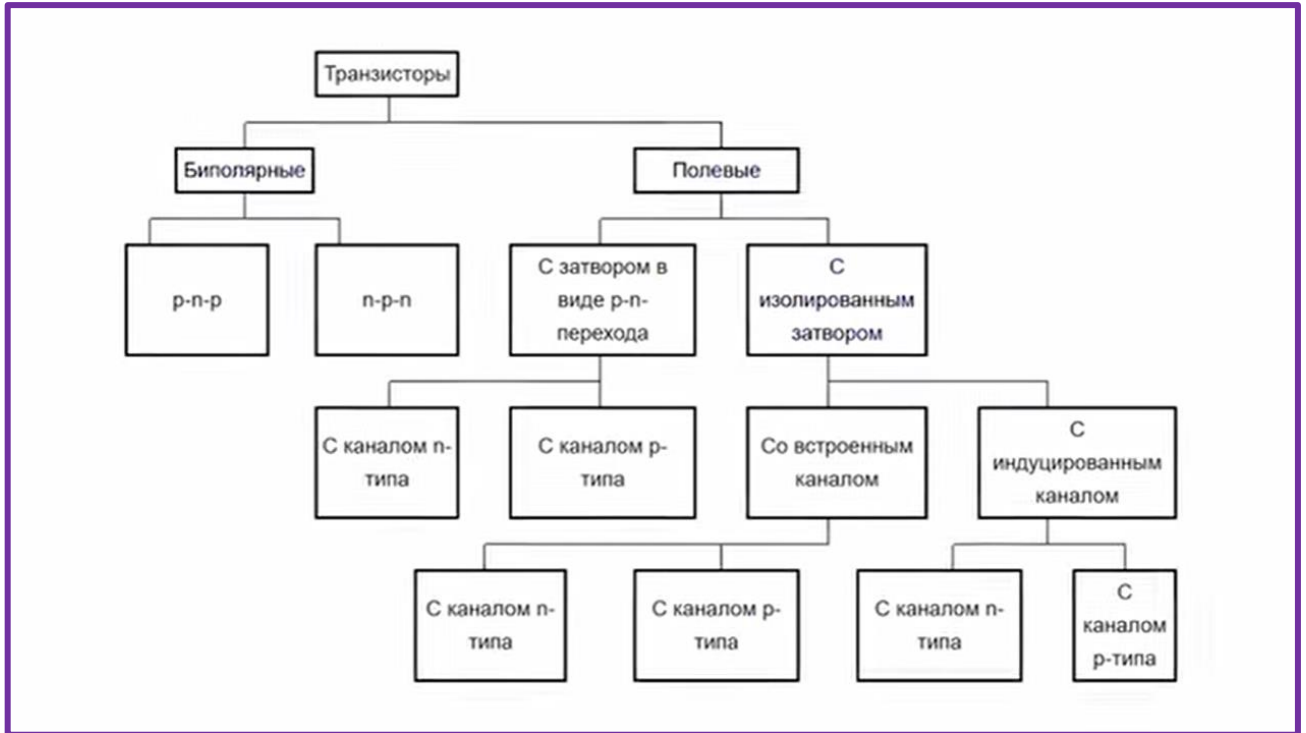


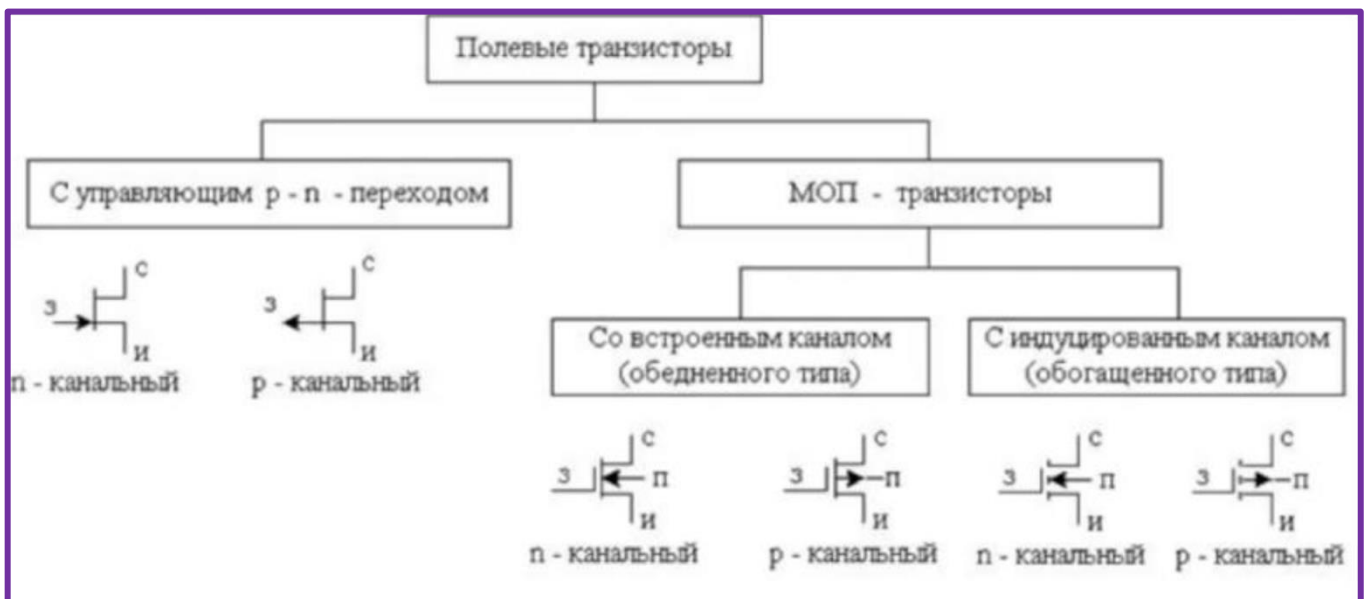
## ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Определение, классификация, маркировка полевых транзисторов.



**Полевой (униполярный, каналный) 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.

Для маркировки полевых транзисторов, как и для полярных применяют буквенно – цифровой код. Например, КП101Г, КП30ИА.



## Полевые транзисторы с управляющими р-п-переходами, их свойства

Схематическое изображение конструкции полевого транзистора с  $p - n$  переходами и схема его включения показаны на рис. 1.

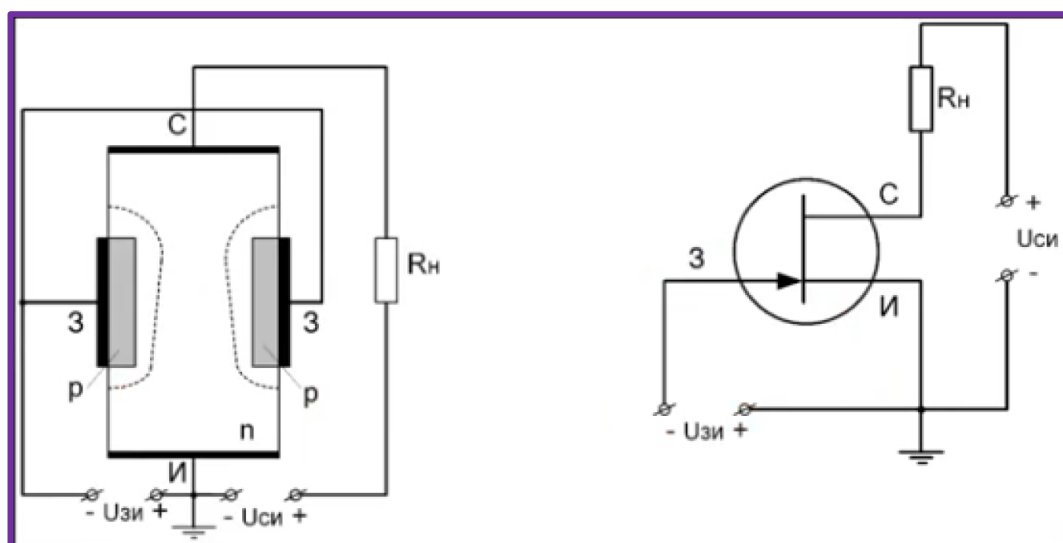


Рис.1. Структура, схема включения полевого транзистора

Принцип действия транзисторов с каналом типа  $n$  или  $p$  аналогичен; различие заключается лишь в полярности подводимых напряжений.

В транзисторе с  $n$  – каналом основными носителями заряда в канале являются электроны, которые движутся вдоль канала от истока с низким потенциалом к стоку с более высоким потенциалом, образуя ток стока  $I_C$ .

Между затвором и истоком приложено напряжение, запирающее  $p - n$  переход, образованный  $n$  – областью канала и  $p$  – областью затвор. Таким образом, в полевом транзисторе с  $n$  – каналом полярности приложенных напряжений следующие:  $U_{СИ} > 0$ ,  $U_{ЗИ} \leq 0$ .

В транзисторе с  $p$  – каналом основными носителями заряда являются дырки, которые движутся в направлении снижения потенциала, поэтому полярности приложенных напряжений должны быть иными:  $U_{СИ} < 0$ ,  $U_{ЗИ} \geq 0$

Рассмотрим подробно работу полевого транзистора с  $n$  – каналом. Величина тока в канале зависит от напряжения  $U_{СИ}$ , приложенного между стоком и истоком, нагрузочного сопротивления и сопротивления полупроводниковой пластинки между стоком и истоком.

При  $U_{СИ}$  и  $R_H = \text{const}$ . ток в канале  $I_C$  (ток стока) зависят только от эффективной площади поперечного сечения канала.

Источник  $E_{ЗИ}$  создаёт отрицательный потенциал затвора, что приводит к увеличению токопроводящего сечения канала.

С уменьшением сечения канала увеличивается сопротивление между истоком и стоком и снизится величина тока  $I_C$ .

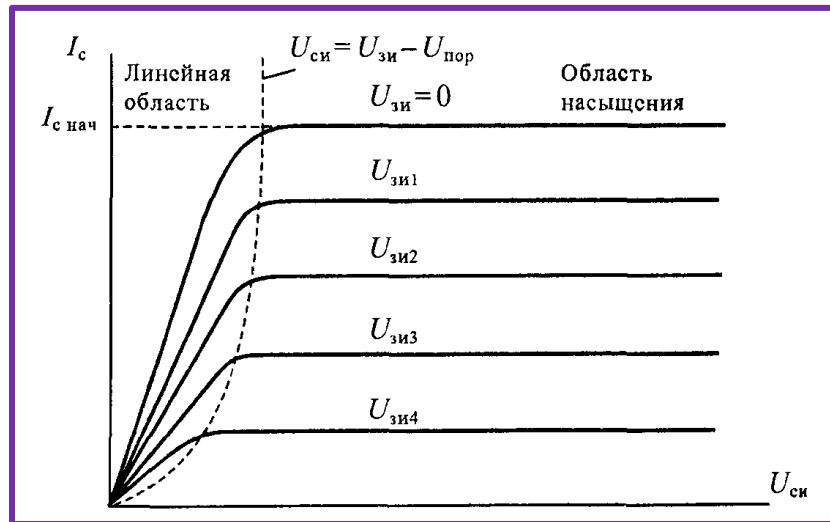
Уменьшение напряжения на затворе вызывает уменьшение сопротивления канала и возрастание тока  $I_C$ .

Подключив последовательно с  $E_{ЗИ}$  источник усиленного переменного напряжения  $U_{ВХ}$ , можно изменять ток в канале  $I_C$  по закону изменения входного напряжения. Ток стока, проходя через сопротивление нагрузки  $R_H$ , создаёт на нём падение напряжения, изменяющееся по закону  $U_{ВХ}$ .

При соответствующем подборе величины  $R_H$  можно добиться повышения уровня

выходного напряжения по сравнению с напряжением на входе, т.е. усилить сигнал.

### Характеристики полевого транзистора с управляющими р - п - переходами.

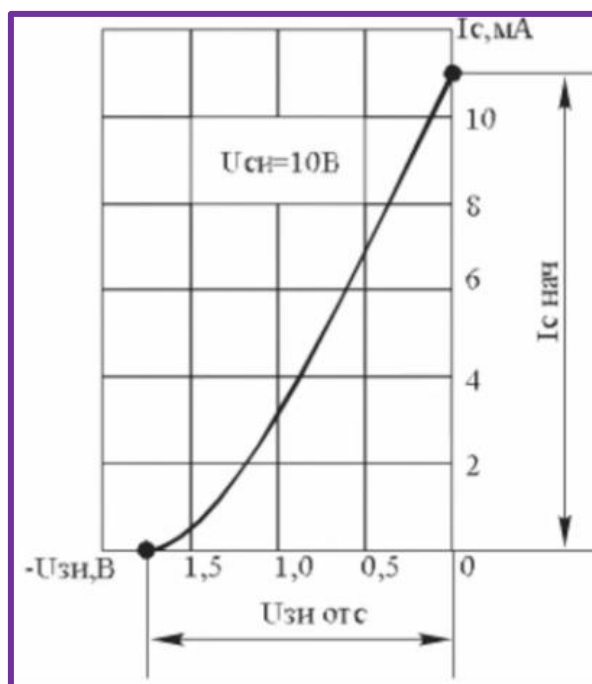


**Рис.2. Выходные характеристики полевого транзистора с управляющим р – п переходом и каналом п - типа**

Зависимость тока от напряжения при постоянном напряжении на затворе называется **выходной** характеристикой или **стоковой**. (Рис.2.)

На начальном участке характеристик ток  $I_c$  возрастает с увеличением  $U_{си}$ . При повышении напряжения  $U_{си}$  происходит перекрытие канала и дальнейший рост тока  $I_c$  прекращается (участок насыщения). Отрицательное напряжение  $U_{зи}$  между затвором и истоком следует момент перекрытия канала в сторону меньших значений напряжения и тока стока  $I_c$ .

Участок насыщения является рабочей областью выходных характеристик полевого транзистора.



### Рис. 2.3 Стоко – затворная характеристика полевого транзистора

По внешнему виду она напоминает анодно – сеточную характеристику лампы. Напряжение  $U_{зи}$  отс. (напряжение отсечки) соответствует запираению транзистора.

Входная характеристика полевого транзистора – зависимость тока утечки затвора  $I_3$  от напряжения затвора – истока обычно не используется, т.к.  $I_3$  очень мал ( $I_3 = 10^{-8} \div 10^{-9}$  А), поэтому во многих случаях его можно не принимать во внимание.

Основными параметрами полевых транзисторов является крутизна характеристики передачи.

$S = \frac{dI_C}{dU_{зи}}$  при  $U_{зи} = \text{const}$  и дифференциальное сопротивление стока (канала) на участке насыщения  $R_C = \frac{dU_{си}}{dI_C}$  при  $U_{зи} = \text{const}$ .

В качестве предельно допустимых параметров нормируются  $\text{max}$  допустимая мощность стока  $P_{C \text{ max}}$ ; максимальный допустимый ток стока  $I_{C \text{ max}}$ .

Междуэлектродные ёмкости полевых транзисторов между затвором и стоком  $C_{зс}$  обычно не превышают 1 – 20 пФ.

Полевые транзисторы с коротким каналом (длиной 1 – 3 мкм) являются высокочастотными приборами и могут работать на частотах до 100 МГц.

К важнейшим достоинствам полевых транзисторов следует отнести:

1) Высокое входное сопротивление ( $10^6 \div 10^{15}$  Ом).  
2) Малый уровень собственных шумов, т.к. в полевых транзисторах в отличие от биполярных в переносе тока участвуют заряды только одного знака. Это исключает появление рекомбинационного шума.

3) Высокая чувствительность против температуры и радиационных воздействий.

4) Высокая плотность расположения элементов при использовании приборов в интегральных микросхемах.

*Главное свойство транзисторов (полевых) – усиление электрических колебаний.*

### Полевые транзисторы с изолированным затвором

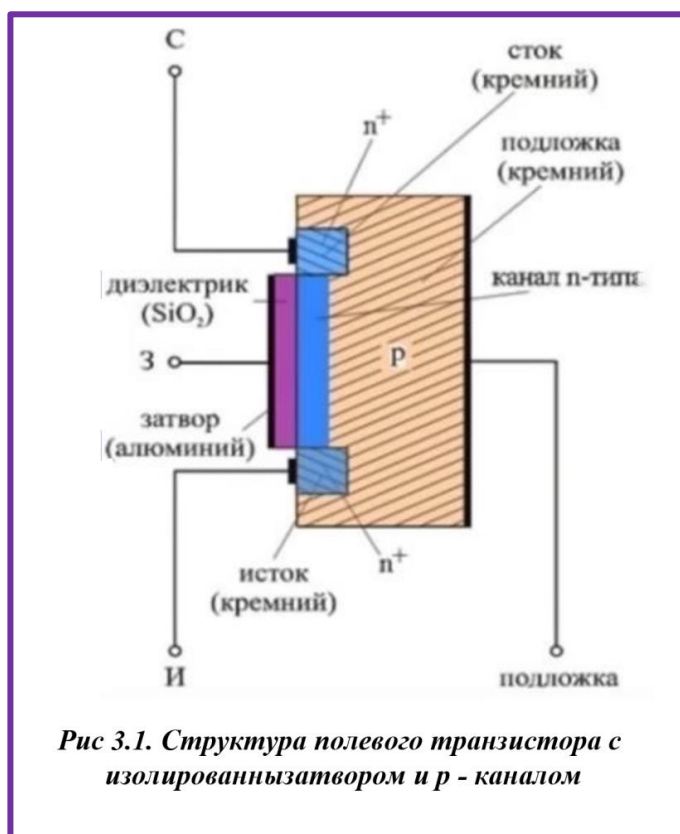


Рис 3.1. Структура полевого транзистора с изолированным затвором и p - каналом

Полевые транзисторы с изолированным затвором имеют структуру металл – диэлектрик (окисел) – полупроводник.

Поэтому их часто называют МДП или МОП – транзисторы. На рис. 3.1 показана конструкция такого транзистора.

Дальнейшее увеличение напряжения  $U_{си}$  приводит к пробое  $p - n$  перехода между затвором и каналом и выводит транзистор из строя.

Зависимость  $I_C = f(U_{зи})$  при  $U_{си} = \text{const}$  получила название стоко – затворной передаточной характеристики (рис. 3.2).

Основой прибора служит пластинка (подложка)

монокристаллического кремния  $p$  – типа. Области, легированные примесью  $n$  – типа. Расстояние между истоком и стоком примерно 1 мкм. На этом участке расположена слабо легированная полоска кремния  $n$  – типа (канал). Затвором служит металлическая пластинка, изолированная от канала слоем диэлектрика толщиной примерно 0,1 мкм.

В качестве диэлектрика может использоваться при высокой температуре плёнка двуокиси кремния. В зависимости от полярности (относительно истока) напряжения приложенного к затвору, канал может обедняться и обогащаться носителями заряда (электронами). При отрицательном напряжении на затворе электроны проводимости выталкиваются из области канала в объём полупроводника подложки. При этом канал обедняется носителями заряда, что ведёт к уменьшению тока в нём.

Положительное напряжение на затворе способствует втягиванию электронов проводимости из подложки в канал. В этом режиме, получившем название режима обогащения, ток канала возрастает.

Таким образом, в отличие от полевого транзистора с  $p - n$  переходами транзистор с изолированным затвором может работать с нулевым, отрицательным или положительным напряжением на затворе.

Выходные характеристики полевого транзистора с изолированным затвором имеют такой же вид, как и характеристики транзистора с  $p - n$  переходами (рис.3.2). Различие заключается лишь в том, что транзисторы с  $p - n$  переходами могут работать только в режиме обеднения (сужения) канала, а транзисторы МДП (или МОП) работают как в режиме обогащения, (при положительном  $U_{зи}$ ), так и в режиме обеднения (при отрицательном  $U_{зи}$ ).

По этой причине стоко – затворная характеристика может захватывать область положительных напряжений между затвором и истоком.

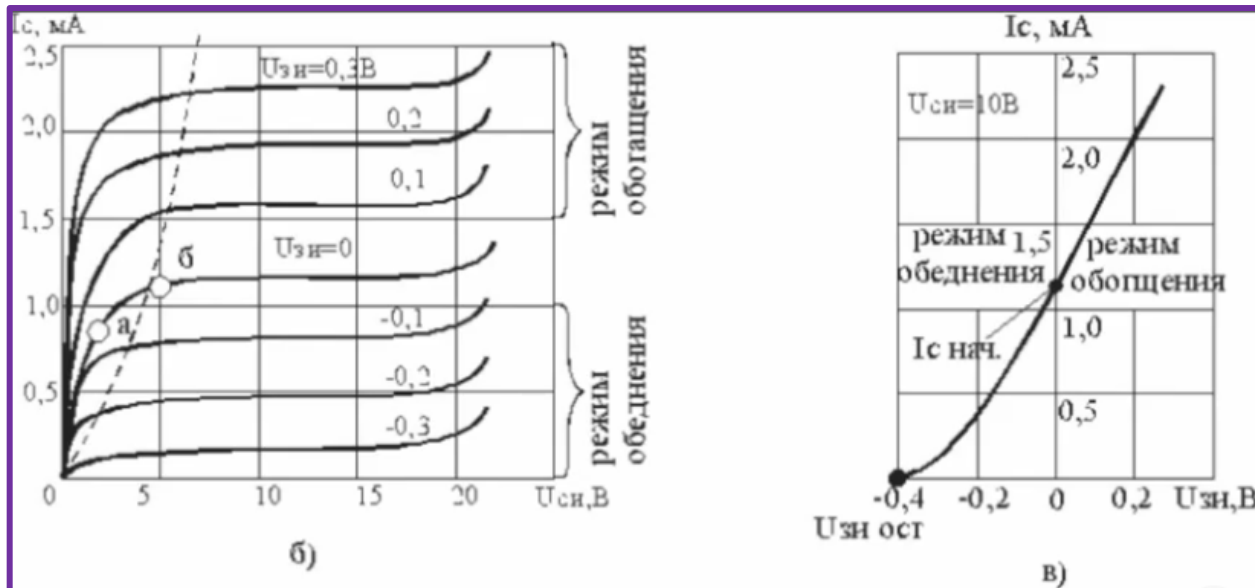


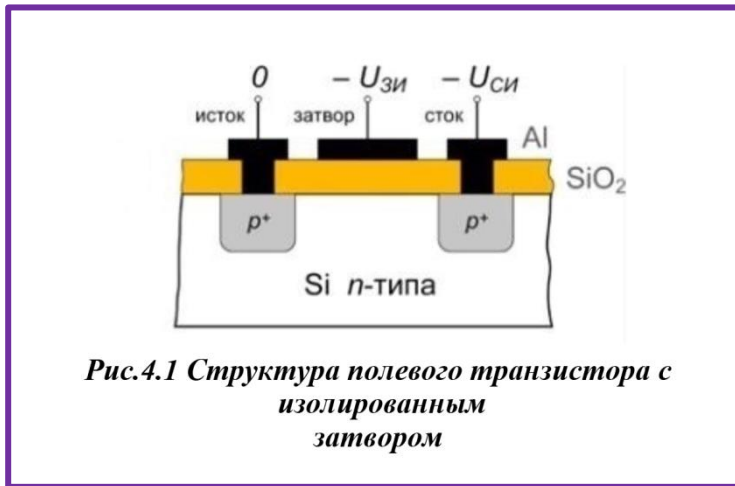
Рис. 3.2. Выходные (стоко – затворные) характеристики полевого транзистора с изолированным затвором

Существует две разновидности МДП – транзисторов: с индуцированным и встроенным каналом. Проводящий канал между сильно легированными областями истока и стока и, следовательно, заметный ток стока появляются только при определённой полярности и при определённом значении напряжения на затворе относительно истока, которое называется **пороговым напряжением**  $U_{зи}$ .

В МДП транзисторах со встроенным каналом у поверхности полупроводника под затвором, где при нулевом напряжении на затворе, относительно истока, существует поверхностный слой – канал, который соединяет исток со стоком.

Если в полевом транзисторе подложка имеет электропроводность  $n$  – типа, то сильно легированные области под истоком и стоком, а также индуцированный и встроенный канал имеют электропроводность  $p$  – типа. Если же аналогичные транзисторы созданы на подложке с электропроводностью  $p$  – типа, то канал у них будет иметь электропроводность  $n$  – типа.

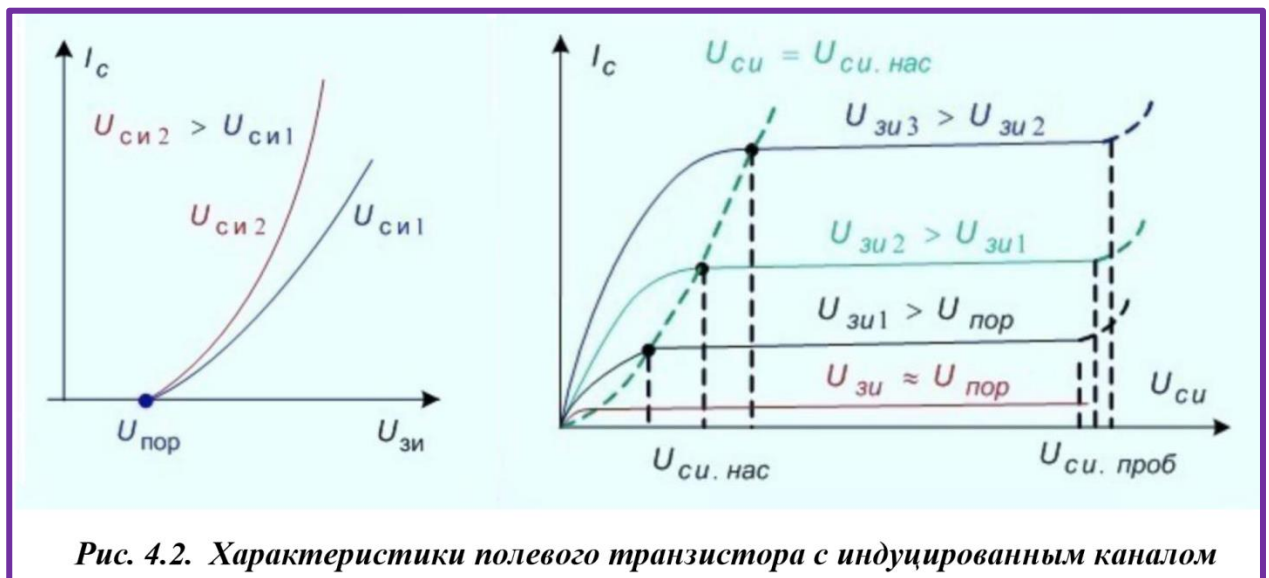
### Полевой транзистор с индуцированным каналом



Структура полевого транзистора с изолированным затвором и  $p$  – каналом изображена на рис. 4.1 При напряжении на затворе относительно истока, равным нулю, и при наличии напряжения на стоке, ток стока оказывается ничтожно малым. Он представляет собой обратный ток  $p$  –  $n$  перехода между подложкой и сильнолегированной областью стока.

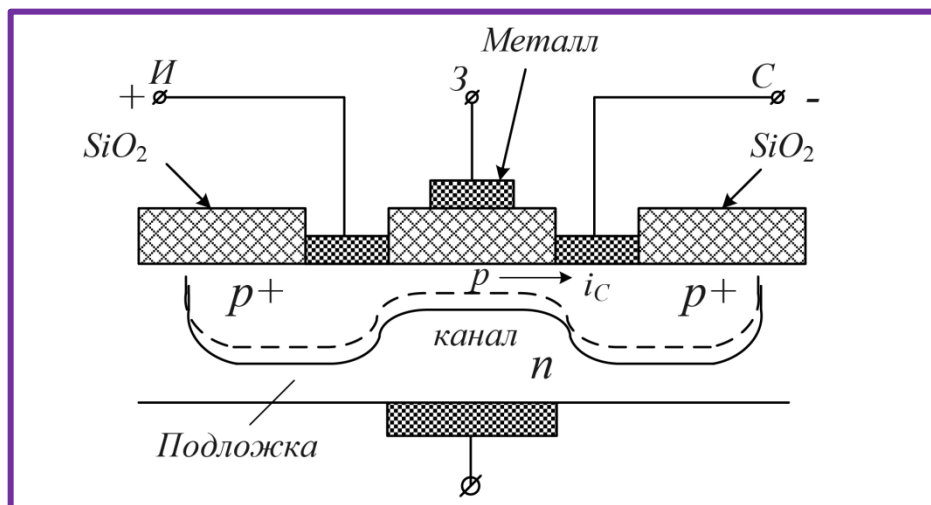
При отрицательном потенциале на затворе, в результате проникновения электрического поля, через диэлектрический слой в полупроводник. При малых напряжениях на затворе (меньших  $U_{з\text{у под}}$ ) у поверхности полупроводника под затвором возникают обеднённый основным зарядом слой и область объёмного заряда, состоящая из ионизированных примесных атомов.

Когда напряжение затвора превысит некоторое отпирающее (пороговое) значение порядка единиц вольт, то у поверхности полупроводника под затвором концентрация электронов настолько уменьшится, что станет меньше концентрация дырок и в этом слое произойдёт так называемая инверсия типа электропроводности, т.е. образуется тонкий канал  $p$  – типа, и транзистор проводить ток. Чем больше отрицательное напряжение на затворе, тем больше проводимость канала и ток стока. Таким образом, подобный транзистор может работать только в режиме обогащения. Если основание взять  $p$  – типа, то получится индуцированный канал  $n$  – типа. Стоковые и стоко – затворные характеристики транзистора с индуцированным каналом изображены на рис. 4.2.



## Полевые транзисторы со встроенным каналом

Структура ПТ со встроенным каналом изображена на рисунке 5.1



**Рис. 5.1. Полевой транзистор с изолированным затвором и со встроенным каналом.**

Основанием (подложкой) служит кремниевая пластина с электропроводностью  $n$  – типа. В ней созданы две области с повышенной проводимостью типа  $p$ . Эти области являются истоком и стоком. От них сделаны выводы. Между истоком и стоком имеется тонкий приповерхностный канал с электропроводностью  $p$  – типа.

Длина канала от истока до стока порядка единиц мкм. На поверхности канала имеется диэлектрический слой двуокиси кремния толщиной  $0,1 - 0,2$  мкм. Сверху диэлектрического слоя расположен затвор в виде тонкой металлической плёнки. Иногда от основания также делается вывод, который обычно соединяют накоротко с истоком.

Если при нулевом напряжении затвора приложить между стоком и истоком напряжение любой полярности, то через канал потечёт ток. Через основание ток не пойдёт, так как один из  $p-n$  переходов будет находиться под обратным напряжением.

При подаче на затвор положительного напряжения относительно истока, а, следовательно, и относительно основания в канале создаётся поперечное электрическое поле, под действием которого дырки выталкиваются из канала и стока в основание.

Канал обедняется основными зарядами, сопротивление его увеличивается и ток стока уменьшается. Чем больше положительное напряжение затвора, тем меньше этот ток. Такой режим называется **режимом обеднения**.

Если же на затвор подать «-» напряжение, то под действием поля, созданного этим напряжением из области истока и стока, а также из основания в канал будут приходить дырки, проводимость канала увеличивается и ток стока возрастает. Этот режим называют **режимом обогащения**.

Таким образом, МДП – транзистор со встроенным каналом может работать в двух режимах: в режиме обогащения и в режиме обеднения канала носителями заряда.

Эта особенность МДП – транзисторов, со встроенным каналом строится на смещении выходных характеристик при изменении напряжения на затворе и его полярности (рис. 5.а).

Характеристики передачи МДП транзисторов со встроенным каналом

Характеристики передачи (стоко – затворные) выходят из точки на оси абсцисс, соответствующей напряжению между затвором и истоком МДП – транзистора со встроенным каналом, работающим в режиме обеднения, при котором ток стока достигает заданного низкого значения (рис. 5.б).

