

Лекция 10

Полевые транзисторы

1. Устройство, принцип работы и ВАХ транзистора с управляемым $p-n$ -переходом.
2. Устройство, принцип работы и ВАХ МДП-транзистора с индуцированным каналом.
3. Устройство, принцип работы и ВАХ МДП-транзистора со встроенным каналом.
4. Преимущества и недостатки полевых транзисторов.

Общие сведения

- транзисторы, принцип действия которых основан на использовании носителей заряда только **одного знака** (электронов или дырок);
- управление током в униполярных транзисторах осуществляется изменением проводимости канала, через который протекает ток транзистора **под воздействием электрического поля** (полевые транзисторы).

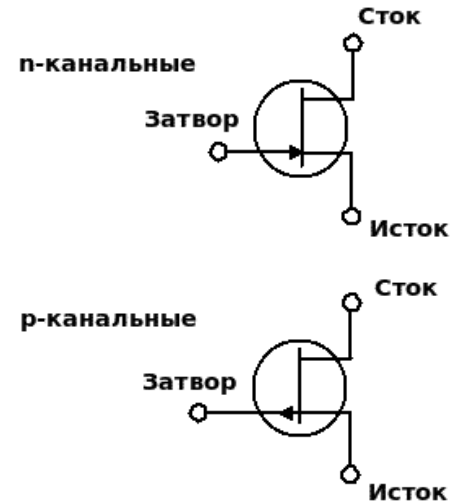
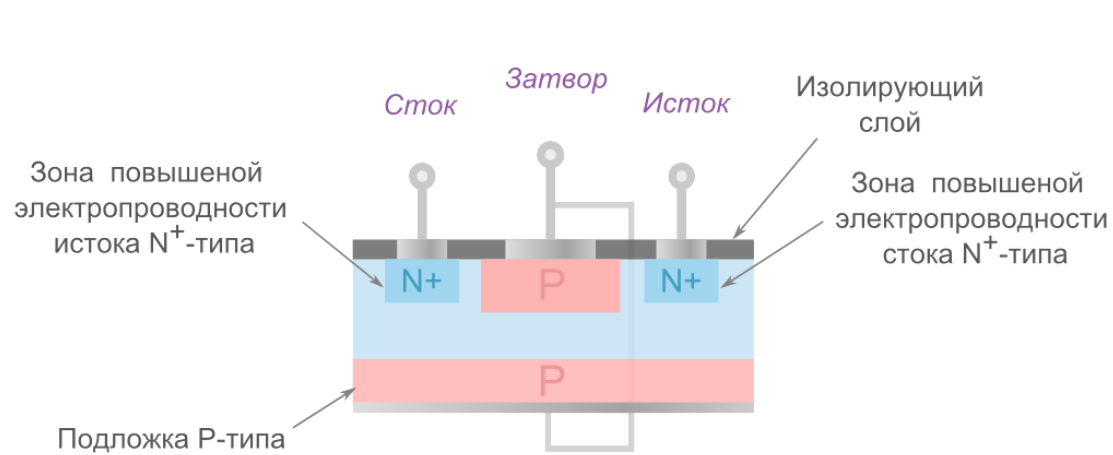
По способу создания канала:

- полевые транзисторы с *p-n*-переходом;
- встроенным каналом;
- индуцированным каналом.

Преимущества:

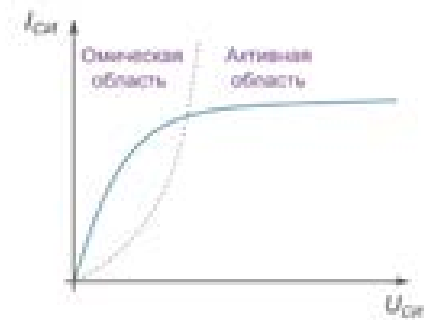
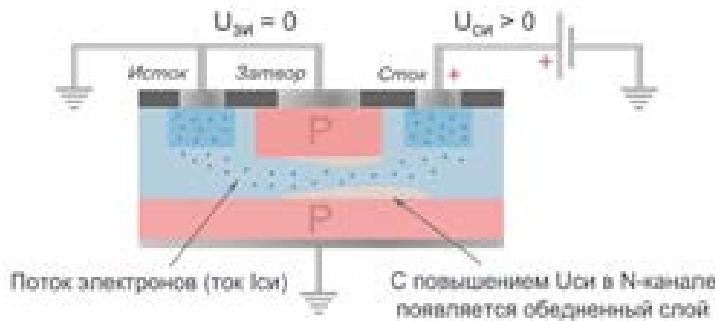
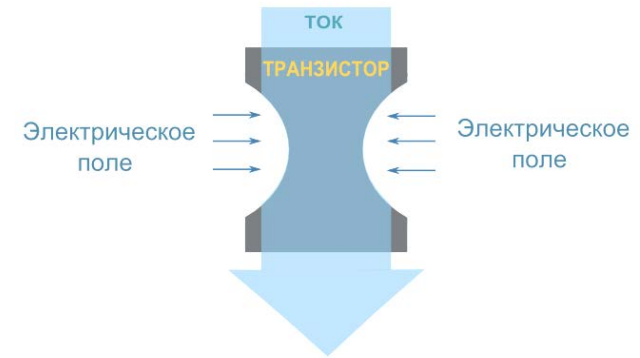
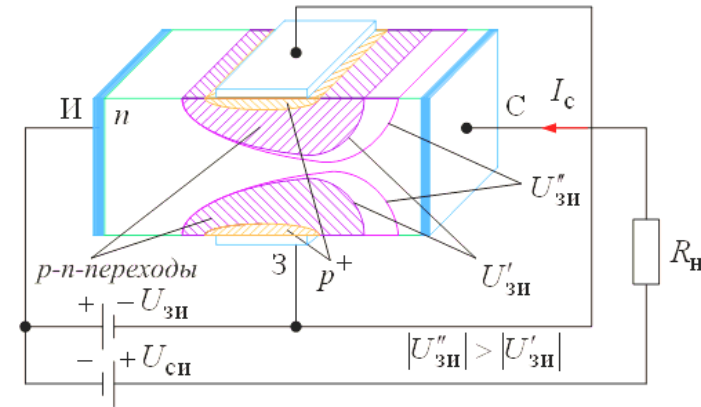
- высокая технологичность;
- хорошая воспроизводимость требуемых параметров;
- меньшая стоимость по сравнению с биполярными транзисторами;
- высокое входное сопротивление.

Устройство полевых транзисторов



- канал протекания тока транзистора представляет собой слой полупроводника n -типа, заключенный между двумя p - n -переходами;
- канал имеет контакты с внешними электродами прибора;
- электрод, от которого начинают движение носители заряда — **ИСТОК**;
- электрод, к которому носители заряда движутся — **СТОК**;
- полупроводниковые слои p -типа, образующие с n -слоем два p - n -перехода, созданы с более высокой концентрацией примеси, чем n -слой;
- оба p -слоя электрически связаны между собой и имеют общий внешний электрод — **затвор**.

Принцип работы полевых транзисторов

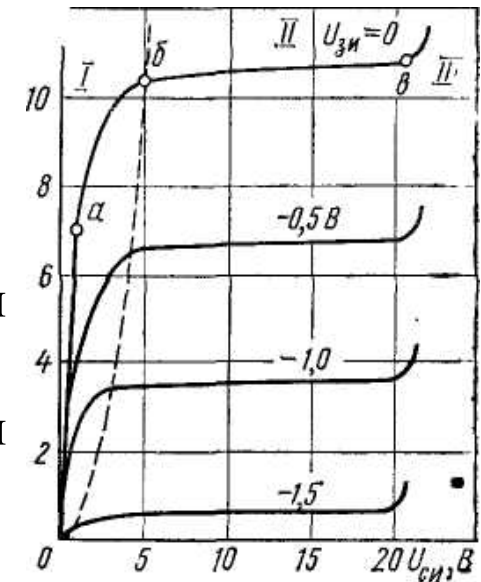
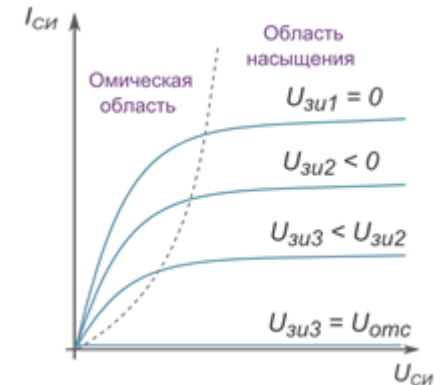
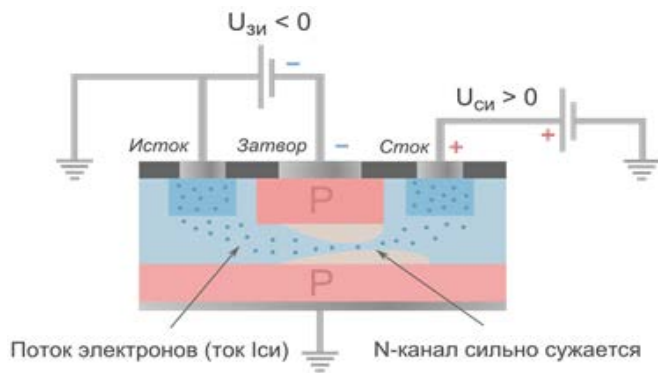
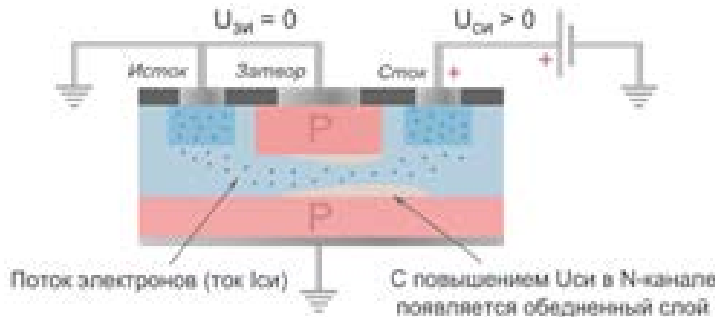


- Управляющее (входное) напряжение подается между затвором и истоком.
- Напряжение $U_{зи}$ является обратным для обоих n - p -переходов.
- В выходную цепь, в которую входит канал транзистора, включается напряжение $U_{си}$ положительным полюсом к стоку.
- При изменении напряжения $U_{зи}$ изменяется ширина p - n -переходов, представляющих собой участки полупроводника, обедненные носителями заряда.
- На проводимость канала оказывает влияние как управляющее напряжение $U_{зи}$, так и напряжение $U_{си}$.

Характеристики полевых транзисторов

Вольт-амперные характеристики: стоковые и стоко-затворные

Стоковые (выходные) отражают зависимость тока стока от напряжения сток — исток при фиксированном напряжении затвор — исток $I_c = F(U_{си})$
 $U_{зи} = \text{const}$



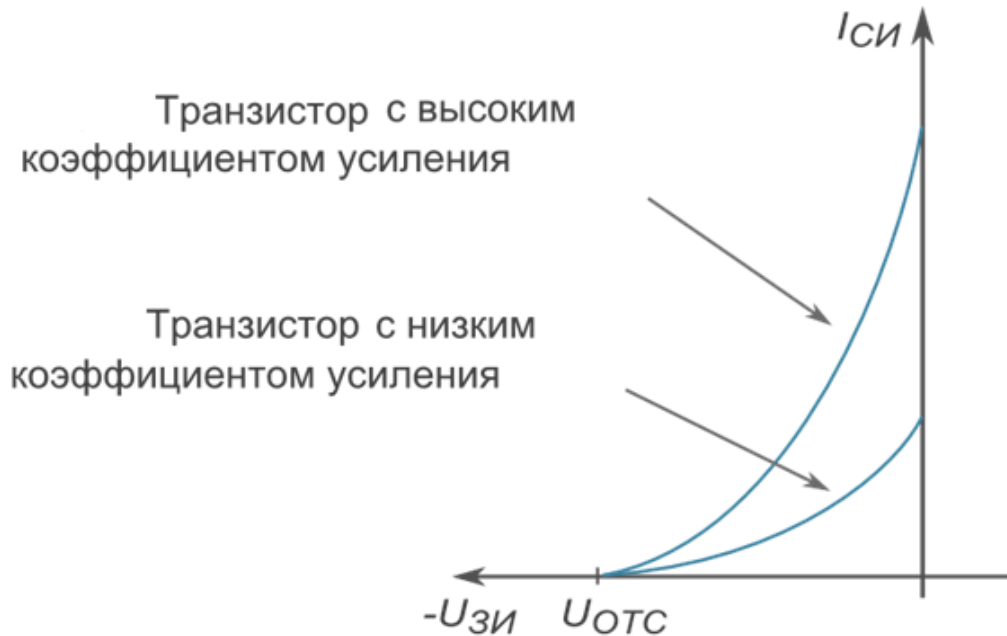
I — сильная зависимость тока I_c от напряжения $U_{си}$ (начальная область);

II — слабая зависимость тока I_c от напряжения $U_{си}$;

III — пробой $p-n$ -перехода.

Характеристики полевых транзисторов

Стоко-затворная характеристика полевого транзистора показывает зависимость тока стока от напряжения затвор — исток при фиксированном напряжении сток — исток: $I_c = F(U_{зи})U_{си} = \text{const}$



Параметр усилительной способности — крутизна стоко-затворной характеристики. Обозначается g_m или S , и измеряется в mA/V .

Параметры полевых транзисторов

- максимальный ток стока $I_{c\max}$;
- максимальное напряжение стока $U_{c\max}$;
- напряжение отсечки $U_{зио}$;
- внутреннее сопротивление r_i при $U_{зи} = \text{const}$; $r_i = \frac{dU_{си}}{dI_c}$
- крутизна S при $U_{си} = \text{const}$; $s = \frac{dI_c}{dU_{зи}}$
- межэлектродные емкости затвор — исток $C_{зи}$, затвор — сток $C_{зс}$ и сток — исток $C_{си}$.

Максимальное значение тока стока $I_{c\max}$ соответствует его значению в точке b на выходных характеристиках (при $U_{зи} = 0$).

Максимальное значение напряжения сток — исток $U_{си\max}$ выбирают в 1,2—1,5 раза меньше напряжения пробоя участка сток — затвор при $U_{зи} = 0$.

Напряжению отсечки $U_{зио}$ соответствует напряжение на затворе при токе стока, близком к нулю.

Внутреннее сопротивление транзистора характеризует наклон выходной характеристики на участке II

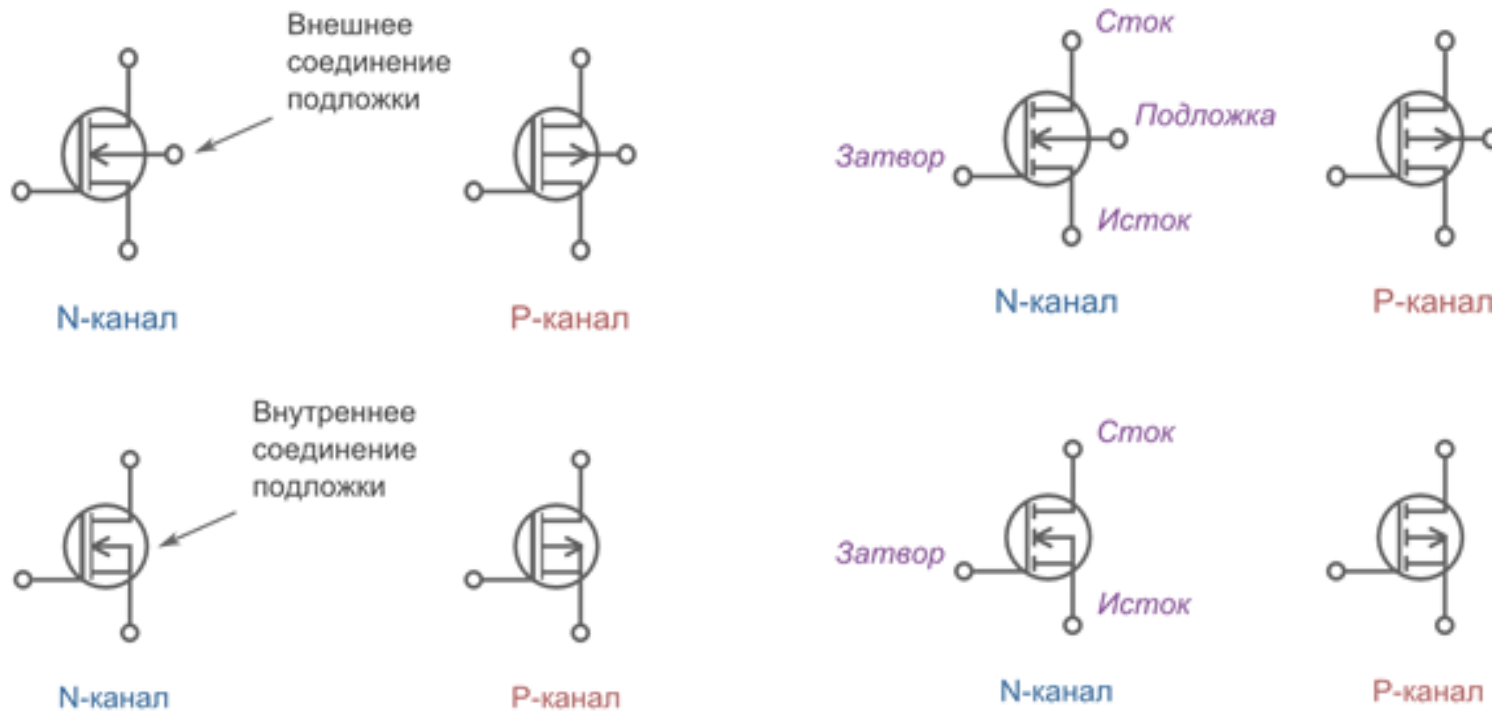
Крутизна стоко-затворной характеристики отражает влияние напряжения затвора на выходной ток транзистора.

Межэлектродные емкости $C_{зи}$ и $C_{зс}$ связаны с наличием в приборе p - n -переходов, примыкающих соответственно к истоку и стоку.

МДП-транзисторы

МДП-транзисторы (структура металл — диэлектрик — полупроводник) выполняются из кремния. В качестве диэлектрика используют окисел кремния SiO_2 .

МОП-транзисторы (структура металл — окисел — полупроводник).

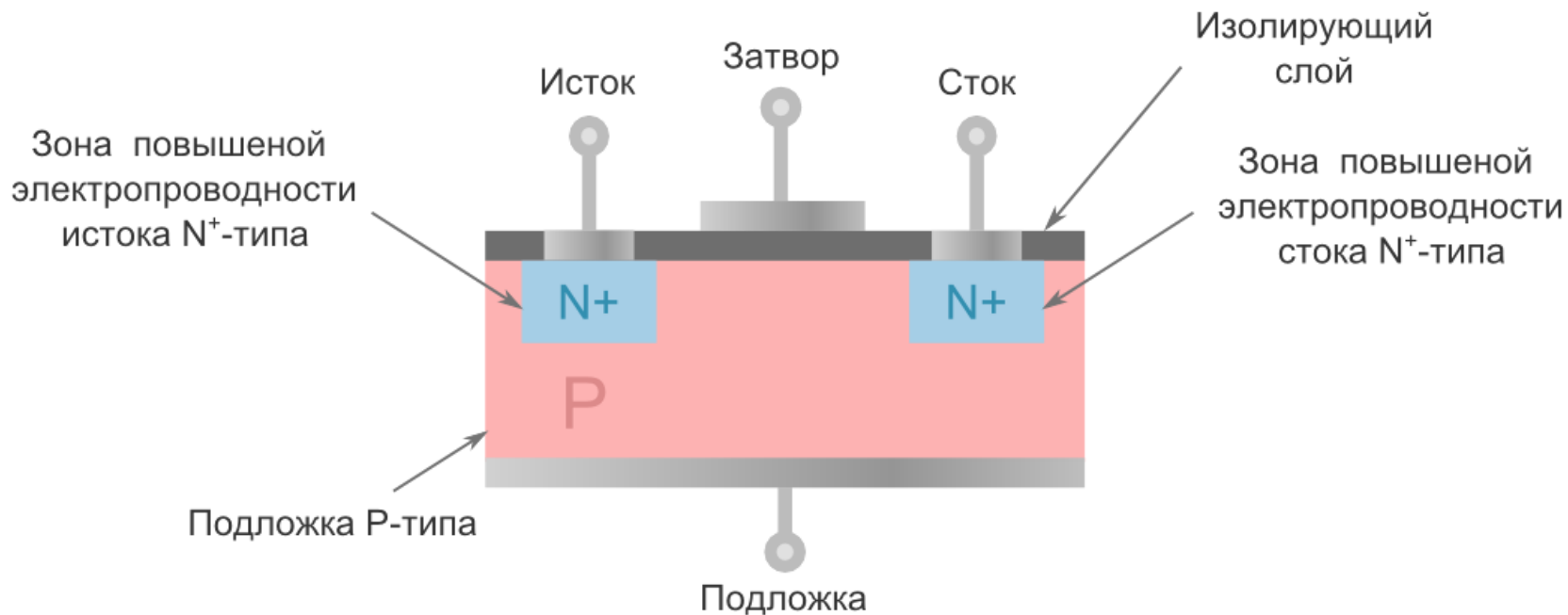


МДП-транзистор со
встроенным каналом

МДП-транзистор с
индуцированным каналом

Устройство МДП-транзистора с индуцированным каналом

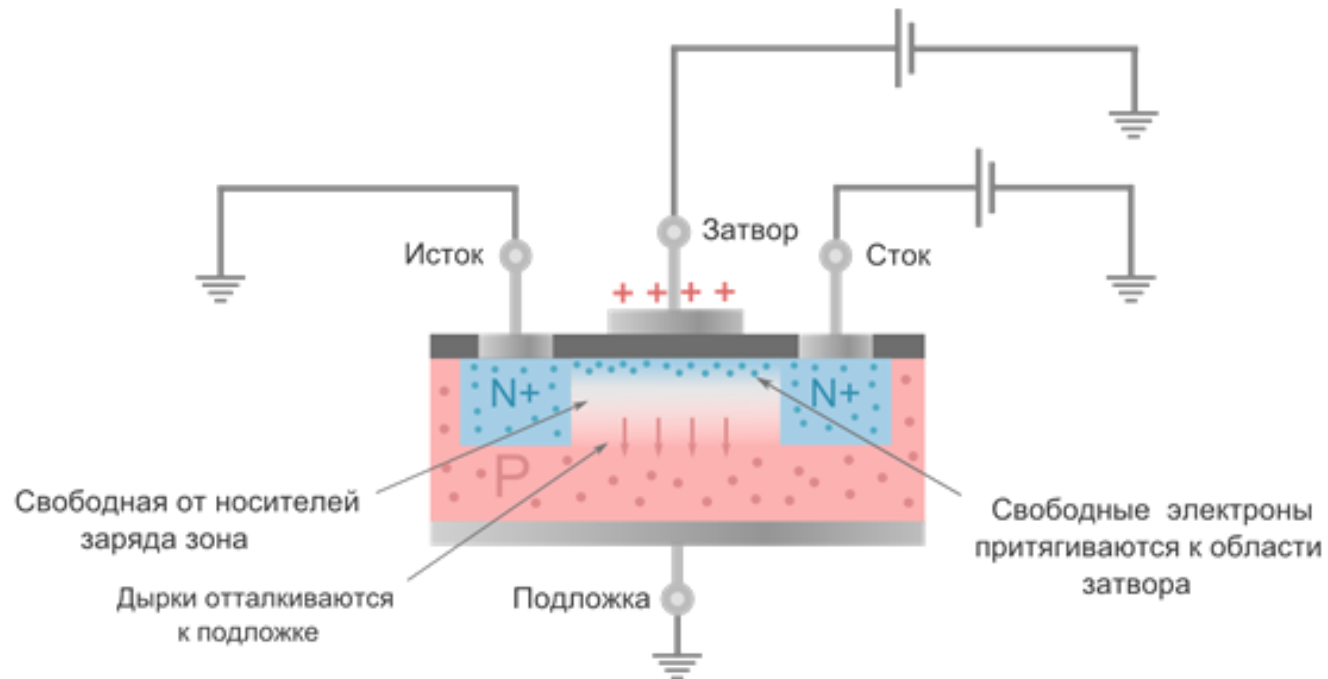
- На основании полупроводника с электропроводностью p -типа (для транзистора с n -каналом) созданы две зоны с повышенной электропроводностью n^+ -типа;
- зоны покрыты тонким слоем диэлектрика (диоксид кремния SiO_2);
- сквозь диэлектрический слой проходят металлические выводы *стока* и *истока*;
- над диэлектриком находится металлический слой *затвора*. Иногда от подложки также идет вывод, который закорачивают с истоком



Устройство МДП-транзистора с индуцированным каналом N-типа

Работа МДП-транзистора с индуцированным каналом

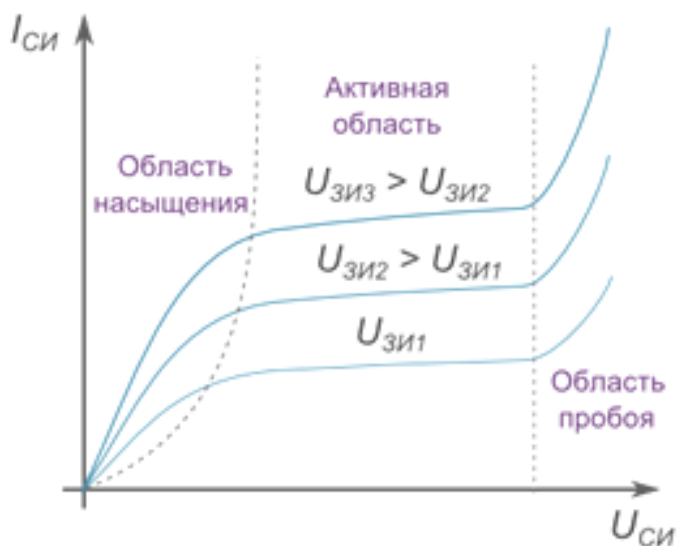
- если подать на затвор положительное напряжение относительно истока $U_{зи}$, возникнет электрическое поле. Оно будет выталкивать положительные ионы (дырки) из зоны Р в сторону подложки;
- когда $U_{зи}$ достигнет своего порогового значения между стоком и истоком сформируется тонкий канал с электропроводностью N-типа, по которому пойдет ток $I_{си}$;
- чем выше напряжение на затворе транзистора $U_{зи}$, тем шире канал и, следовательно, больше сила тока. Такой режим работы полевого транзистора называется **режимом обогащения**.



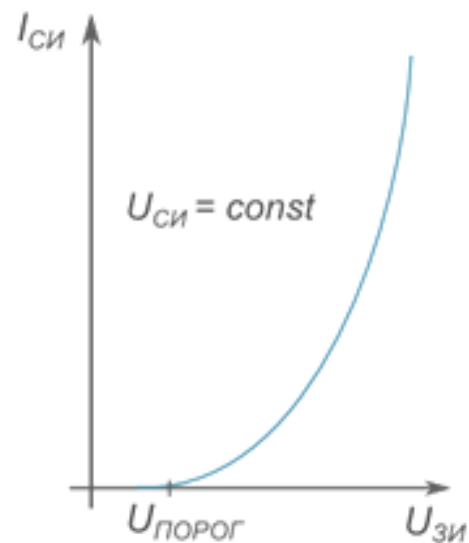
Работа МДП-транзистора с индуцированным каналом N-типа

ВАХ МДП-транзистора с индуцированным каналом

- Управление током транзистора осуществляется напряжением одной полярности, совпадающей с полярностью напряжения $U_{си}$.
- Ток I_c равен нулю при $U_{зи} = 0$.



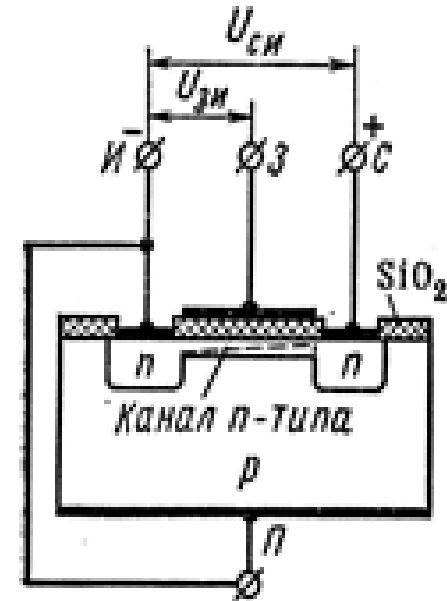
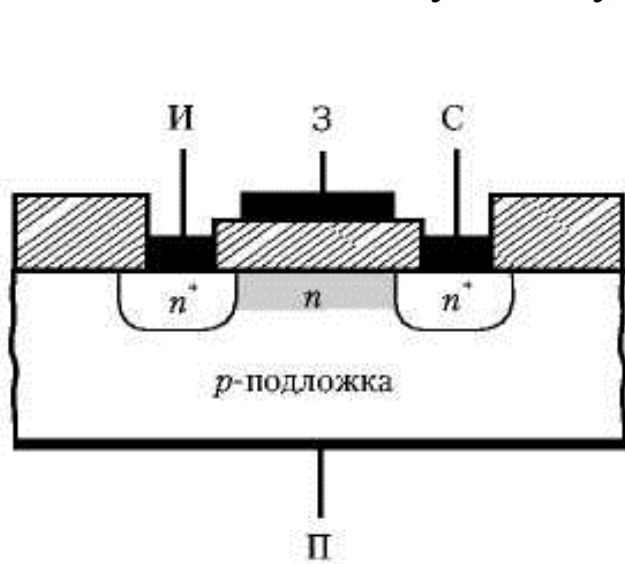
Стоковые (выходные) характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом



Стоко-затворная характеристика МДП-транзистора с индуцированным каналом

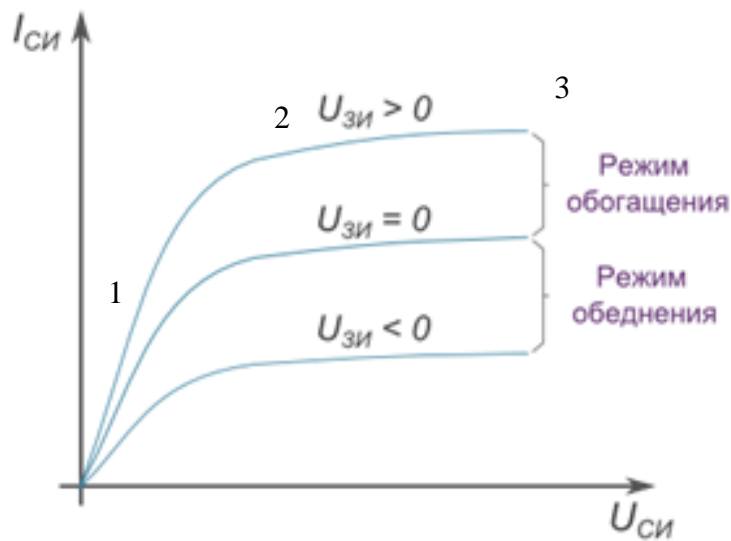
Устройство и работа МДП-транзистора со встроенным каналом

- В исходной пластине кремния p -типа с помощью диффузионной технологии созданы области истока, стока и канала n -типа;
- Слой окисла SiO_2 выполняет функции защиты поверхности, близлежащей к истоку и стоку, а также изоляции затвора от канала.

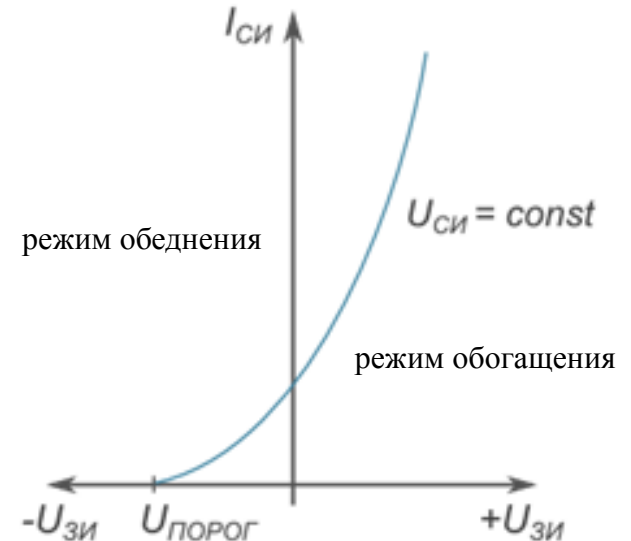


- Напряжение между стоком и истоком $U_{си}$ - любой полярности;
- При $U_{зи} = 0$ через канал идет ток $I_{си}$;
- При повышении отрицательного напряжения на затворе, уменьшается сила тока - **режим обеднения**;
- При подключении положительного напряжения на затворе, ток $I_{си}$ увеличится - **режим обогащения**;
- МДП-транзистор со встроенным каналом способен работать в двух режимах.

ВАХ МДП-транзистора со встроенным каналом



Стоковые (выходные) характеристики
МДП-транзистора со встроенным
каналом



Стоко-затворная характеристика
МДП-транзистора со встроенным
каналом

- 1 – Линейный участок – падение напряжения в канале мало;
- 2 – Пологий участок – падение напряжения в канале приводит к его сужению;
- 3 – Пробой.

Преимущества и недостатки полевых транзисторов

Преимущества:

- 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.
- На порядок выше скорость перехода между состояниями проводимости и непроводимости тока - могут работать на более высоких частотах.

Недостатки:

- Структура полевых транзисторов начинает разрушаться при меньшей температуре (150°C), чем структура биполярных транзисторов (200°C).
- На частотах выше, примерно, чем 1.5 ГГц, потребление энергии у МОП-транзисторов начинает возрастать по экспоненте.
- «Паразитный» биполярный транзистор - подложку закорачивают с истоком.
- Чувствительность к статическому электричеству.

