

# Глава 4. Полевые транзисторы

## 4.1. Основные сведения и классификация

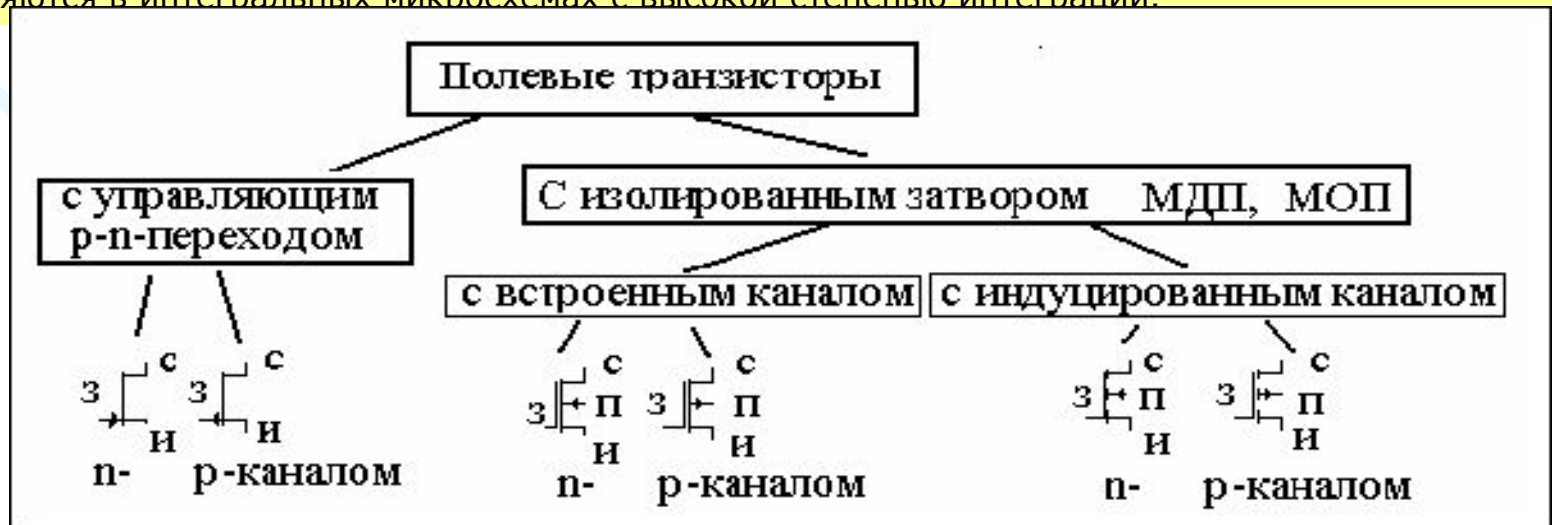
Полевые транзисторы представляют собой полупроводниковые приборы, в которых управление выходным током  $I_{вых}$ , осуществляется с помощью поперечного электрического поля создаваемого входным напряжением  $U_{вх}$ , путем изменения сопротивления полупроводникового канала, проводящего выходной ток, т.е.  $I_{вых} = S U_{вх}$ , где  $S$  - крутизна.

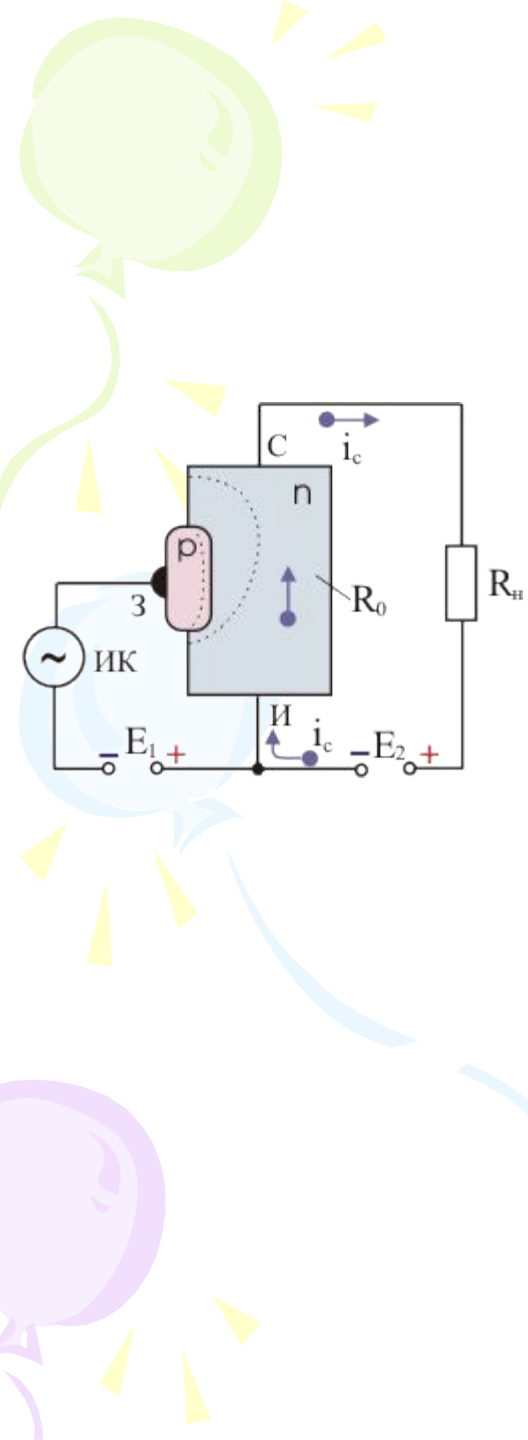
Работа ПТ основана на перемещении только основных носителей заряда (дырок или электронов), а потому их иногда называют униполярными. Основным способом движения зарядов является их дрейф в электрическом поле.

Электрод полевого транзистора, через который втекают носители заряда в канал, называется истоком (И), электрод, через который из канала вытекают носители заряда, называется стоком (С). Эти электроды обратимы. Управляющее напряжение прикладывается к третьему электроду, называемому затвором (З), что изменяет удельную проводимость или площадь сечения канала.

Полевые транзисторы обладают рядом преимуществ по сравнению с биполярными транзисторами.

1. Основным достоинством ПТ - высокое входное сопротивление ( $10^6 - 10^7$  Ом — у транзисторов с управляющим p-n-переходом и  $10^{10} - 10^{15}$  Ом у МДП-транзисторов).
2. ПТ более устойчивы к воздействию ионизирующих излучений,
3. ПТ способны работать при низкой температуре вплоть до температуры жидкого азота ( $-197$  °С).
4. ПТ - характеризуются низким уровнем шумов.
5. МДП-транзисторы занимают малую площадь на поверхности кристалла полупроводника, а потому широко применяются в интегральных микросхемах с высокой степенью интеграции.

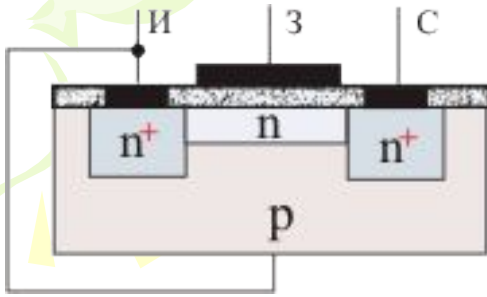




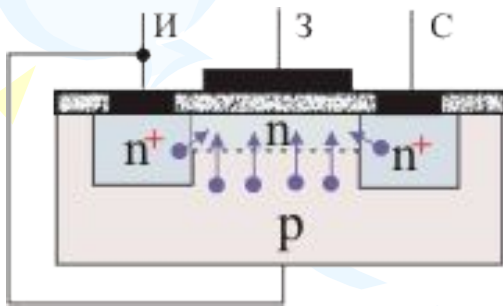
- Идею создания полевых транзисторов, иначе называемых **униполярными** или **канальными**, в 1952 г. предложил один из создателей биполярного транзистора У. Шокли. Главным достоинством этих транзисторов является высокое входное сопротивление (как у ламп и даже больше). Принцип устройства и схема включения полевого транзистора изображены на рис. 1.

Рис. 1 - Полевой транзистор с p-n-переходом и каналом n-типа

- Пластинка из полупроводника (в нашем случае n-типа) имеет на противоположных концах электроды, с помощью которых она включена в выходную (управляемую) цепь усилительного каскада. Эта цепь питается от источника E2 и в нее включена нагрузка Rн. Вдоль транзистора проходит ток основных носителей (в нашем случае электронный ток). Входная (управляющая) цепь транзистора образована при помощи третьего электрода, являющейся областью с другим типом электропроводности (в нашем случае это p-область). Источник E1 создает на единственном p-n-переходе обратное напряжение. Прямое напряжение на переход не подается, поскольку тогда входное сопротивление транзистора будет очень малым. Во входную цепь включен источник усиливаемых колебаний ИК.
- Рассмотрим физические процессы в полевом транзисторе. При изменении входного напряжения изменяется обратное напряжение на p-n-переходе, в результате чего изменяется толщина запирающего слоя (на рисунке эта область ограничена штриховыми линиями). Соответственно меняется площадь поперечного сечения области, через которую проходит поток основных носителей заряда (выходной ток). Эта область называется **каналом**. Электрод, из которого в канал вытекают основные носители заряда, называют **истоком (И)**. Из канала носители проходят к электроду, который называется **стоком (С)**. Исток и сток аналогичны катоду и аноду лампы (или эмиттеру и коллектору биполярного транзистора) соответственно. Управляющий электрод, который предназначен для регулирования площади поперечного сечения канала, называется **затвором**. Затвор аналогичен сетке лампы (или базе биполярного транзистора), хотя принцип их работы сильно отличается.
- Если увеличивать напряжение на затворе, то запирающий слой становится толще и площадь поперечного сечения канала уменьшается. Его сопротивление постоянному току растёт и ток стока  $i_c$  уменьшается. При определенном напряжении на затворе площадь поперечного сечения канала станет равной нулю и ток стока уменьшится до весьма малого значения. Транзистор закроется. При напряжении на затворе, равном 0 сечение канала возрастет до наибольшего значения, сопротивление R0 уменьшится до наименьшего значения, ток стока увеличится до максимального значения. Для более эффективного управления выходным током с помощью входного напряжения, материал основного полупроводника, в котором создан канал, должен быть высокоомным, т. е. с невысокой концентрацией примесей. Тогда запирающий слой получается наибольшей толщины. Кроме того, начальная толщина самого канала (при нулевом входном напряжении) должна быть достаточно малой.
- Поскольку вдоль канала потенциал повышается по мере приближения к стоку, то ближе к стоку обратное напряжение перехода увеличивается и толщина запирающего слоя становится больше.
- **Полевые транзисторы с изолированным затвором**
- Помимо полевых транзисторов с управляющим переходом существуют так называемые **транзисторы с изолированным затвором**. По-другому такие транзисторы называют **МДП-транзисторами** (металл-диэлектрик-полупроводник) или **МОП-транзисторами** (металл-оксид-полупроводник). На рис. 2 показан принцип устройства такого транзистора.

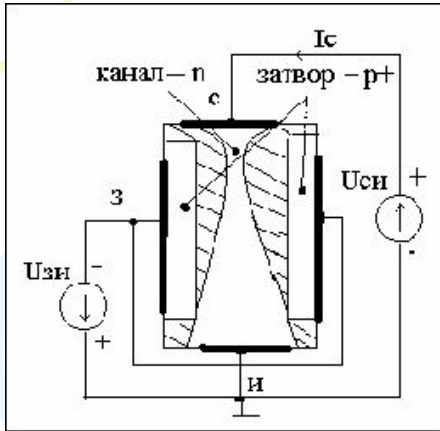


- Рис. 2 - Принцип устройства МДП-транзистора с собственным каналом n-типа
- Основанием служит кремниевая пластинка с электропроводностью p-типа. В ней созданы две области с электропроводностью n+-типа с повышенной проводимостью. Эти области являются истоком и стоком и от них сделаны выводы. Между стоком и истоком имеется приповерхностный канал с электропроводностью n-типа. Заштрихованная область - диэлектрический слой из диоксида кремния (его толщина обычно составляет 0,1 - 0,2 мкм). Сверху диэлектрического слоя расположен затвор в виде тонкой металлической пленки. Кристалл такого транзистора обычно соединен с истоком и его потенциал принимается за нулевой. Иногда от кристалла бывает сделан отдельный вывод. Рассмотренный транзистор называют **транзистором с собственным (встроенным) каналом**. Посмотрим, как же он работает.
- Если на затвор приложено нулевое напряжение, то, подав между стоком и истоком напряжение, через канал потечет ток, представляющий собой поток электронов. Через кристалл ток не пойдет, так как один из p-n-переходов находится под обратным напряжением. При подаче на затвор напряжения отрицательной полярности относительно истока (следовательно, и кристалла) в канале образуется поперечное электрическое поле, которое выталкивает электроны из канала в области истока и стока и кристалла. Канал обедняется электронами, его сопротивление увеличивается, ток уменьшается. Чем больше напряжение на затворе, тем меньше ток. Такой режим называется **режимом обеднения**. Если подать положительное напряжение на затвор, то под действием поля из областей стока, истока и кристалла в канал будут приходить электроны. Сопротивление канала падает, ток увеличивается. Такой режим называется **режимом обогащения**. Если кристалл n-типа, то канал должен быть p-типа и полярность напряжения меняется на противоположную.
- Другим типом является так называемый **транзистор с индуцированным (инверсным) каналом** (рис. 3). От предыдущего он отличается тем, что канал возникает только при подаче на затвор напряжения определенной полярности.



- Рис. 3 - Принцип устройства транзистора с индуцированным каналом n-типа
- При отсутствии напряжения на затворе канала нет, между истоком и стоком n+-типа расположен только кристалл p-типа и на одном из p-n+-переходов получается обратное напряжение. В этом состоянии сопротивление между стоком и истоком велико и транзистор закрыт. При подаче на затвор напряжения положительной полярности под влиянием поля затвора электроны проводимости будут перемещаться из областей стока и истока и p-области по направлению к затвору. Когда напряжение на затворе достигает своего отпирающего (порогового) значения (единицы вольт), в приповерхностном слое концентрация электронов настолько увеличивается, что превышает концентрацию дырок, и в этом слое произойдет так называемая **инверсия** типа электропроводности, т. е. образуется тонкий канал n-типа и транзистор начнет проводить ток. Чем больше напряжение на затворе, тем больше ток стока. Очевидно, что такой транзистор может работать только в режиме обогащения. Если подложка n-типа, то получится индуцированный канал p-типа. Транзисторы с индуцированным каналом часто встречаются в устройствах переключения (очень часто в звукотехнике).
- Схемы включения полевых транзисторов подобны схемам включения биполярных. Следует отметить, что полевой транзистор позволяет получить намного больший коэффициент усиления, нежели биполярный. Обладая высоким входным сопротивлением (и низким выходным) полевые транзисторы постепенно вытесняют биполярные. Следует также помнить, что полевые транзисторы очень "боятся" статического электричества, поэтому при работе с ними предъявляют особо жесткие требования по защите от статического электричества.

# п-канальный полевой транзистор и принцип действия и ВАХ полевого транзистора с электронно-дырочным переходом



Рассмотрим n-канальный полевой транзистор. Он состоит (рис.1.1) из слаболегированного полупроводника n-типа выполненного в виде пластины, которая представляет собой канал. На каждую из боковых граней пластины наносится слой высоколегированного полупроводника с противоположным типом (p+) проводимости - он представляет собой затвор. Оба слоя материала, нанесенные на боковые грани, чаще всего электрически соединены и образуют электрод, имеющий внешний вывод через омический контакт. Этот электрод называется затвором Z. Между затвором и каналом образуются p-n переходы, причем его обедненная область расположена в канале т.к. он слаболегирован. Объем канала, заключенный между p-n-переходами, является проводящей частью канала.

Торцы пластины снабжены электродами, имеющими омические контакты, с помощью которых прибор включается в электрическую цепь. Один из выводов называют истоком И. Его заземляют (соединяют с общей точкой схемы), а другой называют стоком С. На сток подают напряжение  $U_{си}$  такой полярности, чтобы основные носители канала двигались к стоку. При включении в схему сток и исток можно менять местами. Такое включение называется инверсным. Если исходная пластина изготовлена из полупроводника n-типа, то сток подключается к положительному полюсу источника ЭДС, а исток — к отрицательному.

На затвор полевого транзистора подают напряжение  $U_{зи}$  смещающее p-n-переходы в обратном направлении. При этом толщина обедненного слоя p-n-перехода увеличится, а сечение проводящей части канала уменьшится. Это изменяет величину сопротивления канала, т.е. сопротивления между стоком и истоком. Следовательно, изменяя входное напряжение  $U_{зи}$ , можно изменять

электрическое сопротивление канала, в результате чего будет меняться выходной ток  $I_c$ , протекающий в цепи исток-сток под действием приложенного к стоку напряжения  $U_{си}$ .

В цепи затвора протекает малый ток обратносмещенного p-n-перехода  $I_z$ . Поэтому входная проводимость полевого транзистора для постоянного тока и переменного тока низкой частоты может быть очень малой.

# Принцип работы полевого транзистора с управляющим р-п-переходом

Принцип работы рассмотрим по физическим моделям, приведенным на рис.

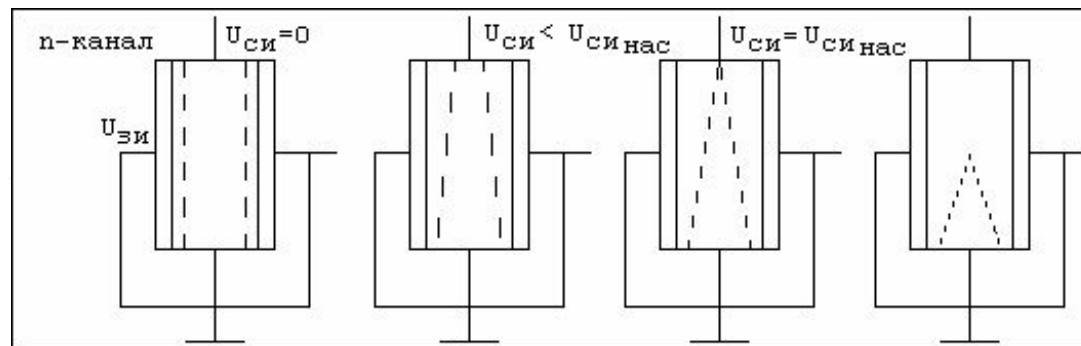
1.  $U_{си}=0$ . Область обеднённая носителями заряда, располагается в объёме канала, причём она имеет одинаковую толщину по его длине. Напряжение  $U_{зи}$  позволяет управлять сечением проводящей части канала, а следовательно и сопротивлением исток-сток. В таком режиме полевой транзистор, выполняет роль переменного сопротивления управляемого  $U_{зи}$ .

При  $U_{зи} < U_{зи\text{отсечки}}$  смыкание канала происходит на стоке. В этом случае весь канал представляет собой область обеднённую носителями зарядов.  $R_{си} = \infty$ ,  $I_c = 0$ . Это режим отсечки тока стока.

2.  $0 < U_{зи} < U_{зи\text{нас}}$ . По каналу протекает ток стока, создавая на его объёмном сопротивлении потенциал, который неодинаков по длине канала. Максимальный он у стока, а минимален у истока. Это приводит к тому, что проводящая часть канала разную ширину - у стока уже, чем у истока.

3. При  $U_{зи} = U_{зи\text{нас}}$  происходит смыкание проводящей части канала у стока.

4.  $U_{зи} > U_{зи\text{нас}}$ . Смыкание происходит в объёме канала. При этом  $I_c$  с возрастанием  $U_{зи}$ , не увеличивается. Это режим насыщения транзистора. Наличие тока стока  $I_c$ , объясняется инжекцией носителей заряда в обеднённую область.



# р-п- переходом

Свойства полевых транзисторов обычно характеризуют следующими семействами ВАХ:

$$I_c = f(U_{cu}) \Big|_{U_{zu} = \text{const}} \quad (\text{выходная характеристика});$$

$$I_c = f(U_{zu}) \Big|_{U_{cu} = \text{const}} \quad (\text{характеристика прямой передачи или стокзатворная характеристика});$$

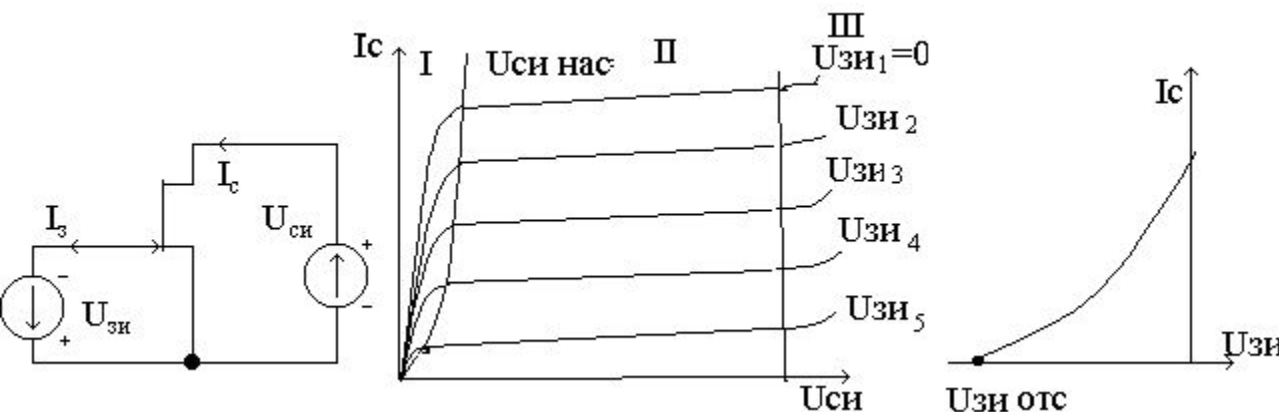
Типичное семейство выходных ВАХ полевого транзистора с р-п-переходом показано на рис 1.2.

На выходных ВАХ можно выделить три области.

Область I.  $0 < U_{cu} < U_{cu, \text{нас}}$ . Это крутой или омический участок. В этой области транзистор работает как омическое сопротивление, управляемое входным напряжением, т.е. :  **$R_{cu} = F(U_{zu})$** .

Область 2.  $U_{cu, \text{нас}} < U_{cu} < U_{cu, \text{мах}}$ . Это область насыщения. При  $U_{cu} = U_{cu, \text{нас}}$  происходит смыкание проводящей части канала у стока. После чего рост тока стока  $I_c$  практически прекращается и он почти не зависит от напряжения на стоке. Напряжение при котором возникает этот режим, называется напряжением насыщения  $U_{cu, \text{нас}}$  :  **$I_c = F(U_{zu})$** . Это рабочая область ПТ.  $U_{cu, \text{нас}} = U_{zu} - U_{zu, \text{отс}}$

Область 3.  $U_{cu} > U_{cu, \text{мах}}$ . Это область пробоя транзистора. Увеличение напряжения на стоке выше определенной величины приводит к электрическому пробое р-п-перехода у стокового конца канала.



Передаточная ВАХ:

Напряжения  $U_{cu}$  в пределах области насыщения мало влияют на поведение стокзатворной характеристики;

$U_{zu, \text{отс}}$  - напряжение отсечки тока стока, при этом напряжении канал смыкается у истока.

При напряжении  $U_{зи}=0$  напряжение насыщения равно напряжению отсечки. Можно показать, что при положительных напряжениях на затворе напряжение насыщения определяется по формуле

$$U_{си\text{нас}} = U_{зи} - U_{зи\text{отс}} \quad 1.1.$$

В выходных ВАХ кривая, соединяющая точки, соответствующие значениям  $U_{си\text{нас}}$  при разных значениях  $U_{зи}$ , является параболой, выходящей из начала координат (пунктирная линия на рис. 5.3). Если управляющий  $p$ - $n$  переход сместить в прямом направлении, ток стока увеличится. При этом резко возрастает входная проводимость прибора. Такой режим на практике не используют. Это не рабочий режим работы.

Передаточная ВАХ (стокзатворная характеристика)  $I_c = f(U_{зи})|_{U_{си}=\text{const}}$  (рис. 1.3) может быть легко получена из семейства выходных характеристик, если при фиксированном напряжении  $U_{си}$  отмечать величину напряжения  $U_{зи}$  и соответствующие ему значения  $I_c$ . Изменение напряжения  $U_{си}$  в пределах области насыщения мало влияет на поведение стокзатворной характеристики.



## 4.3. Полевые транзисторы с изолированным затвором

В них металлический затвор отделен от полупроводникового канала тонким слоем диэлектрика. Отсюда и название транзистора – МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) - или МОП-транзистор. Принцип действия МДП транзистора основан на управлении пространственным зарядом полупроводника канала через слой диэлектрика.

Различают МДП-транзисторы с индуцированным и со встроенным каналом. В МДП-транзисторах с индуцированным каналом проводящий канал между истоком и стоком индуцируется (наводится) управляющим напряжением затвора. В этих транзисторах при разности потенциалов между истоком и затвором, равной нулю, электропроводность между стоком и истоком практически отсутствует.

В МДП транзисторах со встроенным каналом канал соединяющий области стока и истока создают на этапе изготовления транзистора.





# 4.3.1. МДП – транзистор с индуцированным каналом

Структура МДП – транзистора с индуцированным каналом приведена на рис. В них канала соединяющего области стока и истока на этапе изготовления не создают. Возникновение канала основано на эффекте поля, т.е. изменении концентрации носителей в приповерхностном слое полупроводник под действием электрического поля.

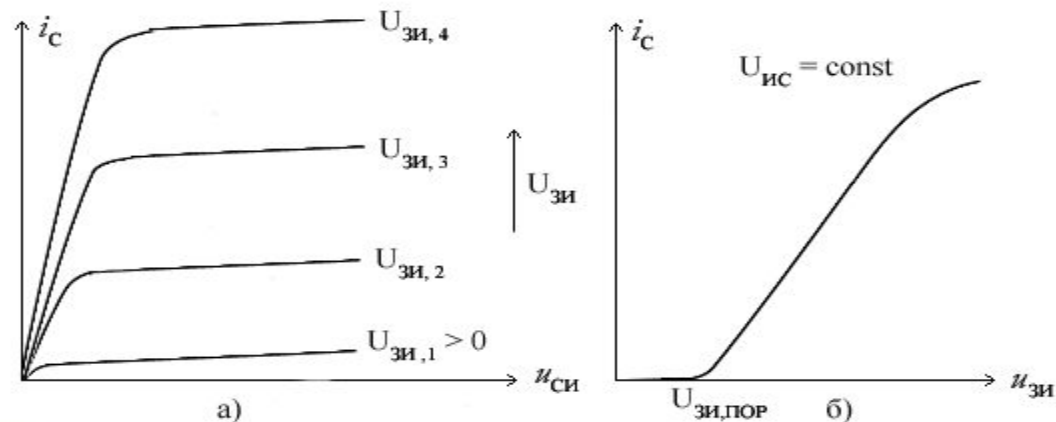
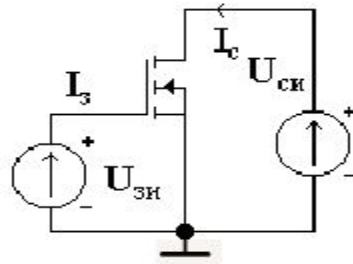
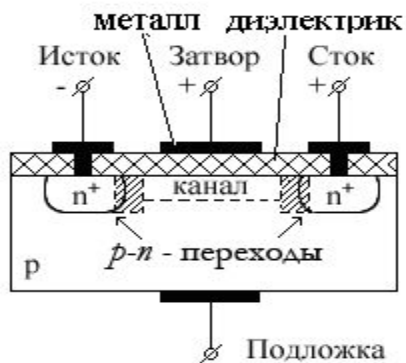
Если  $U_{зи} = 0$ , напряжение на затворе отсутствует, то сопротивление между истоком и стоком, определяемое двумя включенными встречно р-п переходами в местах контакта р-подложки и n+-областей, очень велико, ток стока равен нулю.

При  $U_{зи} > 0$ , в подложке полупроводника возникает электрическое поле, которое вытягивает из р-подложки электроны, увеличивая их концентрацию в тонком приповерхностном слое и изменяет тип его проводимости на противоположный. Этот тонкий слой полупроводника с инверсной проводимостью (n – типа) называется индуцированным или наведенным слоем. Он образует проводящий канал, соединяющий n+ – области истока и стока. При увеличении положительного напряжения затвора толщина n – слоя и его проводимость возрастают, ток в цепи стока увеличивается, а ВАХ смещается вверх.

Напряжение затвора, при котором в приборе формируется канал, называется пороговым напряжением  $U_{зи\ пор}$  или напряжением отсечки.

Выходные характеристики МДП транзистора с индуцированным каналом (рис. 1.5) имеют такой же вид, как и характеристики полевого транзистора с р-п -переходом, а его входная ВАХ на рис. 1.6.

Полевые транзисторы с индуцированным каналом получили более широкое распространение, чем транзисторы со встроенным каналом. В первую очередь это связано с тем, что управляющее напряжение и напряжение питания одной полярности (одного знака).



## 4.3.2. МДП- транзистор со встроенным каналом

Структура МДП транзистора со встроенным n-каналом приведена на рис. В таких МДП транзисторах канал соединяющий области стока и истока создается на этапе изготовления.

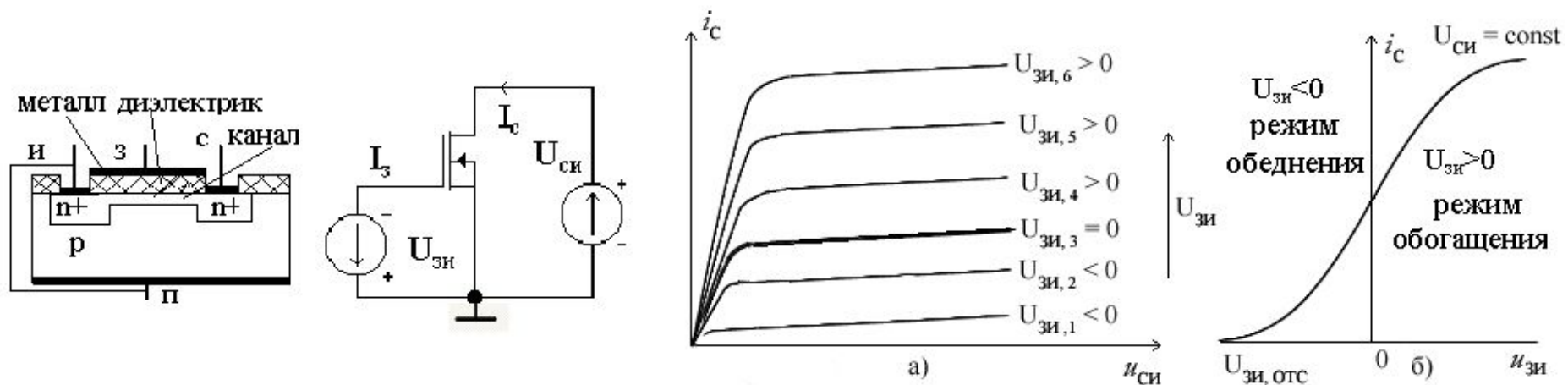
Если  $U_{зи}=0$ , то при подаче на сток положительного напряжения в цепи сток-исток будет протекать ток стока  $I_c$  определяемый проводимостью канала, причем ВАХ будет аналогична выходной ВАХ полевого транзистора с управляющим p-n переходом.

Если  $U_{зи}<0$  -**режимом обеднения**, электрическое поле, создаваемое этим напряжением, вытесняет электроны канала в глубь подложки, увеличивая его сопротивление, ток стока при этом уменьшается, а ВАХ смещается вниз.

Если  $U_{зи}>0$ -**режимом обогащения**, электрическое поле, создаваемое этим напряжением, вытягивает электроны из подложки в канал, обогащая его носителями, и уменьшая его сопротивление, ток стока при этом увеличивается, а ВАХ смещается вверх.

Выходные характеристики  $I_c=f(U_{си})$  при  $U_{зи}=\text{const}$  и характеристики прямой передачи  $I_c=f(U_{зи})$  при  $U_{си}=\text{const}$  для МДП – транзистора со встроенным каналом показаны на рис.. соответственно.

Следует также помнить, что полевые транзисторы очень "боятся" статического электричества, поэтому при работе с ними предъявляют особо жесткие требования по защите от статического электричества.



## 4.3. ВАХ полевого транзистора (математическая модель)

**Транзистор с управляющим п-р-переходом.** Поведение выходных характеристик в начальной области можно описать выражением: (1.2)

$$I_c = \frac{I_{c \text{ нас}}}{U_{зи \text{ отс}}^2} \left[ 2(U_{зи} - U_{зи \text{ отс}})U_{си} - U_{си}^2 \right]$$

Здесь  $I_{c \text{ нас}}$  – начальный ток стока при  $U_{зи}=0$ ;  $U_{зи \text{ отс}}$  – напряжение отсечки;  $U_{зи}$  – текущее напряжение на затворе, которое является параметром для данного семейства;  $U_{си}$  – текущее напряжение на стоке. В области насыщения выходные характеристики описываются приближенным выражением: (1.3)

$$I_c = I_{сина} \left( 1 - \frac{U_{зи}}{U_{зи \text{ отс}}} \right)^2$$

**Транзистор с изолированным затвором.** Для транзистора с индуцированным каналом зависимость тока стока от напряжения на начальном участке выходных ВАХ может быть описана как (1.4)

$$I_c = S_{y\partial} \left[ (|U_{зи}| - |U_{зипор}|) |U_{си}| - \frac{1}{2} U_{си}^2 \right]$$

где  $S_{y\partial}$  – удельная крутизна, зависящая от конструкции транзистора, материала и размеров проводящего канала:

$$S_{y\partial} = \frac{\partial^2 I_c}{\partial U_{зи} \partial U_{си}} A / B^2$$

Подставив  $U_{си \text{ нас}}$  в (1.4.), получим (1.5)

$$|U_{синас}| = |U_{зи}| - |U_{зипор}|$$

выражение для тока в области насыщения:

Продифференцировав (1.4.) по переменной  $U_{си}$  и приравняв производную нулю, получим (1.6)

$$I_c = \frac{S_{y\partial}}{2} (|U_{зи}| - |U_{зипор}|)^2$$

Характеристики транзистора со встроенным каналом аналитически с достаточной точностью описываются выражениями (1.2) и (1.3), если в этих формулах под напряжением отсечки  $U_{зи \text{ отс}}$  понимать напряжение, при котором встроенный канал перекрывается.

## 4.5. Формальная схема замещения полевого транзистора и ее дифференциальные параметры

Полевой транзистор, как и биполярный, можно представить в виде активного четырехполюсника и при работе с сигналами малых амплитуд характеризовать формальной схемой замещения и ее дифференциальными параметрами.

На практике в качестве дифференциальных параметров используют  $y$ -параметры. Они в общем случае это комплексные функции частоты, а в частности на низкой частоте, это вещественные величины.

К ним относятся:

1) крутизна стокзатворной ВАХ полевого транзистора  $Y_{21} = S = \frac{dI_c}{dU_{3u}} \Big|_{U_{cu}} = const$  (1.7)

2) входная проводимость полевого транзистора,  $Y_{11} = \frac{dI_1}{dU_1} \Big|_{U_{cu}} = const$  на низких частотах близка к нулю;

3) выходная проводимость (1.8)  $Y_{22} = \frac{dI_2}{dU_2} \Big|_{U_{3u}} = const$

Часто при расчетах схем на полевых транзисторах используют выходное сопротивление  **$R_i = 1/Y_{22}$** , Кроме того, полевой транзистор можно характеризовать статическим коэффициентом усиления

$$\mu = SR_i = -\frac{dU_{cu}}{dU_{3u}} \Big|_{I_c} = const \quad (1.9)$$

Здесь знак минус означает, что для сохранения неизменной величины тока стока при определении знаки приращений напряжений  $U_{cu}$  и  $U_{3u}$  должны быть разными.

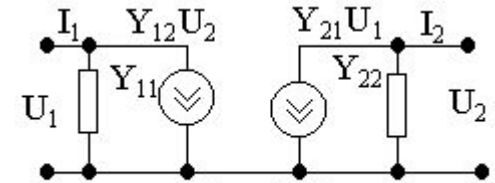


Рис.1.13

# 4.6. Физическая эквивалентная схема полевого транзистора

Для описания частотных свойств полевого транзистора в широком диапазоне частот применяется физическая эквивалентная схема (рис. 1.10). Усилительные свойства транзистора, имеющего крутизну  $S$ , отражаются идеальным генератором тока  $SU_{зи}$ .  $R_i = 1/Y_{22}$  – выходное сопротивление полевого транзистора.  $r_c$ ,  $r_k$ ,  $r_i$  – это объемные сопротивления области стока, канала и истока. В эквивалентной схеме учтены также емкости. В транзисторе с управляющим p-n-переходом емкость  $C_{си}$  в основном определяется емкостью между электродами стока и истока, а в МДП- транзисторе емкость  $C_{си}$  определяется еще и емкостью p-n- перехода между подложкой и областями истока и стока. Поэтому в МДП- транзисторах емкость  $C_{си}$  существенно выше, чем в транзисторах с p-n- переходом. Поскольку полевой транзистор работает с обратным смещенным p-n- переходом, то емкости  $C_{зи}$  и  $C_{зс}$  являются барьерными. Для МДП- транзистора – это емкости затвора относительно областей истока и стока. Ориентировочно, для маломощных транзисторов различного типа  $C_{зи}=2-15$  пФ,  $C_{зс}=0,3-10$  пФ; для МДП – транзисторов  $C_{си}=315$  пФ; для транзисторов с управляющим p-n – переходом емкость  $C_{си}$ , как правило, не превышает 1 пФ. Рассмотренная схема справедлива до частоты, равной примерно  $0,7f_T$ . Частота  $f_T$  на которой коэффициент усиления по мощности в режиме согласования по входу и выходу равен единице, называется предельной частотой генерации транзистора. Предельная частота генерации полевого транзистора определяется как:

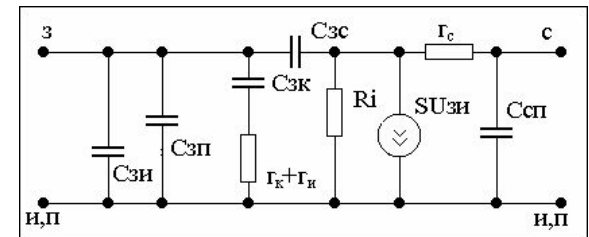
$$f_T = \frac{S}{2\pi C_{зс} (1 + S r_i)}$$

здесь  $r_i$  – сопротивление неуправляемого участка канала вблизи области истока, зависящее от тока насыщения  $i$ , как правило, не превышающее нескольких десятков ом. Используя схему рис. 5.10, можно найти  $y$  - параметры полевого транзистора:

$$\begin{aligned} \dot{y}_{11} &= j\omega(C_{зс} + C_{зи}); & \dot{y}_{12} &= -j\omega C_{зс}; \\ \dot{y}_{21} &= S - j\omega C_{зс}; & \dot{y}_{22} &= 1/R_i + j\omega(C_{зс} + C_{си}); \end{aligned}$$

Знак минус в формуле для  $\dot{y}_{12}$  означает, что ток во входной цепи, вызванный напряжением  $U_{си}$ , вследствие обратной связи в транзисторе, имеет направление, противоположное тому, которое принято положительным для тока затвора. Из (5.10) следует, что с ростом рабочей частоты транзистора величины всех проводимостей растут. Поскольку емкость  $C_{зс}$  невелика, ее влиянием даже на достаточно высоких частотах можно пренебречь и считать, что

$$\dot{y}_{21} = S$$



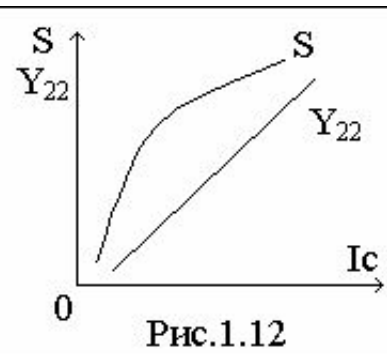
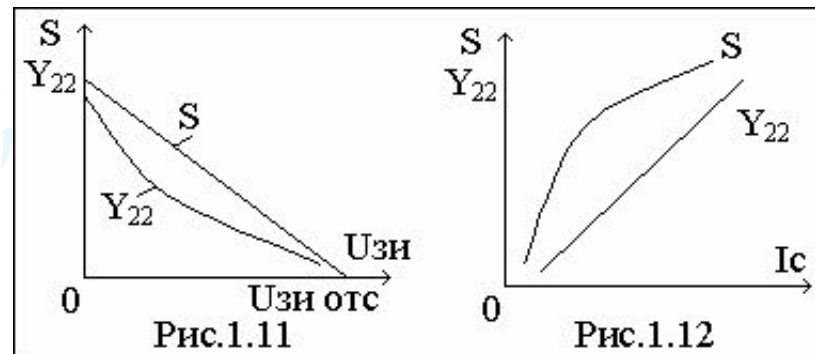
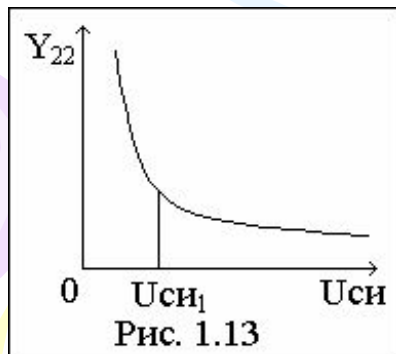
## 4.7. Зависимость параметров полевого транзистора от режима работы и температуры

Низкочастотные значения крутизны и выходной проводимости полевого транзистора существенно зависят от режима работы.

Вследствие того что характеристика прямой передачи имеет четко выраженный квадратичный характер (5.3), крутизна является линейной функцией напряжения на затворе (рис. 1.11) и растет с увеличением тока стока (рис. 1.12). Выходная проводимость, аналитическое выражение которой может быть получено дифференцированием (1.2) по переменной  $U_{си}$ , уменьшается с ростом обратного напряжения на затворе (см. рис. 1.11) и существенно зависит от напряжения на стоке. Из этой зависимости, представленной на рис. 1.13, оси по результатам дифференцирования (5.2) для транзистора с  $n-p$ -переходом, следует, что при напряжениях на стоке, меньших некоторого напряжения  $U_{си1}$ , выходная проводимость резко увеличивается.

Характеристики и параметры полевых транзисторов подвержены влиянию температуры окружающей среды. Изменения температуры приводят к изменению контактной разности потенциалов  $n-p$ -перехода  $\Delta\varphi_0$  и подвижности носителей заряда, что вызывает температурную нестабильность тока стока  $I_c$ , напряжения отсечки  $U_{зи\text{отс}}$ , порогового напряжения, крутизны транзистора и обратного тока затвора. С повышением температуры уменьшаются  $\Delta\varphi_0$ , глубина проникновения  $n-p$ -переходов в пластину  $p$ -полупроводника (см. рис. 1.1) и сопротивление канала, что должно привести к увеличению тока стока. С другой стороны, с увеличением температуры уменьшается подвижность носителей (дырок в рассматриваемом случае), что приводит к уменьшению тока стока.

Результирующее изменение тока стока может быть как положительным, так и отрицательным. В итоге появляются условия, при которых ток стока не будет изменяться с изменением температуры.





На рис. 1.14,а показано семейство характеристик прямой передачи полево-го транзистора при различных температурах, имеющее веерообразный характер: ток стока с увеличением температуры уменьшается, и температурный коэффициент тока стока  $\Delta I_c / \Delta T$  оказывается отрицательным.

Для зависимости  $I_c=f(U_{зи})$ , показанной на рис. 1.14,б, температурный коэффициент тока стока отрицателен, если  $U_{зи} < U_{0зи}$ , и положителен, если  $U_{зи} > U_{0зи}$ . Величина тока стока при напряжении  $U_{0зи}$ , практически не зависит от температуры окружающей среды. Точка на характеристике прямой передачи, соответствующая  $U_{0зи}$ , называется термостабильной точкой, ток в ней — термостабильным током. Режим термостабильного тока может использоваться в усилителях, но следует иметь в виду, что крутизна в этой точке мала и зависит от температуры. Из этого не следует делать вывод о возможности получения абсолютной температурной стабильности выходного тока транзистора, так как ток затвора, являющийся током обратносмещенного в  $n-p$  перехода, принципиально зависит от температуры, что приводит к нестабильности смещения на затворе и, следовательно, к нестабильности тока стока.

Напряжение теплового сдвига характеристик (см. рис. 5.14,а) может быть вычислено по формуле (1.11)

$$\Delta U_T = 3/4(U_{зи1} - U_{зиотс}) \frac{\Delta T}{T}$$

Здесь  $U_{зиотс}$  — напряжение отсечки;  $U_{зи1}$  — смещение на затворе в данной рабочей точке;  $\Delta T$  — изменение температуры  $T$  относительно комнатной температуры  $T_0$ .

Изменение тока затвора вычисляется как: (1.12)  $\Delta I_3 = I_{30} (2^{a(T-T_0)} - 1)$

Здесь  $I_{30}$  — ток затвора при комнатной температуре, который в кремниевых полевых транзисторах не превышает  $2 \cdot 10^{-8}$  А;  $a = 0,13$  К<sup>-1</sup>.

0,13 К<sup>-1</sup>.

Для нормальной работы транзистора необходимо включение во входной цепи транзистора резистора утечки, обеспечивающего цепь для протекания тока затвора. Чтобы изменение тока затвора не меняло заметно напряжение на затворе, максимальная величина сопротивления резистора утечки не должна превышать некоторой величины, которая оговаривается в справочных данных транзистора.

Крутизна в рабочей точке при температуре  $T_2$  определяется по формуле: (1.13)

$$S(T_2) = S(T_1) \frac{T_1}{T_2}$$

где  $S(T_1)$  — крутизна в рабочей точке при температуре  $T_1$ , полученная дифференцированием (5.3) с учетом зависимости параметров, входящих в (5.3), от температуры и формулы (5.7)

Подобно биполярным транзисторам, полевые транзисторы используют в трех основных схемах включения: с общим истоком (ОИ), общим стоком (ОС) и общим затвором (ОЗ). Усилительный каскад по схеме ОИ аналогичен схеме ОЭ. Он дает большое усиление тока и мощности и инвертирует фазу входного напряжения. Коэффициент усиления каскада по напряжению приблизительно равен  $K_u = SRH$ .

Схема ОС подобна эмиттерному повторителю и называется истоковым повторителем. Коэффициент усиления каскада по напряжению близок к единице. Усилитель по схеме ОС имеет сравнительно небольшое выходное сопротивление и большое входное сопротивление. Кроме того, здесь значительно уменьшена входная емкость, что способствует увеличению входного сопротивления на высоких частотах.

Схема ОЗ аналогична схеме ОБ. Схема не усиливает тока, поэтому коэффициент усиления по мощности во много раз меньше, чем в схеме ОИ. Эта схема имеет малое входное сопротивление, так как входным током является ток стока. Фаза напряжения при усилении не инвертируется.

#### Маркировка транзисторов

КТЗ15А, ГТ701А, КП303Е

1 2 3 4 5 6

Аналогично диодам.

1 – характеризует материал. Г,1 –Ge; К,2 –Si;

2 – функциональное назначение.

Т – транзистор(биполярный);

П – полевой;

3 – цифра связанная с мощностью рассеивания и его частотными свойствами.

4,5 – Порядковый номер разработки(Ни с чем не связан).

6 – Буква характеризующая деление по параметрическим группам.

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>P&lt;150 мВт</b>
<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>P&lt;1,5 Вт</b>
<b>7</b> Низкочастотные транзисторы	<b>8</b> Среднечастотные транзисторы	<b>9</b> Высокочастотные транзисторы	<b>P&gt;1,5 Вт</b>

# Биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ)

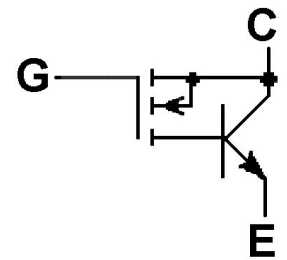
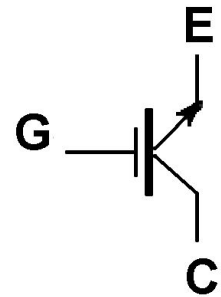
Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistors) - полностью управляемый полупроводниковый прибор, который включает в себя два транзистора в одной полупроводниковой структуре: биполярный (образующий силовой канал) и полевой (образующий канал управления).

Сочетание двух приборов в одной структуре позволило объединить достоинства полевых и биполярных транзисторов: высокое входное сопротивление с высокой токовой нагрузкой и малым сопротивлением во включённом состоянии.

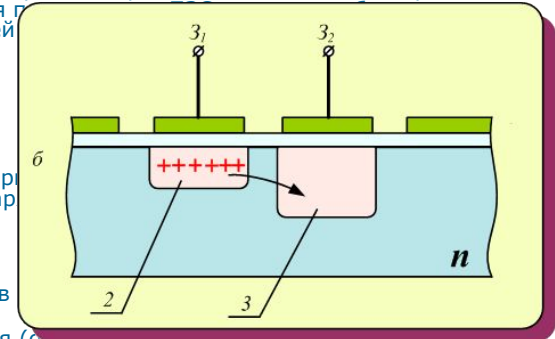
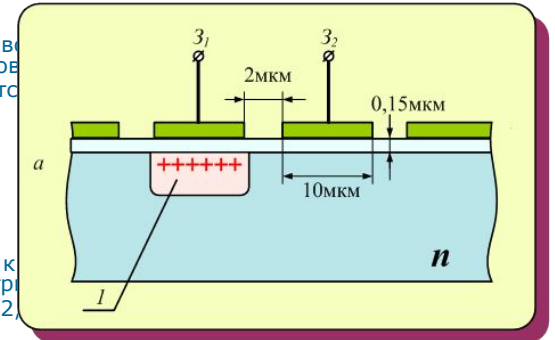
В настоящее время коммутируемое IGBT напряжение достигает 4500 В, токи до 1800 А в модульном исполнении; прямое падение напряжения 1,0-1,5 В, частота коммутации до 50 кГц (времена около 200 нс).

По быстродействию IGBT уступают MOSFET, но значительно превосходят биполярные. Типичные значения времени рассасывания накопленного заряда и спада тока при выключении IGBT находятся в диапазонах 0,2-0,4 и 0,2-1,5 мкс, соответственно.

IGBT имеет три внешних вывода: эмиттер, коллектор, затвор. Соединения эмиттера и стока (D), базы и истока (S) являются внутренними.



- Одним из новых классов приборов со структурой МДП являются приборы с зарядовой связью (ПЗС).
- Принцип действия ПЗС основан на хранении заряда неосновных носителей тока в потенциальных ямах, в полупроводника под действием внешнего электрического поля, и на перемещении этого заряда вдоль поверхности.
- Функциональные возможности ПЗС определили области их практического применения, которыми являются:
  - аналоговые устройства (линии задержки сигналов, устройства фазовой коррекции, фильтры и т.д.);
  - цифровые устройства (сдвиговые регистры, логические схемы динамического типа и др.);
  - оптоэлектронные устройства, используемые для формирования сигналов изображения.
- Структура ПЗС представляет собой (рис.6.23) кремниевую подложку с проводимостью  $n$ -типа, на которой сформирован слой окисла  $\text{SiO}_2$ .
- На окисном слое формируются металлические электроды (затворы).
- Структура ПЗС очень проста, так как, по существу, состоит из трех слоев. Однако следует отметить, что к гораздо более жесткие требования в отношении совершенства границы раздела полупроводник-диэлектрик.
- Если для МДП-транзисторов достаточно обеспечить плотность поверхностных состояний  $N_{\text{ПС}} = 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , должно быть меньше на один два порядка.



Для ПЗС характерны два режима работы: режим хранения и режим передачи информационного заряда. В режиме хранения на один из затворов ПЗС ( $3_1$ ) подается отрицательное напряжение (напряжение хранения  $U_{\text{ХП}}$ ). Под действием этого напряжения в области под затвором образуются потенциальные ямы для неосновных носителей заряда, которая является потенциальной ямой для неосновных носителей заряда.

Рис.6.23. Структура ПЗС в режиме хранения (а) и передачи (б) информационного заряда:

- 1- информационный заряд;
- 2- потенциальная яма;
- 3- более глубокая потенциальная яма

- Если имеется источник неосновных носителей заряда, то потенциальная яма заполняется дырками, которые локализируются в узком приповерхностном слое. Это соответствует режиму хранения информационного заряда «памятью».
- Источниками неосновных носителей заряда могут быть инжектирующие  $p$ - $n$ -переходы, световой поток, вызывающий генерацию электронно-дырочных пар, и др.
- Информационный заряд не может храниться в ПЗС в течение длительного времени вследствие процессов накопления паразитного заряда дырок в потенциальной яме.
- В цифровых устройствах на ПЗС накапливаемый паразитный заряд искажает состояние логического нуля (ответствие информационного заряда), а в аналоговых приводит к искажению аналоговой информации.
- Таким образом, ПЗС могут работать лишь в динамическом режиме.
- Максимальная длительность хранения информации в ПЗС может изменяться в интервале от сотен миллисекунд до десятков секунд в зависимости от качества обработки поверхности и свойств исходного материала. Такая длительность хранения информации вполне достаточна для большинства областей применения ПЗС, однако их нельзя использовать для долговременных запоминающих устройств.
- Вторым характерным режимом для ПЗС является передача информационного заряда. Для передачи заряда на соседний затвор ( $3_2$ ) поступает импульс записи  $U_{\text{ЗАП}}$ . Напряжение записи является более отрицательным по сравнению с напряжением хранения, подаваемым на первый затвор. Поэтому под соседним затвором создается более глубокая потенциальная яма, к которой будут притягиваться дырки, хранившиеся под затвором  $3_1$ . Первоначальные условия хранения восстанавливаются при снятии напряжения хранения с затвора  $3_1$  и уменьшения напряжения записи на затворе  $3_2$  до значения напряжения хранения. Как только установится режим хранения под затвором  $3_2$ , процесс передачи заряда может быть повторен по отношению к другому соседнему затвору.
- Таким образом происходит передача заряда вдоль поверхности полупроводника от затвора к затвору.
- При разработке устройств на ПЗС необходимо учитывать частичную потерю заряда при его переходе от одного затвора к другому.
- Вследствие этого информационный заряд будет постепенно уменьшаться.
- Наиболее значительными при работе ПЗС являются потери заряда из-за наличия поверхностных состояний на границе раздела полупроводник-диэлектрик, которые являются центрами захвата носителей.
- Для уменьшения нежелательного воздействия поверхностных состояний на перенос заряда производят смещение всех электродов ПЗС-структуры на одинаковую величину в область обеднения.
- Потери заряда также существенны, если металлические электроды ПЗС разделены широкими зазорами.
- В этом случае вблизи зазоров возможно образование потенциальных барьеров для неосновных носителей заряда.
- Поэтому в процессе передачи часть носителей заряда с энергией, соответствующей высоте потенциального барьера, может остаться в области своей первоначальной локализации и рекомбинировать в ее окрестности после снятия импульса напряжения хранения с соответствующего затвора.
- Необходимо отметить, что получение малых межэлектродных промежутков (менее 1 мкм) в ПЗС с однослойной металлизацией сопряжено со значительными трудностями прецизионной фотолитографии. Как уже указывалось, ПЗС используются для построения запоминающих и других устройств вычислительной техники. На ПЗС можно сравнительно просто реализовать сдвиговые регистры.
- На рис.7.24 показана схема работы трехтактного сдвигового регистра на ПЗС.
- Каждый электрод ПЗС соединен с одной из трех шин, на которые от внешнего генератора подаются тактовые импульсы.

– накопление заряда под действием светового импульса.

Устройство вывода (считывания) информации предназначено для регистрации информационного заряда на выходе ПЗС и преобразования его в форму, удобную для дальнейшего использования. Как правило, в качестве устройства вывода информации используется обратносмещенный  $p-n$ -переход, формируемый в непосредственной близости от последней МДП-структуры.

Таким образом, при разработке ПЗС необходимо учитывать следующие физические ограничения:

- предельную величину накопленного информационного заряда, превышение которой ведет к исчезновению потенциальной ямы;
- минимально допустимую рабочую частоту переноса зарядов, ниже которой информация искажается из-за тепловой генерации носителей;
- минимально допустимое геометрическое расстояние между соседними МДП-структурами, определяемое появлением туннельного эффекта (если две соседние структуры слишком близки) или возникновением электрического пробоя (если слой диэлектрика под затвором оказывается слишком

тонким).

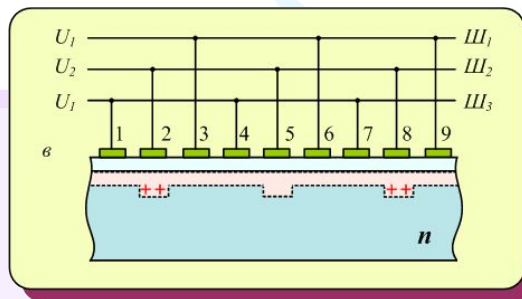
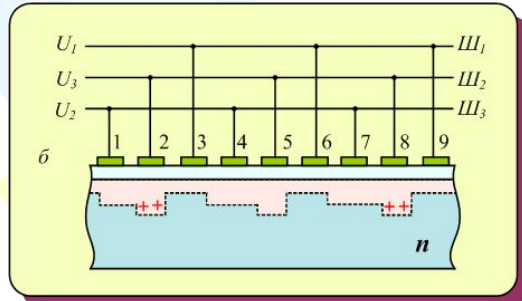
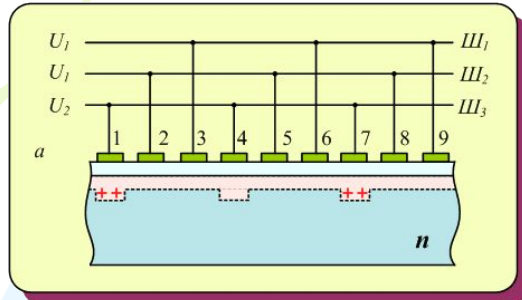


Рис. 6.24. Схема работы трехтактного сдвигового регистра на ПЗС

Пусть в некотором начальном состоянии (рис.6.24,**а**) напряжение хранения  $U_2$  приложено к электродам **1,4,7** и т.д., а меньшее по абсолютной величине напряжение хранения  $U_1$  – ко всем остальным электродам. Необходимо отметить, что напряжения  $U_1$ ,  $U_2$  и  $U_3$ , прикладываемые к шинам, должны превосходить величину напряжения, при котором образуется обедненный слой. Подложка находится под нулевым потенциалом.

Допустим, что под электродами **1** и **7** локализован положительный информационный заряд, а под электродом **4** заряд отсутствует. Для продвижения информации в следующий момент времени (следующий такт) на шину  $Ш_2$  подается напряжение  $U_3$  (рис.6.24,**б**), причем  $|U_3| > |U_2|$ . Напряжения записи прикладывается к электродам **2, 5, 8** и т.д. Поскольку под этими электродами образуются более глубокие потенциальные ямы, то заряды из-под электродов **1** и **7** и состояние отсутствия заряда под электродом **4** передвинутся на шаг вправо. При следующем такте (рис.6.24,**в**) к шине  $Ш_2$  прикладывается напряжение хранения, а к шинам  $Ш_1$  и  $Ш_3$  – напряжение  $U_1$ . Информация в таком случае хранится под электродами **2, 5** и **8**. Аналогично может осуществляться и дальнейшее продвижение информации.

ПЗС должны иметь устройства ввода и вывода информации. Под устройством ввода (записи) информации подразумевается система, позволяющая заполнять неосновными носителями потенциальную яму под первым затвором ПЗС. Информационный заряд на входе ПЗС можно создать инъекцией неосновных носителей из  $p-n$ -перехода. Для этого на входе ПЗС создается диффузионная область, частично перекрываемая металлическим электродом первой МДП-структуры.

Кроме этого основного способа записи информации, возможны следующие:

- накопление информационных зарядов в потенциальных ямах ПЗС за счет процессов термогенерации;
- накопление заряда под действием светового импульса.

Устройство вывода (считывания) информации предназначено для регистрации информационного заряда на выходе ПЗС и преобразования его в форму, удобную для дальнейшего использования. Как правило, в качестве устройства вывода информации используется обратносмещенный  $p-n$ -переход, формируемый в непосредственной близости от последней МДП-структуры.

Таким образом, при разработке ПЗС необходимо учитывать следующие физические ограничения:

- предельную величину накопленного информационного заряда, превышение которой ведет к исчезновению потенциальной ямы;
- минимально допустимую рабочую частоту переноса зарядов, ниже которой информация искажается из-за тепловой генерации носителей;
- минимально допустимое геометрическое расстояние между соседними МДП-структурами, определяемое появлением туннельного эффекта (если две соседние структуры слишком близки) или возникновением

электрического пробоя (если слой диэлектрика под затвором оказывается слишком тонким).

