

Полевые транзисторы (FET)



Полевым называется транзистор, действие которого основано на использовании тока основных носителей заряда в полупроводнике (электронов и дырок). Управление током основных носителей осуществляется внешним электрическим полем.

Первый полевой транзистор был создан в 1952 году В.Шокли. В настоящее время транзистор является почти универсальным активным компонентом радиоэлектронной аппаратуры. Полевые транзисторы также называют **униполярными**. Это значит, что в процессе протекания тока у них участвует только один вид носителей заряда (или электроны, или дырки).

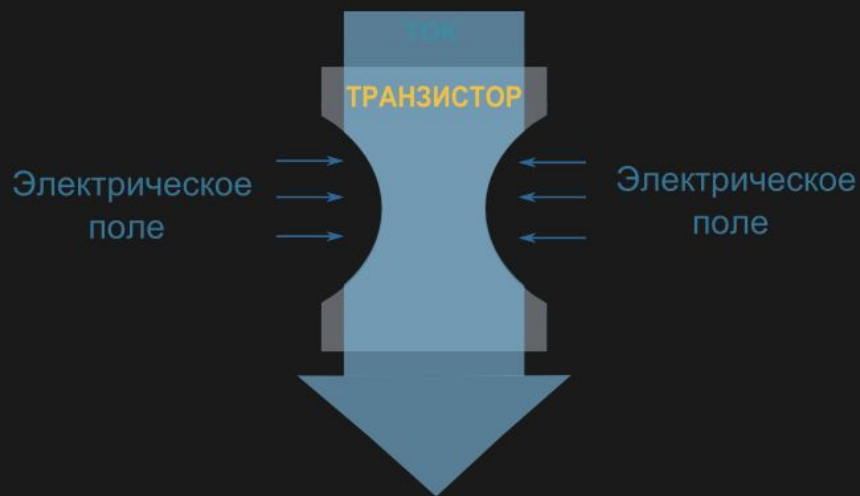
Преимущества полевого транзистора перед биполярным:

- ▶ Высокое входное сопротивление
- ▶ Малая потребляемая мощность
- ▶ Схемы с ПТ более помехоустойчивые
- ▶ Габариты ПТ значительно меньше, что позволяет повысить плотность компоновки интегральных схем на ПТ

недостатки:

- ▶ Чувствительность к статическому электричеству

Принцип действия полевого и биполярного транзистора



Принцип действия
полевого транзистора



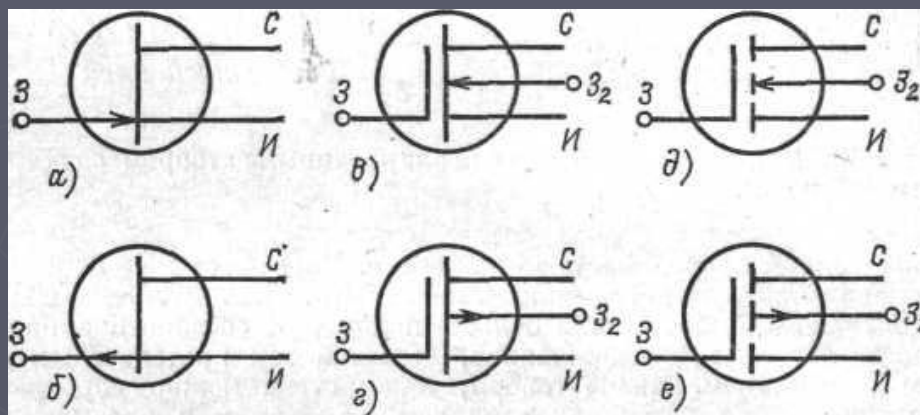
$$\text{Большой ток} = \text{Маленький ток} * \text{Коэффициент усиления}$$

Принцип действия
биполярного транзистора

Имеется два типа полевых транзисторов:

- ▶ ПТ с затвором на р-п переходе (с управляющим р-п переходом)
- ▶ ПТ с изолированным затвором:
 - со встроенным каналом
 - с индуцированным каналом

Условные обозначения ПТ:



- ▶ а и б — с управляющим р-п переходом;
- ▶ в и г — с изолированным затвором и встроенным каналом;
- ▶ д и е — с изолированным затвором и индуцированным каналом.
(Стрелка, направленная внутрь) обозначает транзистор с каналом типа *n*, а наружу — с каналом типа *p*).

ПТ с управляющим р-n переходом:

Условные обозначения:

С каналом n-типа

С каналом p-типа

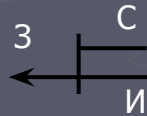
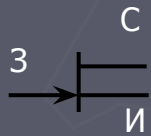
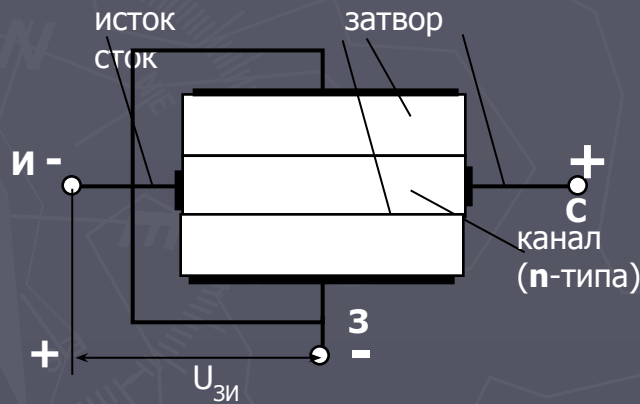


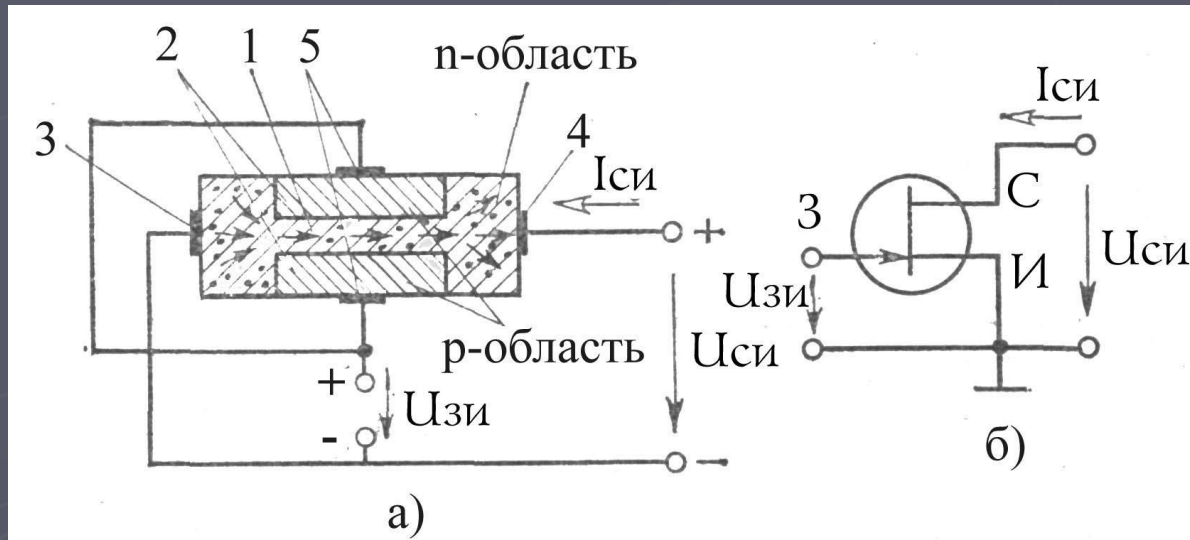
Схема структуры



Принцип действия:

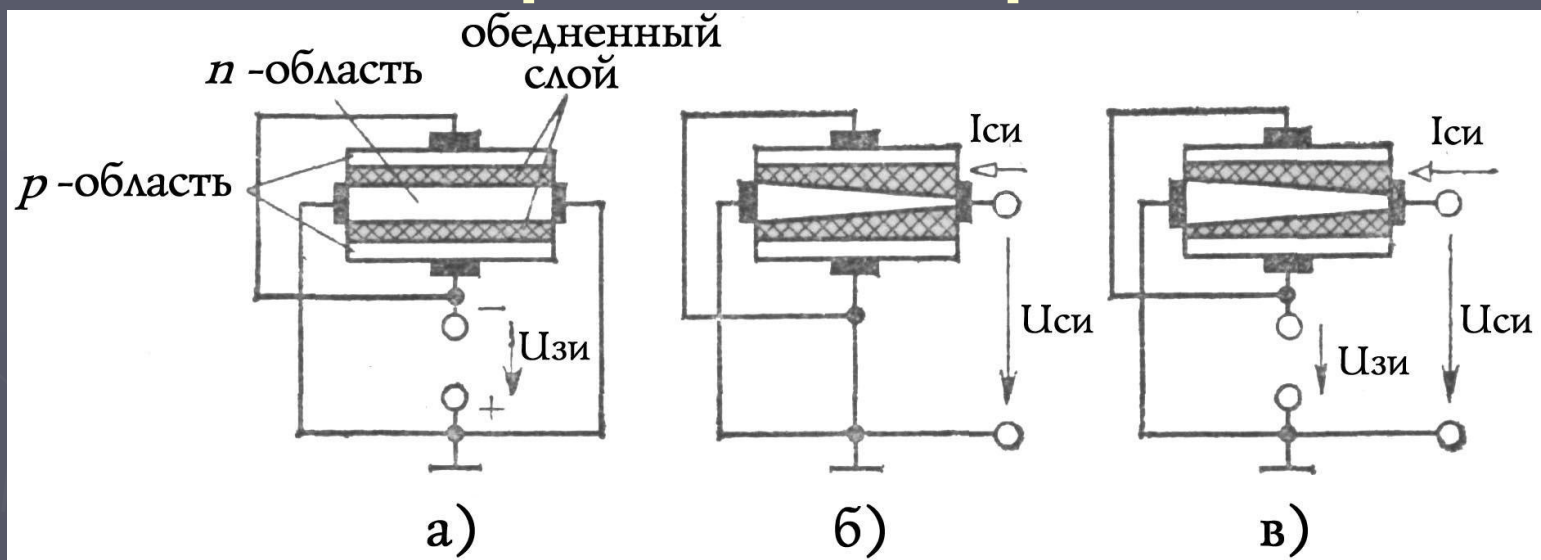
Напряжение затвор - исток, приложенное к **p-n** переходу в обратном направлении, изменяет ширину канала, по которому проходит ток исток - сток и, следовательно, его сопротивление.

Структурная схема и схема включения полевого транзистора с n -каналом и управляющим p - n -переходом



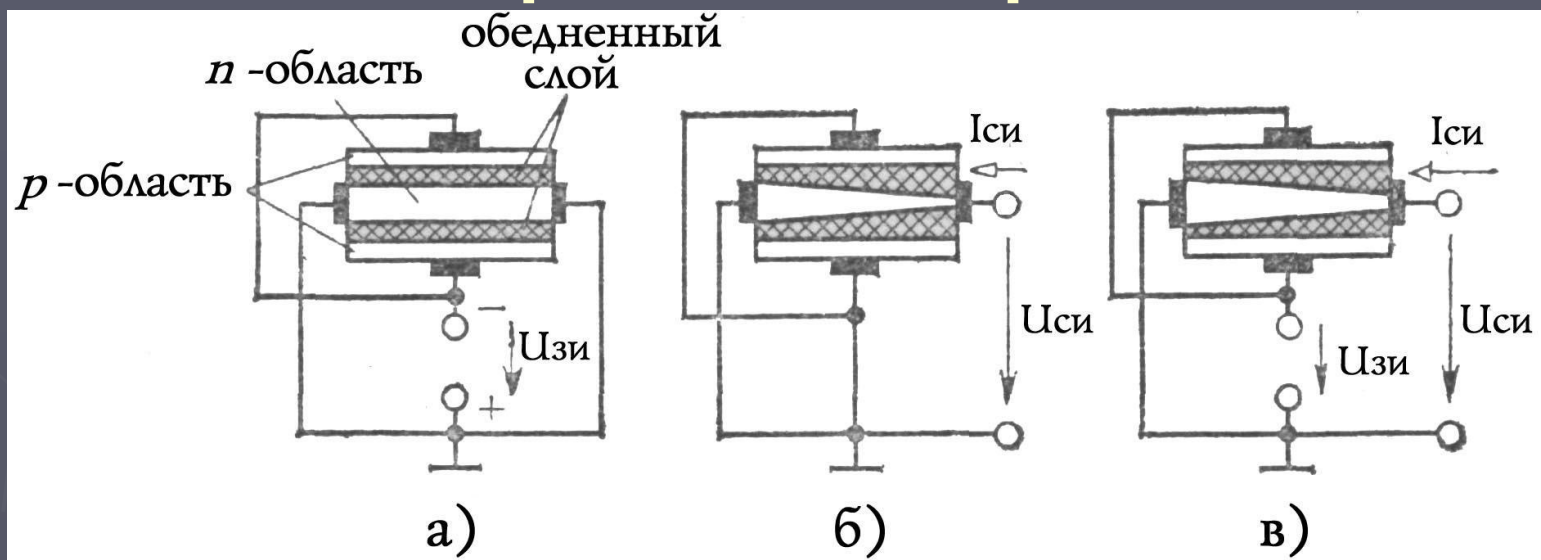
В основе устройства лежит пластинка из полупроводника с проводимостью (например) n -типа. На противоположных концах она имеет электроды, подав напряжение на которые мы получим ток от истока к стоку. Сверху на этой пластинке есть область с противоположным типом проводимости, к которой подключен третий электрод — затвор. Естественно, что между затвором и n -областью под ним (**каналом**) возникает p - n переход.

Перекрытие канала в полевом транзисторе



Поскольку p-слой значительно уже канала, то большая часть обедненной подвижными носителями заряда области перехода будет приходиться на n-слой. Соответственно, если мы подадим на переход напряжение обратного смещения, то, закрываясь, он значительно увеличит сопротивление канала и уменьшит ток между истоком и стоком. Таким образом, происходит регулирование выходного тока транзистора с помощью напряжения (электрического поля) затвора.

Перекрытие канала в полевом транзисторе



Даже при нулевом напряжении на затворе, между затвором и стоком существует обратное напряжение, равное напряжению исток-сток. Вот почему р-п переход имеет такую неровную форму, расширяясь к области стока.

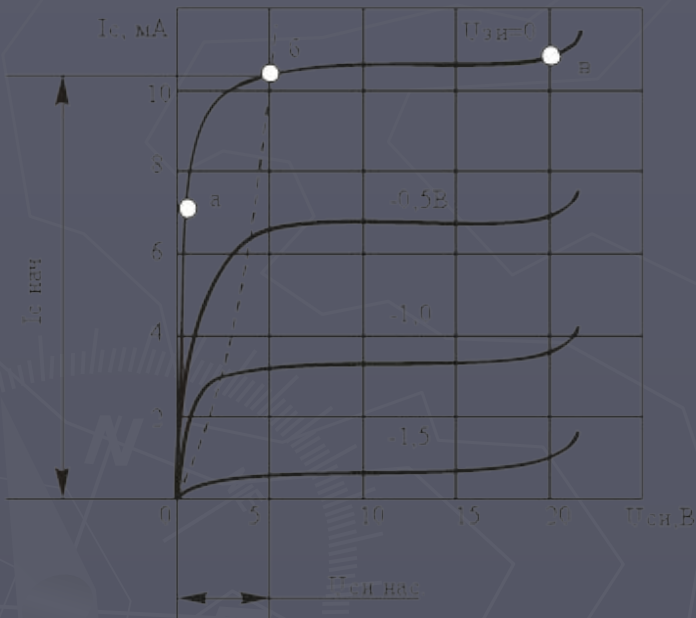
Характеристики ПТ с управляющим р-n-переходом и каналом типа n:

Выходной (стоковой) называется зависимость тока стока от напряжения исток-сток при постоянном напряжении затвор-исток.

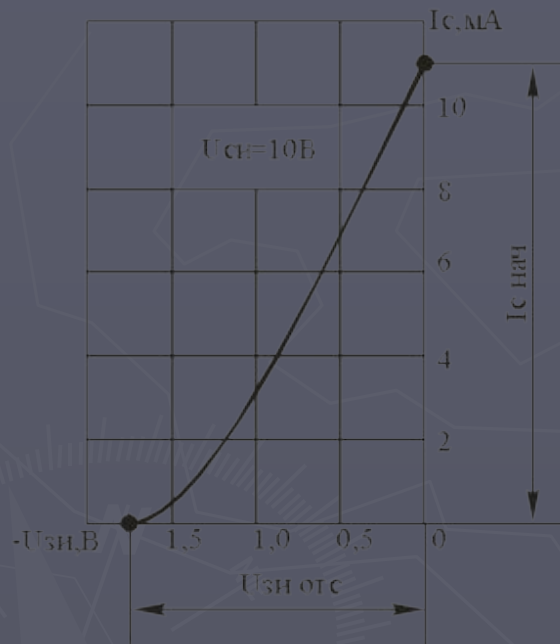
На графике можно четко выделить три зоны. Первая из них — зона резкого возрастания тока стока. Это так называемая **«омическая» область**. Канал «исток-сток» ведет себя как резистор, чье сопротивление управляется напряжением на затворе транзистора.

Вторая зона — **область насыщения**. Она имеет почти линейный вид. Здесь происходит перекрытие канала в области стока, которое увеличивается при дальнейшем росте напряжения исток-сток. Соответственно, растет и сопротивление канала, а стоковый ток меняется очень слабо. Именно этот участок характеристики используют в усилительной технике, поскольку здесь наименьшие нелинейные искажения сигналов и оптимальные значения малосигнальных параметров, существенных для усиления. К таким параметрам относятся крутизна характеристики, внутреннее сопротивление и коэффициент усиления.

Третья зона графика — **область пробоя**



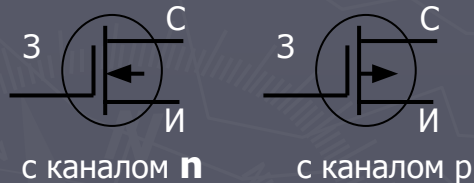
Характеристики ПТ с управляющим р-n-переходом и каналом типа n:



Стоко-затворная характеристика.

Она показывает то, как зависит ток стока от напряжения затвор-исток при постоянном напряжении между истоком и стоком. И именно ее крутизна является одним из основных параметров полевого транзистора.

ПТ с изолированным затвором и встроенным каналом:



Есть подложка из полупроводника с p-проводимостью, в которой сделаны две сильно легированные области с n-проводимостью (исток и сток). Между ними пролегает узкая приповерхностная перемычка, проводимость которой также n-типа. Над ней на поверхности пластины имеется тонкий слой диэлектрика (чаще всего из диоксида кремния — отсюда аббревиатура МОП). А уже на этом слое и расположен затвор — тонкая металлическая пленка. Сам кристалл обычно соединен с истоком, хотя бывает, что его подключают и отдельно.

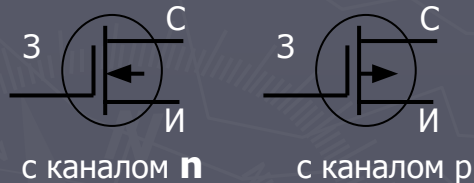
Если при нулевом напряжении на затворе подать напряжение исток-сток, то по каналу между ними потечет ток.

ПТ с изолированным затвором и встроенным каналом:



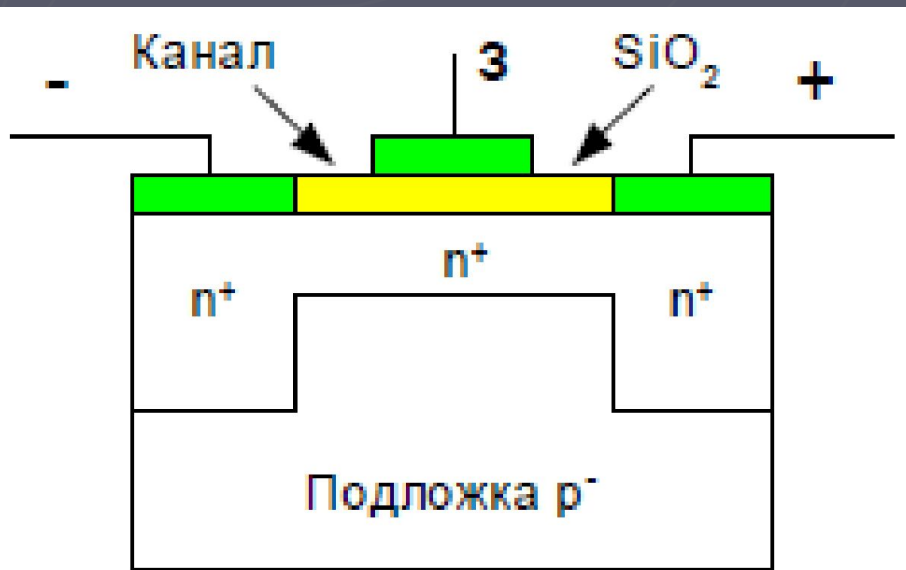
А теперь подадим на затвор отрицательное относительно истока напряжение. Возникшее поперечное электрическое поле «вытолкнет» электроны из канала в подложку. Соответственно, возрастет сопротивление канала и уменьшится текущий через него ток. Такой режим, при котором с возрастанием напряжения на затворе выходной ток падает, называют **режимом обеднения**.

Если же мы подадим на затвор напряжение, которое будет способствовать возникновению «помогающего» электронам поля «приходить» в канал из подложки, то транзистор будет работать в **режиме обогащения**. При этом сопротивление канала будет падать, а ток через него расти.



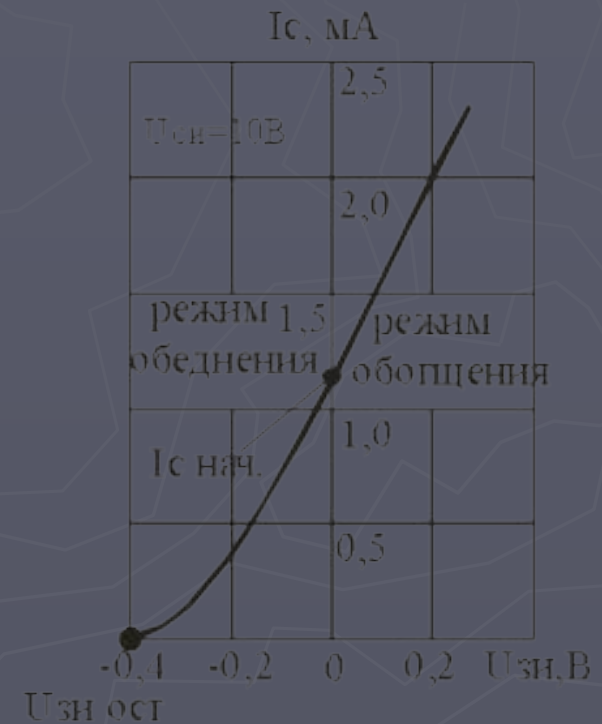
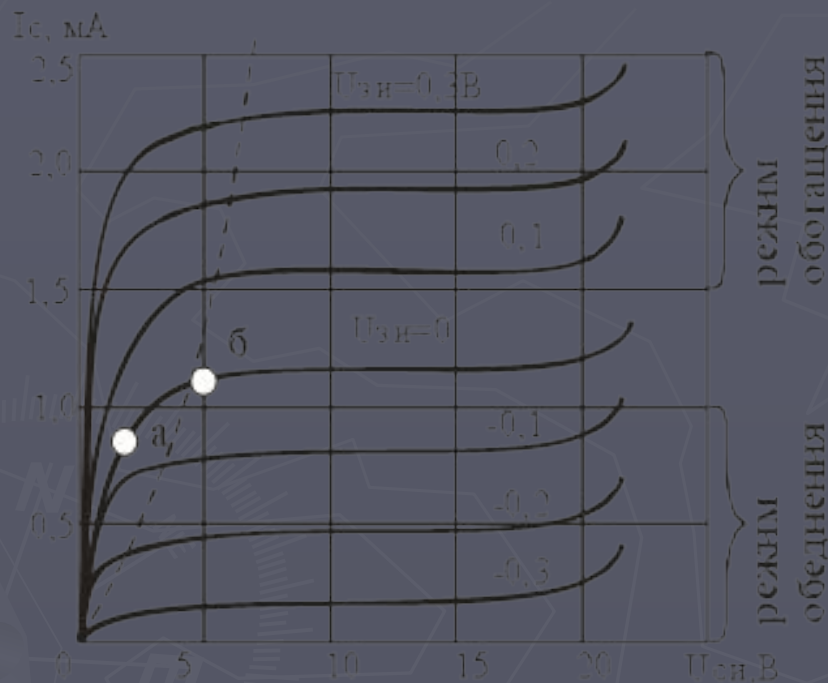
Конструкция транзистора с изолированным затвором похожа на конструкцию с управляющим p-n переходом тем, что даже при нулевом токе на затворе при ненулевом напряжении исток-сток между ними существует так называемый **начальный ток стока**.

ПТ с изолированным затвором и встроенным каналом:

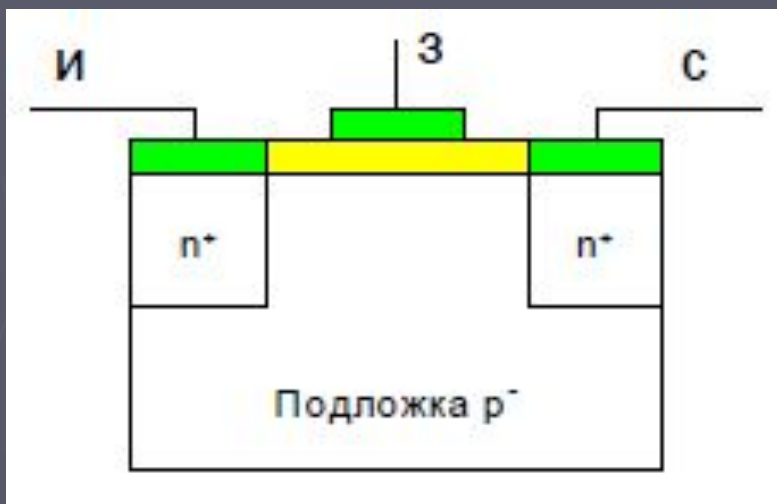


1. При отсутствии управляющего напряжения (**U_{зи}**) через канал протекает ток между И и С.
2. При подаче U_{зи} прямой полярности (**p⁺, n⁻**) в канал притягиваются электроны из подложки ⇒ его сопротивление уменьшается, ток через нагрузку растет.
3. При подаче напряжения обратной полярности электроны из канала выталкиваются ⇒ сопротивление его увеличивается.

Семейства стоковых и стоко-затворная характеристики транзистора с встроенным каналом



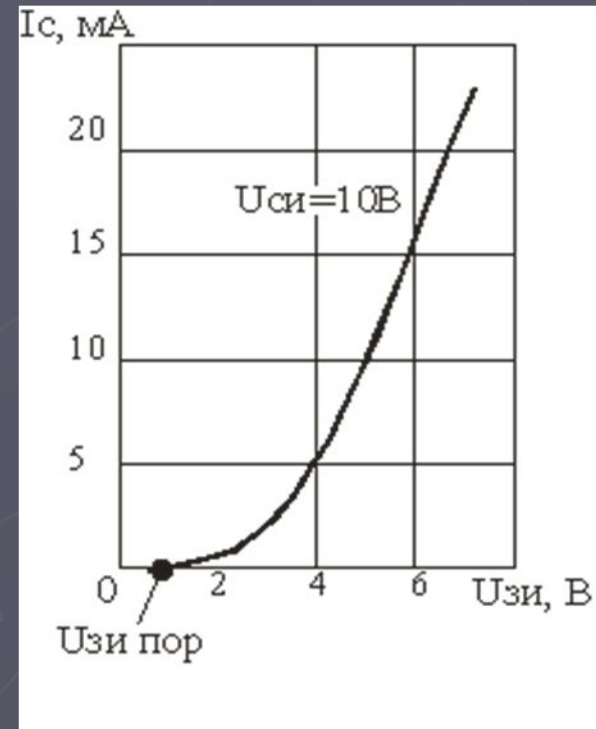
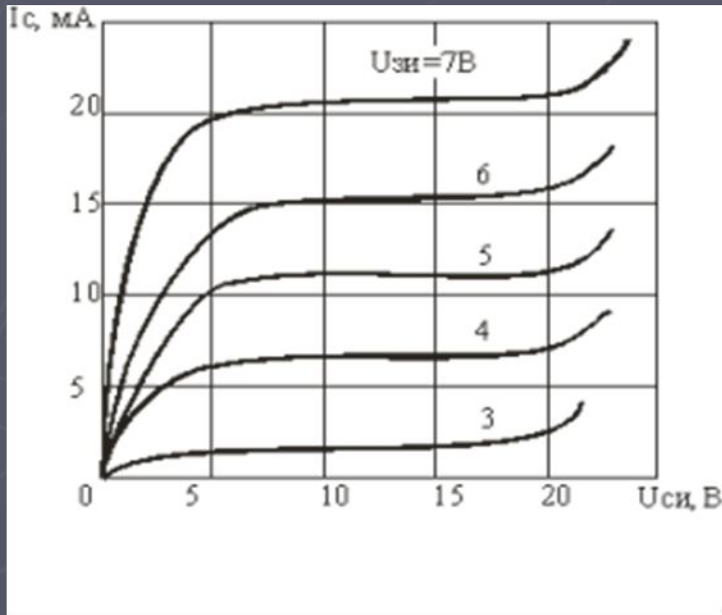
МДП - транзистор с индуцированным каналом



У транзистора с индуцированным каналом канал между сильнолегированными областями стока и истока появляется только при подаче на затвор напряжения определенной полярности.

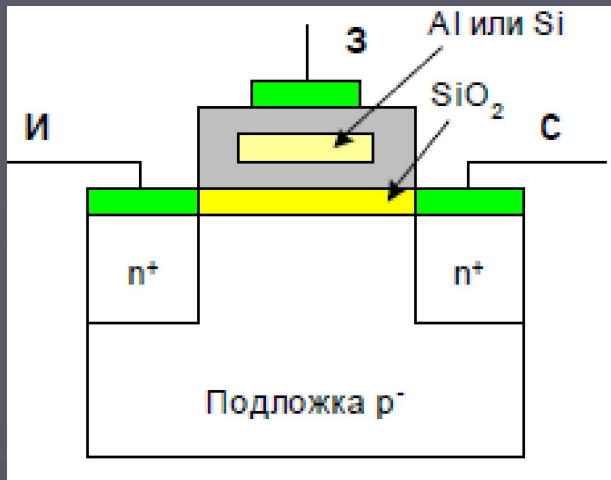
Если подать напряжение только на исток и сток, ток между ними течь не будет, поскольку один из p-n переходов между ними и подложкой закрыт. Подадим на затвор (прямое относительно истока) напряжение. Возникшее электрическое поле «потянет» электроны из сильнолегированных областей в подложку в направлении затвора. И по достижении напряжением на затворе определенного значения в приповерхностной зоне произойдет так называемая **инверсия** типа проводимости. Т.е. концентрация электронов превысит концентрацию дырок, и между стоком и истоком возникнет тонкий канал n-типа. Транзистор начнет проводить ток, тем сильнее, чем выше напряжение на затворе. Из такой его конструкции понятно, что работать транзистор с индуцированным каналом может только находясь в режиме обогащения. Поэтому они часто встречаются в устройствах переключения.

Семейства стоковых и стоко-затворная характеристики транзистора с индуцированным каналом



МНОП – транзистор с плавающим затвором

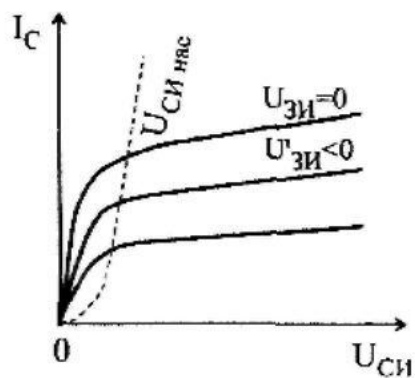
М - металл, Н – сплав HSi_3N_4 , О – оксид металла, П – полупроводник



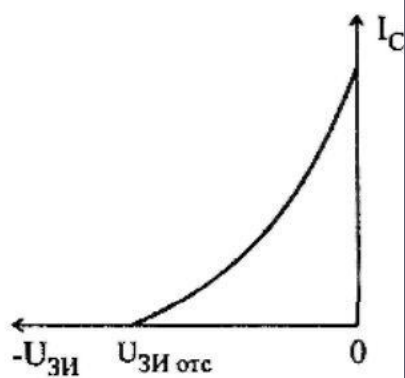
Принцип действия этих транзисторов основан на том, что в сильных электрических полях электроны могут проникать в диэлектрик на глубину до 1мкм.

В структурах типа металл-нитрид-оксид-полупроводник (МНОП) диэлектрик под затвором выполняется двухслойным: слой оксида SiO_2 и толстый слой нитрида Si_3N_4 . Между слоями образуются ловушки электронов, которые при подаче на затвор МНОП-структуры положительного напряжения (28..30 В) захватывают туннелирующие через тонкий слой SiO_2 электроны. Образующиеся отрицательно заряженные ионы повышают пороговое напряжение, причём их заряд может храниться до нескольких лет при отсутствии питания, так как слой SiO_2 предотвращает утечку заряда. При подаче на затвор большого отрицательного напряжения (28...30 В), накопленный заряд рассасывается, что существенно уменьшает пороговое напряжение.

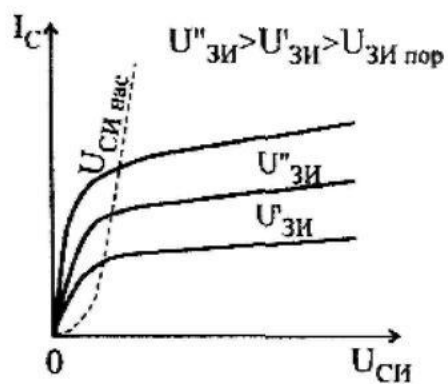
Применяются в интегральных микросхемах ЗУ в виде ячейки для хранения 1бит информации



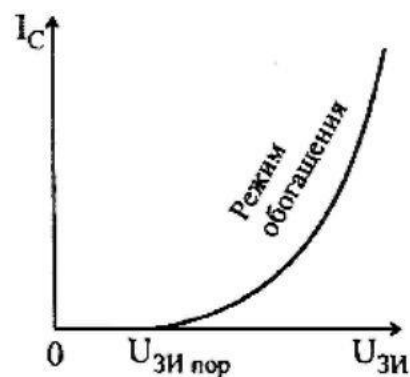
а



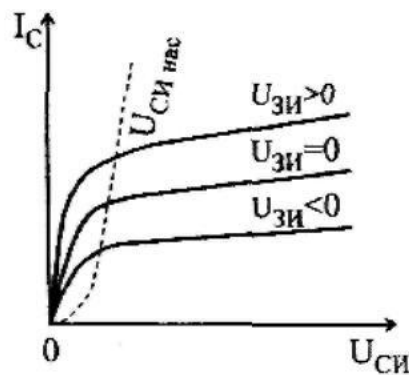
б



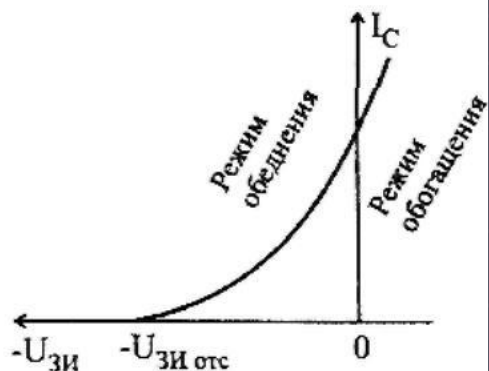
в



г



д



е

Дифференциальные параметры полевых транзисторов. Основными дифференциальными параметрами полевых транзисторов являются:

- крутизна $S = dI_c / dU_{зи} |_{U_{си} = \text{const}}$;
- внутреннее (дифференциальное) сопротивление $R_i = dU_{си} / dI_{и} |_{U_{зи} = \text{const}}$;
- коэффициент усиления по напряжению $\mu = dU_{си} / dU_{зи} |_{I_c = \text{const}}$.

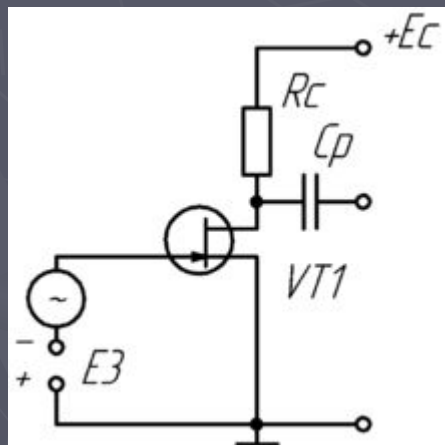
Все три параметра связаны выражением $\mu = SR_i$.

Схемы включения полевых транзисторов

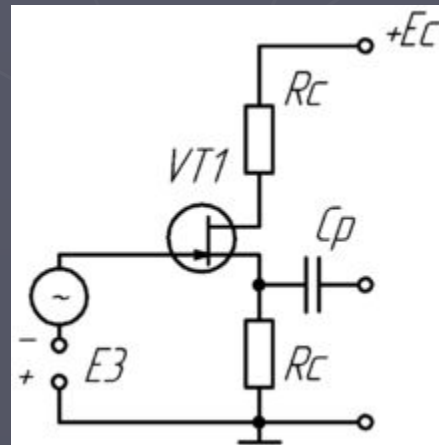
Чаще всего применяется **схема с общим истоком**, как дающая большее усиление по току и мощности.

Схема с общим затвором усиления тока почти не дает и имеет маленькое входное сопротивление. Из-за этого такая схема включения имеет ограниченное практическое применение.

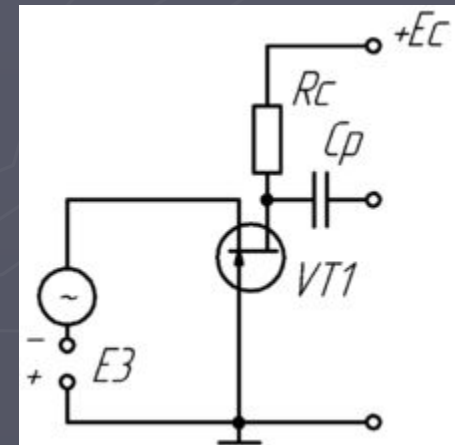
Схему с общим стоком также называют *истоковым повторителем*. Ее коэффициент усиления по напряжению близок к единице, входное сопротивление велико, а выходное мало.



С общим истоком



С общим стоком



С общим затвором

Области применения ПТ:

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