

# 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. Их работа основана на перемещении только основных носителей заряда, т. е. дырок или электронов, а потому их иногда называют униполярными. Процессы инжекции и экстракции в таких транзисторах не играют основной роли. Основным способом движения зарядов является их дрейф в электрическом поле.

Электрод полевого транзистора, через который втекают носители заряда в канал, называется истоком (И), а электрод, через который из канала вытекают носители заряда, называется стоком (С). Эти электроды обратимы. С помощью напряжения, прикладываемого к третьему электроду, называемому затвором (З), осуществляют перекрытие канала, т. е. изменяют удельную проводимость или площадь сечения канала.

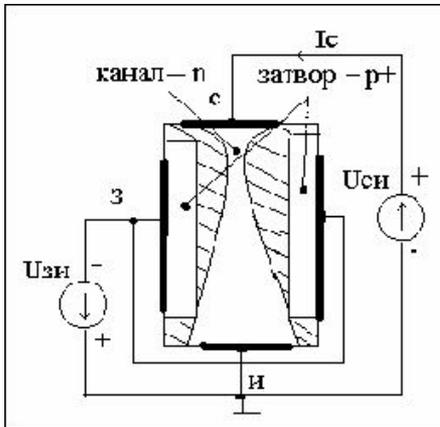
Различают два типа полевых транзисторов: с управляющим р-п переходом и с изолированным затвором (МДП-транзисторы, представляющие собой структуру металл — диэлектрик — полупроводник). МДП-транзисторы, в свою очередь, делятся на транзисторы со встроенным и индуцированным каналом.

Полевые транзисторы обладают рядом преимуществ по сравнению с биполярными транзисторами.

1. Одним из основных достоинств полевого транзистора является его высокое входное сопротивление (106— 107 Ом — у транзисторов с управляющим р-п-переходом и 1010 —1015 Ом у МДП-транзисторов).
2. Они более устойчивы к воздействию ионизирующих излучений,
3. - хорошо работают и при очень низкой температуре вплоть до температуры жидкого азота (−197 °С).
4. - характеризуются низким уровнем шумов.
5. МДП-транзисторы занимают малую площадь на поверхности кристалла полупроводника, а потому широко применяются в



## 4.2. Устройство 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-перехода 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.

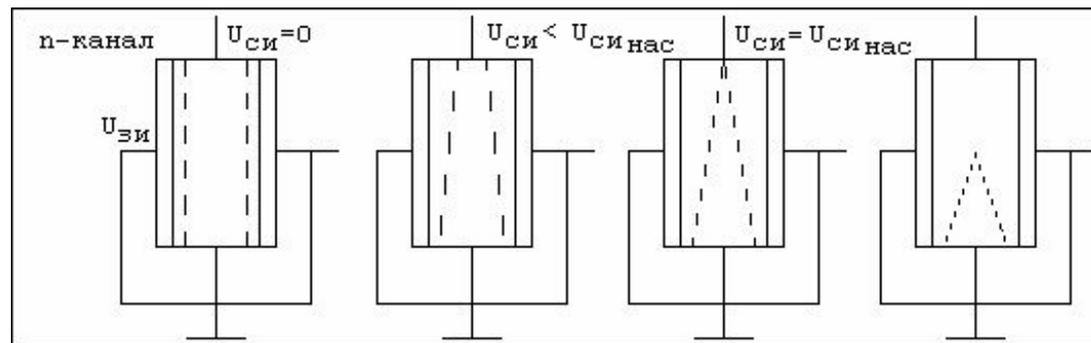
1.  $U_{си}=0$ . Область обеднённая носителями заряда, располагается в объёме канала, причём она имеет одинаковую толщину по его длине. Напряжение  $U_{зи}$  позволяет управлять сечением проводящей части канала, а следовательно и сопротивлением исток-сток. В таком режиме полевой транзистор, выполняет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



# Статические характеристики полевого транзистора с р-п переходом

Если полевой транзистор включен по схеме с общим истоком (ОИ), то связь токов и напряжений могут быть охарактеризованы следующими ВАХ:

$$I_3 = f(U_{3и}) \Big|_{U_{си} = const} \quad (\text{входная характеристика});$$

$$I_3 = f(U_{си}) \Big|_{U_{3и} = const} \quad (\text{характеристика обратной передачи});$$

$$I_c = f(U_{3и}) \Big|_{U_{си} = const} \quad (\text{характеристика прямой передачи или стокотворная характеристика});$$

$$I_c = f(U_{си}) \Big|_{U_{3и} = const} \quad (\text{выходная характеристика});$$

Обычно применяются две последние характеристики.

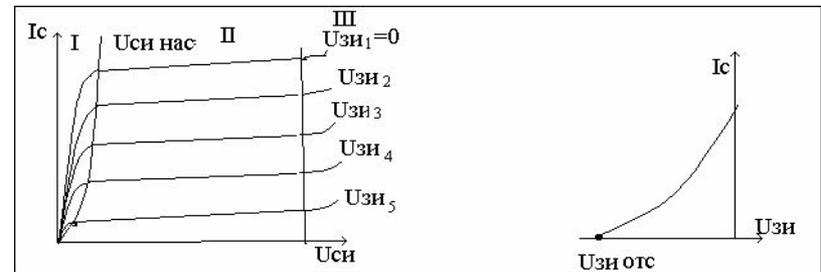
Типичное семейство выходных ВАХ полевого транзистора с n-p- переходом показано на рис 1.2.

На выходных ВАХ можно выделить три области.

Область I.  $0 < U_{си} < U_{си.нас}$ . Это крутой или омический участок. Ток  $I_c$  почти линейно увеличивается с ростом напряжения на стоке. В этой области транзистор может быть использован как омическое, управляемое входным напряжением, сопротивление. Далее линейная зависимость между  $U_{си}$  ток  $I_c$  нарушается, так как уменьшается сечение канала и увеличивается его сопротивление.

Область 2.  $U_{си.нас} < U_{си} < U_{си.мах}$ . Это область насыщения. При  $U_{си} = U_{си.нас}$  происходит смыкание проводящей части канала у стока. После чего рост тока стока  $I_c$  практически прекращается и его величина почти не зависит от напряжения, так как увеличение напряжения на стоке, с одной стороны, вызывает увеличение тока стока, с другой — сужение канала, что, в свою очередь, уменьшает ток. Напряжение на стоке, при котором возникает этот режим, называется напряжением насыщения  $U_{си.нас}$ .

Область 3.  $U_{си} > U_{си.мах}$ . Это область пробоя транзистора. Увеличение напряжения на стоке выше определенной величины приводит к электрическому пробоя р-n- перехода у стокового конца канала, так как в этой части прибора к р- n-переходу приложено наибольшее обратное напряжение.



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

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

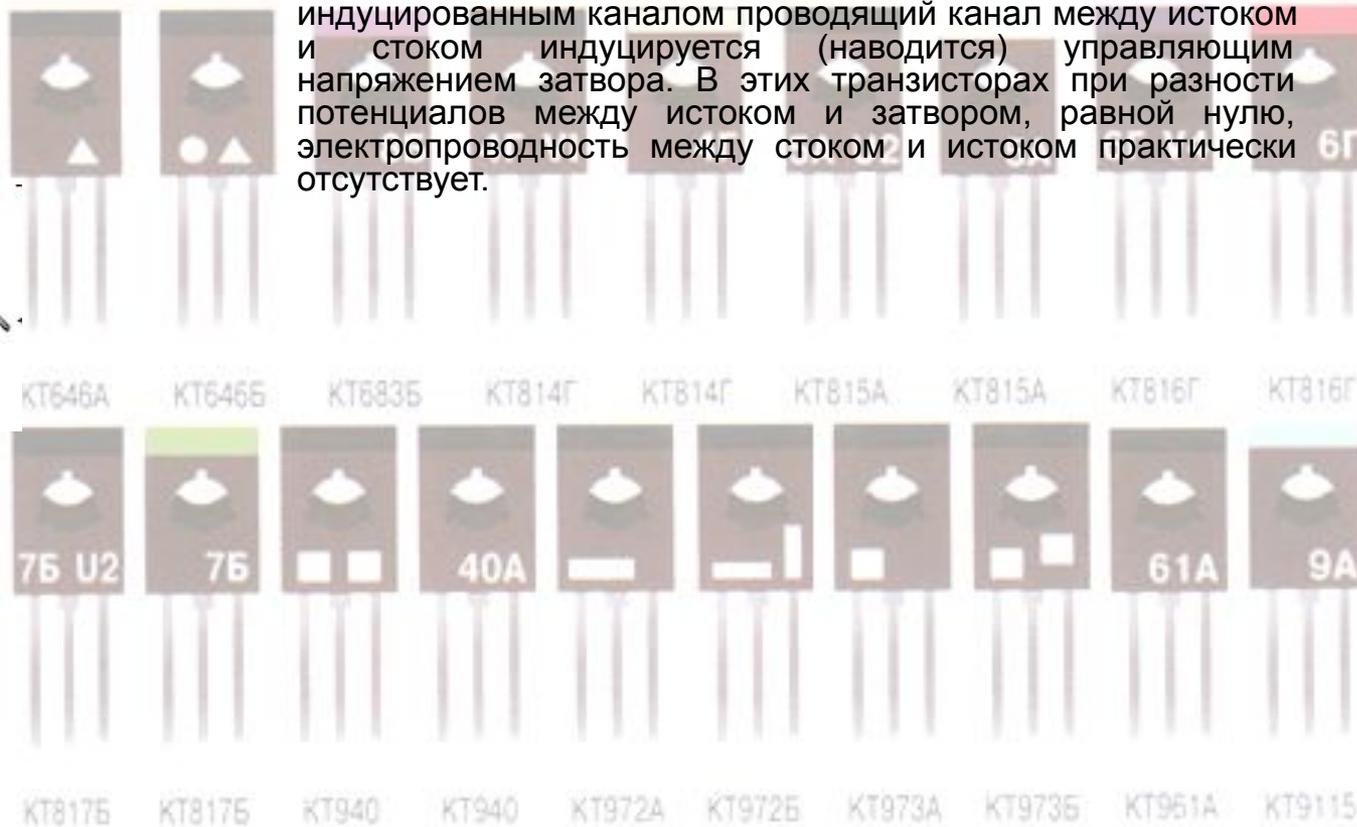
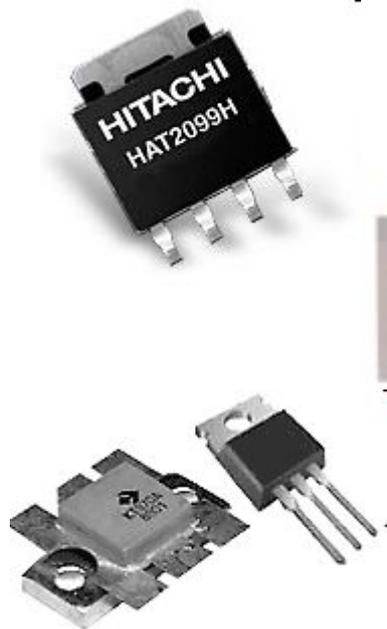
В выходных ВАХ кривая, соединяющая точки, соответствующие значениям  $U_{си\text{нас}}$  при разных значениях  $U_{зи}$ , является параболой, выходящей из начала координат (пунктирная линия на рис. 5.3). Если управляющий p-n переход сместить в прямом направлении, ток стока увеличится. При этом резко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

МДП- или МОП-транзистор представляет собой прибор, в котором металлический затвор изолирован слоем диэлектрика от канала, образованного в приповерхностном слое полупроводника. Принцип действия МДП транзистора основан на управлении пространственным зарядом полупроводника 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.



## 4.3.1. МДП – транзистор с индуцированным каналом

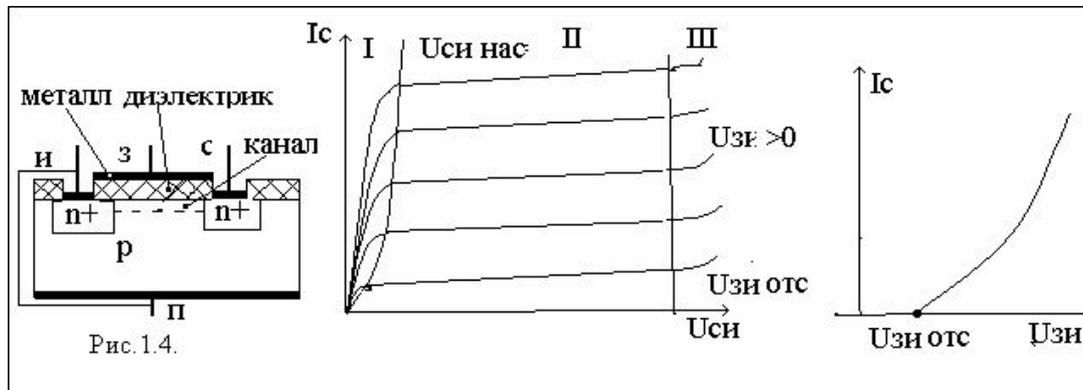
В МДП – транзисторах затвор и канал изолированы пленкой диэлектрика (рис. 1.4). Каналом является тонкий слой на поверхности пластины (подложки) с противоположным типом проводимости. Затвор представляет собой тонкую пленку алюминия, нанесенную на поверхность окисла кремния. Исток и сток выполнены в виде сильнолегированных  $n+$  – областей (концентрация дырок  $10^{18}$  -  $10^{20}$  см $^{-3}$ ) в пластине кремния  $n$ - типа.

Если  $U_{зи}=0$  напряжение на затворе отсутствует, то сопротивление между истоком и стоком, определяемое двумя включенными встречно  $p$ - $n$  переходами в местах контакта  $p$ -подложки и  $n+$ -областей, очень велико. Возникновение канала основано на так называемом эффекте поля, т.е. изменении концентрации носителей в приповерхностном слое полупроводника под действием электрического поля. При подаче на затвор положительного  $U_{зи}>0$ , по отношению к истоку напряжения в подложке полупроводника возникает электрическое поле, которое вытягивает из  $p$ - 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 отрицательного напряжения затвора толщина  $n$  – слоя и его проводимость возрастают.

Таким образом, можно управлять током стока транзистора. Напряжение затвора, при котором в приборе формируется канал, называется пороговым напряжением  $U_{зи пор}$ . Если при  $|U_{зи}|>|U_{зи пор}|$  подать положительное напряжение на сток, то в канале появится продольное электрическое поле и возникнет дрейфовое движение электронов от истока к стоку. При изменении напряжения  $U_{си}$ , будет меняться дрейфовая скорость движения дырок в канале, а следовательно, и ток  $I_c$ . Величина порогового напряжения у транзисторов с индуцированным каналом лежит в пределах от 1 до 6 В..

Величина тока в цепи затвора транзистора очень мала, так как сопротивление изоляции между затвором и каналом достигает  $10^{15}$  Ом. Выходные характеристики МДП транзистора с индуцированным каналом (рис. 1.5) имеют такой же вид, как и характеристики полевого транзистора с  $p$ - $n$  – переходом, а его входная ВАХ на рис. 1.6.

Принцип работы, свойства и ВАХ МДП- транзистора с  $p$  – каналом примерно такие же как и транзистора с  $n$  –каналом. Отличие состоит в том, что транзисторы с  $n$  – каналом оказываются более быстродействующими, так как подвижность электронов, переносящих ток, примерно в три раза выше, чем подвижность дырок. Кроме того, эти транзисторы имеют разные пороговые напряжения.



## 4.3.2. МДП- транзистор со встроенным каналом

В таких МДП транзисторах канал на этапе изготовления образуется тонким слоем полупроводника, нанесенного на подложку и имеющего противоположный по отношению к ней тип проводимости. Эти транзисторы отличаются от транзисторов с индуцированным каналом тем, что могут работать как при положительном, так и при отрицательном напряжении на затворе. Конструкция МДП транзистора со встроенным n-каналом приведена на рис.

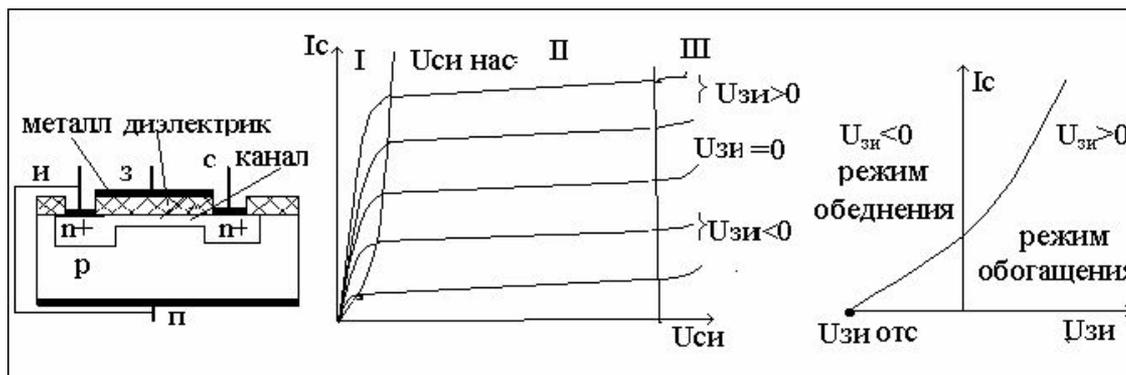
Если напряжение на затворе относительно подложки, которая обычно соединена с истоком, равно нулю  $U_{зи}=0$ , то при подаче на сток положительного напряжения в цепи сток исток будет протекать ток стока  $I_c$  определяемый проводимостью канала, причем ВАХ будет аналогична выходной ВАХ полевого транзистора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

Если на затвор, подать отрицательное напряжение  $U_{зи}<0$ , то электрическое поле, создаваемое этим напряжением, удаляет электроны канала в глубь подложки, увеличивая его сопротивление, ток стока при этом уменьшается. Такой режим называется режимом обеднения.

Если на затвор, подать положительное напряжение  $U_{зи}>0$ , то электрическое поле, создаваемое этим напряжением, втягивает электроны из подложки в канал, обогащая его носителями, и уменьшая его сопротивление, ток стока при этом увеличивается. Такой режим называется режимом обогащения.

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. 1.8. и 1.9. соответственно.

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. 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)

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

**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)

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

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)  $|U_{си \text{ нас}}| = |U_{зи}| - |U_{зи \text{ отс}}|$

выражение для тока в области насыщения:

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

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

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, 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 (1.7) 
$$Y_{21} = S = \frac{dI_c}{dU_{3u}} \Big|_{U_{cu}} = const$$

2) входная проводимость полевого транзистора, на низких частотах близка к нулю; 
$$Y_{11} = \frac{dI_3}{dU_{3u}} \Big|_{U_{cu}} = const$$

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

Часто при расчетах схем на полевых транзисторах используют выходное сопротивление  $R_i = 1/Y_{22}$ , которое для области насыщения у маломощных транзисторов равно 10 - 100 кОм. Кроме того, полевой транзистор можно характеризовать статическим коэффициентом усиления (1.9)

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

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

## 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:

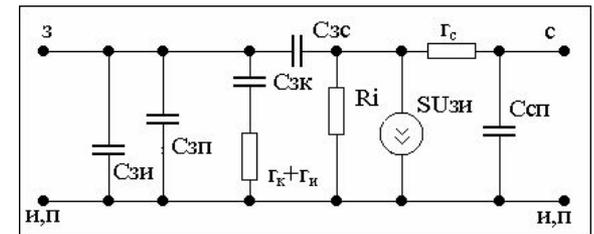
$$f_T = \frac{S}{2\pi C_{зс} (1 + S r_i)}$$

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  $U_{зи}$ , 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

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



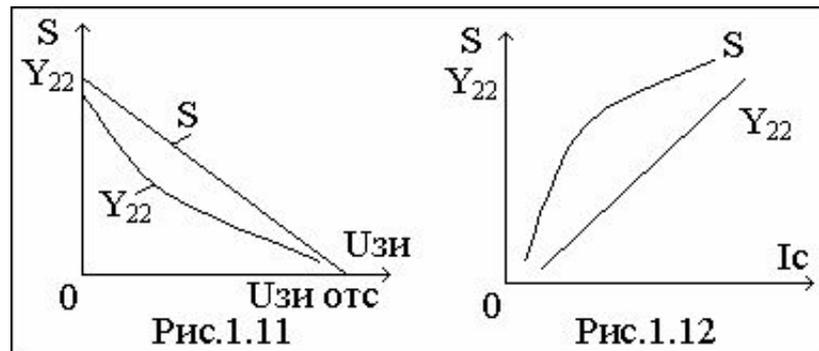
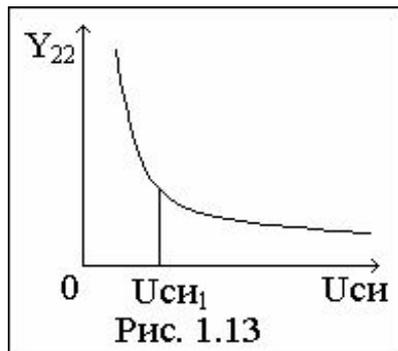
## 4.7. Зависимость параметров полевого транзистора от режима работы и температуры

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  $\Delta\phi_0$  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  $\Delta\phi_0$ , 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 p— 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>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>P&gt;1,5 Вт</b>
Низкочастотные транзисторы	Среднечастотные транзисторы	Высокочастотные транзисторы	