

## Лекция № 6

### Полевой транзистор с изолированным затвором (МДП-транзистор)

Чтобы понять физические процессы в этой структуре, необходимо рассмотреть процессы на поверхности полупроводника.

#### *Явления на поверхности полупроводника*

В результате взаимодействия полупроводника и окружающей среды на поверхности кристалла образуются различные соединения, отличающиеся по своим свойствам от основного материала. Кроме того, обработка кристалла приводит к дефектам кристаллической решетки на поверхности полупроводника. По этим причинам возникают поверхностные состояния, повышающие вероятность появления свободных электронов или незаполненных ковалентных связей. Энергетические уровни поверхностных состояний могут располагаться в запрещенной энергетической зоне и соответствовать донорным или акцепторным уровням. Плотность поверхностных уровней равна плотности поверхностных атомов, то есть около  $10^{15}$  см. Уровни, расположенные вблизи зоны проводимости, называют донорными. Они возникают при потере поверхностными атомами электронов, в результате чего поверхностные атомы приобретают положительный заряд. Уровни, расположенные вблизи валентной зоны, называют акцепторными. Они образуются при захвате поверхностными атомами чужих электронов, в результате чего поверхностные атомы приобретают отрицательный заряд.

Поверхностные уровни являются причиной возникновения в приповерхностном слое полупроводника электрического поля, характер и интенсивность которого зависят от типа и плотности поверхностных уровней. Если на поверхности электронного полупроводника преобладают донорные уровни, то она заряжается положительно и к поверхности притягиваются отрицательные заряды (т.е. знаки поверхностного заряда и основных носителей противоположны), в результате чего возникает обогащенный электронами приповерхностный слой, концентрация электронов в котором выше, чем в объеме полупроводника (рис. 6.1, а), и происходит изгиб вниз границ энергетических зон.

На поверхности полупроводника сохраняется равновесное состояние, то есть выполняется условие  $n_s p_s = n_i^2$ . Поэтому увеличение концентрации электронов вблизи поверхности сопровождается уменьшением концентрации дырок. Аналогичным образом образуется обогащенный дырочный приповерхностный слой при наличии на поверхности дырочного полупроводника отрицательного поверхностного заряда.

Обеднение возникает в том случае, если поверхностный заряд совпадает по знаку с основными носителями заряда. На рис. 6.1, б показано образование обедненного слоя на поверхности полупроводника n-типа при такой плотности поверхностных состояний, что уровни  $E_i$  и  $E_{Fn}$  не пересекаются. Если на поверхности электронного полупроводника преобладают акцепторные уровни, то она заряжается отрицательно. При этом электроны выталкиваются с поверхности вглубь кристалла, в результате чего образуется обедненный электронами

приповерхностный слой, концентрация электронов в котором ниже, чем в объеме полупроводника, и границы энергетических зон изгибаются вверх. Повышение плотности пространственного заряда может привести к пересечению уровня Ферми с уровнем середины запрещенной зоны (рис. 6.1, в), что соответствует изменению типа электропроводности у поверхности полупроводника. Это явление называют инверсией типа электропроводности, а слой, в котором оно наблюдается, – инверсным слоем. Аналогичный процесс происходит на поверхности дырочного полупроводника при высокой концентрации донорных уровней.

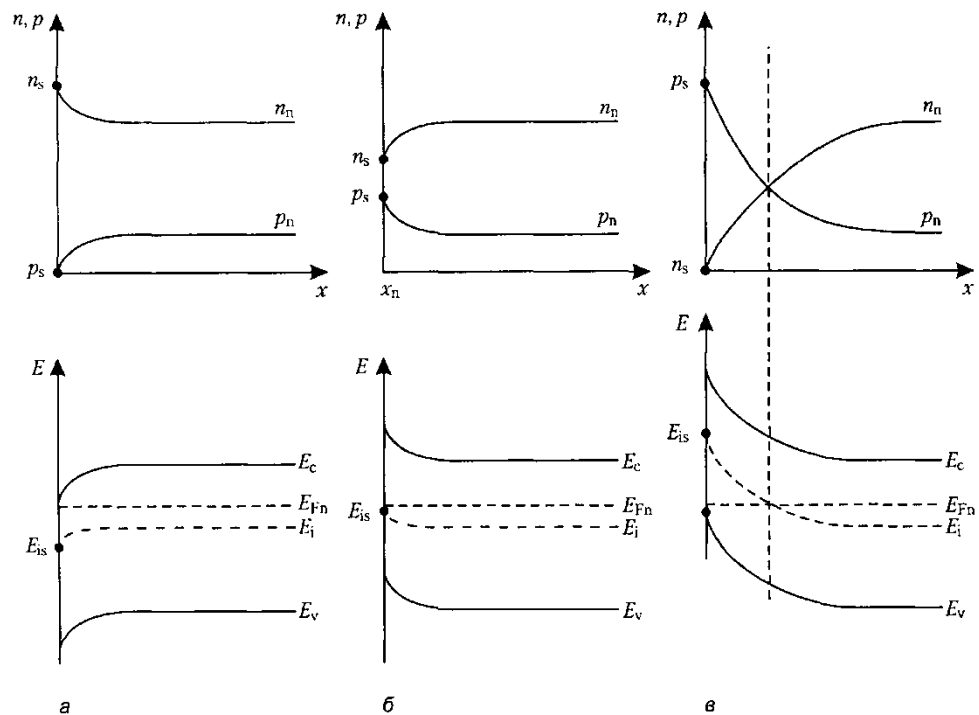


Рис. 6.1 – Образование обогащенного слоя - а ; образование обедненного слоя - б; образование инверсного слоя -в

Электропроводность приповерхностного слоя полупроводника может изменяться под действием электрического поля, возникающего за счет напряжения, прикладываемого к металлу и полупроводнику, разделенных диэлектриком. Если предположить, что до включения напряжения поверхностные состояния на границе полупроводника и диэлектрика отсутствуют, то электропроводности приповерхностного слоя и объема полупроводника будут одинаковыми.

При включении напряжения между металлом и полупроводником возникает электрическое поле, и на поверхности металла и в приповерхностном слое полупроводника, как на пластинах конденсатора, накапливаются заряды.

Например, если полупроводник дырочный и к нему прикладывается положительное напряжение, то под действием электрического поля у

поверхности увеличивается концентрация дырок, и электропроводность приповерхностного слоя полупроводника увеличивается. При изменении полярности напряжения (рис.6.2) концентрация дырок в приповерхностном

слое уменьшается, а электронов – увеличивается. В связи с этим электропроводность приконтактной области уменьшается, стремясь к собственной. Увеличение напряжения приводит к тому, что концентрация электронов становится выше концентрации дырок, и происходит изменение (инверсия) типа электропроводности слоя. При этом электропроводность приповерхностного слоя увеличивается.

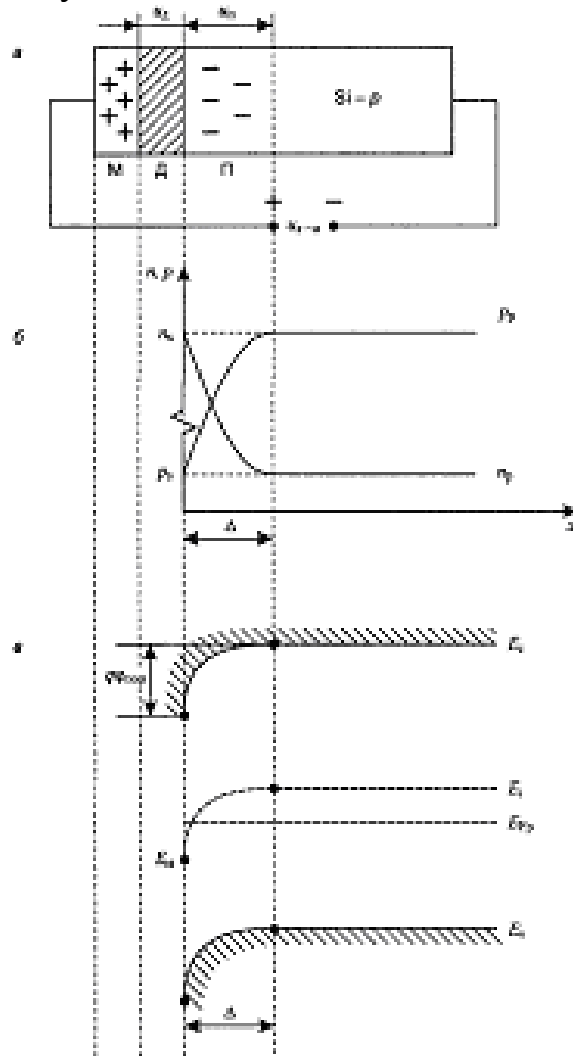


Рис. 6.2 – Энергетические диаграммы поверхностных состояний при подаче напряжения между металлом и полупроводником при контакте металл – диэлектрик – полупроводник

Зависимость электропроводности приповерхностного слоя полупроводника n-типа от напряжения показана на рис. 6.3а, р-типа – на рис. 6.3б. Это явление принято называть эффектом внешнего поля.

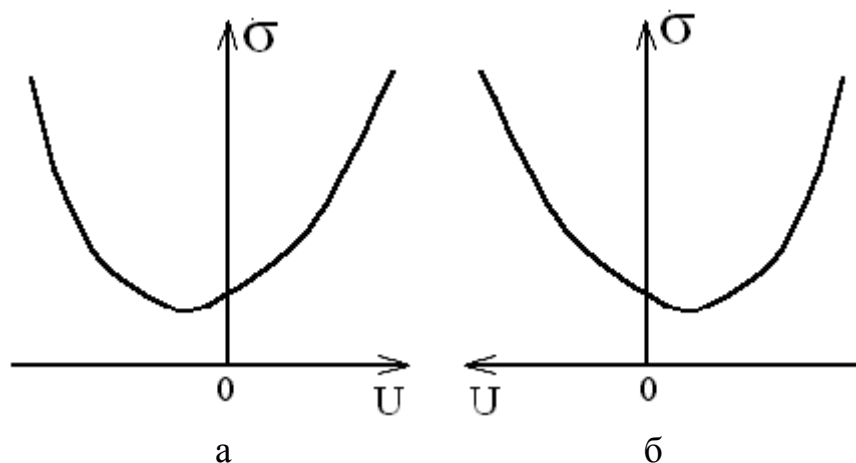


Рис. 6.3 – Изменение типа электропроводности на поверхности полупроводника а – n – типа; б – p – типа

### Устройство и принцип работы полевого транзистора с изолированным затвором (МДП-транзистора)

Этот транзистор имеет структуру металл - диэлектрик - полупроводник и может быть двух типов: с индуцированным каналом (рис. 6.4,д) и с встроенным каналом (рис.6.4,е). Графическое изображение МДП ПТ с индуцированным n-каналом представлены на рис.6.4,б, p-каналом – 6.4,г, со встроенным n- каналом на рис.6.4,в, p-каналом – 6.4,а. Если основой транзистора является кремний, то диэлектриком может быть слой окиси кремния, поэтому такую структуру иногда называют МОП-транзистор (металл - окисел - полупроводник).

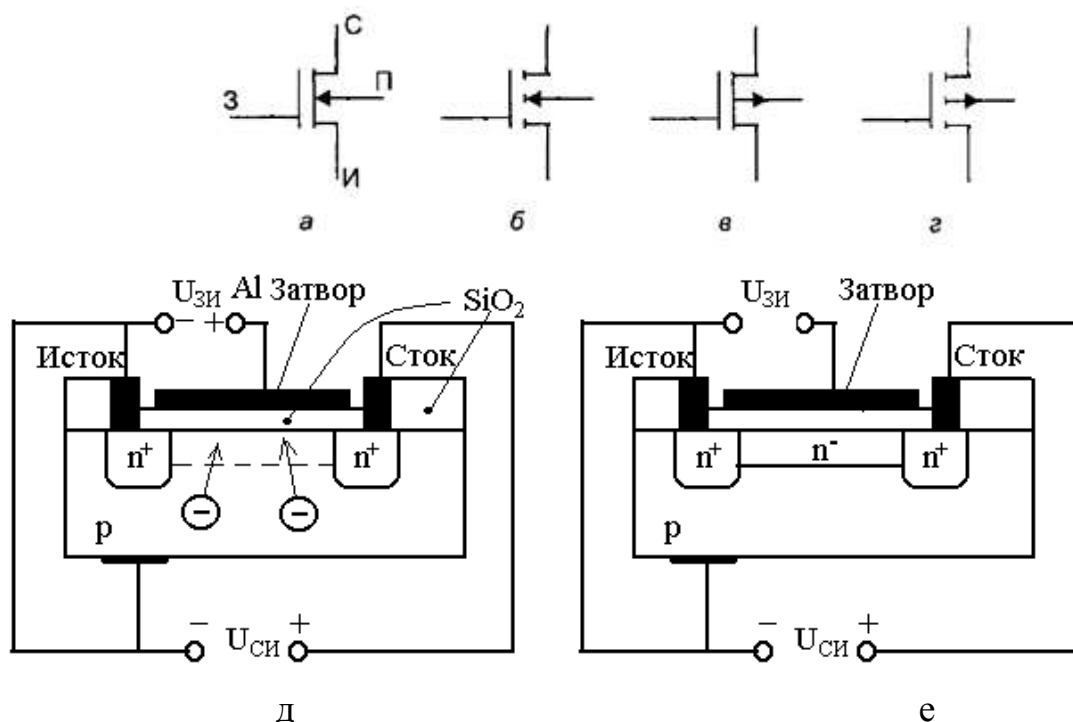


Рис. 6.4 – Графическое изображение (а, б, в, г) и структура МДП ПТ с индуцированным (д) и встроенным (е) каналами

Транзистор с индуцированным каналом имеет области истока  $n^+$  и стока  $n^+$ , которые выведены путем металлизации через отверстие в окиси кремния на контакты - исток и сток. На слой двуокиси кремния напыляют слой алюминия, служащий затвором. Можно считать, что алюминиевый затвор и полупроводниковый материал р-типа образуют плоский конденсатор с окисным диэлектриком. Если на металлическую часть затвора подать положительное напряжение, то положительный заряд обкладки затвора индуцирует соответствующий отрицательный заряд в полупроводниковой области канала. С возрастанием положительного напряжения этот заряд, созданный притянутыми из глубины р-области проводника электронами, которые являются неосновными носителями, превращает поверхностный слой полупроводника р-типа в проводящий канал n-типа, соединяющий исходные  $n^+$ -области истока и стока. Поэтому уменьшается сопротивление материала между истоком и стоком, что ведет к увеличению тока стока. Таким образом, благодаря электростатической индукции между истоком и стоком происходит инверсия типа проводимости полупроводника. Слой полупроводника р-типа превращается в полупроводник n-типа. До инверсии сопротивление между истоком и стоком определяется сопротивлением закрытого перехода, так как до инверсии имеет место структура  $n^+ - p - n^+$ . После инверсии образуется область с n-проводимостью, и структура становится  $n^+ - n - n^+$ . Меняя напряжение на затворе, можно управлять током стока. Если взять подложку n-типа, то можно построить МДП-транзистор с индуцированным р-каналом, который управляется отрицательным напряжением на затворе.

Транзистор с встроенным каналом имеет конструкцию, подобную предыдущей. Между истоком и стоком методом диффузии создают слаболегированный канал с проводимостью  $n^-$ -типа при проводимости подложки р-типа. Возможно другое сочетание. Канал имеет проводимость р-типа, а подложка — проводимость n-типа. В отсутствии напряжения на затворе ток между истоком и стоком определяется сопротивлением слаболегированной области канала. При отрицательном напряжении на затворе концентрация носителей заряда в канале уменьшится, и в нем появится обедненный слой. Сопротивление между истоком и стоком увеличится и ток уменьшится. При положительном напряжении на затворе ток стока увеличится, потому что в канале индуцируется дополнительный отрицательный заряд, увеличивающий его проводимость.

На рисунке 6.5 приведены характеристики прямой передачи МДП-транзисторов с индуцированным (кривая 2) и встроенным (кривая 1) каналами n-каналами. Характеристики р-канальных транзисторов симметричны эти относительно оси ординат.

Теоретически характеристика прямой передачи описывается следующим выражением:

$$I_C = A[U_{зи} - U_{зиПОР}]^2 \text{ при } U_{си} \geq (U_{зи} - U_{зиПОР}). \quad (6.1)$$

Здесь  $A$  - постоянный коэффициент;  $U_{зи\ пор}$  - напряжение, которое для транзистора с индуцированным каналом принято называть пороговым. Инверсия типа проводимости начинается лишь при достижении напряжения  $U_{пор}$ .

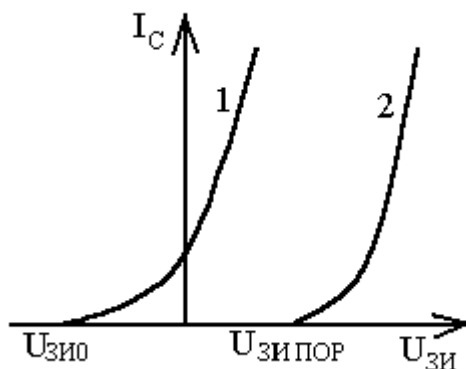


Рис.6.6 – Характеристики прямой передачи МДП ПТ

Выходные характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом  $n$ -типа приведены на рисунке 6.7,а со встроенным каналом - на рисунке 6.7,б.

В области  $U_{си} < |U_{зи} - U_{зи\ пор}|$  теоретический ток стока

$$I_C = 2A[(U_{зи} - U_{зи\ пор})U_{си} - 0,5U_{си}^2]. \quad (6.2)$$

Уравнение (6.2) описывает восходящие ветви выходной характеристики. Входное сопротивление МДП-транзистора из-за наличия изолятора между затвором и каналом составляет около  $10^{12} - 10^{14}$  Ом и уменьшается с ростом частоты вследствие шунтирования входной емкостью транзистора. Выходное сопротивление находится в пределах десятков - сотен килоомов. Входная и выходная емкости составляют единицы пикофарад, а проходная емкость -десятые доли пикофарад.

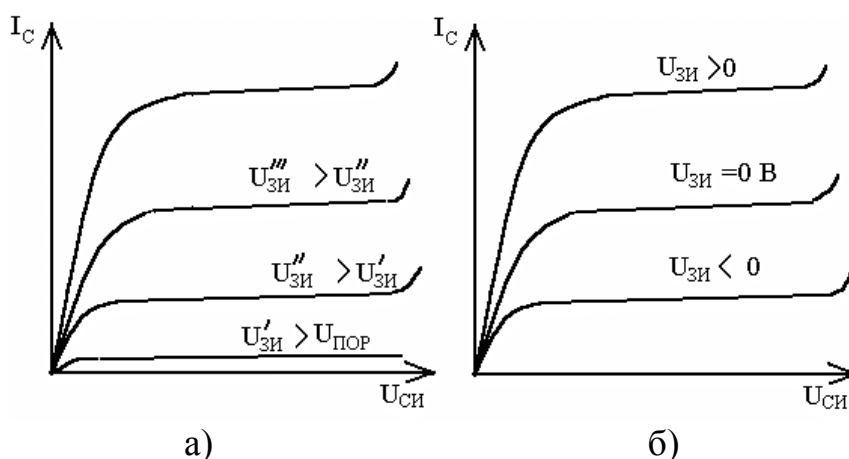


Рис. 6.7 – Выходные характеристики ПТ с индуцированным (а) и встроенным (б) каналами

## Дифференциальные параметры полевых транзисторов

Статические характеристики и их семейства наглядно связывают постоянные токи электродов с постоянными напряжениями на них. Эти связи характеризуют коэффициентами пропорциональности – дифференциальными параметрами.

Дифференциальные параметры устанавливают взаимосвязь между бесконечно малыми приращениями токов и напряжений. Независимо от схемы включения транзистор можно представить в виде 4-х полюсника на входе которого действуют напряжение  $u_1$  и ток  $i_1$ , а на выходе – напряжение  $u_2$  и ток  $i_2$ .

В ПТ используют систему  $y$ -параметров, в которой в качестве независимых параметров используют напряжения  $u_1$  и  $u_2$ , а в качестве зависимых – токи  $i_1$  и  $i_2$ . В ПТ, включенных по схеме с общим истоком  $u_1$  – это напряжение затвор-исток,  $i_1$  – ток затвора,  $u_2$  – напряжение сток-исток, ток  $i_2$  – ток стока.

Система дифференциальных уравнений для ПТ выглядит следующим образом:

$$di_z = \frac{\partial i_z}{\partial u_{zu}} du_{zu} + \frac{\partial i_z}{\partial u_{cu}} du_{cu}$$

$$di_c = \frac{\partial i_c}{\partial u_{z-u}} du_{z-u} + \frac{\partial i_c}{\partial u_{c-u}} du_{c-u}$$

Но в силу особенностей работы ПТ ток затвора пренебрежимо мал. Первое уравнение не имеет смысла. Только ток стока зависит от напряжения на затворе  $u_{z-u}$ , и напряжения стока  $u_{c-u}$ . Поэтому выражение для полного дифференциала тока стока можно представить в виде

$$di_c = \frac{\partial i_c}{\partial u_{z-u}} du_{z-u} + \frac{\partial i_c}{\partial u_{c-u}} du_{c-u} \quad (6.3)$$

В этом выражении частные производные, определяющие приращения тока при изменении соответствующих напряжений, можно рассматривать как дифференциальные параметры транзистора. Приращения статических величин в нашем случае имитируют переменные токи и напряжения.

Это уравнение устанавливает и способ нахождения по статическим характеристикам, и метод измерения  $y$ -параметров. Полагая  $dU_{cu} = 0$ , т.е.  $U_{cu} = \text{const}$ , можно найти  $y_{21}$ , а считая  $dU_{zu} = 0$ , т.е.  $U_{zu} = \text{const}$ , определить  $y_{22}$ .

**Крутизна** характеризует управляющее действие затвора

$$Y_{21} = S = \frac{dI_c}{dU_{z-u}} \mid U_{c-u} = \text{const} \quad (6.4)$$

Ее измеряют в [мА/В] и определяют по управляющей (передаточной) характеристике, как это показано на рис. 6.8, б, заменяя бесконечно малые

приращения конечными, то есть  $S = \frac{\Delta i_c}{\Delta u_{3-и}}$ . Крутизну можно также определить и по выходным характеристикам.

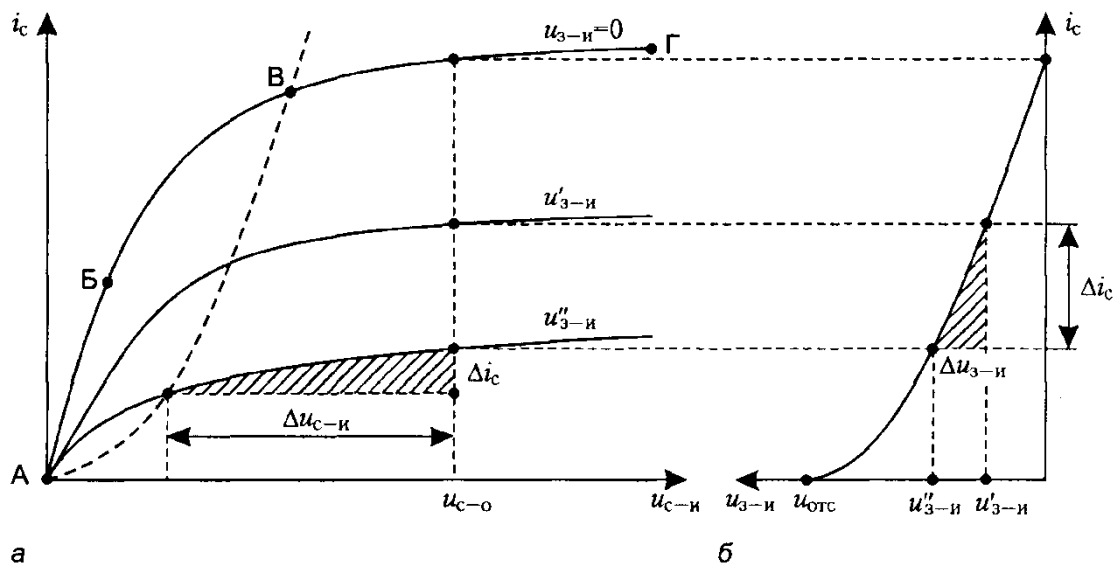


Рис.6.8 – Определение дифференциальных параметров ПТ с управляющим р-п переходом

Для получения высокой крутизны необходимо иметь канал с малой длиной и большой шириной. Увеличивать толщину канала и уменьшать удельное сопротивление нецелесообразно, так как это ведет к увеличению отрицательного порогового напряжения. Практически, длина канала составляет несколько микрометров, а его ширина тысячи микрометров.

**Выходная проводимость** характеризует влияние напряжения стока на ток стока

$$y_{22} = G_i = \frac{di_c}{du_{c-и}} | U_{3-и} = const \quad (6.5)$$

Ее определяют по выходным характеристикам (см. рис. 6.8, а), заменяя бесконечно малые приращения конечными, то есть  $G_i = \frac{\Delta i_c}{\Delta u_{c-и}}$ . Величина выходной проводимости очень мала и обусловлена изменением длины канала при изменении напряжения стока. Чем короче канал, тем больше относительное изменение его длины при одном и том же приращении  $\Delta u_{c-и}$  следовательно, тем больше проводимость  $G_i$ . Часто вместо параметра  $G_i$  применяют обратную величину  $R_i = 1/G_i$ . Этот параметр называется внутренним сопротивлением транзистора.

Помимо рассмотренных параметров используют параметр, характеризующий сравнительное воздействие напряжений стока и затвора на ток стока. Этот параметр называется **коэффициентом усиления  $\mu$** . Он равен отношению



приращений напряжений стока в затвора, вызывающих одинаковые по величине и противоположные по знаку приращения тока стока

$$\mu = - \frac{du_{c-u}}{du_{3-u}} \quad (6.6)$$

Знак «минус» в этой формуле учитывает, что положительному приращению  $du_{c-u}$  увеличивающему ток на величину  $di_c$  соответствует отрицательное приращение  $du_{3-u}$  уменьшающее ток на ту же самую величину  $di_c$ , благодаря чему обеспечивается постоянство тока  $i_c$ .

Параметр  $\mu$  связан с параметрами  $S$  и  $R_i$ .

$$SR_i = \mu \quad (6.7)$$

Полученное соотношение связывает между собой дифференциальные параметры полевого транзистора.

Так же как и в полевом транзисторе с р-п-переходом, дифференциальными параметрами МДП-транзистора являются крутизна  $S$ , внутренняя проводимость  $G_i$ , и коэффициент усиления  $\mu$ . Способ определения их по характеристикам такой же как и для полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом.

Для повышения крутизны надо снижать пороговое напряжение и уменьшать длину канала и толщину подзатворного диэлектрика, а также увеличивать ширину канала. Практически длина канала составляет от 1 до 10 мкм, толщина диэлектрика 0,1 мкм.

Важным параметром полевых транзисторов является величина внутренней проводимости в линейном режиме. Желательно, чтобы она была больше.

Проводимость в линейном режиме численно равна крутизне. Следовательно, увеличивая крутизну, мы тем самым добиваемся того, что выходная характеристика полевого транзистора в линейном режиме идет более круто, что очень важно для полевых транзисторов, работающих в ключевом режиме.