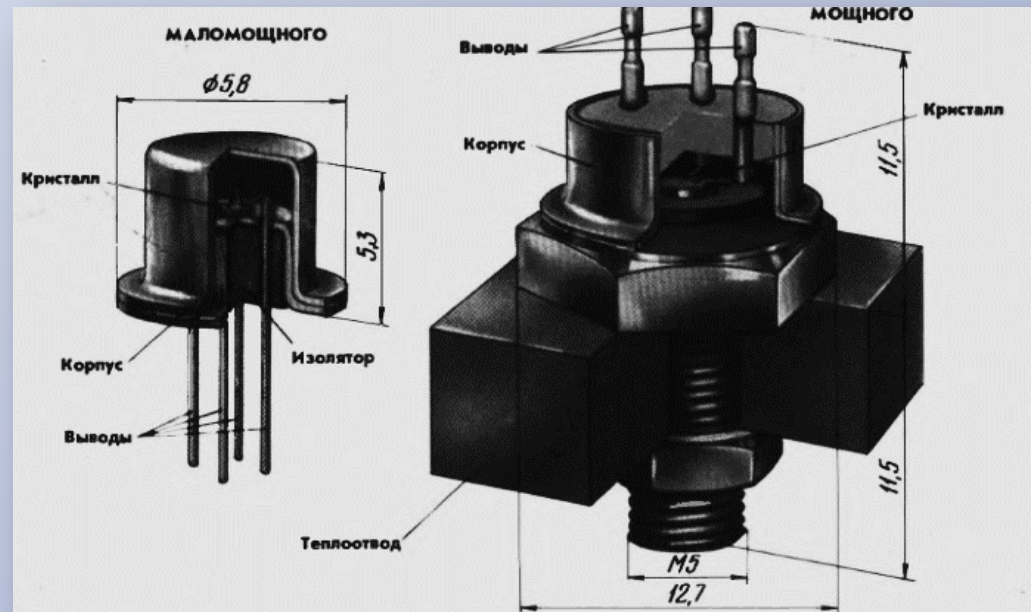
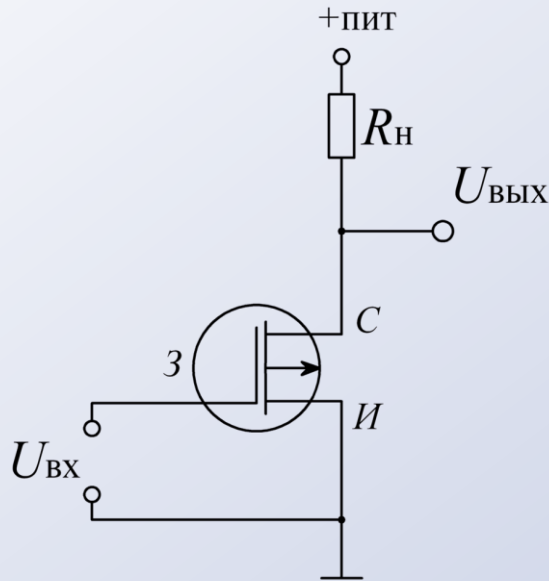


Схема замещения на низких частотах

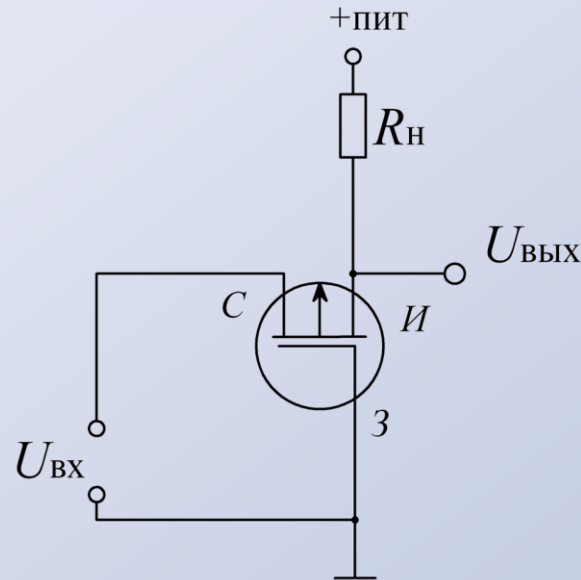


Схемы включения полевых транзисторов



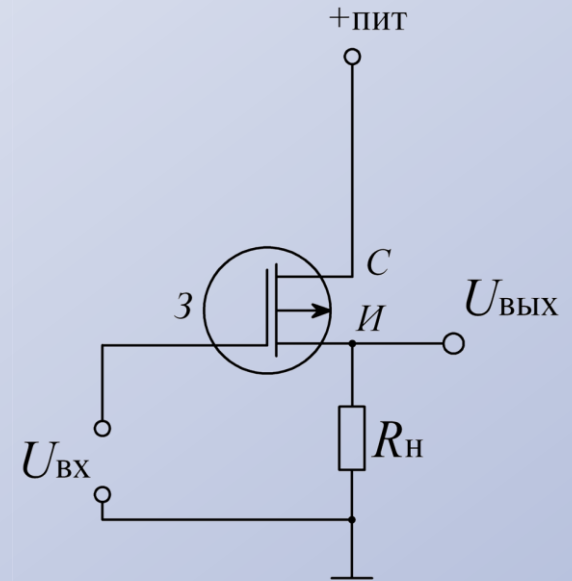
с общим истоком - ОИ

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



с общим затвором - ОЗ

1. Аналогична схеме с общей базой.
2. **Не дает усиления по току и поэтому коэффициент усиления по мощности незначителен.**
3. **Фаза напряжения при усилении не изменяется.**
4. **Входное сопротивление мало, так как входным током является ток истока. Поэтому отдельно практически не используется**



с общим стоком - ОС

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

ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ПЕРЕД БИПОЛЯРНЫМИ

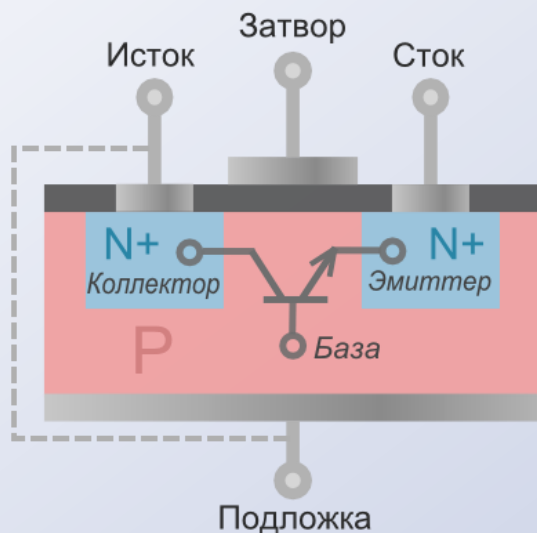
Полевые транзисторы получили широкое распространение в интегральных схемах в качестве ключей (электронных переключателей)

ГЛАВНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

- Благодаря очень **высокому входному сопротивлению**, цепь полевых транзисторов **расходует крайне мало энергии**, так как практически не потребляет входного тока.
- **Усиление по току** у полевых транзисторов **намного выше**, чем у биполярных.
- **Значительно выше помехоустойчивость и надежность работы**, поскольку из-за отсутствия тока через затвор транзистора, управляющая цепь со стороны затвора изолирована от выходной цепи со стороны стока и истока.
- У полевых транзисторов на порядок **выше скорость перехода между состояниями проводимости и непроводимости тока**. Поэтому они могут работать на более высоких частотах, чем биполярные.

ГЛАВНЫЕ НЕДОСТАТКИ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

- У полевых транзисторов **большее падение напряжения из-за высокого сопротивления между стоком и истоком, когда прибор находится в открытом состоянии**.
- Структура полевых транзисторов **начинает разрушаться при меньшей температуре (150С), чем структура биполярных транзисторов (200С)**.
- Несмотря на то, что полевые транзисторы потребляют намного меньше энергии, по сравнению с биполярными транзисторами, **при работе на высоких частотах ситуация кардинально меняется. На частотах выше, примерно, чем 1.5 GHz, потребление энергии у МОП-транзисторов начинает возрастать по экспоненте**. Поэтому скорость процессоров перестала так стремительно расти, и их производители перешли на стратегию «многоядерности».



Паразитный биполярный NPN-транзистор
внутри МДП-транзистора

- При изготовлении мощных МОП-транзисторов, в их структуре возникает «паразитный» биполярный транзистор. Для того, чтобы нейтрализовать его влияние, подложку закорачивают с истоком. Это эквивалентно закорачиванию базы и эмиттера паразитного транзистора. В результате напряжение между базой и эмиттером биполярного транзистора никогда не достигнет необходимого, чтобы он открылся (около 0.6 В необходимо, чтобы р-п переход внутри прибора начал проводить). Однако, при быстром скачке напряжения между стоком и истоком полевого транзистора, паразитный транзистор может случайно открыться, в результате чего, вся схема может выйти из строя.

- **Важнейшим недостатком** полевых транзисторов является их **чувствительность к статическому электричеству**. Поскольку изоляционный слой диэлектрика на затворе чрезвычайно тонкий, иногда даже относительно невысокого напряжения бывает достаточно, чтоб его разрушить. А разряды статического электричества, присутствующего практически в каждой среде, могут достигать несколько тысяч вольт. Поэтому внешние корпуса полевых транзисторов стараются создавать таким образом, чтоб минимизировать возможность возникновения нежелательного напряжения между электродами прибора. Одним из таких методов является **закорачивание истока с подложкой и их заземление**. Также в некоторых моделях используют специально встроенный диод между стоком и истоком. При работе с интегральными схемами (чипами), состоящими преимущественно из полевых транзисторов, желательно использовать заземленные антистатические браслеты. При транспортировке интегральных схем используют вакуумные антистатические упаковки.