

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.

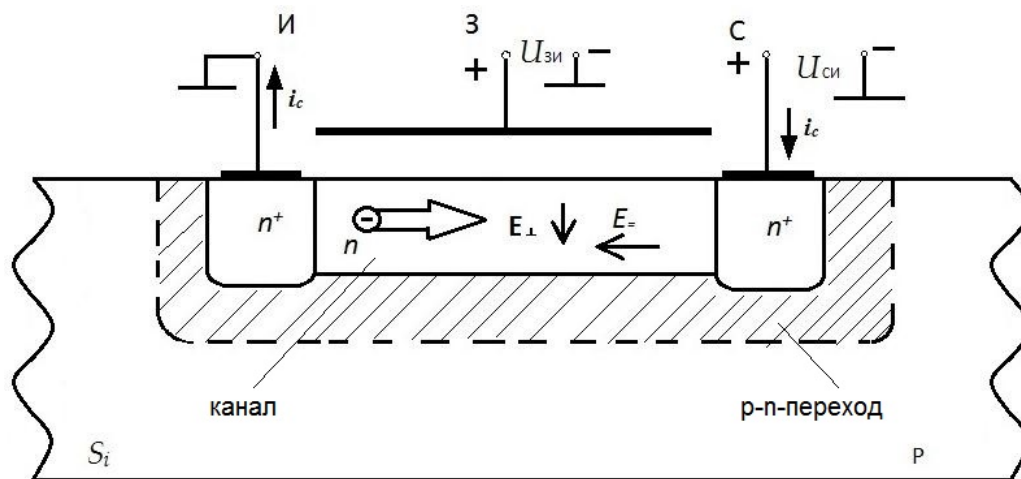


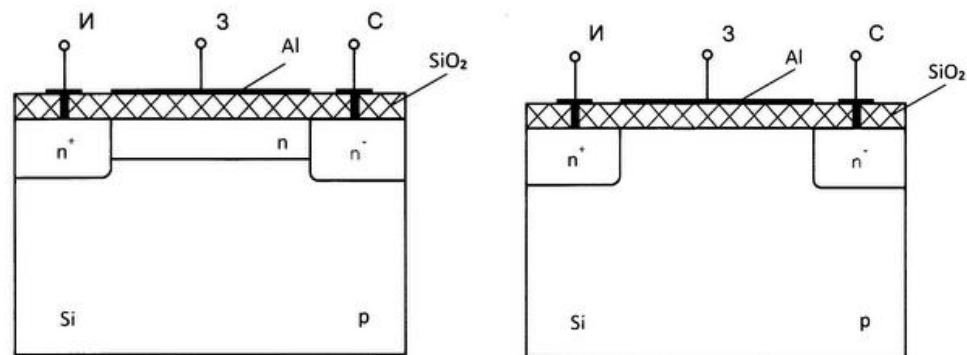
Рис. 4.1. Упрощенная структура полевого транзистора.

Упрощенная структура полевого транзистора приведена на рис. 4.1. Основным элементом этой структуры является достаточно тонкий (толщиной менее микрометра) однородный полупроводниковый слой, называемый 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 канал создаются в тонком приповерхностном слое полу-проводниковой (чаще всего кремниевой) подложки, которая также может иметь внешний контакт. Тип электропроводности подложки выбирается противоположным 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  $E_x$ , **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  $\text{SiO}_2$ , 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.

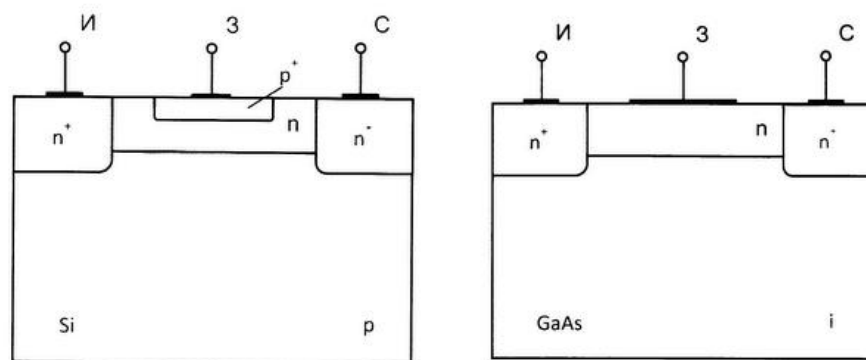
Транзисторы МДП-структуры, в свою очередь, бывают двух типов. В транзисторах со встроенным каналом (рис. 4,2, а) токопроводящий канал создается (встраивается в структуру) технологическим путем при изготовлении транзистора. В таком транзисторе ток может протекать в канале при отсутствии поперечного поля, 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 p-n-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 - МЕР-транзистором (англ. - MESFET). В иностранной литературе он часто называется полевым транзистором с затвором Шоттки (ПТШ).

Упрощенные структуры ПТУП и МЕР 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.



а) ПТУП

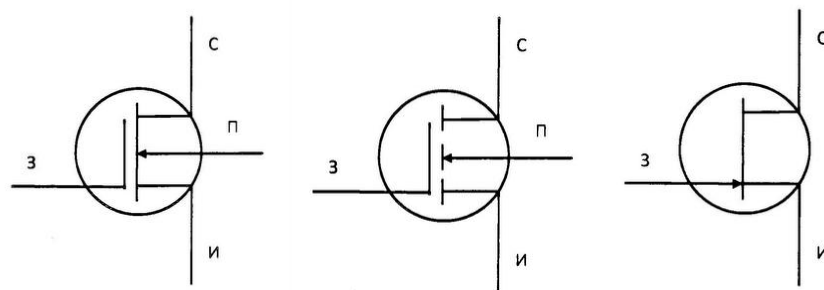
б) МЕР

Рис. 4.3. Упрощенные структуры транзисторов.

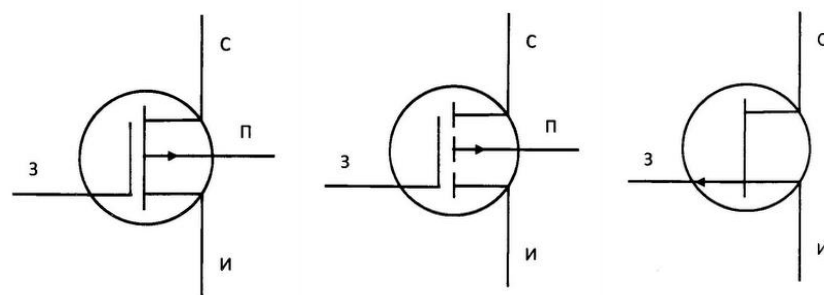
В ПТУП затвор выполняется в виде **очень тонкой и очень сильно легированной области** полупроводника с противоположным каналу типом электропроводности, расположенной в приповерхностном слое канала. Возникающий между затвором и каналом несимметричный p-n-переход (на рис. 4.3, а не показан) расположен 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 при-поверхностном слое канала образуется **обедненная** подвижными носителями заряда **область** (на рис. 4.3, б не показана), подобная **обедненной области р-n-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 ПТУП и МЭП транзисторах одинаков** и основан на изменении сопротивления канала за счет изменения **его толщины**.



п-канальные



р-канальные

а) МДП-транзисторы

б) МДП-транзисторы

в) ПТУП и МЭП

со встроенным каналом

с индуцированным каналом

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 (p-n-перехода в ПТУП и выпрямляющего контакта «металл-полупроводник» в МЕР-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  $i_c = 0$ . 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**, 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  $r_k$** , управляемое 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).

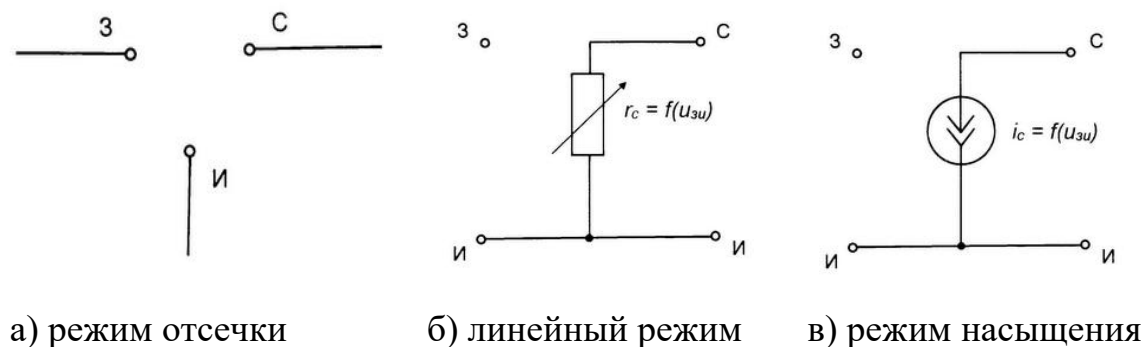


Рис. 4.5. Упрощенные эквивалентные схемы полевых транзисторов.

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.