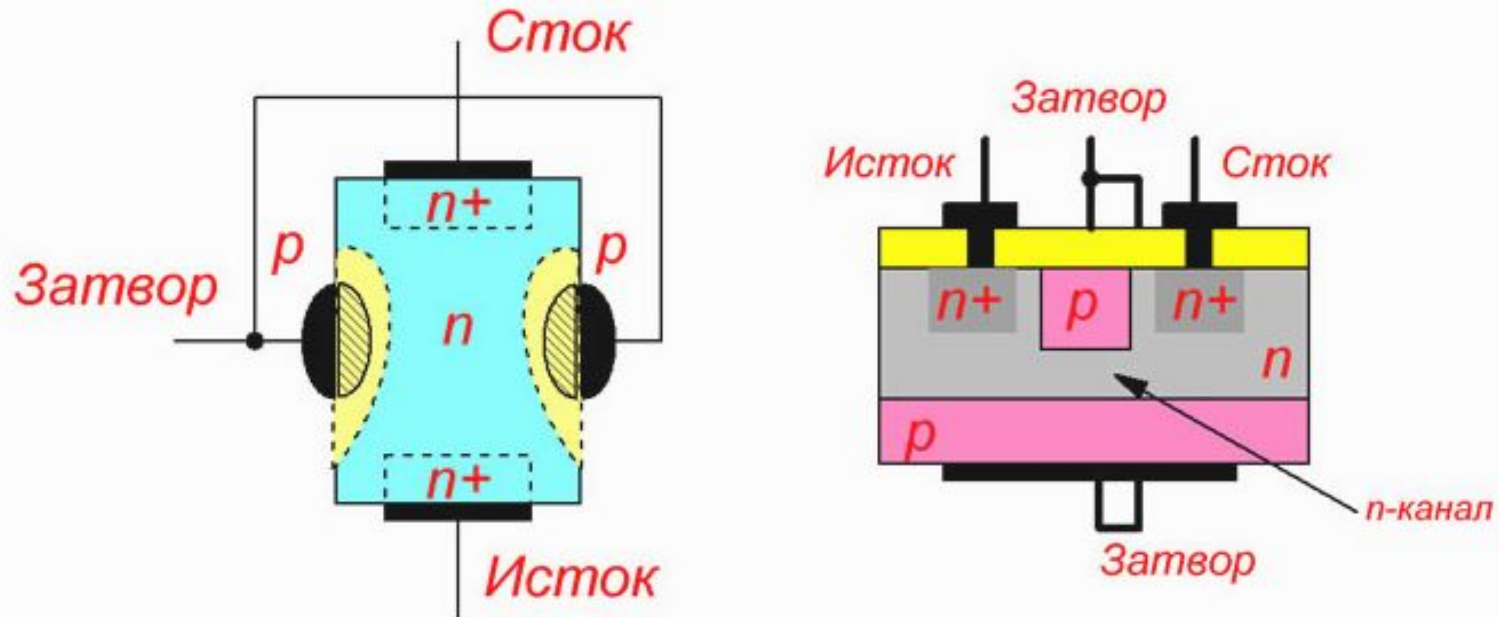


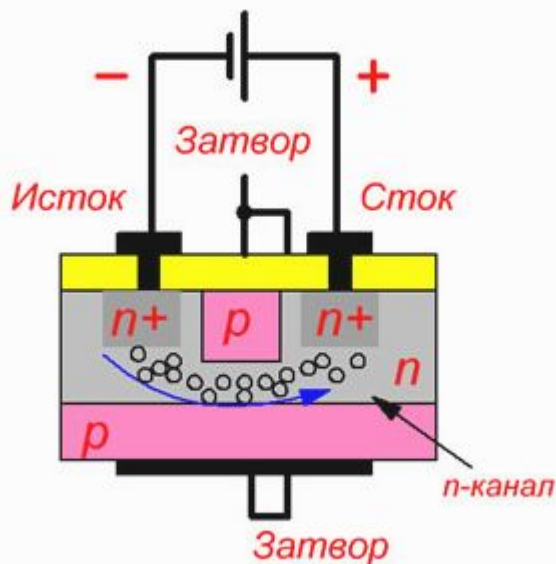
Полевые транзисторы.

**Полевой (униполярный) транзистор — полупроводниковый прибор, работа которого основана на управлении электрическим сопротивлением токопроводящего канала поперечным электрическим полем, создаваемым приложенным к затвору напряжением.**

Область, из которой носители заряда уходят в канал, называется истоком, область, в которую они входят, называется стоком, электрод, на который подается управляющее напряжение, называется затвором.

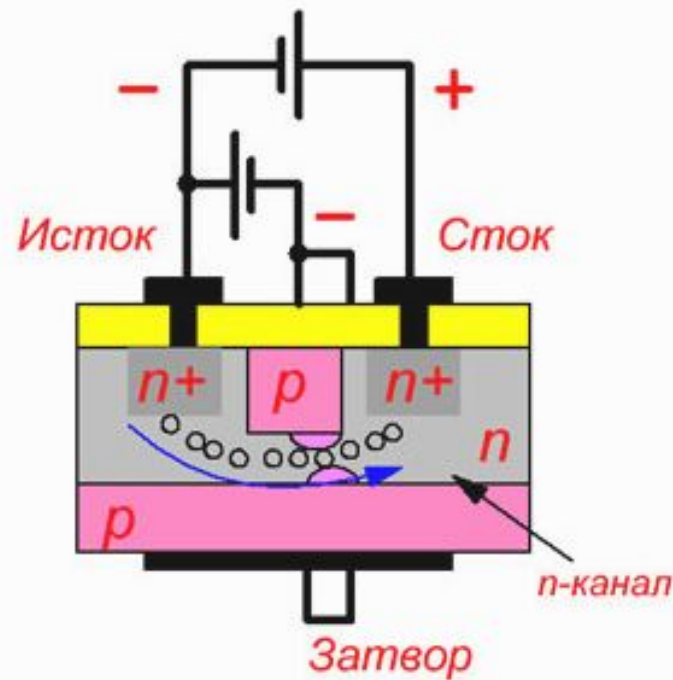


Если к высоколегированным n-областям подключить источник напряжения, то в канале создается электрическое поле, под воздействием этого поля электроны из n-области, к которой подключен «минус» источника будут перемещаться в n-область, к которой подключен «плюс» источника напряжения. Таким образом, через канал потечет электрический ток. Величина этого тока будет напрямую зависеть от электропроводности канала, которая в свою очередь зависит от площади поперечного сечения канала. Нетрудно догадаться, что площадь поперечного сечения канала зависит от ширины p-n п



Та область, от которой движутся носители заряда, а в случае n-канала это электроны, называется **ИСТОКОМ** (source), а к которой движутся – **СТОКОМ** (drain).

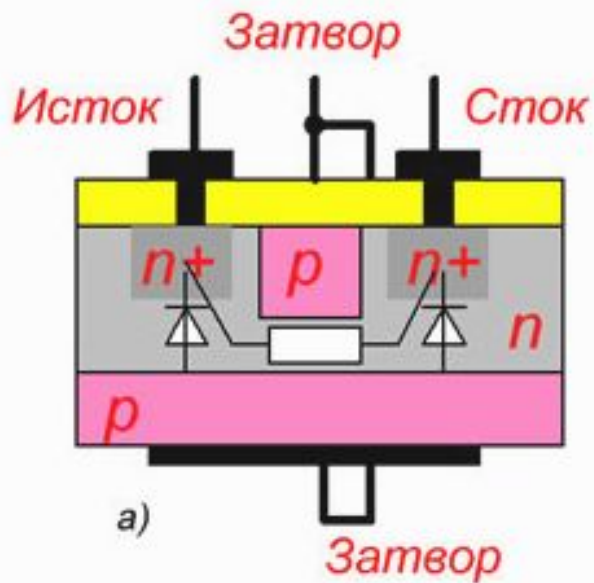
Если на затвор относительно истока подать отрицательное напряжение, то p-n переход, образованный между затвором и истоком будет смещаться в обратном направлении, при этом ширина запирающего слоя будет увеличиваться, тем самым сужая размеры канала и уменьшая электропроводность.



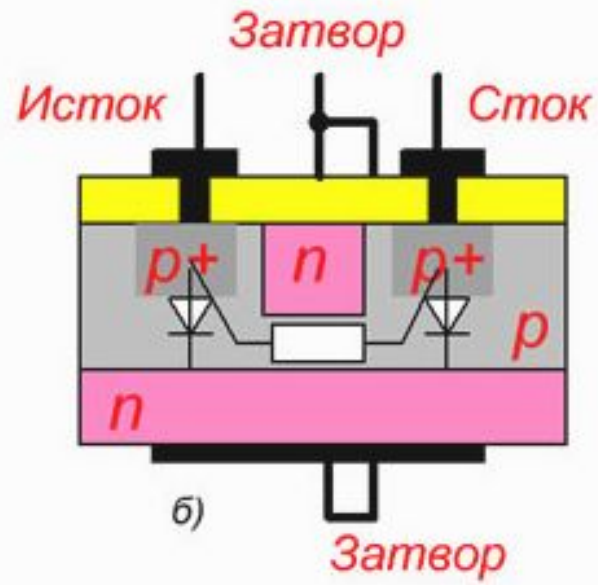
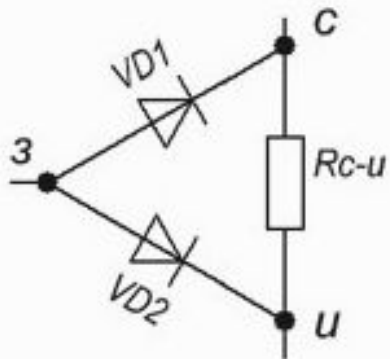
Таким образом, изменяя напряжение между затвором и истоком, мы можем управлять током через канал полевого транзистора.

**При составлении схемы будем руководствоваться следующими принципами:**

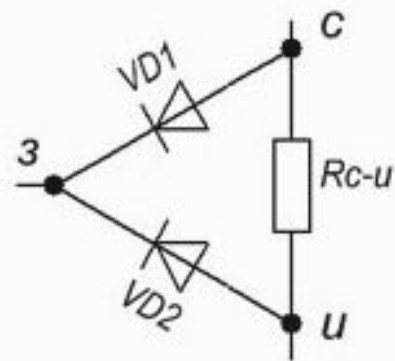
1. В транзисторе имеются два p-n перехода, первый между затвором и истоком, второй между затвором и стоком.
  2. Канал между истоком и стоком при отсутствии отрицательного запирающего напряжения на затворе не закрыт и электропроводен, то есть имеет определенное значение сопротивления.
  3. Теперь p-n переходы обозначим диодами, а электропроводность канала резистором.
- Составляем эквивалентную схему полевого транзистора с управляющим p-n переходом.

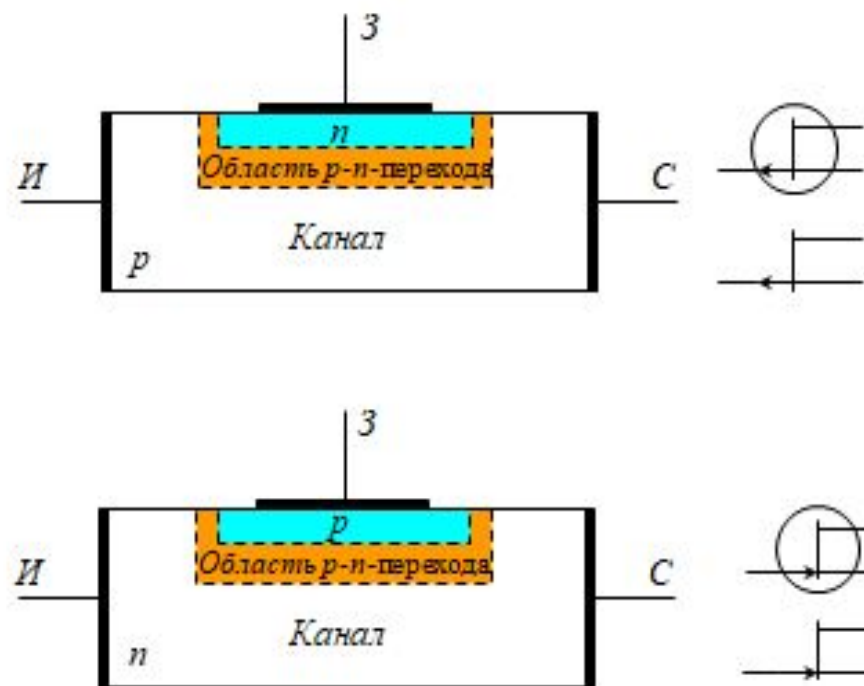


канал n-типа



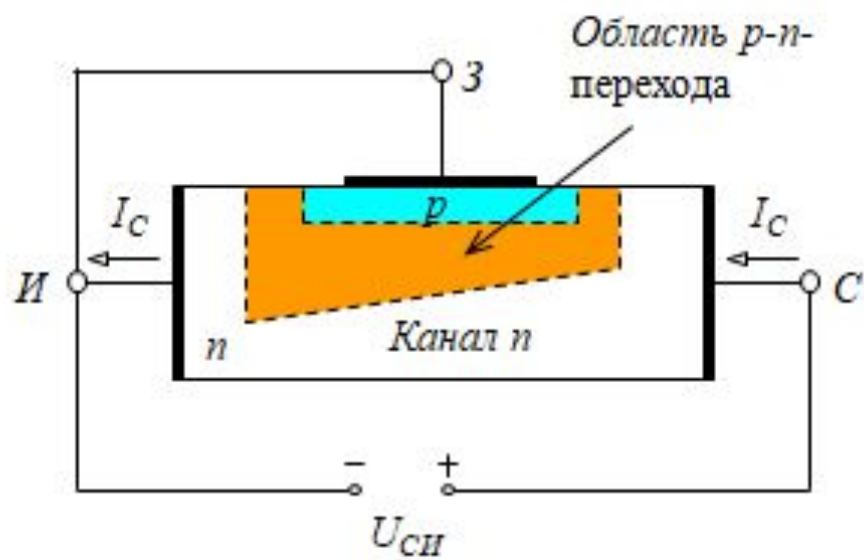
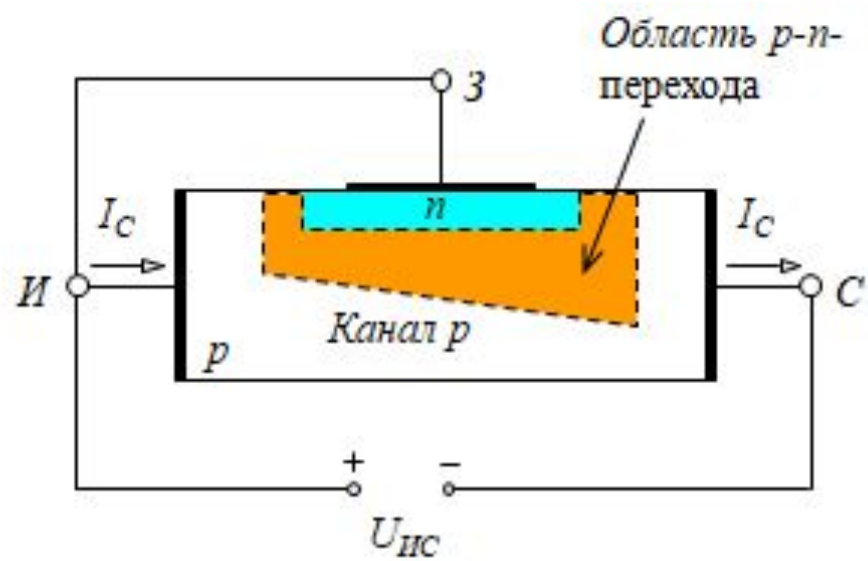
канал p-типа



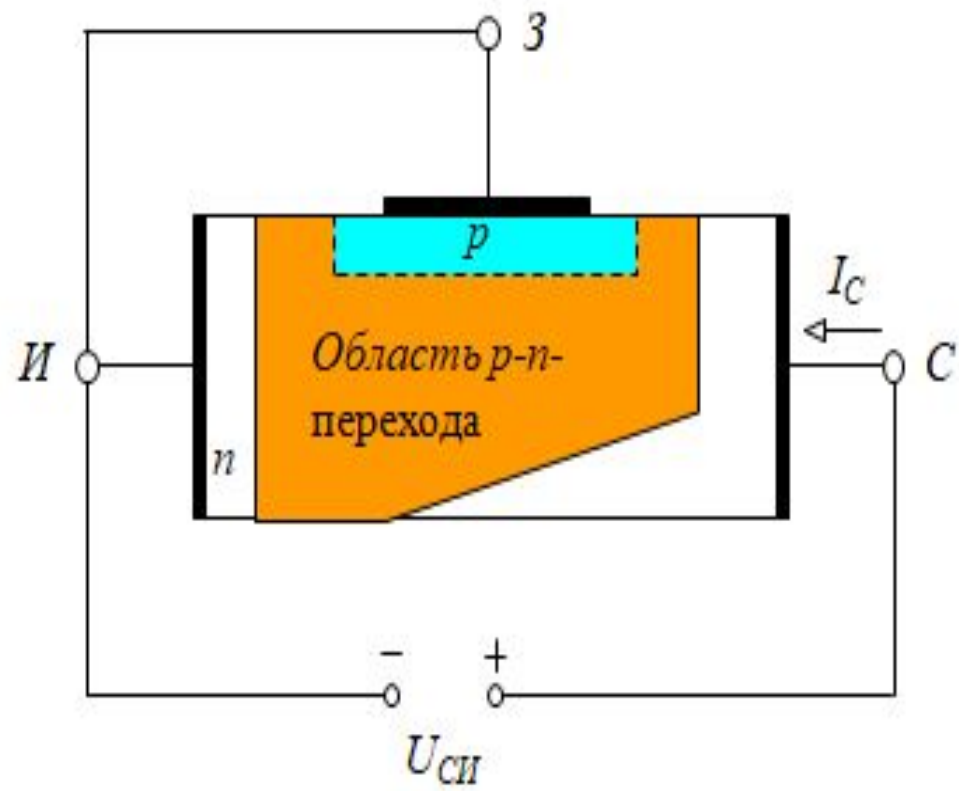


Удельное сопротивление слоя затвора намного меньше удельного сопротивления слоя канала.

Напряжение  $U_{ЗИ}$  прикладывается к  $p-n$ -переходу в обратном направлении. Поэтому ток затвора очень мал и практически не зависит от управляющего напряжения.

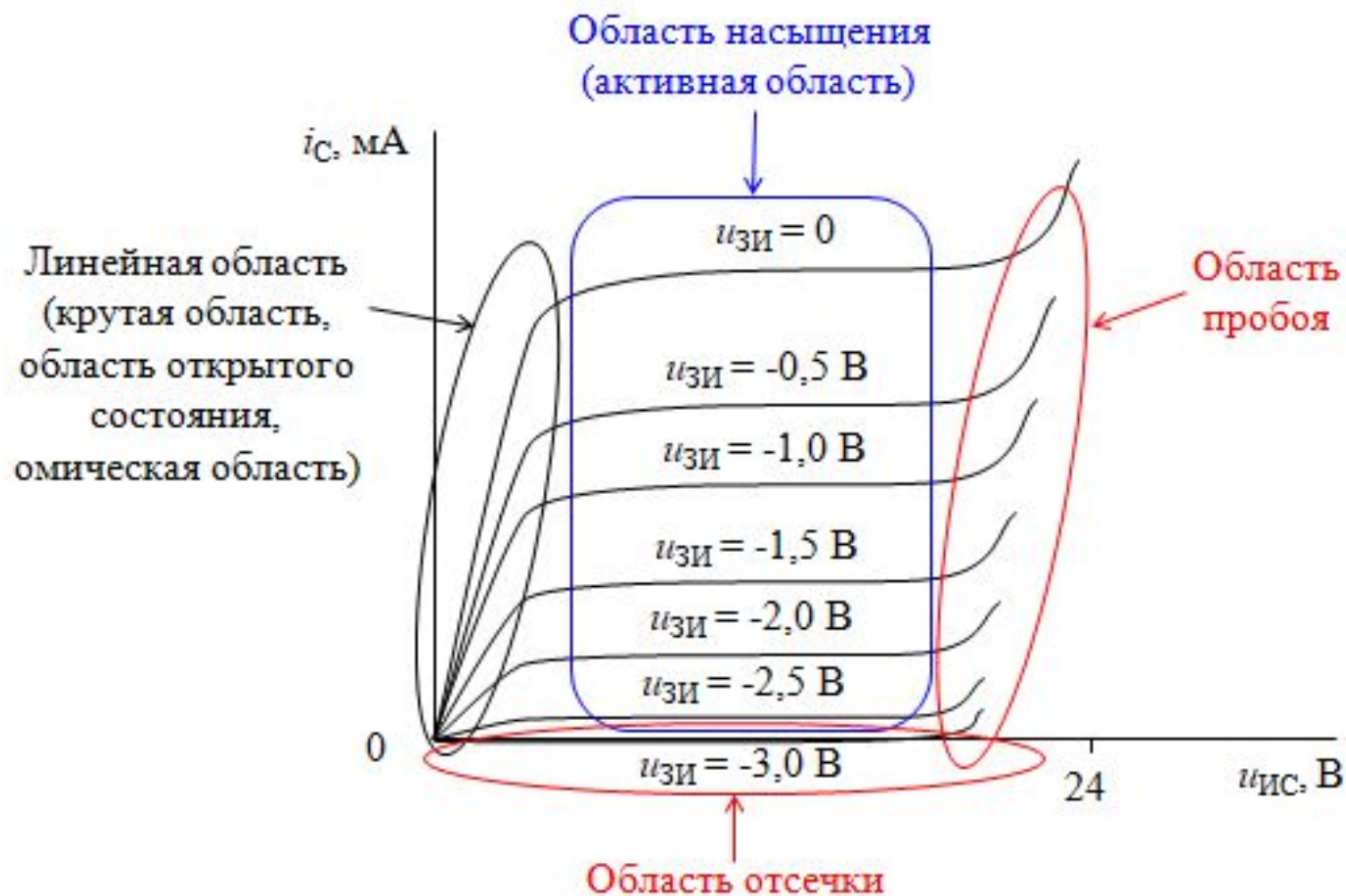


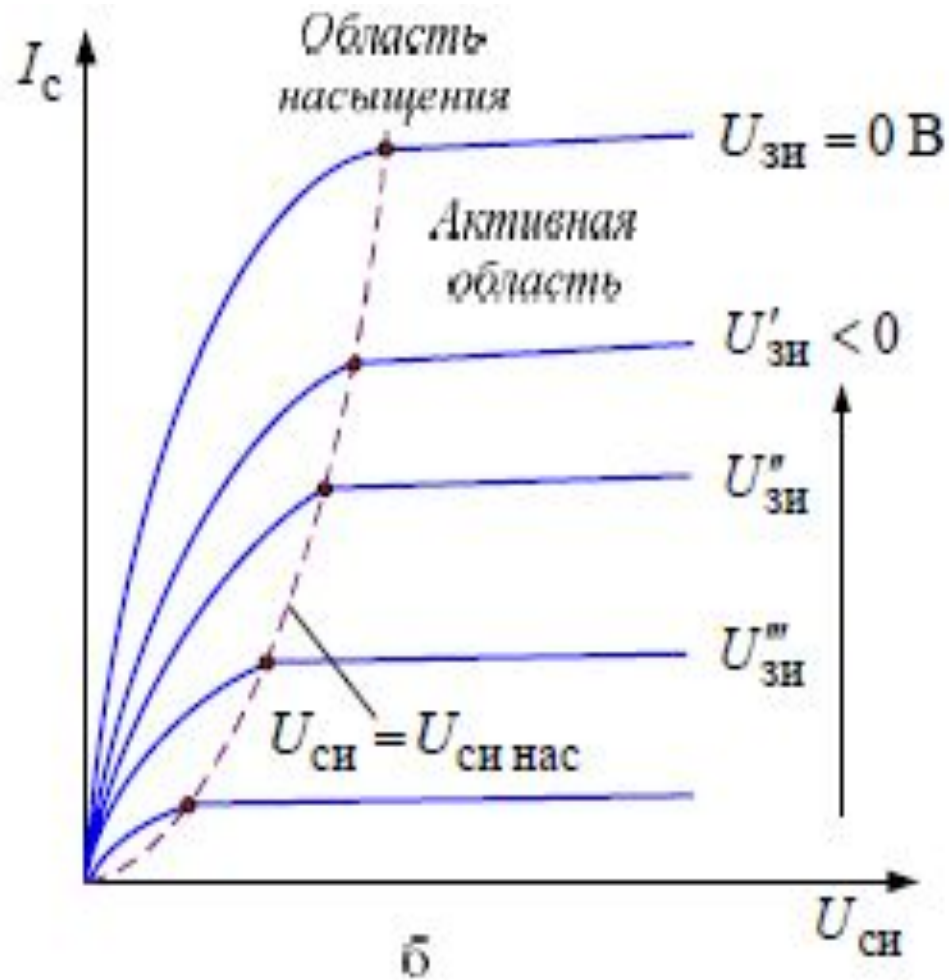
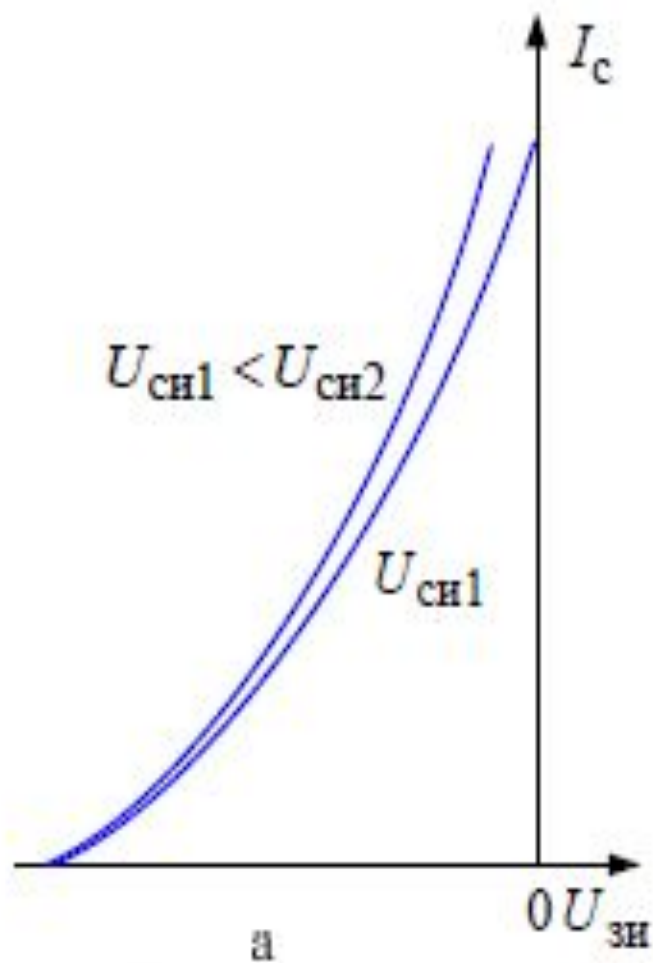




# Статические ВАХ полевых транзисторов

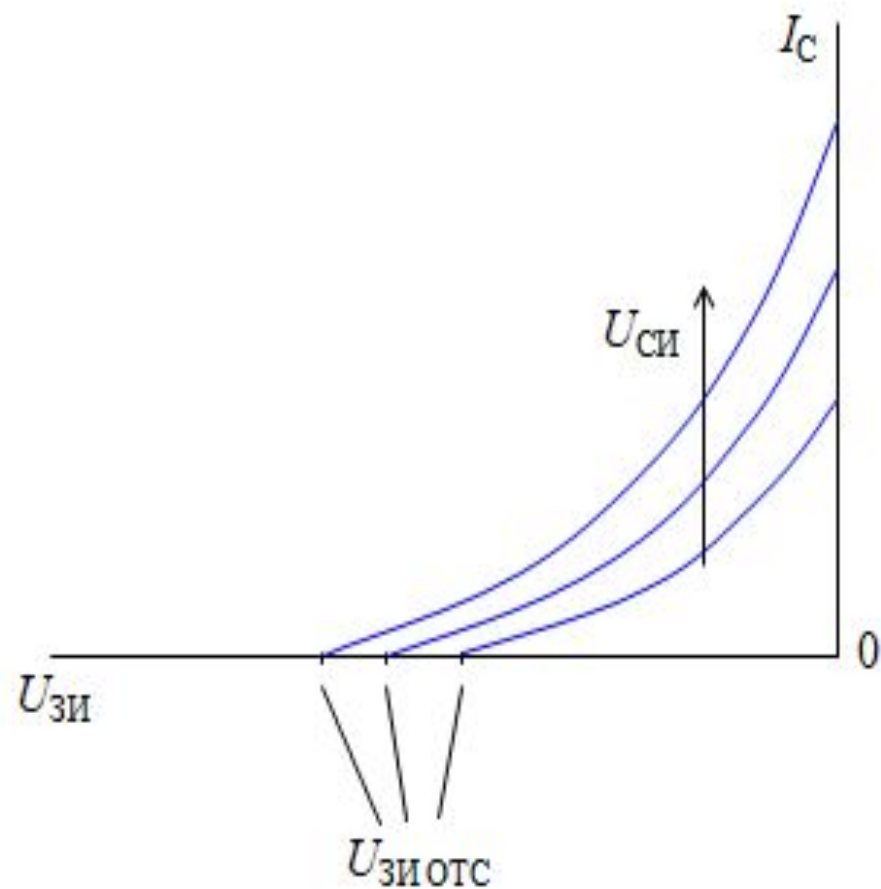
Выходные (сток – истоковые). Пример для транзистора с  $n$ -каналом



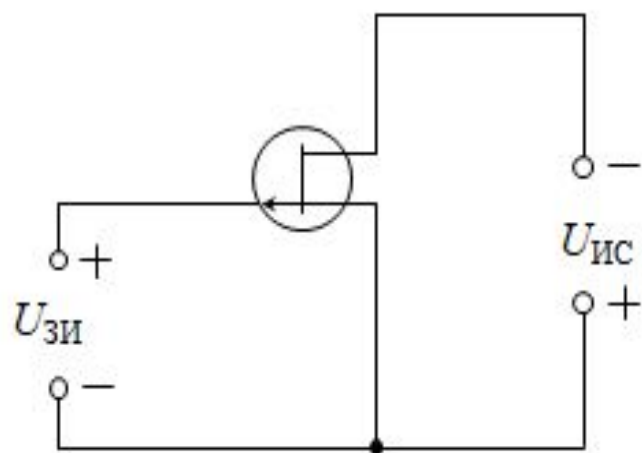
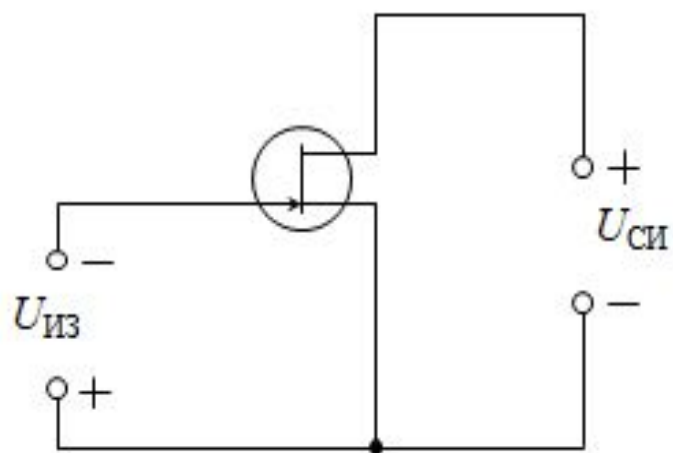


затем его рост  $U_c$  сменяется и наступает явление, напоминающее насыщение, хотя с ростом ток стока так же должен возрастать. Это объясняется тем, что с ростом возрастает обратное напряжение  $U_c$  на  $p-n$ -переходе и увеличивается ширина запирающего слоя, а ширина канала соответственно уменьшается. Это приводит к увеличению его сопротивления и уменьшению тока  $I_c$ . Таким образом, происходит два взаимно противоположных влияния на ток, в результате чего он остается почти неизменным. Чем больше запирающее напряжение подается на затвор, тем ниже идет выходная характеристика. Повышение напряжения стока, в конце концов, может привести к электрическому пробое  $p-n$ -перехода, и ток стока начинает лавинообразно нарастать. Напряжение пробоя является одним из предельных параметров полевого транзистора.

Передаточные (затвор - стоковые). Пример для транзистора с  $n$ -каналом



## Полярности напряжений при включении полевых транзисторов с $n$ и $p$ каналами



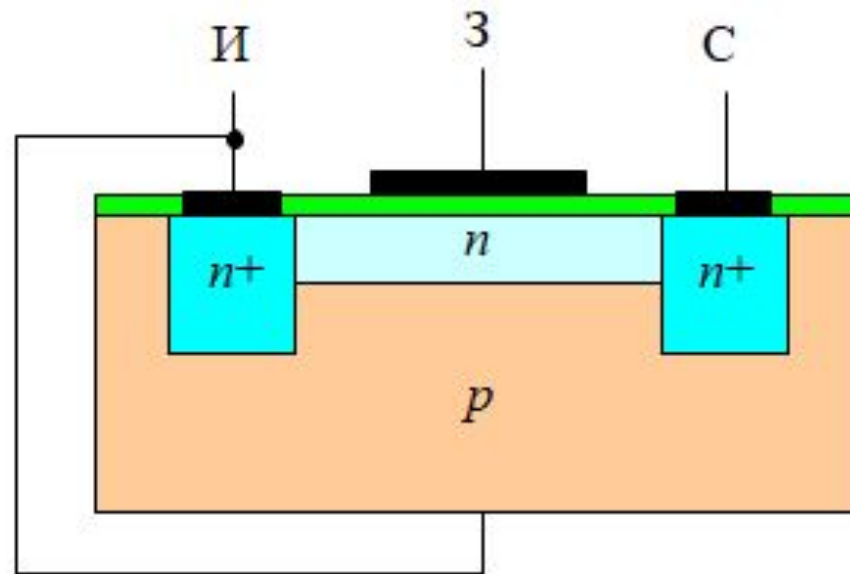
## Полевые транзисторы с изолированным затвором (МОП-транзисторы, МДП-транзисторы)

Диэлектриком (изолятором) обычно служит слой диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ .

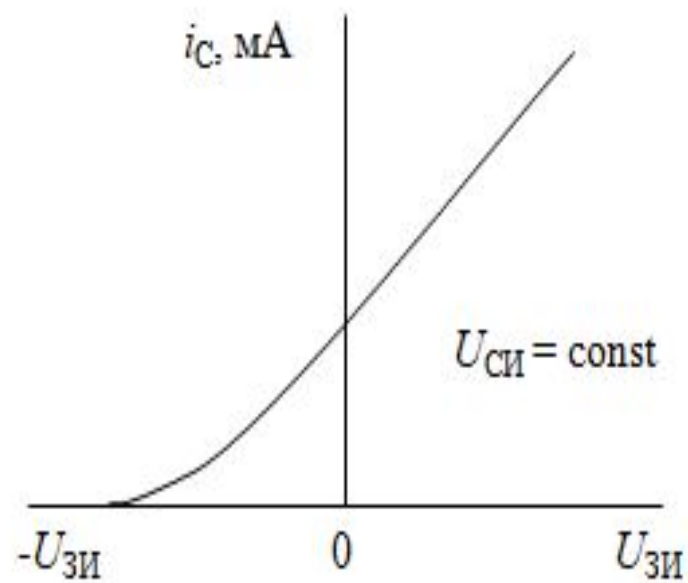
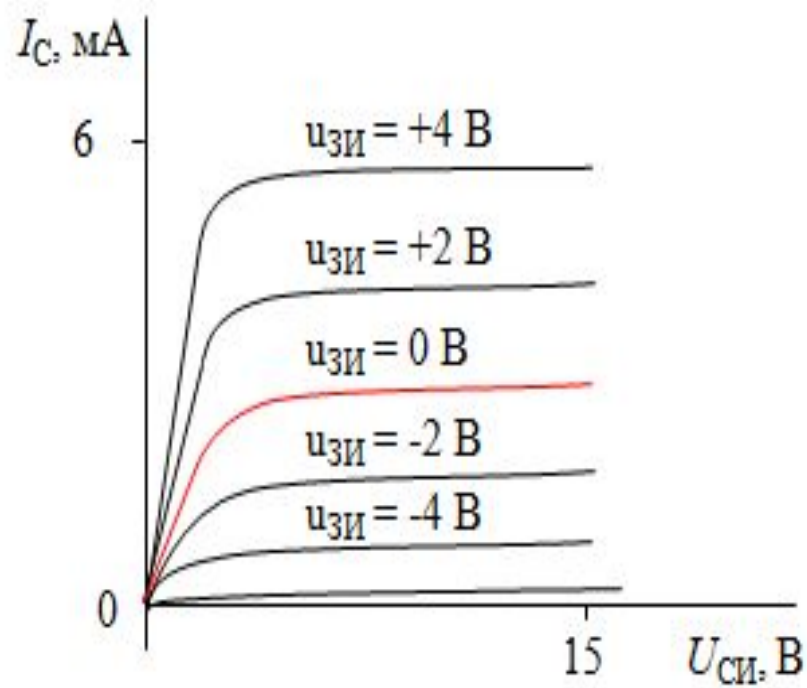
## Транзисторы с собственным (встроенным) каналом



Транзистор с собственным (встроенным) каналом *n*-типа







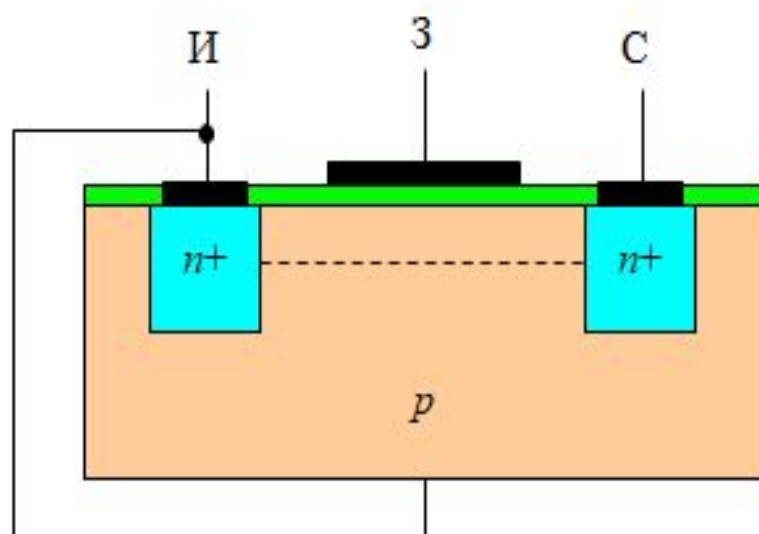
Если при нулевом напряжении затвора приложить напряжение между стоком и истоком, то через канал потечёт ток, представляющий собой поток электронов. Через кристалл ток не пойдёт, так как один из  $p-n$ -переходов находится под обратным напряжением. При подаче на затвор напряжения, отрицательного относительно истока, а, следовательно, и относительно кристалла, в канале создаётся поперечное электрическое поле, под влиянием которого электроны проводимости выталкиваются из канала в области истока, стока и кристалла.

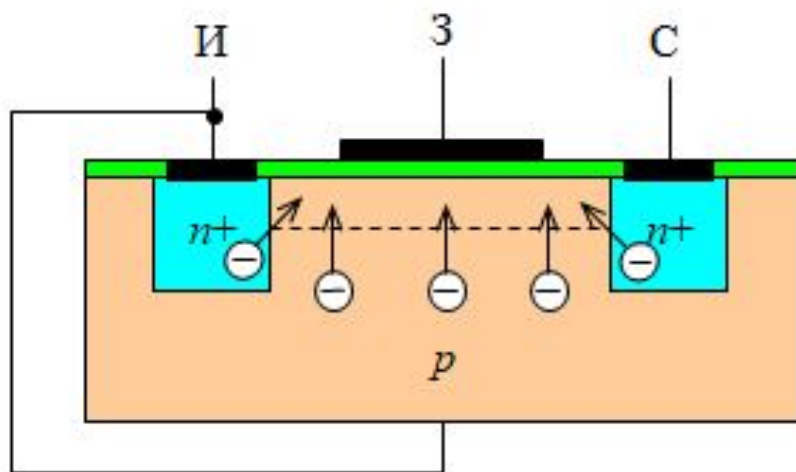
Транзистор работает как в режиме обеднения, так и в режиме обогащения канала носителями заряда.

## Транзисторы с индуцированным (инверсным) каналом



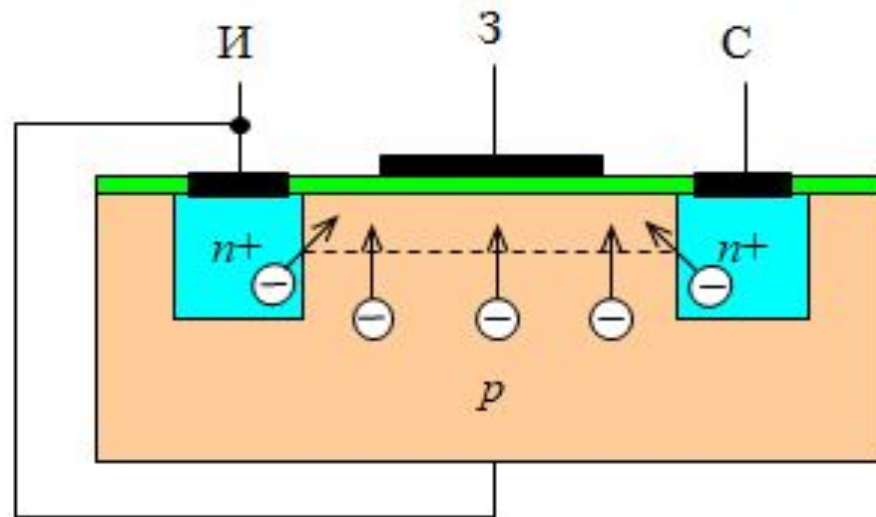
Транзистор с индуцированным (инверсным) каналом  $n$ - типа



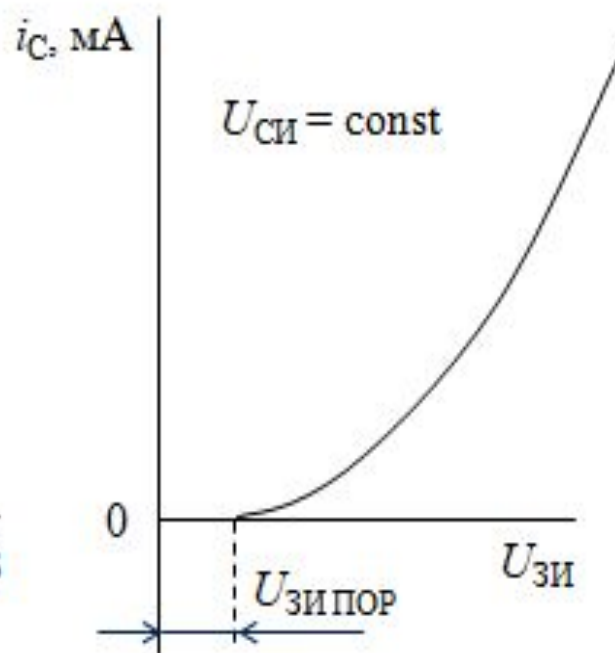
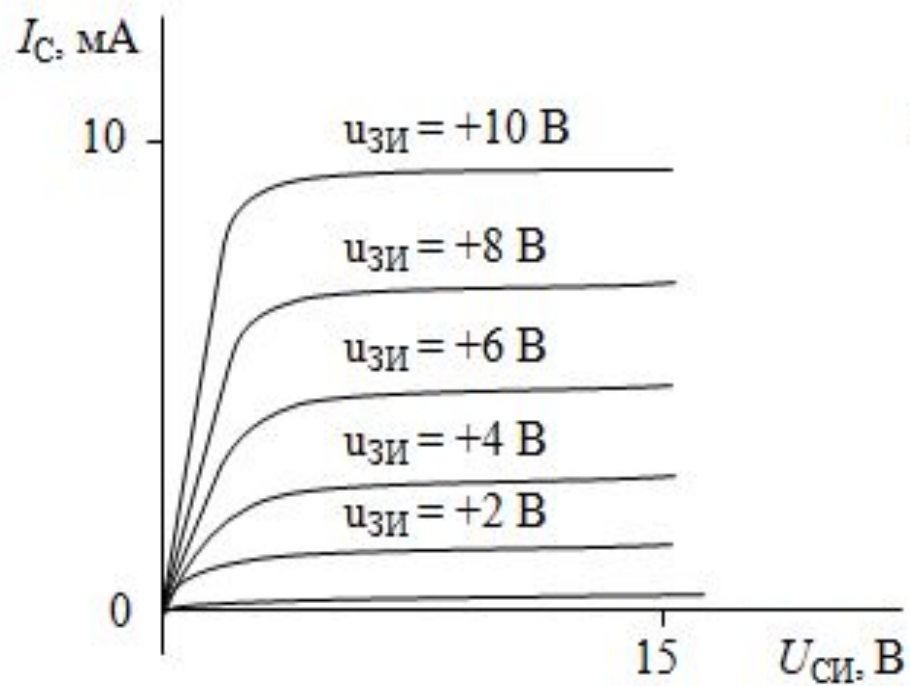


Канал возникает только при подаче на затвор напряжения. В примере напряжение, подаваемое на канал, должно быть *положительным*. Если канал *p*-типа, то напряжение на затвор надо подавать *отрицательное*.





Когда напряжение затвора превысит некоторое отпирающее (пороговое) значение, то в приповерхностном слое концентрация электронов настолько увеличится, что превысит концентрацию дырок, и в этом слое произойдёт так называемая инверсия типа электропроводности, т.е. образуется тонкий канал  $n$ -типа и транзистор начинает проводить ток. Чем больше положительное напряжение затвора, тем больше проводимость канала и ток стока. Таким образом, транзистор работает только в режиме обогащения канала.



# Основные параметры полевых транзисторов

1. Коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = \mu = \frac{\Delta U_{CH}}{\Delta U_{3H}} \Big|_{I_C = const} \quad \text{точнее} \quad K_U = \mu = \frac{dU_{CH}}{dU_{3H}} \Big|_{I_C = const}$$

2. Крутизна

$$s = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{3H}} \Big|_{U_{CH} = const} \quad \text{точнее} \quad s = \frac{dI_C}{dU_{3H}} \Big|_{U_{CH} = const}$$

3. Дифференциальное выходное (внутреннее) сопротивление

$$R_{ВЫХ} = R_i = \frac{\Delta U_{CH}}{\Delta I_C} \Big|_{U_{3H} = const} \quad \text{точнее} \quad R_{ВЫХ} = R_i = \frac{dU_{CH}}{dI_C} \Big|_{U_{3H} = const}$$

4. Дифференциальное сопротивление участка затвор-сток

$$R_{ВХ} = R_{3C} = \frac{\Delta U_{3C}}{\Delta I_C} \quad \text{точнее} \quad R_{ВХ} = R_{3C} = \frac{dU_{3C}}{dI_C}$$

Первые три параметра связаны между собой

$$\mu = sR_i$$

где  $\Delta I_c$  — приращение тока стока ;

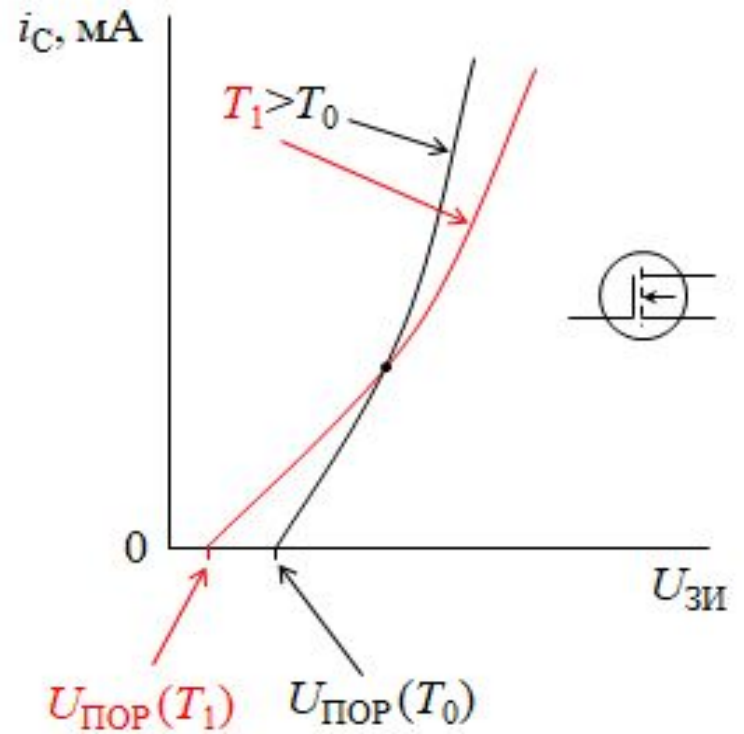
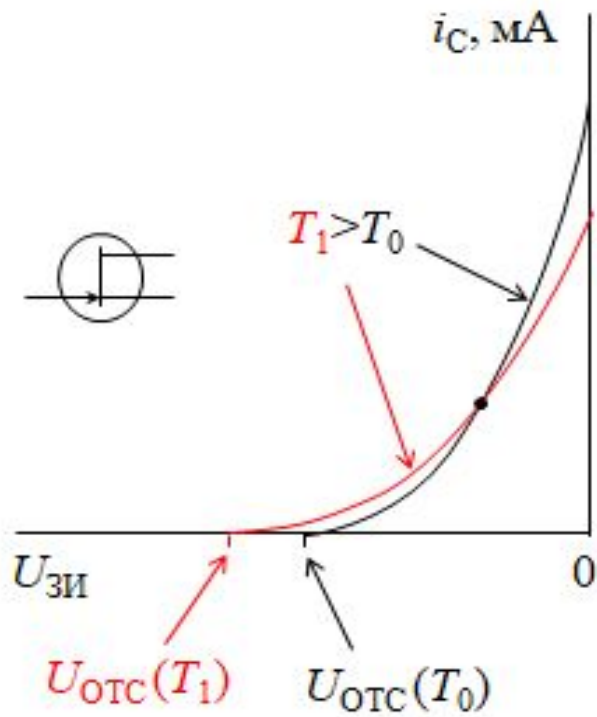
$\Delta U_{зи}$  — приращение напряжения на

$R_i$  внутреннее (выходное) сопротивление

$\mu$  коэффициент усиления



## Температурные свойства полевых транзисторов



Немаловажно и то, что полевые транзисторы имеют большую температурную стабильность чем биполярные транзисторы.

## Маркировка полевых транзисторов

Маркировка дискретных полевых транзисторов, применяемая с 1972 года, предусматривает шестисимвольное буквенно-цифровое обозначение.

Первый символ – буква или цифра указывает исходный материал:

Г или 1 – германий или его соединения,

К или 2 – кремний или его соединения,

А или 3 – соединения галлия (арсенид галлия),

И или 4 – соединения индия.

Второй символ – буква, обозначает класс прибора:

Т – биполярные транзисторы,

П – полевые транзисторы.

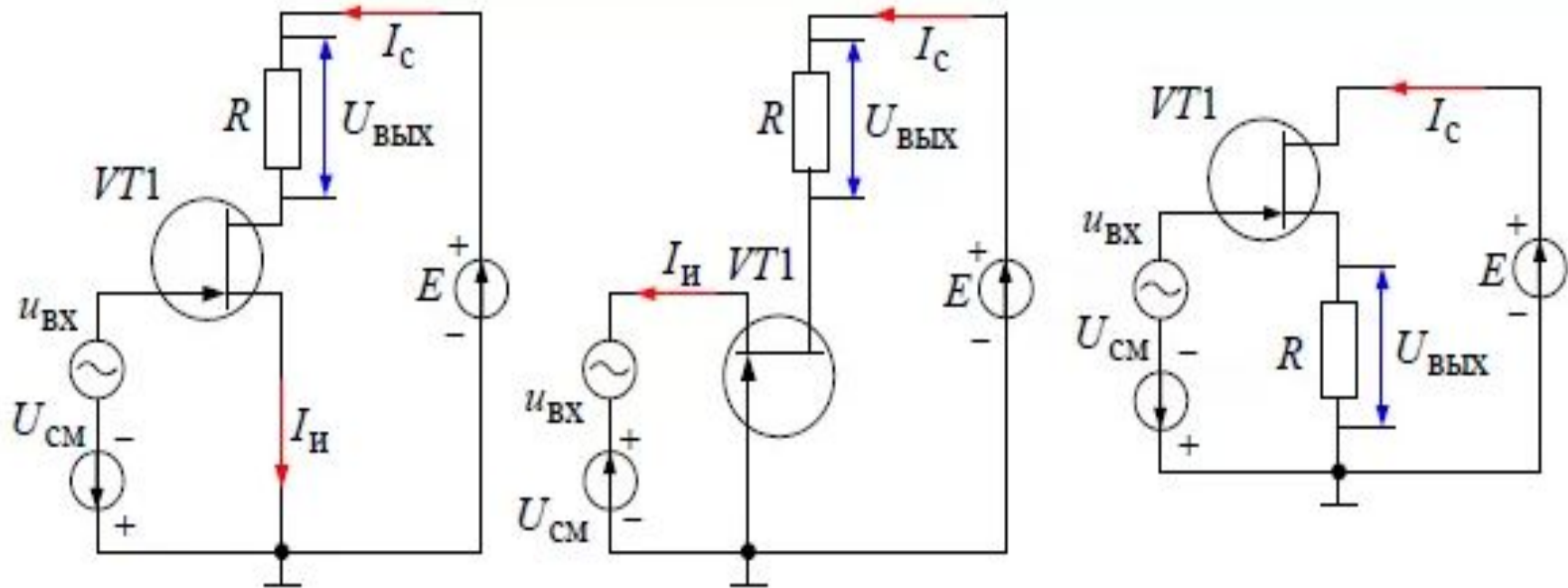
Третий символ – цифра (от 1 до 9) указывает на энергетическую и частотную характеристики биполярного и полевого транзисторов в соответствии таблицей.

Мощность рассеяния, Вт	Рабочая частота МГц		
	До 3	3...30	Более 30
0,3	1	2	3
0,3...1.5	4	5	6
Более 1,5	7	8	9

## Схемы включения полевых транзисторов

Так же, как и биполярные транзисторы, полевые транзисторы могут иметь три схемы включения: с общим истоком, с общим стоком и с общим затвором. Схема включения определяется тем, какой из трех электродов транзистора является общим и для входной и выходной цепи, является схемой с общим ~~истоком~~ ~~стоком~~. Схема с общим затвором аналогична схеме с общей базой у биполярных транзисторов. Она не дает усиления по току, а входное сопротивление здесь маленькое, так как входным током является ток стока, вследствие этого данная схема на практике не используется.

Схема с общим стоком подобна схеме эмиттерного повторителя на биполярном транзисторе и ее называют *истоковым повторителем*. Для данной схемы коэффициент усиления по напряжению близок к единице. Выходное напряжение по величине и фазе повторяет входное. В этой схеме очень высокое входное сопротивление и малое

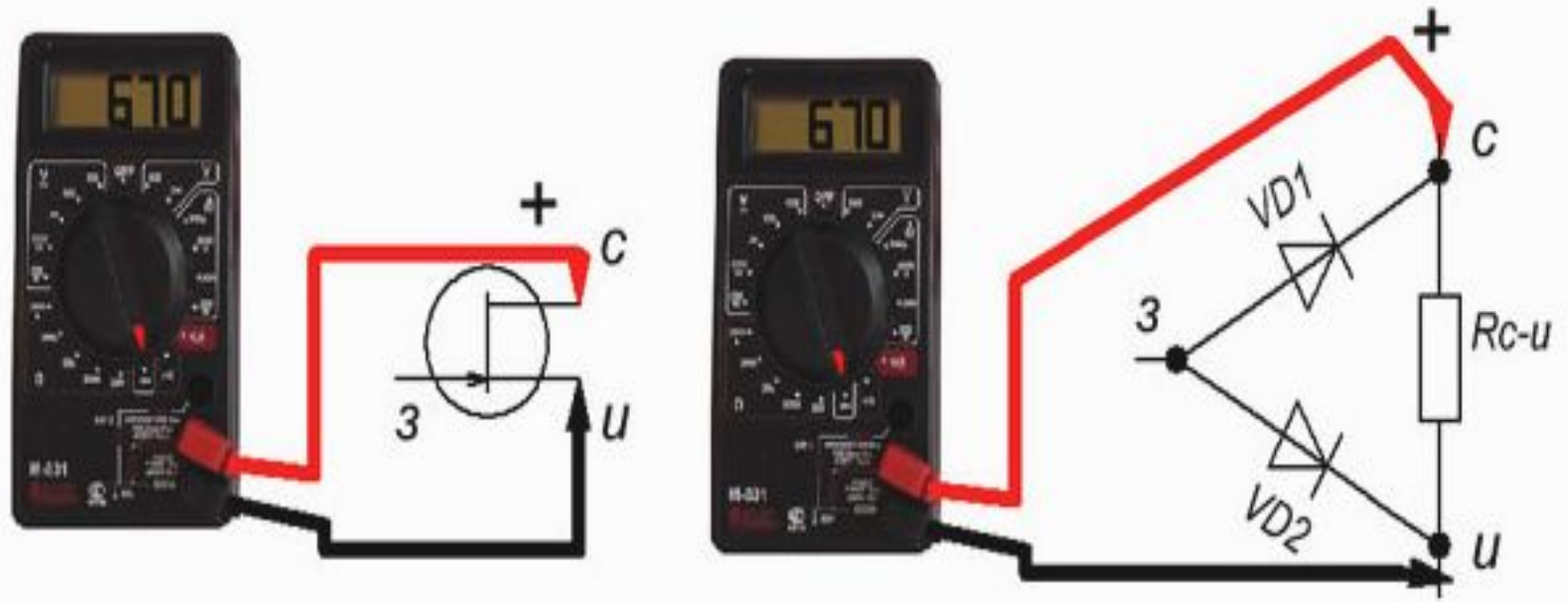


Определите схему с общим затвором.

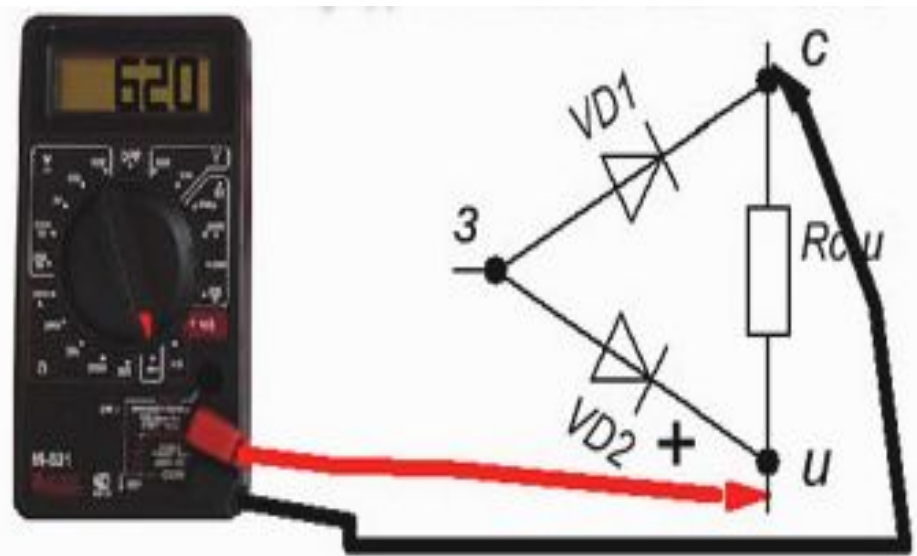
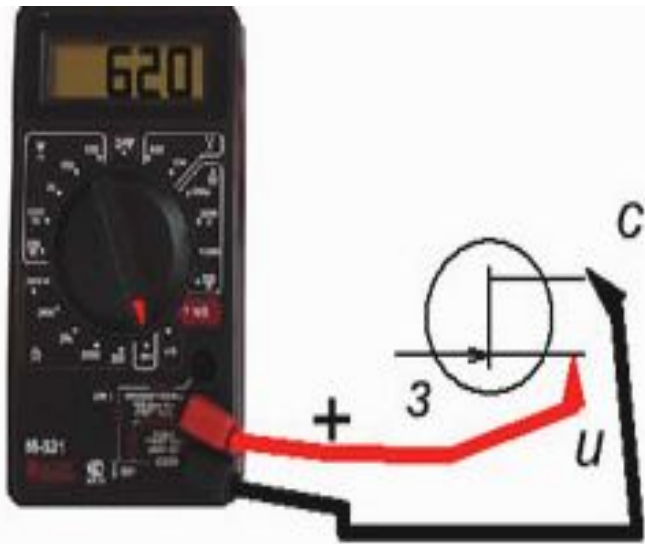
# Проверка полевого транзистора с управляющим р-п переходом и каналом n-типа.

Для проверки сопротивления канала с помощью мультиметра необходимо на приборе установить режим измерения сопротивления, предел измерения 2000 Ом.

Измерить сопротивление между истоком и стоком транзистора при разной полярности подключения щупов мультиметра.

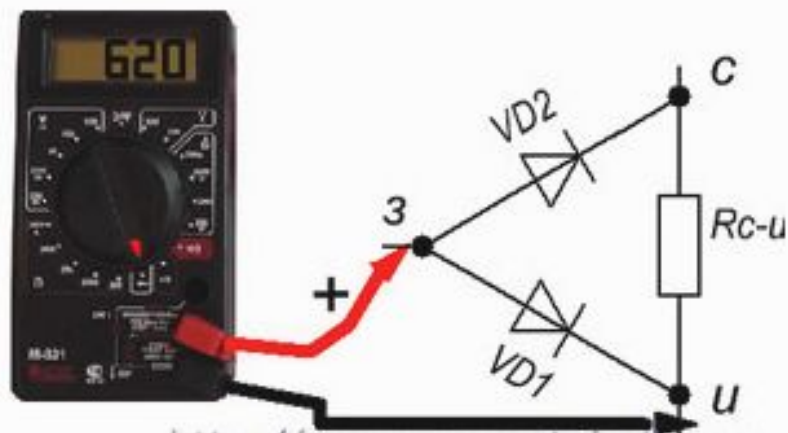




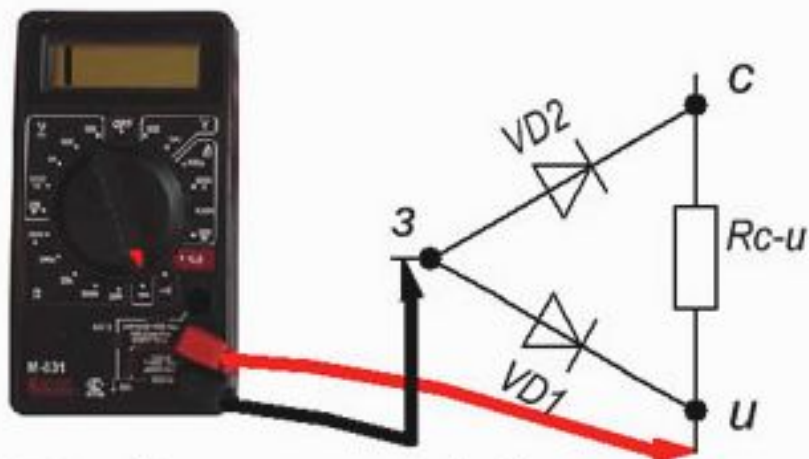
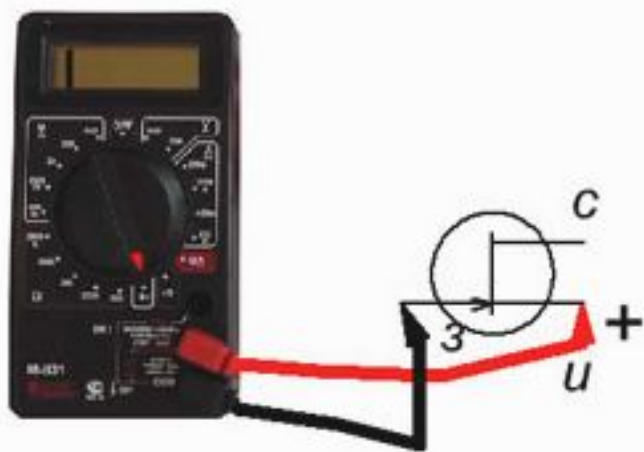


Значения сопротивления канала при разной полярности подключения щупов должны быть примерно одинаковыми.

Далее включаем мультиметр в режим проверки диодов. Красный (плюсовой) щуп мультиметра подключаем на затвор (имеет p-проводимость), а черный на исток. Мультиметр должен показать падение напряжения на открытом p-n переходе, которое должно быть в пределах 600-700 мВ.



Меняем полярность подключения щупов (красный на исток, черный на затвор), мультиметр, в случае исправности транзистора показывает бесконечность (на дисплее «1»), то есть переход включен в обратном направлении и закрыт.





Так же проверяем исправность р-n перехода сток-затвор. То есть включаем мультиметр в режим проверки диодов. Красный (плюсовой) щуп мультиметра подключаем на затвор (имеет р-проводимость), а черный на сток. Мультиметр должен показать падение напряжения на открытом р-n переходе затвор-сток, которое должно быть в пределах 600-700 мВ.

**Если все три условия выполнены, то считается, что полевой транзистор исправен.**

# Классификация полевых транзисторов

Полевые транзисторы классифицируют:

1. Тип проводимости канала: n или p. Фактор определяет полярность управляющего напряжения.
2. По структуре. С p-n-переходом сплавные, диффузионные, МДП (МОП), с барьером Шоттки, тонкопленочные.
3. Число электродов – 3 или 4. В последнем случае подложка рассматривается обособленным субъектом, позволяя управлять протеканием тока по каналу (помимо затвора).
4. Материал проводника. Сегодня распространены кремний, германий, арсенид галлия. Материал полупроводника маркируется условным обозначением буквами (К, Г, А) или (в изделиях военной промышленности) цифрами (1, 2, 3).
5. Класс применения не входит в маркировку, указывается справочниками, полевой транзистор часто входит в состав усилителей, радиоприемных устройств. В мировой практике встречается деление по применяемости на следующие 5 групп: усилители высокой, низкой частоты, постоянного тока, модуляторы, ключевые.

6. К основным параметрам полевых транзисторов причисляют: входное сопротивление, внутреннее сопротивление транзистора, также называемое выходным, крутизну стокзатворной характеристики, напряжение отсечки и некоторые другие.

7. Диапазон электрических параметров определяет набор значений, в которых полевой транзистор сохраняет работоспособность. Напряжение, ток, частота.

8. Числом конструктивных элементов, вмещенных одной подложкой выделяют сдвоенные, комплементарные.

Помимо общей классификации придумана специализированная, определяющая принципы работы.

Различают:

Полевые транзисторы с управляющим р-n-переходом.

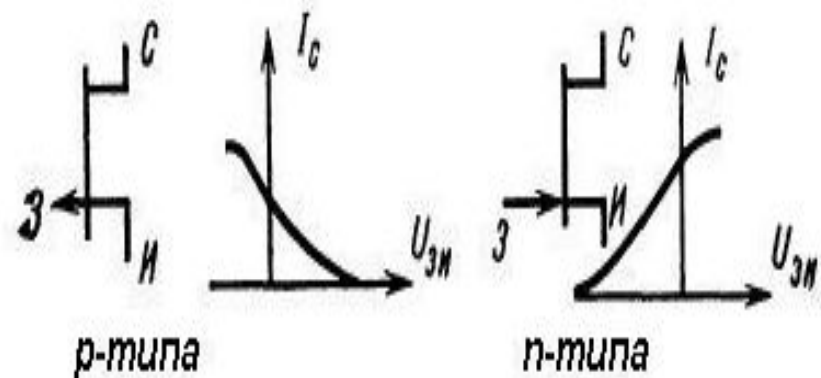
Полевые транзисторы с барьером Шоттки.

Полевые транзисторы с изолированным затвором:

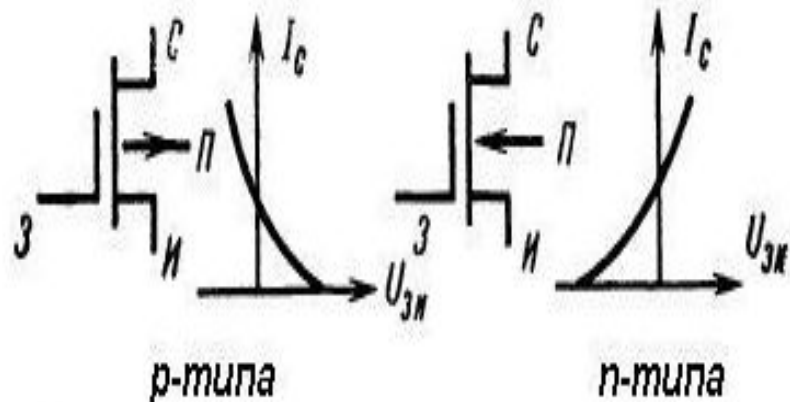
С встроенным каналом.

С индуцированным каналом.

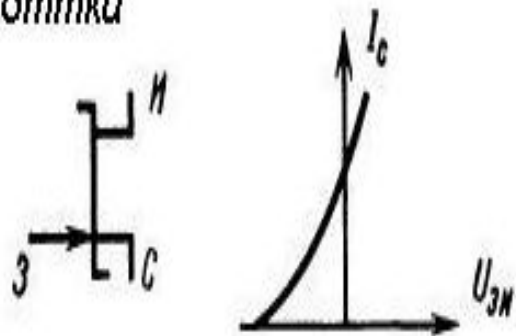
С р-п-переходом



С изолированным затвором, встроенным каналом

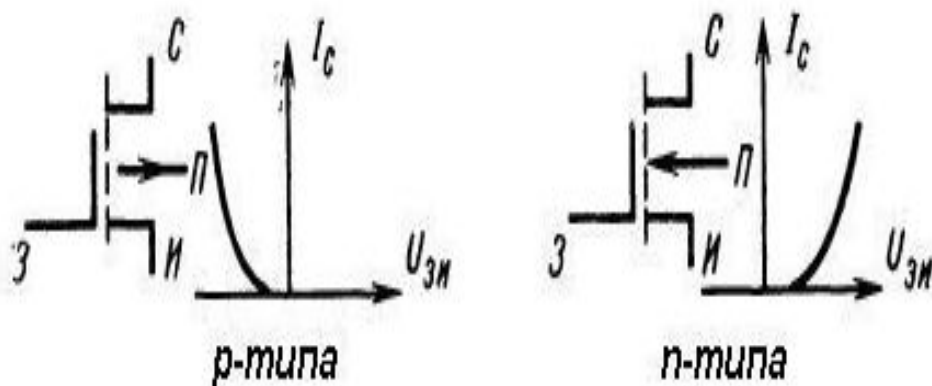


С барьером Шоттки



н-типа (иное невозможно)

индуцированным каналом



В литературе дополнительно упорядочивают структуры следующим образом: применять обозначение **МОП** нецелесообразно, конструкции на оксидах считают частным случаем **МДП** (металл, диэлектрик, полупроводник). Барьер Шоттки (**МеП**) следует отдельно выделять, поскольку это иная структура. Напоминает свойствами р-n-переход. Добавим, что конструктивно в состав транзистора способны входить одновременно диэлектрик (нитрид кремния), оксид (четырёхвалентный кремния), как это случилось с КП305. Такие технические решения используются людьми, ищущими методы получения уникальных свойств изделия, удешевления.

Среди зарубежных аббревиатур для полевых транзисторов зарезервировано сочетание FET, иногда обозначает тип управления – с p-n-переходом. В последнем случае наравне с этим встретим JFET.

Слова-синонимы. За рубежом принято отделять оксидные (MOSFET, MOS, MOST – синонимы), нитридные (MNS, MNSFET) полевые транзисторы. Наличие барьера Шоттки маркируется SBGT.

**Спасибо за внимание**