

Лекция 10.

Униполярные (полевые) транзисторы

К классу униполярных относят 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. Вследствие этого униполярные транзисторы называют также полевыми.

По способу создания канала различают полевые транзисторы с p - n -переходом, встроенным каналом и индуцированным каналом. Последние два типа относят к разновидностям МДП-транзисторов.

Повышенный интерес к этим приборам обусловлен их высокой технологичностью, хорошей воспроизводимостью требуемых параметров, а также меньшей стоимостью по сравнению с биполярными транзисторами. Из электрических параметров полевые транзисторы отличает их высокое входное сопротивление.

Транзисторы с управляемым p - n -переходом

Анализ работы полевого транзистора с p - n -переходом проведем на его модели, показанной на рис. 5.1, *а*. В приведенной конструкции 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 (в данном случае электроны), называют истоком, а электрод, к которому они движутся, — стоком. 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, называемый затвором. Подобную конструкцию имеют и полевые транзисторы с каналом p -типа.

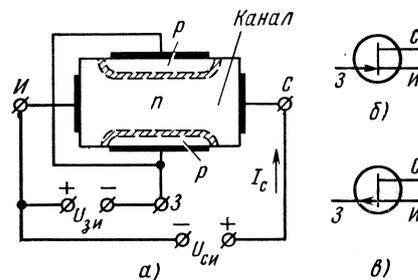


Рис. 5.1. Конструкция полевого транзистора с p - n -переходом (*а*); условные обозначения полевого транзистора с p - n -переходом и каналом n -типа (*б*); с p - n -переходом и каналом p -типа (*в*)

Полярность внешних напряжений, подводимых к транзистору, показана на рис. 5.1, а. 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.

Управляющие свойства транзистора объясняются тем, что при изменении напряжения $U_{зи}$ изменяется ширина его p - n -переходов, представляющих собой участки полупроводника, обедненные носителями заряда. Поскольку p -слой имеет большую концентрацию примеси, чем n -слой, изменение ширины p - n -переходов происходит в основном за счет более высокоомного n -слоя (эффект модуляции ширины базы). Тем самым изменяются сечение токопроводящего канала и его проводимость, т.е. выходной ток I_c прибора.

Особенностью полевого транзистора является то, что на проводимость канала оказывает влияние как управляющее напряжение $U_{зи}$, так и напряжение $U_{си}$. Влияние подводимых напряжений на проводимость канала иллюстрирует рис. 5.2, а—в, где для простоты не показаны участки n -слоя, расположенные вне p - n -переходов.

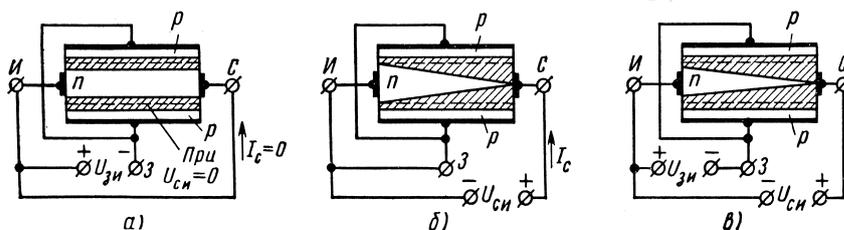


Рис. 5.2. Поведение полевого транзистора с p - n -переходом и каналом n -типа при подключении внешних напряжений: а) $U_{зи} < 0$, $U_{си} = 0$; б) $U_{зи} = 0$, $U_{си} > 0$; в) $U_{зи} < 0$, $U_{си} > 0$

На рис. 5.2, а внешнее напряжение приложено только к входной цепи транзистора. Изменение напряжения $U_{зи}$ приводит к изменению проводимости канала за счет изменения на одинаковую величину его сечения по всей длине канала. Но выходной ток $I_c = 0$, поскольку $U_{си} = 0$.

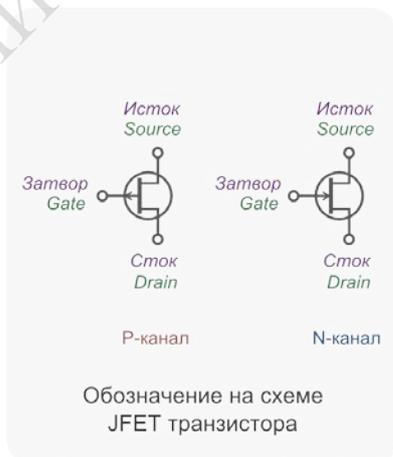
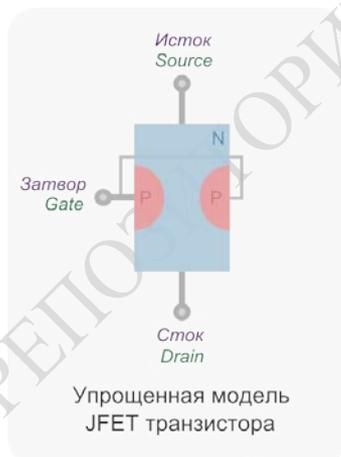
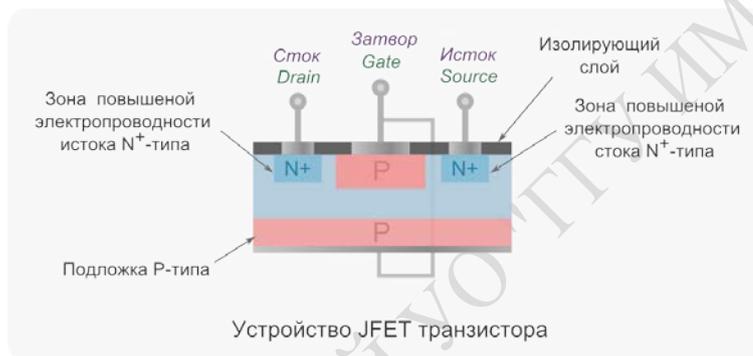
Рис. иллюстрирует изменение сечения канала при воздействии только напряжения $U_{си}$ ($U_{зи} = 0$). При $U_{си} > 0$ через канал протекает ток I_c , в результате чего создается падение напряжения, возрастающее в направлении стока. Суммарное падение напряжения участка исток — сток равно $U_{си}$. В силу этого потенциалы точек канала n -типа будут неодинаковыми по его длине, возрастая в направлении стока от нуля до $U_{си}$. Потенциал же точек p -области относительно истока определяется потенциалом затвора относительно истока и в данном случае равен нулю. В связи с указанным обратное напряжение, приложенное к p - n -переходам, возрастает в направлении от истока к стоку и p - n -переходы расширяются в направлении стока. Данное явление приводит к уменьшению сечения канала от истока к стоку (рис. 5.2, б). Повышение напряжения $U_{си}$ вызывает увеличение падения напряжения в канале и

уменьшение его сечений, а следовательно, уменьшение проводимости канала. При некотором напряжении $U_{си}$ происходит сужение канала, при котором границы обоих p - n -переходов смыкаются (рис. 5.2, б) и сопротивление канала становится высоким. На рис. 5.2, в отражено результирующее влияние на канал обоих напряжений $U_{зи}$ и $U_{си}$. Канал показан для случая смыкания p - n -переходов.

Устройство полевого транзистора JFET с N-каналом

Как показано на рисунке ниже, область полупроводника N-типа формирует канал между зонами P-типа. Электроды, подключаемые к концам N-канала, называются *сток* и *исток*. Полупроводники P-типа электрически соединяются между собой (закорачиваются), и представляют собой один электрод – *затвор*.

Вблизи стока и истока находятся области повышенного легирования N+. Т. е. зоны с повышенной концентрацией электронов. Это улучшает проводимость канала. Кроме этого, наличие областей N+ ослабляет эффект появления паразитических PN-переходов в случае присоединения проводников из трехвалентного алюминия.



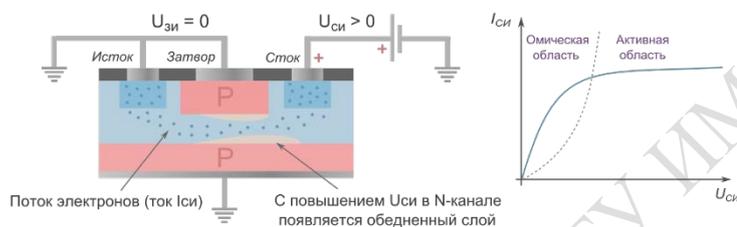
Имена электродов сток и исток носят условный характер. Если взять отдельный полевой транзистор, не подключенный к какой-либо схеме, то не будет иметь значения какая ножка корпуса сток, а какая исток. Имя электрода будет зависеть от его расположения в электрической цепи.

Работа полевого транзистора JFET с N-каналом

1. Напряжение на затворе $U_{зи} = 0$

Подключим источник положительного напряжения к стоку, землю к истоку. Затвор также подсоединим к земле ($U_{зи} = 0$). Начнем постепенно повышать напряжение на стоке $U_{си}$. Пока $U_{си}$ низкое, ширина канала максимальна. В таком состоянии полевой транзистор ведет себя как обычный проводник. Чем больше напряжение между стоком и истоком $U_{си}$, тем больше ток через канал между стоком и истоком $I_{си}$. Это состояние еще называют *омическая область*.

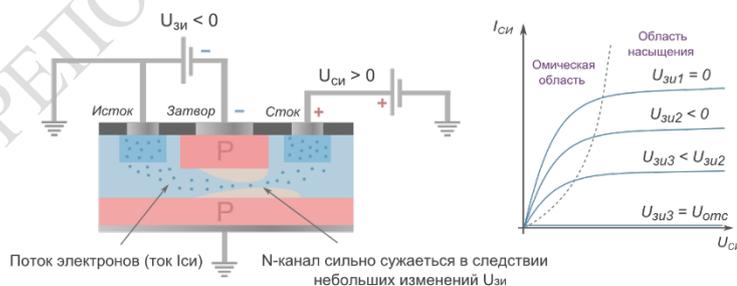
При повышении $U_{си}$, в полупроводнике N-типа в зонах PN-перехода постепенно снижается количество свободных электронов – появляется обедненный слой. Этот слой растет несимметрично – больше со стороны стока, поскольку туда подключен источник напряжения. В результате канал сужается настолько, что при дальнейшем повышении $U_{си}$, $I_{си}$ будет расти очень незначительно. Это состояние называют *режим насыщения*.



Работа полевого транзистора JFET при $U_{зи} = 0$

2. Напряжение на затворе $U_{зи} < 0$

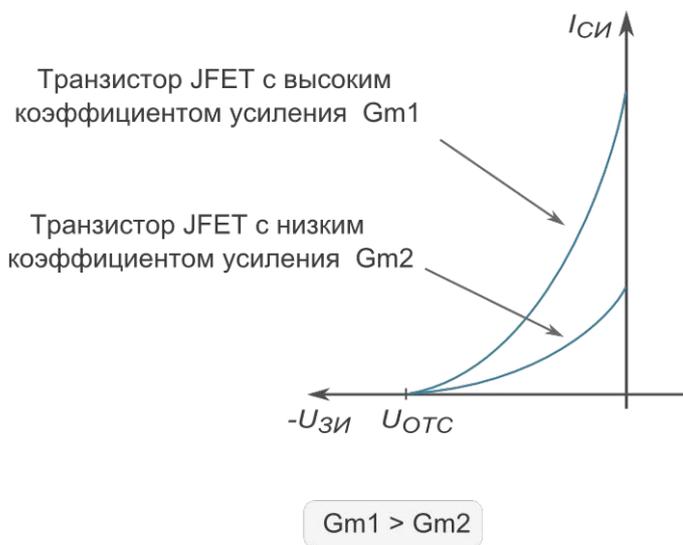
Когда транзистор находится в режиме насыщения, канал относительно узкий. Достаточно подать небольшое отрицательное напряжение на затвор $U_{зи}$, для того чтобы еще сильнее сузить канал и значительно уменьшить ток $I_{си}$ (для транзистора с P-каналом на затвор подается положительное напряжение). Если продолжить понижать $U_{зи}$, канал будет сужаться, пока полностью не закроется, и ток $I_{си}$ не прекратится. Значение $U_{зи}$, при котором ток $I_{си}$ останавливается, называется напряжением отсечки ($U_{отс}$).



Работа полевого транзистора JFET при $U_{зи} < 0$

Для усиления сигнала полевой транзистор JFET используют в режиме насыщения, так как в этом состоянии *вследствие небольших изменений $U_{зи}$ сильно меняется $I_{си}$* . Параметр усилительной способности JFET – это крутизна стоко-затворной

характеристики (Mutual Transconductance). Обозначается g_m или S , и измеряется в mA/V (милиАмпер/Вольт).



Зависимость тока от $I_{си}$ напряжения на затворе $U_{зи}$
(стокзатворная характеристика)

Преимущества и недостатки полевого транзистора JFET

Высокое входное сопротивление

Одно из важнейших свойств полевых транзисторов, как уже упоминалось выше, это очень высокое входное сопротивление $R_{вх}$ (R_{in}). Причем у полевых транзисторов с изолированным затвором MOSFET, R_{in} в среднем еще на несколько порядков выше, чем у JFET. Благодаря этому, полевые транзисторы практически не потребляют ток у источников сигнала, который надо усилить.

Например, цифровая схема микроконтроллера генерирует сигнал, управляющий работой электромотора. Такого рода схема обычно располагает очень малым током на выходе, что явно недостаточно для двигателя. Здесь потребуется усилитель, потребляющий крайне мало тока на входе, и выдающий на выходе сигнал такой же формы и частоты как на выходе у микроконтроллера, только уже с большим выходным током. Здесь как раз и подойдет усилитель, основанный на JFET транзисторе с высоким входным сопротивлением.

Низкий коэффициент усиления по напряжению

Значительным недостатком JFET по сравнению с биполярным транзистором является очень низкий коэффициент усиления по напряжению. Если построить усилитель на основе одного прибора JFET, можно добиться V_{out}/V_{in} в лучшем случае около 20. При аналогичном использовании биполярного транзистора с высокой β (коэффициент усиления биполярного транзистора – ток коллектора/ток базы) можно достигнуть V_{out}/V_{in} в несколько сотен.

Поэтому для качественных усилителей нередко используются совместно оба типа транзисторов. Например, благодаря очень высокому R_{in} полевого транзистора,

добиваются большого усиления сигнала по току. А уже потом, с помощью биполярного транзистора усиливают сигнал по напряжению.

Рассмотрим вольт-амперные характеристики полевых транзисторов с n - p -переходом. Для этих транзисторов представляют интерес два вида вольт-амперных характеристик: стоковые и стоко-затворные.

Стоковые (выходные) характеристики полевого транзистора с p - n -переходом и каналом n -типа показаны на рис. 5.3. Они отражают зависимость тока стока от напряжения сток — исток при фиксированном напряжении затвор — исток $I_c = F(U_{си})$ $U_{зи} = \text{const}$ и представляются в виде семейства кривых. На каждой из этих кривых можно выделить три характерные области: 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.

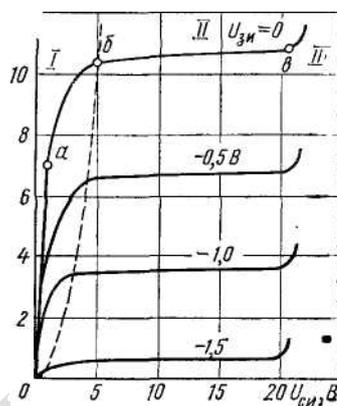


Рис. 5.3. Семейство стоковых (выходных) характеристик полевого транзистора с p - n -переходом и каналом n -типа

Рассмотрим выходную характеристику полевого транзистора при $U_{зи} = 0$ (см. рис. 5.3, б). В области малых напряжений $U_{си}$ (участок 0— a) влияние напряжения $U_{си}$ на проводимость канала незначительно, в связи с чем здесь имеется практически линейная зависимость $I_c = F(U_{си})$. По мере увеличения напряжения $U_{си}$ (участок a — b) сужение токопроводящего канала оказывает все более существенное влияние на его проводимость, что приводит к уменьшению крутизны нарастания тока. При подходе к границе с участком II (точка b) сечение токопроводящего канала уменьшается до минимума в результате смыкания обоих p - n -переходов. Дальнейшее повышение напряжения на стоке не должно приводить к увеличению тока через прибор, так как одновременно с ростом напряжения $U_{си}$ будет увеличиваться сопротивление канала. Некоторое увеличение тока I_c на экспериментальных кривых объясняется наличием различного рода утечек и влиянием сильного электрического поля в p - n -переходах, прилегающих к каналу.

Участок III резкого увеличения тока I_c характеризуется лавинным пробоем области p - n -переходов вблизи стока по цепи сток — затвор. Напряжение пробоя соответствует точке b .

Приложение к затвору обратного напряжения вызывает сужение канала (см. рис. 5.2, *a*) и уменьшение его исходной проводимости. Поэтому начальные участки кривых, соответствующих большим напряжениям на затворе, имеют меньшую крутизну нарастания тока (рис. 5.3). Ввиду, наличия напряжения $U_{зи}$ перекрытие канала объемным зарядом p - n -переходов (см. рис. 5.2, *в*) происходит при меньшем напряжении и границе участков I и II будут соответствовать меньшие напряжения сток — исток. Напряжениям перекрытия канала соответствуют абсциссы точек пересечения стоковых характеристик с пунктирной кривой, показанной на рис. 5.3. При меньших напряжениях наступает и режим пробоя транзистора по цепи сток — затвор.

Важным параметром полевого транзистора является напряжение на затворе, при котором ток стока близок к нулю. Оно соответствует напряжению запирающего прибора по цепи затвора и называется напряжением запирающего или отсечки $U_{зи}$. Числовое значение $U_{зи0}$ равно напряжению $U_{си}$ в точке b вольт-амперной характеристики при $U_{зи} = 0$.

Поскольку управление выходным током полевых транзисторов производится напряжением входной цепи, для них представляет интерес так называемая переходная или стоко-затворная вольт-амперная характеристика. Стоко-затворная характеристика полевого транзистора показывает зависимость тока стока от напряжения затвор — исток при фиксированном напряжении сток — исток: $I_c = F(U_{зи})U_{си} = \text{const}$ (рис. 5.4). Стоко-затворная характеристика связана с выходными характеристиками полевого транзистора и может быть построена по ним.

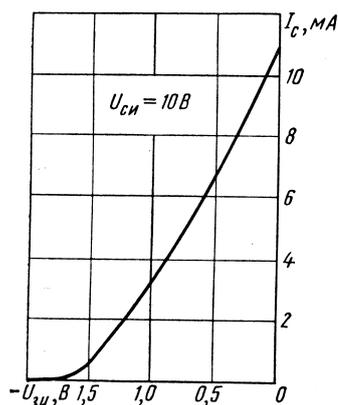


Рис. 5.4. Стоко-затворная характеристика полевого транзистора с p - n -переходом и каналом n -типа

Основными параметрами полевого транзистора являются: максимальный ток стока $I_{сmax}$, максимальное напряжение стока $U_{сmax}$, напряжение отсечки

$U_{\text{зио}}$, внутреннее сопротивление r_i , крутизна S , а также межэлектродные емкости затвор — исток $C_{\text{зи}}$, затвор — сток $C_{\text{зс}}$ и сток — исток $C_{\text{си}}$.

Максимальное значение тока стока $I_{\text{с макс}}$ соответствует его значению в точке ν на выходных характеристиках (при $U_{\text{зи}} = 0$). Максимальное значение напряжения сток — исток $U_{\text{симах}}$ выбирают в 1,2—1,5 раза меньше напряжения пробоя участка сток — затвор при $U_{\text{зи}} = 0$. Напряжению отсечки $U_{\text{зио}}$ соответствует напряжение на затворе при токе стока, близком к нулю.

Внутреннее сопротивление транзистора $r_i = \frac{dU_{\text{си}}}{dI_{\text{с}}}$, при $U_{\text{зи}} = \text{const}$ характеризует наклон выходной характеристики на участке II. Крутизна стоко-затворной характеристики $S = \frac{dI_{\text{с}}}{dU_{\text{зи}}}$, при $U_{\text{си}} = \text{const}$, отражает влияние напряжения затвора на выходной ток транзистора. Крутизну S находят по стоко-затворной характеристике прибора (рис. 5.4). Входное сопротивление $r_{\text{вх}} = dU_{\text{зи}} / dI_{\text{з}}$ транзистора определяется сопротивлением p - n -переходов, смещенных в обратном направлении. Входное сопротивление полевых транзисторов с p - n -переходом довольно велико, что выгодно отличает их от биполярных транзисторов. Межэлектродные емкости $C_{\text{зи}}$ и $C_{\text{зс}}$ связаны главным образом с наличием в приборе p - n -переходов (см. рис. 5.1), примыкающих соответственно к истоку и стоку.

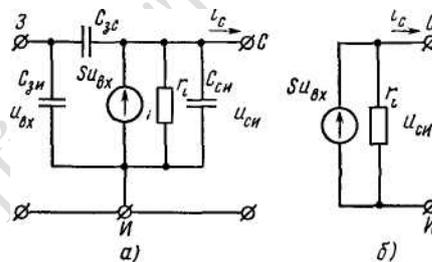


Рис. 5.5. Схема замещения полевого транзистора с p - n -переходом в области высоких (а) и низких (б) частот

Полевые транзисторы с p - n -переходом выпускаются на токи $I_{\text{с}}$ до 50 мА и напряжения до 50 В. Приведем типичные значения параметров этих транзисторов: $U_{\text{зио}} = 0,8 \div 10$ В, $r_i = 0,02 \div 0,5$ МОм, $S = 0,3 \div 7$ мА/В, $r_{\text{вх}} = 10^8$ — 10^9 Ом, $C_{\text{зи}} = C_{\text{си}} = 6 \div 20$ пФ, $C_{\text{зс}} = 2 \div 8$ пФ.

Влияние температуры на характеристики и параметры рассматриваемого класса транзисторов обуславливается температурными зависимостями контактной разности потенциалов ϕ_0 и подвижности носителей заряда (электронов или дырок).

Величина ϕ_0 фактически является одной из составляющих напряжения обратносмещенных p - n -переходов. Изменение ϕ_0 в зависимости от температуры приводит к изменению напряжения на переходах и их ширины,

а следовательно, к изменению сечения токопроводящего канала и его проводимости. С ростом температуры контактная разность потенциалов ϕ_0 уменьшается, что сказывается на увеличении сечения канала и повышении его проводимости. Вследствие уменьшения подвижности носителей заряда проводимость канала уменьшается с повышением температуры.

Влияние температуры на характеристики и параметры полевого транзистора оказывается достаточно сложным и по-разному проявляется в конкретных типах приборов этого класса. Температурные зависимости характеристик и параметров транзисторов приводятся в справочниках.

Схема замещения полевого транзистора с p - n -переходом показана на рис. 5.5, а Она характеризует работу транзистора на участке II выходных характеристик для переменных составляющих тока и напряжения. При ее построении были использованы следующие соображения. Ток прибора на участке II определяется напряжением на затворе (входе) и крутизной, в связи с чем в выходную цепь схемы замещения введен источник тока $Su_{вх}$. Параллельно источнику тока включено сопротивление r_i , учитывающее влияние напряжения стока на ток прибора. Величины $C_{зи}$, $C_{зс}$, $C_{си}$ отражают влияние межэлектродных емкостей на работу транзистора в области высоких частот. Для области низких частот схема замещения полевого транзистора принимает вид, показанный на рис. 5.5, б.

МДП-транзисторы

В отличие от полевых транзисторов с p - n -переходом, в которых затвор имеет непосредственный электрический контакт с близлежащей областью токопроводящего канала, в МДП-транзисторах затвор изолирован от указанной области слоем диэлектрика. По этой причине МДП-транзисторы относят к классу полевых транзисторов с изолированным затвором.

МДП-транзисторы (структура металл — диэлектрик — полупроводник) выполняют из кремния. В качестве диэлектрика используют окисел кремния SiO_2 . Отсюда другое название этих транзисторов — МОП-транзисторы (структура металл — окисел — полупроводник). Наличие диэлектрика обеспечивает высокое входное сопротивление рассматриваемых транзисторов (10^{12} — 10^{14} Ом).

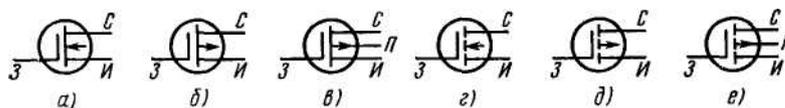
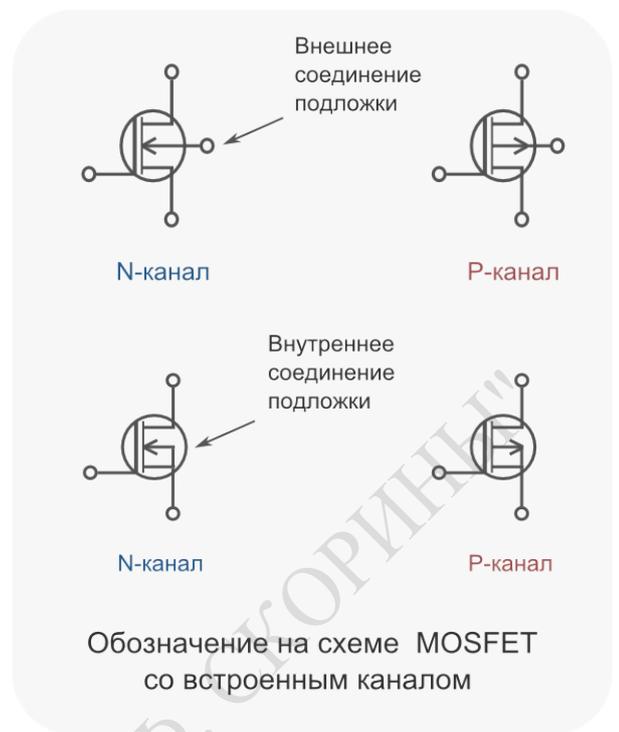
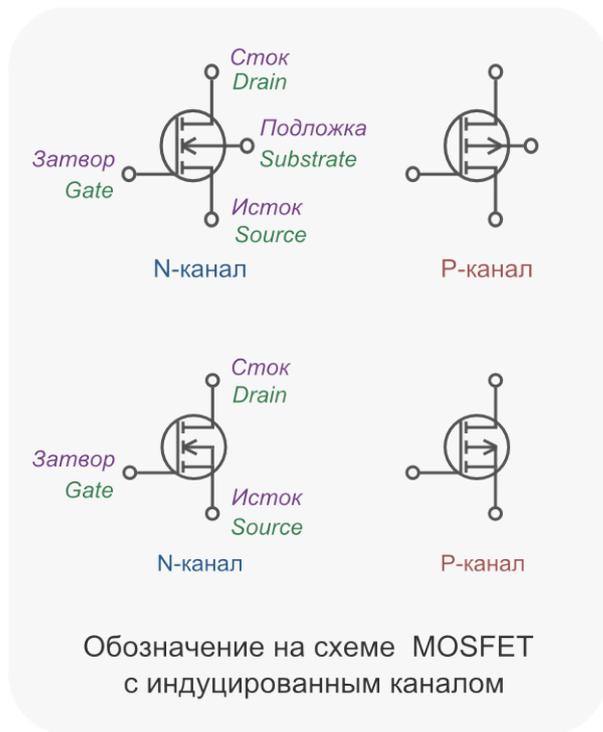
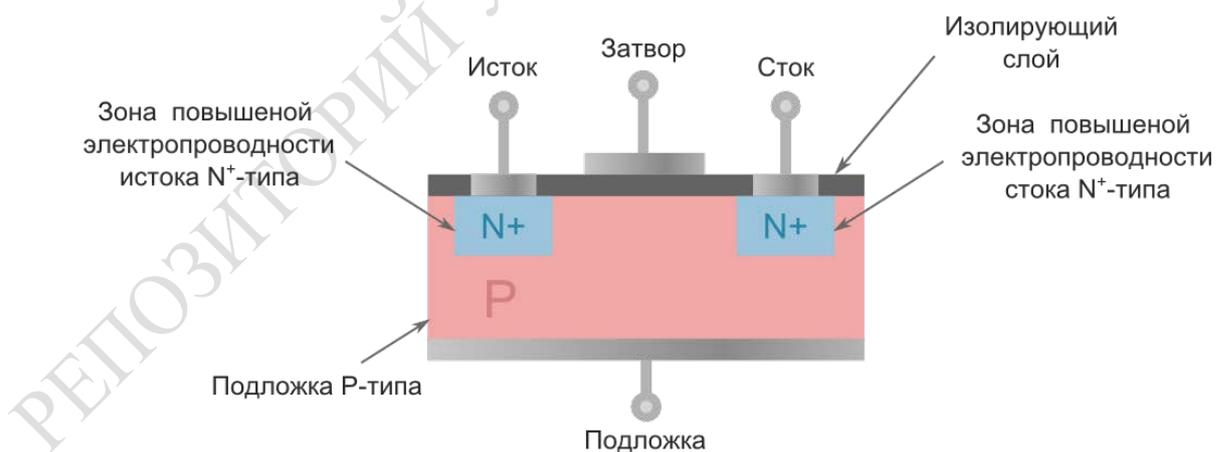


Рис. 5.6. Условные обозначения МДП-транзисторов со встроенным каналом n -типа (а), p -типа (б) и выводом от подложки (в); с индуцированным каналом n -типа (г), p -типа (д) и выводом от подложки (е)



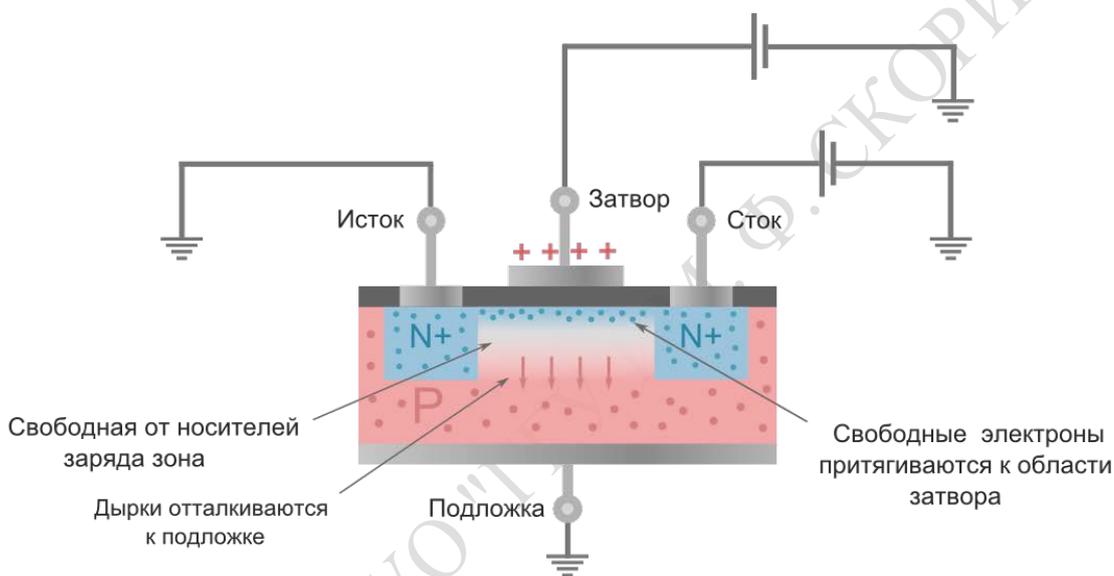
На основании (подложке) полупроводника с электропроводностью P-типа (для транзистора с N-каналом) созданы две зоны с повышенной электропроводностью N⁺-типа. Все это покрывается тонким слоем диэлектрика, обычно диоксида кремния SiO₂. Сквозь диэлектрический слой проходят металлические выводы от областей N⁺-типа, называемые *стоком* и *истоком*. Над диэлектриком находится металлический слой *затвора*. Иногда от подложки также идет вывод, который закорачивают с истоком



Устройство МДП-транзистора с индуцированным каналом N-типа

Подключим напряжение любой полярности между стоком и истоком. В этом случае электрический ток не пойдет, поскольку между зонами N^+ находится область P , не пропускающая электроны. Далее, если подать на затвор положительное напряжение относительно истока $U_{зи}$, возникнет электрическое поле. Оно будет выталкивать положительные ионы (дырки) из зоны P в сторону подложки. В результате под затвором концентрация дырок начнет уменьшаться, и их место займут электроны, притягиваемые положительным напряжением на затворе.

Когда $U_{зи}$ достигнет своего порогового значения, концентрация электронов в области затвора превысит концентрацию дырок. 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

Стоковые (выходные) характеристики полевого транзистора с индуцированным каналом n -типа приведены на рис. 5.8, б. Они близки по виду аналогичным характеристикам транзистора со встроенным каналом и имеют тот же характер зависимости $I_c = F(U_{си})$. Отличие заключается в том, что управление током транзистора осуществляется напряжением одной полярности, совпадающей с полярностью напряжения $U_{си}$. Ток I_c равен нулю при $U_{зи} = 0$, в то время как в транзисторе со встроенным каналом для этого необходимо изменить полярность напряжения на затворе относительно истока. Вид стоко-затворной характеристики транзистора с индуцированным каналом показан на рис. 5.8, в.



График а)

Стоковые (выходные) характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом

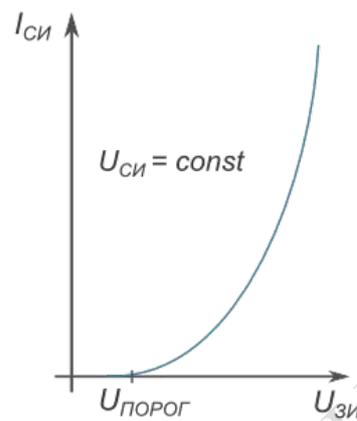


График б)

Стоко-затворная характеристика МДП-транзистора с индуцированным каналом

Принцип действия МДП-транзисторов основан на эффекте изменения проводимости приповерхностного слоя полупроводника на границе с диэлектриком под воздействием поперечного электрического поля. Приповерхностный слой полупроводника является токопроводящим каналом этих транзисторов. МДП-транзисторы выполняют двух типов — со встроенным и с индуцированным каналом.

МДП-транзисторы представляют собой в общем случае четырех-электродный прибор. Четвертым электродом (подложкой), выполняющим вспомогательную функцию, является вывод от подложки исходной полупроводниковой пластины. МДП-транзисторы могут быть как с каналом n - или p -типа. Условные обозначения МДП-транзисторов показаны на рис. 5.6 а—е.

Рассмотрим особенности МДП-транзисторов со встроенным каналом. Конструкция такого транзистора с каналом n -типа показана на рис. 5.7, а. 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. Вывод подложки (если он имеется) иногда присоединяют к истоку.

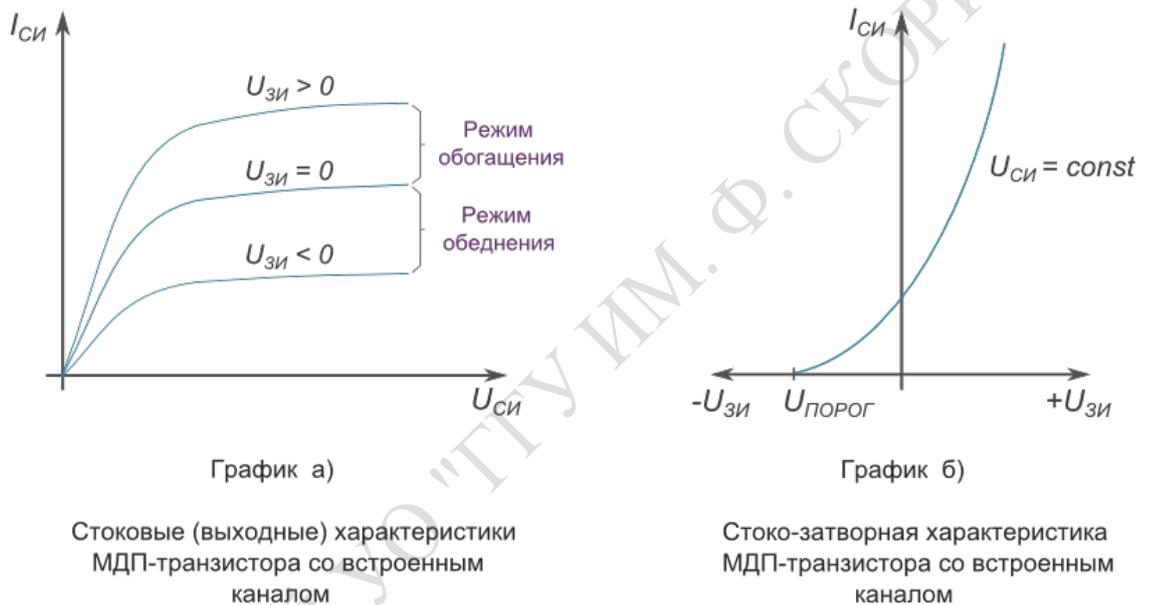
Подключим к транзистору напряжение между стоком и истоком $U_{си}$ любой полярности. Оставим затвор отключенным ($U_{зи} = 0$). В результате через канал пойдет ток $I_{си}$, представляющий собой поток электронов.

Далее, подключим к затвору отрицательное напряжение относительно истока. В канале возникнет поперечное электрическое поле, которое начнет выталкивать электроны из зоны канала в сторону подложки. Количество электронов в канале

уменьшиться, его сопротивление увеличится, и ток $I_{си}$ уменьшиться. При повышении отрицательного напряжения на затворе, уменьшается сила тока. Такое состояние работы транзистора называется режимом обеднения.

Если подключить к затвору положительное напряжение, возникшее электрическое поле будет притягивать электроны из областей стока, истока и подложки. Канал расширится, его проводимость повысится, и ток $I_{си}$ увеличится. Транзистор войдет в режим обогащения.

Как мы видим, МДП-транзистор со встроенным каналом способен работать в двух режимах - в режиме обеднения и в режиме обогащения.



Стоковые (выходные) характеристики полевого транзистора со встроенным каналом n -типа для случая соединения подложки с истоком показаны на рис. 5.7, б. По виду эти характеристики близки к характеристикам полевого транзистора с p - n -переходом. Рассмотрим характеристику при $U_{зи} = 0$, что соответствует соединению затвора с истоком. Внешнее напряжение приложено к участку исток — сток положительным полюсом к стоку. Поскольку $U_{зи} = 0$, через прибор протекает ток, определяемый исходной проводимостью канала. На начальном участке $0—a$, когда падение напряжения в канале мало, зависимость $I_c(U_{си})$ близка к линейной. По мере приближения к точке $б$ падение напряжения в канале приводит ко все более существенному влиянию его сужения (пунктир на рис. 5.7, а) на проводимость канала, что уменьшает крутизну нарастания тока на участке $а—б$. После точки $б$ токопроводящий канал сужается до минимума, что вызывает ограничение нарастания тока и появление на характеристике пологого участка II.

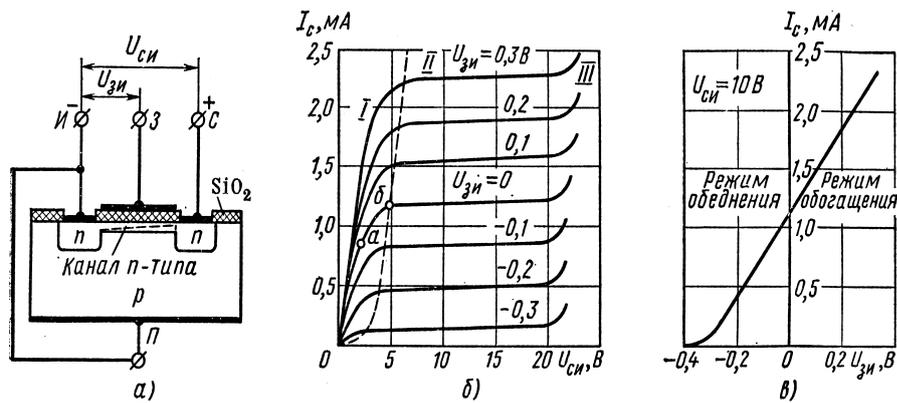


Рис. 5.7. Конструкция МДП-транзистора со встроенным каналом n -типа (а); стоко-затворная характеристика (б); стоко-затворная характеристика (в)

Покажем влияние напряжения затвор — исток на ход стоковых характеристик.

В случае приложения к затвору напряжения ($U_{зи} < 0$) поле затвора оказывает отталкивающее действие на электроны — носители заряда в канале, что приводит к уменьшению их концентрации в канале и проводимости канала. Вследствие этого стоковые характеристики при $U_{зи} < 0$ располагаются ниже кривой, соответствующей $U_{зи} = 0$. Режим работы транзистора ($U_{зи} < 0$), при котором происходит уменьшение концентрации заряда в канале, называют режимом обеднения.

При подаче на затвор напряжения $U_{зи} > 0$ поле затвора притягивает электроны в канал из p -слоя полупроводниковой пластины. Концентрация носителей заряда в канале увеличивается, что соответствует режиму обогащения канала носителями. Проводимость канала возрастает, ток I_c увеличивается. Стоковые характеристики при $U_{зи} > 0$ располагаются выше исходной кривой ($U_{зи} = 0$).

Для транзистора имеется предел повышения напряжения $U_{сз}$ ввиду наступления пробоя прилежащего к стоку участка сток — затвор. На стоковых характеристиках пробоем соответствует достижение некоторой величины $U_{си-пр}$. В случае $U_{зи} < 0$ напряжение $U_{сз}$ увеличивается, в связи с чем при $U_{зи} < 0$ пробой наступает при меньшем напряжении $U_{си}$.

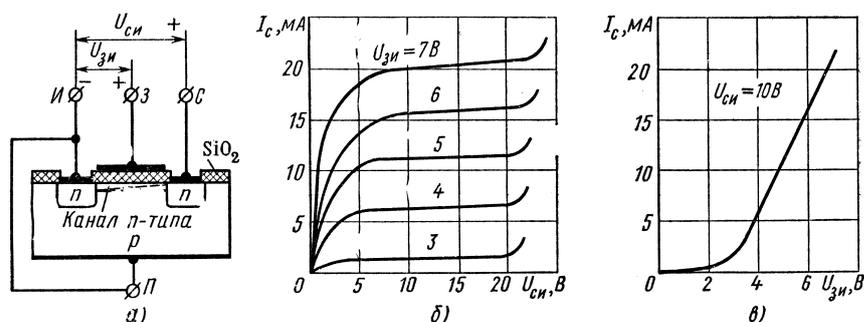


Рис. 5.8. Конструкция МДП-транзистора с индуцированным каналом n -типа (а);
семейство его стоковых характеристик (б)

Примерный вид стоко-затворной характеристики транзистора со встроенным каналом иллюстрирует рис. 5.7, в. Ее отличие от стоко-затворной характеристики транзистора с p - n -переходом (см. рис. 5.8) обусловлено возможностью работы прибора как при $U_{зи} < 0$ (режим обеднения), так и при $U_{зи} > 0$ (режим обогащения).

Конструкция МДП-транзистора с индуцированным каналом n -типа показана на рис. 5.8, с. Канал проводимости тока здесь специально не создается, а образуется (индуцируется) благодаря притоку электронов из полупроводниковой пластины в случае приложения к затвору напряжения положительной полярности относительно истока. За счет притока электронов в приповерхностном слое происходит изменение электропроводности полупроводника, т.е. индуцируется токопроводящий канал n -типа, соединяющий области стока и истока. Проводимость канала возрастает с повышением приложенного к затвору напряжения положительной полярности. Таким образом, транзистор с индуцированным каналом работает только в режиме обогащения.

Преимущества и недостатки полевых транзисторов перед биполярными.

Полевые транзисторы практически вытеснили биполярные в ряде применений. Самое широкое распространение они получили в интегральных схемах в качестве ключей (электронных переключателей)

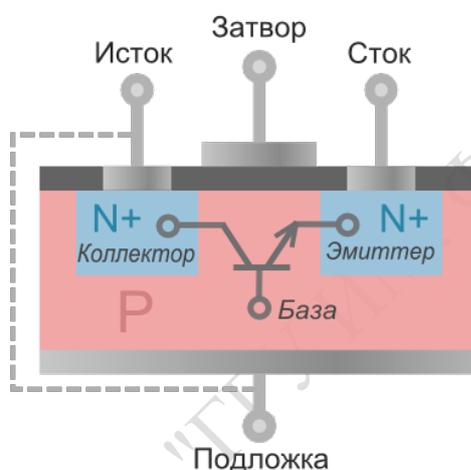
Главные преимущества полевых транзисторов

- 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.
- У полевых транзисторов на порядок выше скорость перехода между состояниями проводимости и непроводимости тока. Поэтому они могут работать на более высоких частотах, чем биполярные.

Главные недостатки полевых транзисторов

- Структура полевых транзисторов начинает разрушаться при меньшей температуре (150С), чем структура биполярных транзисторов (200С).

- Несмотря на то, что полевые транзисторы потребляют намного меньше энергии, по сравнению с биполярными транзисторами, при работе на высоких частотах ситуация кардинально меняется. На частотах выше, примерно, чем 1.5 GHz, потребление энергии у МОП-транзисторов начинает возрастать по экспоненте. Поэтому скорость процессоров перестала так стремительно расти, и их производители перешли на стратегию «многоядерности».
- При изготовлении мощных МОП-транзисторов, в их структуре возникает «паразитный» биполярный транзистор. Для того, чтобы нейтрализовать его влияние, подложку закорачивают с истоком. Это эквивалентно закорачиванию базы и эмиттера паразитного транзистора. В результате напряжение между базой и эмиттером биполярного транзистора никогда не достигнет необходимого, чтобы он открылся (около 0.6В необходимо, чтобы PN-переход внутри прибора начал проводить).



Паразитный биполярный NPN-транзистор
внутри МОП-транзистора

Однако, при быстром скачке напряжения между стоком и истоком полевого транзистора, паразитный транзистор может случайно открыться, в результате чего, вся схема может выйти из строя.

- Важнейшим недостатком полевых транзисторов является их **чувствительность к статическому электричеству**. Поскольку изоляционный слой диэлектрика на затворе чрезвычайно тонкий, иногда даже относительно невысокого напряжения бывает достаточно, чтоб его разрушить. А разряды статического электричества, присутствующего практически в каждой среде, могут достигать несколько тысяч вольт.

Поэтому внешние корпуса полевых транзисторов стараются создавать таким образом, чтоб минимизировать возможность возникновения нежелательного напряжения между электродами прибора. Одним из таких методов является закорачивание истока с подложкой и их заземление. Также в некоторых моделях используют специально встроенный диод между стоком и истоком. При работе с интегральными схемами (чипами), состоящими преимущественно из полевых транзисторов, желательно использовать заземленные антистатические браслеты. При транспортировке интегральных схем используют вакуумные антистатические упаковки