

## 4. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

### 4.1. Общие сведения о полевых транзисторах

Полевыми транзисторами (англ. - **Field-Effect Transistors** или сокращенно **FET**) называются **электропреобразовательные полупроводниковые приборы**, в которых управление током осуществляется путем изменения сопротивления токопроводящего полупроводникового слоя (**канала**) поперечным электрическим полем. В отличие от биполярных транзисторов полевые транзисторы иногда называют **униполярными**, поскольку в них используется движение носителей заряда только одного типа – электронов или дырок, являющихся **основными носителями заряда в канале**.

Упрощенная структура полевого транзистора приведена на рис. 4.1. **Основным элементом** этой структуры является **достаточно тонкий** (толщиной менее микрометра) **однородный полупроводниковый слой**, называемый

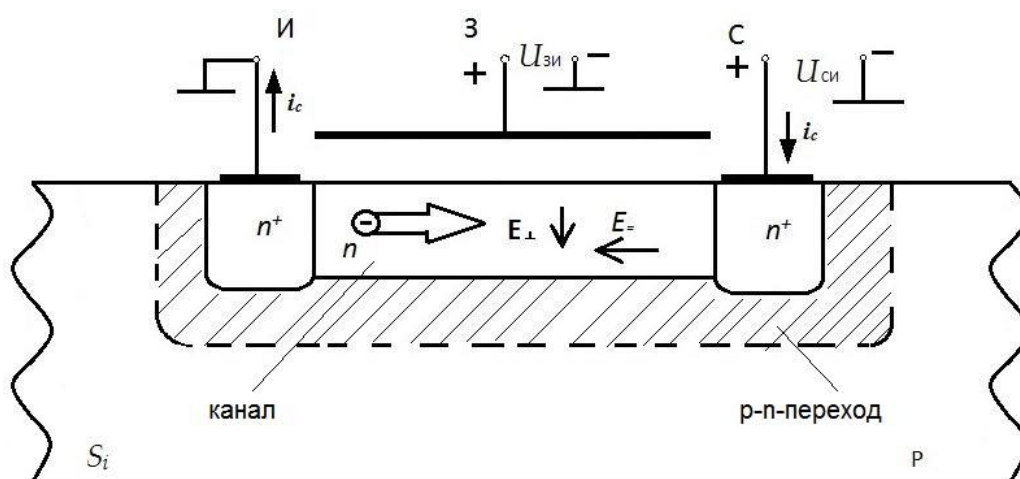


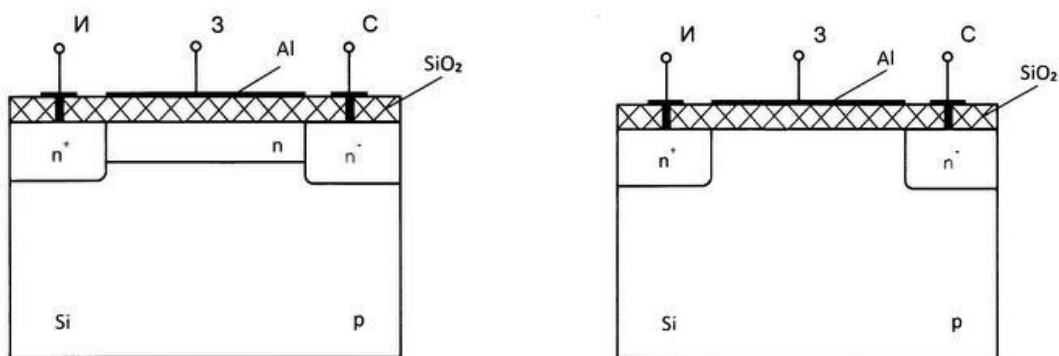
Рис. 4.1. Упрощенная структура полевого транзистора.

**каналом**. По типу электропроводности канала различают **n-канальные** и **p-канальные** транзисторы (на рис. 4.1 приведена структура **n-канального** транзистора). На границах канала имеются **сильнолегированные области** полупроводника, имеющие **внешние контакты**, называемые **электродами** полевого транзистора. Электрод, из которого носители поступают в канал называется **истоком** (англ. - **source**), а электрод, собирающий носители, прошедшие через канал, называется **стоком** (англ. - **drain**). Области **истока**, **стока** и **канала** создаются в **тонком приповерхностном слое** полупроводниковой (чаще всего кремниевой) **подложки**, которая также может иметь **внешний контакт**. Тип электропроводности подложки выбирается **противопо-**

**ложным** типу электропроводности канала, поэтому между каналом и областями истока и стока, с одной стороны, и подложкой, возникает **p-n-переход**, который **изолирует** транзистор от подложки. Заметим, что на последующих рисунках этот переход не будет показан. **Электрод, управляющий током в канале**, называется **затвором** (англ. - **gate**) и располагается в непосредственной близости от канала. Важно подчеркнуть, что **затвор обязательно изолируется от канала**.

При подаче **напряжения между стоком и истоком** в канале возникает **продольное электрическое поле  $E_{\parallel}$** , которое вызывает **дрейфовое движение основных носителей** (электронов в случае канала n-типа) **через канал от истока к стоку**. В результате во внешних цепях истока и стока протекает **дрейфовый ток**, называемый **током стока  $i_C$** . При подаче **на затвор напряжения** в канале возникает **поперечное электрическое поле  $E_{\perp}$** , которое изменяет **сопротивление канала** и, соответственно, **управляет током стока**. **Изменение сопротивления канала поперечным полем может осуществляться двумя способами**. Также **двумя способами** может осуществляться **изоляция затвора от канала**. Соответственно различают две **различные группы полевых транзисторов**.

К первой группе относятся так называемые **транзисторы структуры «металл-диэлектрик-полупроводник»** или **МДП-транзисторы**. В этих транзисторах **металлический** (обычно алюминиевый) **затвор изолирован от полупроводниковой подложки** и, соответственно, от канала тонким слоем диэлектрика. Отсюда происходит термин МДП-транзистор. Поскольку обычно в качестве диэлектрика используется **диоксид кремния  $SiO_2$** , транзисторы МДП-структуры часто называют транзисторами структуры **«металл-оксид-полупроводник»** или **МОП-транзисторами** (англ. - **MOSFET**). В основе механизма управления током в МДП-транзисторах лежит **эффект поля**, представляющий собой **изменение концентрации свободных носителей заряда** в тонком приповерхностном слое подложки **поперечным электрическим полем**. Изменяя концентрацию носителей заряда в канале **поперечное поле изменяет сопротивление канала** и, соответственно, **ток в канале**.



а) со встроенным каналом

б) с индуцированным каналом

Рис. 4.2. Упрощенная структура МДП-транзисторов.

**Транзисторы МДП-структуры, в свою очередь, бывают двух типов. В транзисторах со встроенным каналом (рис. 4,2, а) токопроводящий канал создается (встраивается в структуру) технологическим путем при изготовлении транзистора. В таком транзисторе ток может протекать в канале при отсутствии поперечного поля, т.е. напряжения на затворе. В транзисторах с индуцированным каналом (рис. 4,2, б) токопроводящий канал не создается технологически, и при отсутствии напряжения на затворе ток между истоком и стоком отсутствует. Канал наводится (индуцируется) в приповерхностном слое подложки поперечным электрическим полем, возникающим при подаче на затвор напряжения определенной полярности и величины (большей некоторого порогового значения).**

**Ко второй группе полевых транзисторов относятся также два транзистора. Один из них называется полевым транзистором с управляющим р-п-переходом (ПТУП) (англ. - JFET). Поскольку именно этот транзистор появился раньше других полевых транзисторов, в литературе (особенно старой) его часто называют просто полевым транзистором. Второй транзистор называется полевым транзистором с управляющим переходом «металл-полупроводник» или транзистором с металлополупроводниковым затвором - МЭП-транзистором (англ. - MESFET). В иностранной литературе он часто называется полевым транзистором с затвором Шоттки (ПТШ).**

**Упрощенные структуры ПТУП и МЭП транзисторов приведены соответственно на рис. 4.3, а и 4.3, б. Токопроводящий канал между истоком и стоком в обоих транзисторах создается технологически. Основное различие между ними заключается в устройстве управляющего электрода - затвора.**

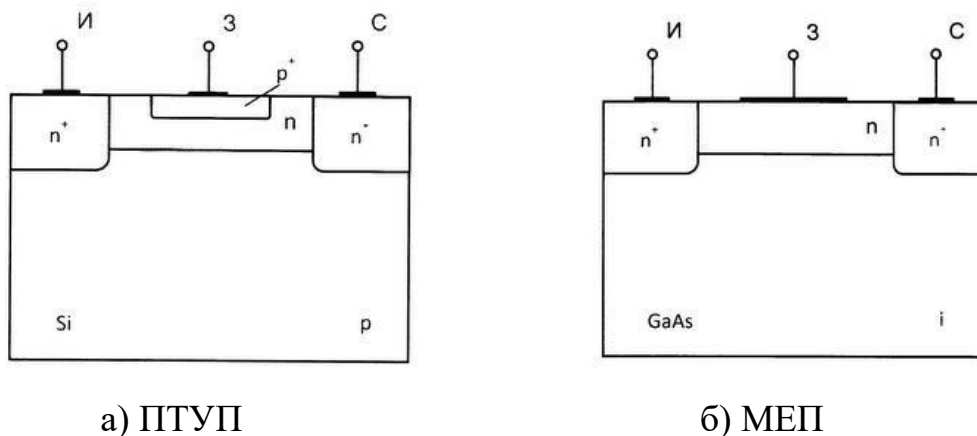
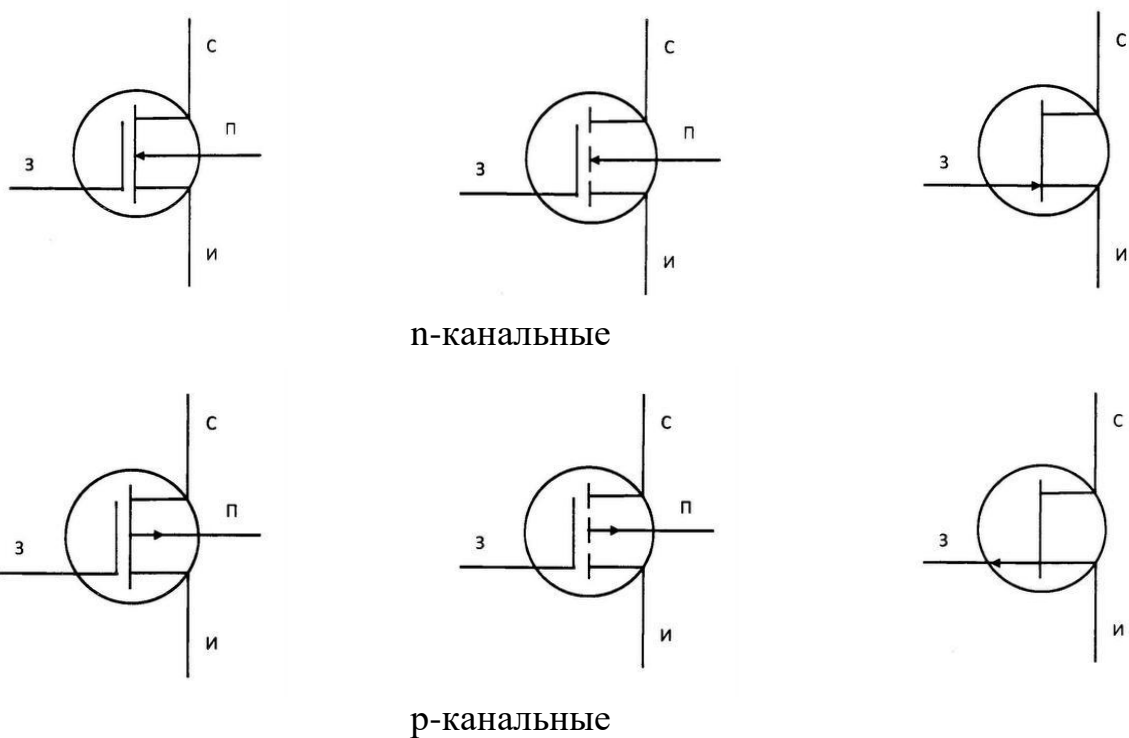


Рис. 4.3. Упрощенные структуры транзисторов.

**В ПТУП затвор выполняется в виде очень тонкой и очень сильно легированной области полупроводника с противоположным каналу типом электропроводности, расположенной в приповерхностном слое канала. Возникающий между затвором и каналом несимметричный р-п-переход (на рис. 4.3, а не показан) расположен преимущественно в канале и называется**

управляющим переходом. При подаче на затвор напряжения, соответствующего обратному смещению управляющего перехода, его толщина увеличивается, а толщина канала уменьшается и, соответственно, увеличивается сопротивление канала, в результате чего ток в канале уменьшается. Заметим, что при этом концентрация носителей заряда в канале не изменяется.

Затвор МЭП-транзистора выполняется в виде тонкой металлической пленки, напыляемой непосредственно на поверхность канала. Параметры металла и полупроводника подбираются таким образом, чтобы контакт «металл-полупроводник» был выпрямляющим. В этом случае в приповерхностном слое канала образуется обедненная подвижными носителями заряда область (на рис. 4.3, б не показана), подобная обедненной области р-п-перехода. При подаче на затвор напряжения, соответствующего обратному смещению контакта «металл-полупроводник», толщина этой области увеличивается, а толщина канала уменьшается. Таким образом механизм управления током в ПГУП и МЭП транзисторах одинаков и основан на изменении сопротивления канала за счет изменения его толщины.



а) МДП-транзисторы со встроенным каналом

б) МДП-транзисторы с индуцированным каналом

в) ПГУП и МЭП транзисторы

Рис. 4.4. Обозначения полевых транзисторов.

Также одинаковым образом осуществляется изоляция затвора от канала. Она обеспечивается за счет высокого сопротивления обедненных областей, разделяющих затвор и канал (р-п-перехода в ПГУП и выпрямляющего контакта «металл-полупроводник» в МЭП-транзисторе).

На рис. 4.4 приведены **условные обозначения** рассмотренных транзисторов в электрических схемах. В связи с тем, что ПТУП и МЕР транзисторы во многом сходны, они имеют в целом **одинаковые обозначения** (см. рис. 4.4, в). В обозначении МЕР-транзистора внутри кружка, обозначающего корпус транзистора, **иногда** указывается характерный значок.

Важно отметить, что **МЕР-транзисторы** создаются на подложке из **арсенида галлия (GaAs)**. Арсенид галлия обладает рядом преимуществ по сравнению с кремнием. В частности, в связи с **большой шириной запрещенной зоны** энергетической диаграммы (**около 1,4 эВ**) подложки из собственного арсенида галлия **являются полуизолирующими**, что облегчает изоляцию транзисторов друг от друга. Кроме того, существенно **увеличивается допустимая температура**, при которой могут работать транзисторы. Другим важным преимуществом арсенида галлия является **значительно (в 5 раз) более высокая подвижность электронов**, что существенно улучшает параметры транзисторов, в первую очередь **повышает их быстродействие**. Арсенид-галлиевые транзисторы являются самыми быстродействующими среди всех рассмотренных транзисторов. Их **граничная частота превосходит 100 ГГц**, т.е. это **СВЧ-транзисторы**.

Подобно биполярным транзисторам полевые транзисторы используются в схемах в качестве **активных элементов усилительных каскадов и электронных ключей**. Среди схем включения полевых транзисторов наибольшее распространение получила схема с **общим истоком (ОИ)**, обладающая **более высокими усилительными свойствами** по сравнению со схемами с **общим стоком (ОС)** и **общим затвором (ОЗ)**. В этом смысле схема с **общим истоком эквивалентна** схеме включения биполярного транзистора с **общим эмиттером (ОЭ)**. Заметим, что ниже рассматривается именно схема ОИ. В этой схеме **исток** полевого транзистора эквивалентен **эмиттеру** биполярного транзистора, а **сток и затвор** эквивалентны соответственно **коллектору и базе**.

Также по аналогии с биполярным транзистором различают **режимы работы полевых транзисторов**. С практической точки зрения интерес представляют три режима, при этом имеет место определенная **аналогия** с режимами биполярного транзистора в плане **зависимостей выходного тока** (тока стока  $i_c$ ) **от входного и выходного напряжений** (напряжений  $u_{зи}$  и  $u_{си}$  соответственно). **Названия** же режимов полевых транзисторов **не совпадают** с названиями режимов биполярного транзистора. Они **определяются характером изменения тока стока**, наглядно проявляющимся на статических характеристиках полевых транзисторов, приведенных ниже на рис. 4.8.

При напряжении  $U_{зи} \leq U_{пор}$  **токопроводящий канал** между истоком и стоком **отсутствует**, и ток стока  $i_c = 0$  (см. рис. 4.8, а). Такой режим называется **режимом отсечки канала** или просто режимом **отсечки** и аналогичен одноименному режиму биполярного транзистора. При  $U_{зи} > U_{пор}$  и относительно небольших напряжениях  $U_{си}$  происходит **резкий рост тока стока**. На самом начальном участке **выходная характеристика практически линейна** (см. рис. 4.8, б), и режим, характеризующийся ростом тока стока, называется **линейным**. Этот режим аналогичен режиму **насыщения** биполярного транзистора. При дальнейшем увеличении напряжения  $U_{си}$  **рост тока стока постепенно насыщается** и полевой транзистор переходит в режим **насыщения**, в котором ток стока почти не изменяется. **Этот режим аналогичен активному режиму** биполярного транзистора, и именно **в этом режиме** полевые транзисторы используются в **усилительных схемах**. В этой связи в последние годы в литературе режим насыщения полевых транзисторов нередко называют **активным режимом**. Возможно с годами это название станет общепринятым, однако в рамках настоящего пособия ниже будет использовано традиционное название – **режим насыщения**.

Подобно биполярному транзистору полевые транзисторы в различных режимах могут быть представлены достаточно простыми **эквивалентными схемами**, приведенными на рис. 4.5. **В режиме отсечки** так же, как и биполярный транзистор, полевые транзисторы представляют собой **разрыв цепи** (см. рис. 4.5, а). **В линейном режиме** полевой транзистор может быть представлен **линейным резистором**, отражающим **сопротивление канала  $r_k$** , **управляемым напряжением  $U_{зи}$**  (см. рис. 4.5, б). Величина этого сопротивления может изменяться от нескольких единиц до нескольких сотен Ом. **В режиме насыщения** ток стока практически не зависит от напряжения  $U_{си}$ , поэтому транзистор отображается **генератором тока, управляемым напряжением  $U_{зи}$**  (см. рис. 4.5, в).

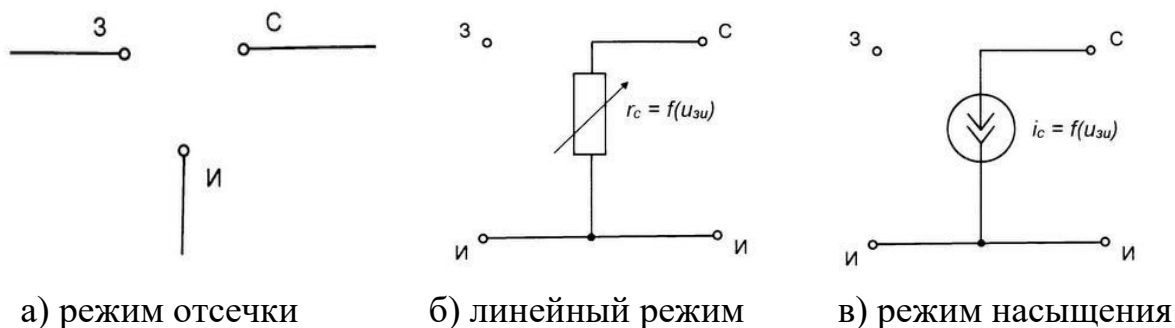


Рис. 4.5. Упрощенные эквивалентные схемы полевых транзисторов.

Как отмечалось выше, **полевые и биполярные транзисторы** используются в различных устройствах и в определенной степени **конкурируют между собой**. Среди достоинств полевых транзисторов по сравнению

с биполярными, прежде всего, следует выделить **очень высокое входное сопротивление** (в статическом режиме и на низких частотах его часто принимают равным бесконечности). Это связано с тем, что управляющий электрод **затвор** (именно он является входным в схеме ОИ) во всех полевых транзисторах **изолирован от канала**. При бесконечном входном сопротивлении **входной ток** (ток затвора  $i_z$ ) **отсутствует**, что существенно облегчает построение многих схем. Кроме того, полевые транзисторы имеют значительно **более высокий коэффициент усиления по току**. Другими преимуществами полевых транзисторов является их **более высокая температурная стойкость** (подробнее см. ниже в п. 4.4). и **низкий уровень собственных шумов**. К достоинствам **биполярных транзисторов** следует отнести **более высокий коэффициент усиления по напряжению**, обусловленный более высокой крутизной биполярных транзисторов по сравнению с полевыми.

#### 4.2. Режим отсечки и линейный режимы работы полевого транзистора

Строго говоря МДП-транзисторы и ПТУП (МЕР-транзисторы) описываются различными уравнениями, но **в первом приближении ток стока может рассчитываться одинаково** во всех полевых транзисторах.

**В режиме отсечки** ( $u_{зи} \leq U_{пор}$ ) ток стока  $i_c = 0$ , т.е. транзистор представляет собой разрыв цепи и **обеспечивает закрытое (разомкнутое) состояние электронного ключа**, схема которого приведена на рис. 4.6, а. Эквивалентная схема разомкнутого ключа приведена на рис. 4.6, б.

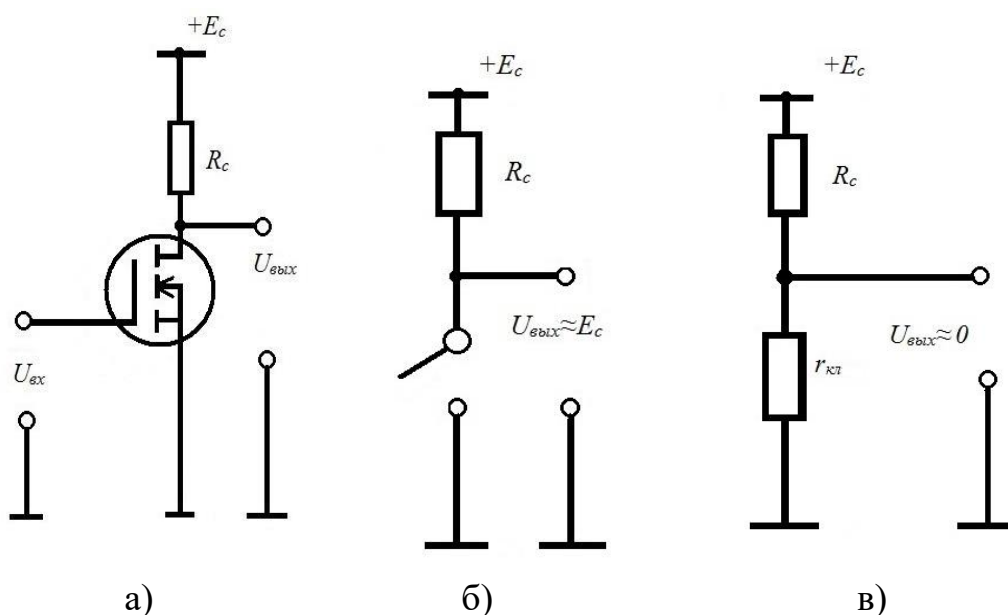


Рис. 4.6. Схема электронного ключа на МДП-транзисторе с индуцированным каналом n-типа (а). Эквивалентные схемы ключа в разомкнутом (б) и замкнутом (в) состояниях.

В линейном режиме ( $u_{си} < u_{зи} - U_{пор}$ ) выражение для расчета тока стока имеет вид

$$i_c = k(u_{зи} - U_{пор} - \frac{u_{си}}{2})u_{си} \quad (4.1)$$

где  $k$  - удельная крутизна полевого транзистора, которая увеличивается при уменьшении длины и увеличении ширины канала. При малых (близких к нулю) напряжениях  $u_{си}$  выражение (4.1) приобретает вид

$$i_c = k(u_{зи} - U_{пор})u_{си} = \frac{u_{си}}{r_{клин}}, \quad (4.2)$$

где  $r_{клин}$  - сопротивление канала в линейном режиме, зависящее от напряжения  $u_{зи}$ . Это сопротивление для мощных полевых транзисторов составляет доли или единицы Ома, что позволяет использовать их в схеме электронного ключа с малым собственным сопротивлением в открытом (замкнутом) состоянии. Эквивалентная схема замкнутого ключа приведена на рис. 4.6, б. Пороговое напряжение  $U_{пор}$  зависит от типа транзистора и его конструктивных особенностей (для n-канального ПТУП и МДП-транзистора со встроенным каналом  $U_{пор} < 0$ , а для n-канального МДП-транзистора с индуцированным каналом  $U_{пор} > 0$ ). Величина  $U_{пор}$  составляет обычно единицы вольт.

Переключение полевого транзистора из режима отсечки в линейный режим в электронных ключах происходит аналогично биполярному транзистору. Как уже отмечалось, в режиме отсечки ( $u_{зи} \leq U_{пор}$ ) ток через нагрузку не протекает ( $i_c = 0$ ). В том случае, когда на вход подается высокое напряжение  $u_{зи}$ , транзистор переходит в линейный режим, т.к. с ростом тока стока уменьшается и стремится к нулю напряжение на стоке  $u_{си} = E_c - i_c R_c$ . При этом в цепи стока протекает большой ток  $i_c = \frac{E_c}{R_c + r_{клин}} \approx \frac{E_c}{R_c}$ , практически полностью определяемый питающим напряжением  $E_c$  и сопротивлением  $R_c$ .

### 4.3. Режим насыщения полевого транзистора

Режим насыщения в полевых транзисторах наступает при достаточно большом напряжении  $u_{си} > U_{нас}$ , где  $U_{нас} = u_{зи} - U_{пор}$  - напряжение насыщения. В этом режиме ток стока практически перестает зависеть от напряжения  $u_{си}$ . Соответственно транзистор представляет собой генератор тока, управляемый напряжением  $u_{зи}$  (см. рис. 4.5, в). В этом режиме полевые транзисторы используются в усилительных схемах. Насыщение роста тока стока при увеличении напряжения  $u_{си}$  связано с насыщением дрейфовой скорости электронов в сильных электрических полях (см. выше - п. 1.5).

При значительных напряжениях  $u_{си}$  необходимо учитывать увеличение потенциала канала от истока к стоку, которое вызывает соответствующее сужение канала от истока к стоку. При постоянном токе в канале и неизменной концентрации электронов, создающих этот ток, уменьшение площади



поперечного сечения канала приводит к увеличению скорости дрейфового движения электронов. При напряжении  $u_{си} = U_{нас}$  на границе канала со стоком происходит насыщение дрейфовой скорости электронов. При более высоких значениях напряжения  $u_{си} > U_{нас}$  сечение, в котором происходит насыщение скорости, смещается в сторону истока, и на интервале между этим сечением и стоком электроны движутся со скоростью насыщения, в результате чего ток стока практически не изменяется (см. рис. 4.8, б). Слабый рост тока связан с тем, что при увеличении напряжения  $u_{си}$  насыщение скорости происходит при большей площади поперечного сечения канала. Увеличение напряжения насыщения с ростом напряжения  $u_{зи}$  объясняется тем, что при большем напряжении  $u_{зи}$  канал оказывается шире, и насыщение скорости достигается при большем напряжении  $u_{си} = U_{нас}$ .

В учебной литературе (см., напр., [1,2]) насыщение роста тока стока связывается с эффектом отсечки канала на границе со стоком. Подобная трактовка требует ряда допущений, затрудняющих понимание физических процессов, протекающих в полевых транзисторах.

В режиме насыщения выражение для тока стока имеет вид

$$i_c = \frac{k}{2} (u_{зи} - U_{пор})^2. \quad (4.3)$$

В случае, когда требуется учесть слабое влияние напряжения  $u_{си}$  на ток стока, в формулу (4.3) вносят уточняющую поправку

$$i_c = \frac{k}{2} (u_{зи} - U_{пор})^2 \left( 1 + \frac{u_{си}}{U_A} \right), \quad (4.4)$$

где  $U_A$  - параметр, аналогичный напряжению Эрли биполярного транзистора.

Таким образом, работа полевого транзистора в режиме насыщения во многом аналогична работе биполярного транзистора в активном режиме. Вместе с тем практическое отсутствие входного тока значительно упрощает построение различных схем на полевых транзисторах. На рис. 4.7, а приведена схема усилительного каскада на n-канальном полевом транзисторе с управляющим переходом, включенном по схеме ОИ. В этой схеме для запирающего управляющего перехода используется дополнительный источник питания  $E_3$ .

На рис. 4.7, б приведена малосигнальная эквивалентная схема усилительного каскада на полевом транзисторе. В малосигнальном режиме ток стока и напряжения на затворе и на стоке можно заменить их малыми прираще-

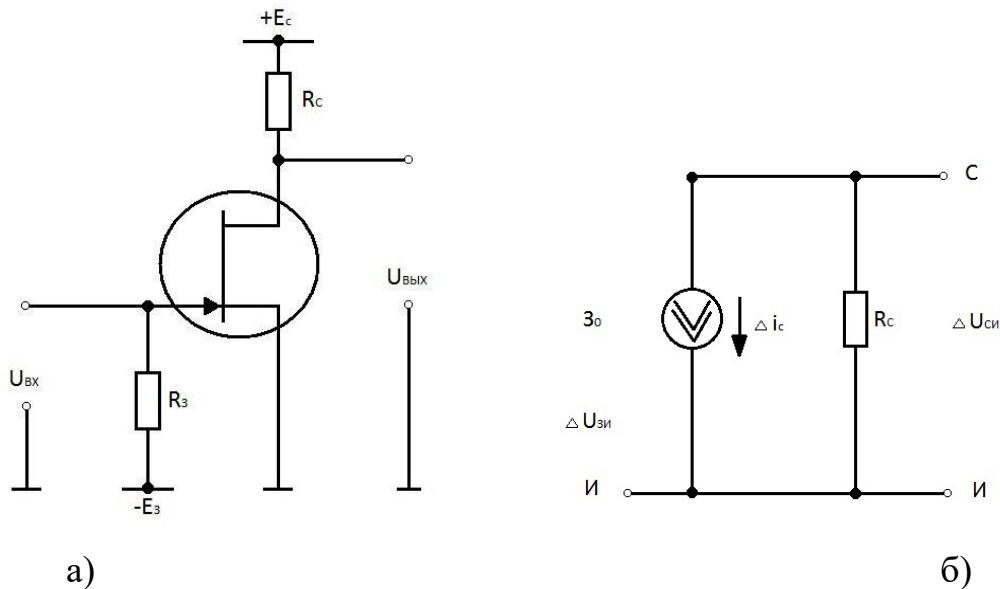


Рис. 4.7. Схема усилительного каскада на ПТУП (а) и малосигнальная эквивалентная схема каскада (б).

ниями. Тогда, записывая выражение для полного дифференциала тока стока, получаем

$$\Delta i_c = \frac{\partial i_c}{\partial u_{зи}} \Delta u_{зи} + \frac{\partial i_c}{\partial u_{си}} \Delta u_{си} = S \Delta u_{зи} + \frac{\Delta u_{си}}{r_c}, \quad (4.5)$$

где  $S = \frac{\partial i_c}{\partial u_{зи}} = k(u_{зи} - U_{пор})$  - крутизна, а  $r_c = \frac{\partial u_{си}}{\partial i_c}$  - выходное дифференциальное сопротивление транзистора. В дальнейшем ввиду слабого влияния напряжения  $u_{си}$  на ток стока в режиме насыщения будем полагать  $r_c = \infty$ , тогда  $\Delta i_c = S \Delta u_{зи}$ . Соответственно, коэффициент усиления по напряжению равен

$$K_U = \frac{\Delta u_{си}}{\Delta u_{зи}} = -S R_c. \quad (4.6)$$

Знак минус отражает тот факт, что приращения напряжений  $\Delta u_{зи}$  и  $\Delta u_{си}$  имеют разные знаки. В случае усиления малых синусоидальных сигналов знак минус отражает противофазность входного и выходного напряжений. Отметим также, что крутизна полевых транзисторов существенно ниже, чем биполярных, и, соответственно, коэффициент усиления по напряжению у полевых транзисторов также значительно ниже, чем у биполярных. Коэффициент усиления по току полевых транзисторов в силу малости входного тока (тока затвора) оказывается очень большим и значительно превосходит коэффициент усиления по току биполярного транзистора. На низких частотах ток затвора принимают равным нулю (см. рис. 4.7, б). В этом случае коэффициент усиления по току формально оказывается бесконечным и не рассчитывается. Что касается коэффициента усиления мощности  $K_P = K_I K_U$ , то в связи с более низким коэффициентом усиления по напряжению полевых транзисторов, он оказывается сравнимым для полевых и биполярных транзисторов.

#### 4.4. Статические характеристики полевого транзистора

В связи с тем, что все рассмотренные выше (см. п. 4.1) полевые транзисторы имеют единый принцип работы, их **статические характеристики различаются очень незначительно**. В то же время имеет место определенная **специфика** характеристик полевых транзисторов по сравнению с характеристиками биполярных транзисторов. Поскольку в статическом режиме **входной ток** (ток затвора в схеме ОИ) **отсутствует**, **входная характеристика не используется** для описания работы полевых транзисторов. Влияние входного и выходного напряжений на выходной ток описывается **семействами управляющих и выходных характеристик**. Следует также отметить, что поскольку в режиме насыщения напряжение  $u_{си}$  практически не влияет на ток стока, **управляющие характеристики, построенные при различных напряжениях  $u_{си} > U_{нас}$ , практически сливаются друг с другом**, в связи с чем обычно приводится только **одна управляющая характеристика**.

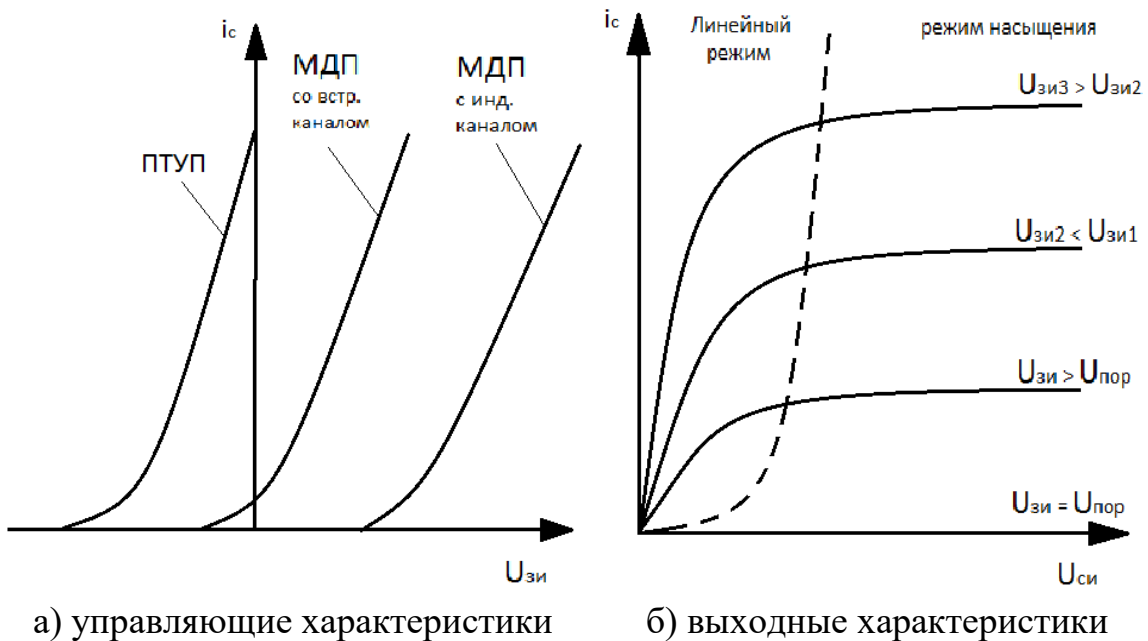


Рис. 4.8. Статические характеристики n-канальных полевых транзисторов в схеме ОИ.

На рис. 4.8, а приведены **управляющие характеристики различных n-канальных полевых транзисторов в схеме ОИ**. Характеристики получены при постоянном напряжении  $u_{си} > U_{нас}$ , т.е. **соответствуют режиму насыщения**. Как видно из рисунка, **характер зависимости тока стока от напряжения  $u_{зи}$  для всех транзисторов оказывается одинаковым** (он описывается квадратичной параболой). **Различными оказываются только пороговые напряжения**, при которых в транзисторах образуется токопроводящий канал. Как отмечалось выше, **в ПТУП и МДП-транзисторе со встроенным каналом  $U_{пор} < 0$ , а в МДП-транзисторе с индуцированным каналом  $U_{пор} > 0$** . Следует также

отметить, что управляющая характеристика ПТУП лежит целиком в области отрицательных напряжений  $u_{зи}$ , поскольку при  $u_{зи} > 0$  открывается управляющий переход, появляется ток в цепи затвора и резко падает входное сопротивление транзистора. Участки характеристик, соответствующие напряжениям  $u_{зи} < U_{пор}$ , при которых отсутствует канал, отражают режим отсечки.

На рис. 4.8, б приведено семейство выходных характеристик, построенных при различных значениях напряжения  $u_{зи}$ . Вид данного семейства оказывается одинаковым для любого из рассмотренных транзисторов. Различие заключается только в конкретных значениях напряжения  $u_{зи}$ , при которых построены характеристики. Крутые участки характеристик соответствует линейному режиму транзистора, пологие участки соответствуют режиму насыщения. Крутые и пологие участки разделяет пунктирная линия, соответствующая условию  $u_{си} = U_{нас}$  и представляющая собой квадратичную параболу. Следует также отметить, что в отличие от биполярного транзистора (см. рис. 3.16) крутые участки выходных характеристик при разных значениях напряжения  $u_{зи}$  расходятся «веером». Начальные области выходных характеристик, соответствующие близким к нулю напряжениям  $u_{си}$ , линейны. Это позволяет использовать полевые транзисторы в качестве линейных резисторов, управляемых напряжением  $u_{зи}$  (см. рис. 4.5, б), в схемах аттенуаторов и аналоговых ключей.

Аналогичным образом выглядят статические характеристики р-канальных полевых транзисторов с той разницей, что полярности напряжений и направление тока стока меняются на обратные.

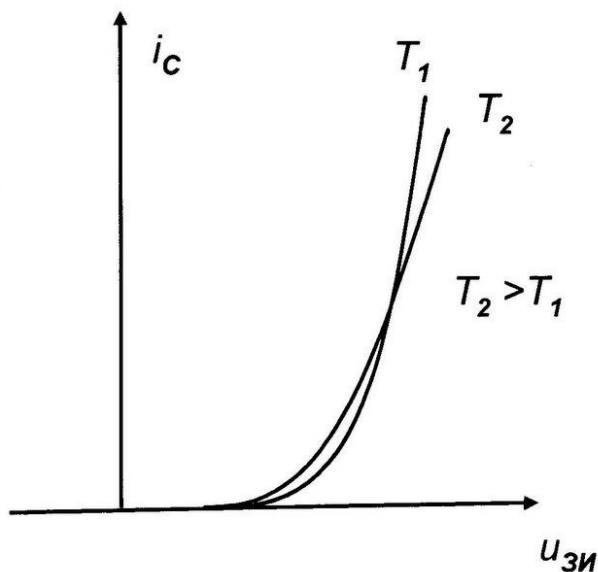


Рис. 4.9. Управляющие характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом n-типа при различных температурах.

В заключении остановимся на влиянии температуры на работу полевых транзисторов. На рис. 4.9 показаны две управляющие характеристики МДП-

транзистора с индуцированным каналом, полученные при различных температурах. В первую очередь отметим, что **при больших токах** с ростом температуры **ток стока уменьшается**, а не увеличивается, как ток коллектора в биполярном транзисторе. Это объясняется **уменьшением подвижности носителей** с ростом температуры. С практической точки зрения это означает **невозможность первичного теплового пробоя**. С другой стороны, **при малых токах** с ростом температуры **ток стока увеличивается** из-за уменьшения порогового напряжения. На характеристиках можно отметить **термостабильную точку**, в которой **ток стока практически не зависит от температуры**. В целом **зависимость тока стока полевых транзисторов от температуры** выражена значительно **слабее**, чем в биполярных транзисторах.

#### 4.5. Математические модели и эквивалентные схемы полевых транзисторов

Поскольку различные полевые транзисторы объединяет **единый принцип работы**, математические модели, описывающие их работу, и соответствующие им эквивалентные схемы также **оказываются одинаковыми**. На рис. 4.10, а приведена упрощенная универсальная эквивалентная схема полевого транзистора, соответствующая **высокочастотной модели большого сигнала**. **Нелинейная связь** тока стока с напряжениями  $u_{зи}$  и  $u_{си}$  определяется в разных режимах выражениями (4.1) – (4.4). **Инерционность** процессов в транзисторах учитывается с помощью **нелинейных емкостей**  $C_{зи}$  и  $C_{зс}$ . Выражения, связывающие их с напряжениями  $u_{зи}$  и  $u_{си}$ , различаются в зависимости от типа полевого транзистора. Более подробную информацию, включая параметры конкретных полевых транзисторов можно найти в **компьютерных программах моделирования** таких, как **PSPICE, AIM - SPICE, Desinlab** и др.

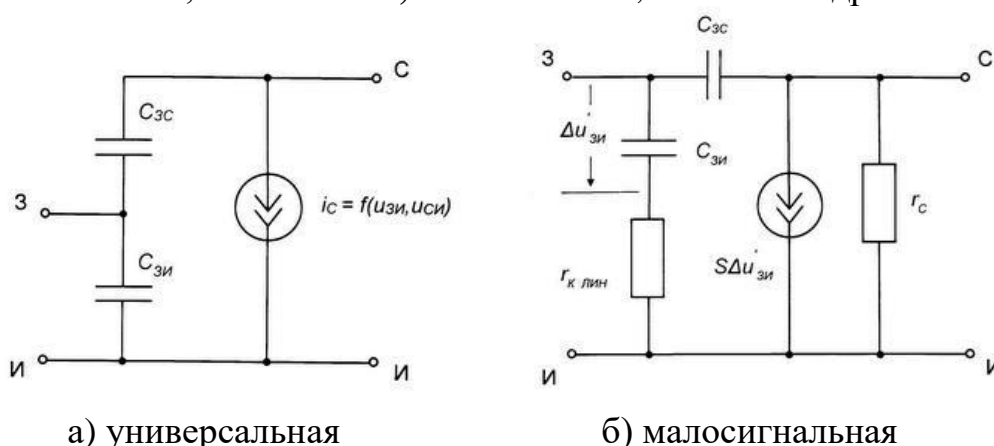


Рис. 4.10. Эквивалентные схемы полевого транзистора.

На рис. 4.10, б приведена **линеаризованная** (малосигнальная) **эквивалентная схема** полевого транзистора. Отметим, что генератор тока управляется **напряжением затвор-канал**  $u_{зк} = \Delta u_{зи}$ , меньшим напряжения  $u_{зи}$ . Можно показать, что **постоянная времени заряда** емкости затвор-канал практически

совпадает с **временем пролета носителей через канал** транзистора. За исключением самых быстродействующих транзисторов этим временем можно пренебречь и, следовательно, исключить  $r_{к\text{лин}}$  из эквивалентной схемы (закоротить его).

Следует отметить, что **на высоких частотах входное сопротивление и, соответственно, коэффициент усиления по току** полевых транзисторов **снижаются на порядки**. Например, при  $r_{к\text{лин}} = 500 \text{ Ом}$  и  $C_{зи} = 7 \text{ пФ}$  на частоте **10 МГц** входное сопротивление и коэффициент усиления по току **уменьшаются в 100 раз** по сравнению с низкочастотным значением, тогда как коэффициент усиления по напряжению практически не изменяется.

В заключение отметим, что линейную (малосигнальную) модель достаточно легко использовать в практических расчетах даже без использования компьютера.

#### 4.6. Полевые транзисторы репрограммируемых постоянных запоминающих устройств.

Помимо использования в качестве активных элементов усилительных каскадов и электронных ключей полевые транзисторы могут использоваться и в **других применениях**.

На рис. 4.11, а приведена упрощенная структура специального транзистора, называемого **МДП-транзистором с плавающим затвором** и используемого для хранения двоичной информации. В отличие от обычного МДП-

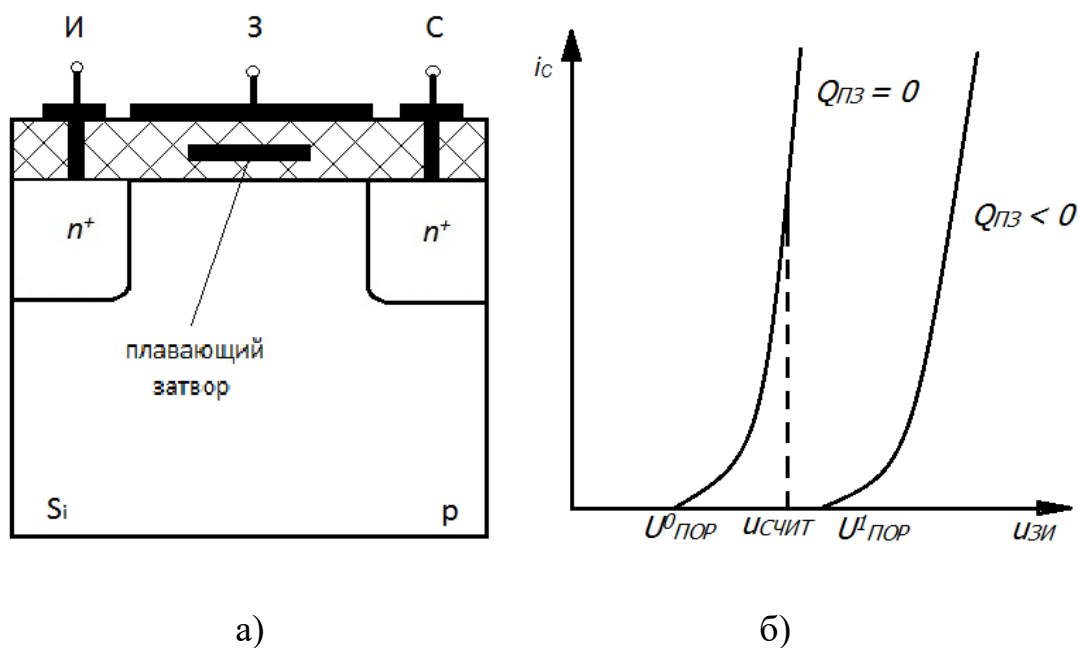


Рис. 4.11. Структура (а) и управляющие характеристики (б) МДП-транзистора с плавающим затвором.

транзистора с индуцированным каналом этот транзистор имеет **два затвора**. Помимо управляющего затвора, имеющего внешний вывод, в нем создается **дополнительный затвор, не имеющий внешнего вывода**. Этот затвор располагается под управляющим затвором и со всех сторон **окружен диэлектриком** (как бы «плавает» в диэлектрике – отсюда его название). **Заряд электронов на этом затворе может сохраняться годами**. Он частично **экранирует поперечное поле**, создаваемое в приповерхностном слое подложки при подаче напряжения на управляющий затвор, и, соответственно, **увеличивает пороговое напряжение**, при котором между истоком и стоком образуется токопроводящий канал.

На рис. 4.11, б приведены две управляющие характеристики транзистора с плавающим затвором, **соответствующие отсутствию и наличию заряда электронов** на плавающем затворе. Кодирование двоичной информации осуществляется следующим образом. **Логическому нулю** сопоставляется состояние, при котором **заряд электронов на плавающем затворе отсутствует** ( $Q_{пз} = 0$ ), **логической единице** – состояние, при котором **заряд имеет место** ( $Q_{пз} < 0$ ). При этом **различаются пороговые напряжения**, соответствующие логическим нулю и единице ( $U^0_{пор} < U^1_{пор}$ ). Для считывания информации достаточно **подать на управляющий затвор напряжение**  $U^0_{пор} < U_{счит} < U^1_{пор}$ , и по отсутствию или наличию тока стока определить значение двоичной переменной.

Существуют различные **способы программирования транзистора**. Например, для **записи логической единицы** (создания заряда электронов на плавающем затворе) можно подать на сток **напряжение равное пробивному**. При этом в обедненной области вблизи стока начнется **лавинное размножение носителей заряда, часть из которых** будет иметь энергию достаточную для преодоления потенциального барьера на границе полупроводника и диэлектрика и **окажется на плавающем затворе**. Для **стирания логической единицы** (удаления заряда электронов с плавающего затвора) можно использовать **внешний фотоэффект**. При облучении транзистора ультрафиолетовым излучением **кванты света будут выбивать электроны с плавающего затвора**. В **современных конструкциях** для записи и стирания используют **дополнительные затворы, расположенные на туннельно-прозрачном расстоянии** (единицы нанометров) от плавающего затвора. Подобные транзисторы находят широкое применение в ряде **репрограммируемых логических схем и в устройствах флэш памяти**.