

## ЛЕКЦИЯ 5. 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.

### 5.1. Транзисторы с $p$ - $n$ -переходом

Анализ работы полевого транзистора с  $p$ - $n$ -переходом проведем на его модели, показанной на рис. 5.1, а.

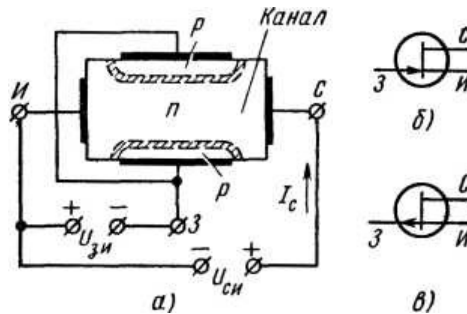


Рис. 5.1. Конструкция полевого транзистора с  $p$ - $n$ -переходом (а); условные обозначения полевого транзистора с  $p$ - $n$ -переходом и каналом  $n$ -типа (б); с  $p$ - $n$ -переходом и каналом  $p$ -типа (в).

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. Условные обозначения полевых транзисторов с каналами  $n$ - и  $p$ - типов приведены на рис. 5.1, б, 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  $p$ - $n$ -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 примесей, чем  $n$ -слой, изменение ширины  $p$ - $n$ -перехода 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 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 по-

казаны участки  $n$ -слоя, расположенные вне  $p$ - $n$ -переходов.

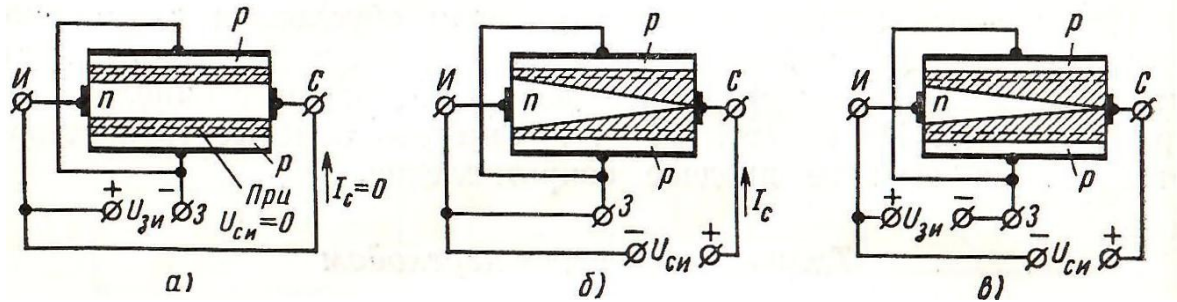


Рис. 5.2. Поведение полевого транзистора с  $p$ - $n$ -переходом и каналом  $n$ -типа при подключе-

нии 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  $I_c$ , поскольку  $U_{си} = 0$ .

Рис. 5.2, б 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 напряже-

ние, 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.

Рассмотрим вольт-амперные характеристики полевых транзисторов с  $p$ - $n$ -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.

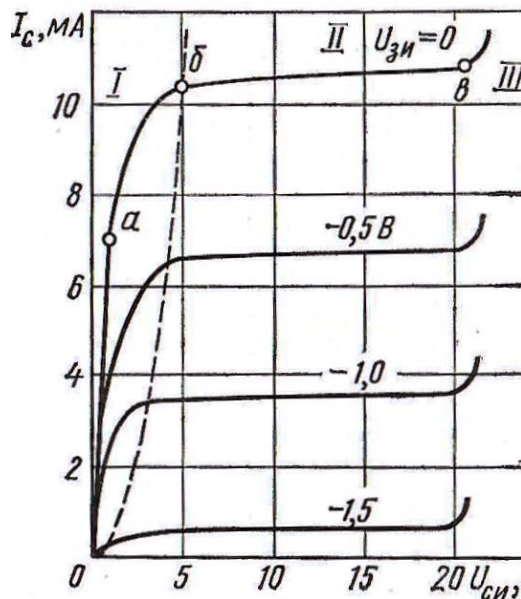


Рис. 5.3. Семейство стоковых; (выходных) характеристик полевого транзистора с  $p$ - $n$ -переходом и каналом  $n$ -типа.

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.

Рассмотрим выходную характеристику полевого транзистора при  $U_{зи} = 0$ . 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 зави-

симось  $I_c = f(U_{\text{си}})$ . По мере увеличения напряжения  $U_{\text{си}}$  (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 б) 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  $U_{\text{си}}$  будет увеличиваться сопротивление канала. Некоторое увеличение тока  $I_c$  на экспериментальных кривых объясняется наличием различного рода утечек.

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

Приложение к затвору обратного напряжения вызывает сужение канала (см. рис. 5.2, а) 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  $U_{\text{зи}}$  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 стока близок к нулю. Оно соответствует напряжению запирающего прибора по цепи затвора и называется напряжением запирающего или отсечки  $U_{\text{зи0}}$ . Числовое значение

$U_{зи0}$  равно напряжению  $U_{си}$  в точке б вольт-амперной характеристики при  $U_{зи}=0$ .

Поскольку управление выходным током полевых транзисторов происходит под 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:

$I_c = f(U_{зи})|_{U_{си} = \text{const}}$ . Примерный вид этой характеристики показан на рис. 5.4.

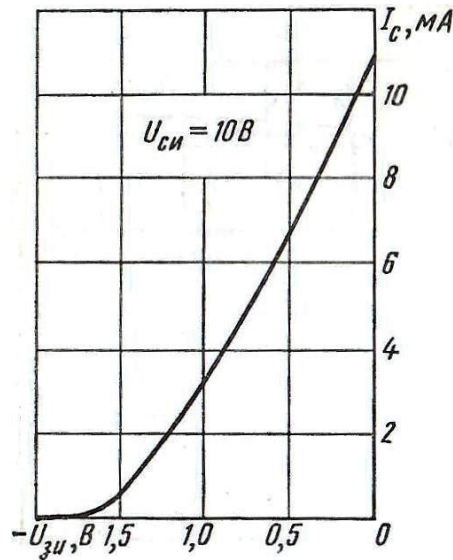


Рис. 5.4. Стоко-затворная характеристика транзистора с  $p$ - $n$ -переходом и каналом  $n$ -типа.

Стоко-затворная характеристика связана с выходными характеристиками полевого транзистора и может быть построена по ним.

Основными параметрами полевого транзистора являются: максимальный ток стока

$I_{с \text{ max}}$ , максимальное напряжение стока  $U_{си \text{ max}}$ , напряжение отсечки  $U_{зи0}$ , внутрен-

нее сопротивление  $r_i$ , крутизна  $S$ , входное сопротивление  $r_{вх}$ , а также межэлектродные емкости затвор – исток  $C_{зи}$ , затвор – сток  $C_{зс}$  и сток – исток  $C_{си}$ .

Максимальное значение тока стока  $I_{с\max}$  соответствует его значению в точке  $\nu$  на выходных характеристиках (при  $U_{зи}=0$ ). Максимальное значение напряжения сток – исток  $U_{си\max}$  выбирают в 1,2-1,5 раза меньше напряжения пробоя участка сток - затвор при  $U_{зи}=0$ . Напряжению отсечки  $U_{зи0}$  соответствует напряжение на затворе при токе

стока, близком нулю. Внутреннее сопротивление  $r_i = \frac{dU_{cu}}{dI_c} \Big|_{U_{зи}=\text{const}}$  транзистора характеризует наклон выходной характеристики на участке II (см. рис. 5.3). Крутизна стоко-затвор-

ной характеристики  $S = \frac{dI_c}{dU_{зи}} \Big|_{U_{си}=\text{const}}$  отражает влияние напряжения затвора на выходной ток транзистора. Крутизну  $S$  находят по стоко-затворной характеристике прибора (рис. 5.4).

Входное сопротивление  $r_{вх} = \frac{dU_{зи}}{dI_c}$  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  $C_{зи}$  и  $C_{зс}$  связаны главным образом с наличием в приборе  $p$ - $n$ -переходов, примыкающих соответственно к истоку и стоку.

Полевые транзисторы с  $p$ - $n$ -переходом выпускаются на токи  $I_{с\max}$  до 50 мА и



напряжения до 50 В.

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.

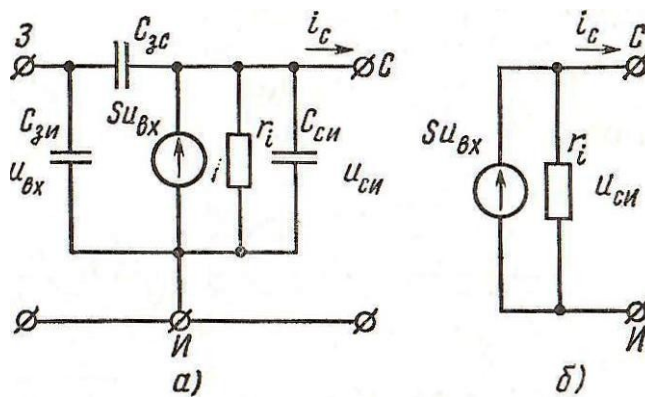


Рис. 5.5. Схема замещения полевого транзистора с  $p$ - $n$ -переходом в области высоких (а) и низких (б) частот.

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

$S \cdot U_{\text{вх}}$ . Параллельно источнику тока включено сопротивление  $r_i$ , учитывающее влия-

ние 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.

## 5.2. МДП (MOSFET)-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. В иностранной литературе МДП-транзисторы называются *MOSFET* (Metal – Oxide – Semiconductor – Field – Effect – Transistor).

МДП-транзисторы (структура металл – диэлектрик – полупроводник) выполняют из кремния. В качестве диэлектрика используют окисел кремния  $\text{SiO}_2$ . Отсюда другое название этих транзисторов – МОП-транзисторы (структура металл – окисел – полупроводник). Наличие диэлектрика обеспечивает высокое входное сопротивление рассматриваемых транзисторов  $(10^{12} \div 10^{14} \text{ Ом})$ .

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 четырехэлектродный прибор. Четвертым электродом (подложкой), выполняющим вспомогательную функцию, является вывод от подложки исходной полупроводниковой пластины. МДП-транзисторы могут быть с каналом  $n$ - или  $p$ -типа. Условные обозначения МДП-транзисторов показаны на рис. 5.6, *a-e*.

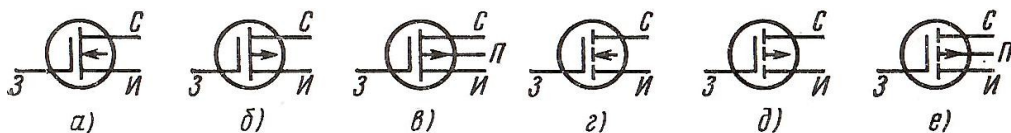


Рис. 5.6. Условные обозначения МДП-транзисторов со встроенным каналом  $n$ -типа (а),  $p$ -типа (б) и выводом от подложки (в); с индуцированным каналом  $n$ -типа (г),  $p$ -типа (д) и выводом от подложки (е).

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  $\text{SiO}_2$  выполняет функции защиты поверхности, близлежащей к истоку и стоку, а также изоляции затвора от канала. Вывод подложки (если он имеется) иногда присоединяют к истоку.

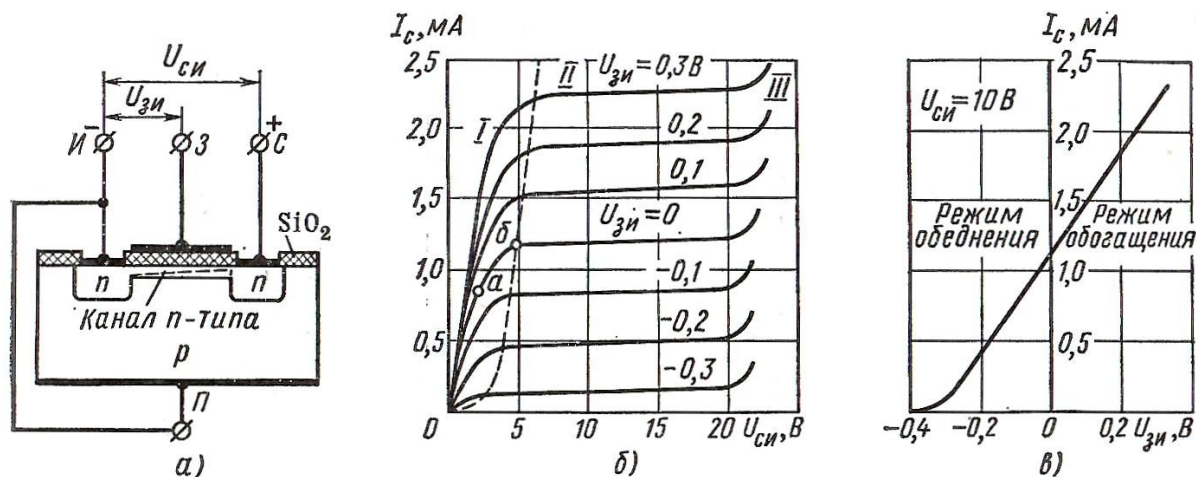


Рис. 5.7. Конструкция МДП-транзистора со встроенным каналом  $n$ -типа (а); семейство его стоковых характеристик (б); стоко-затворная характеристика (в).

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-а, 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.

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  $U_{зи} > 0$  распо-

лагаются 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  $U_{си\text{ пр}}$  (область III). В случае  $U_{зи} < 0$  напряжение  $U_{сз}$  увеличивается, в связи с чем при  $U_{зи} < 0$  пробой наступает при меньшем напряжении  $U_{си}$ .

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 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, а.

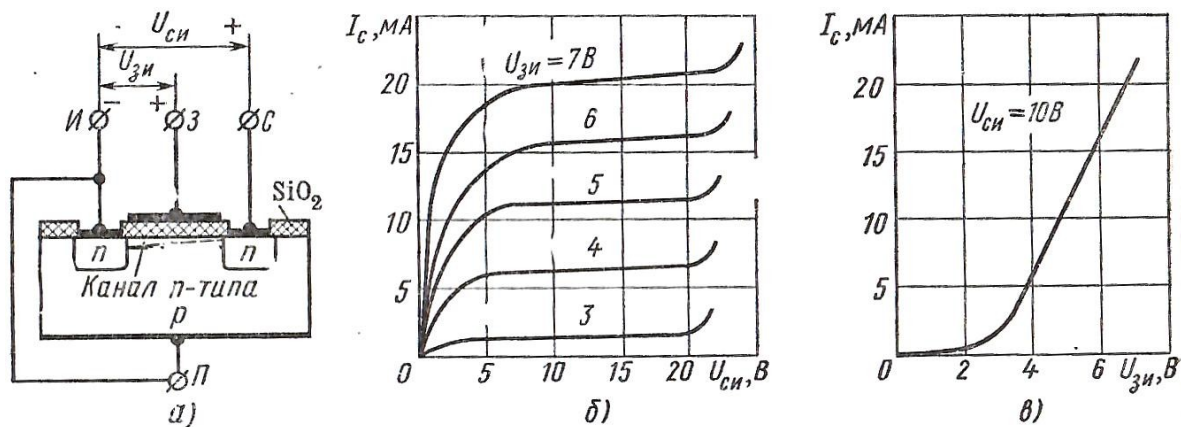


Рис. 5.8. Конструкция МДП-транзистора с индуцированным каналом  $n$ -типа (а); семейство его стоковых характеристик (б); стоко-затворная характеристика (в).

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.

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  $I_c(U_{си})$ . 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 сток-затворной характеристики транзистора с индуцированным каналом показан на рис. 5.8, в.

МДП-транзисторы обоих типов выпускаются на тот же диапазон токов и напряжений, что и транзисторы с  $p-n$ -переходом. Примерно такой же порядок величин имеют крутизна  $S$  и внутреннее сопротивление. Что касается входного сопротивления и межэлектродных емкостей, то МДП-транзисторы имеют лучшие показатели, чем транзисторы с  $p-n$ -переходом. Схема замещения МДП-транзисторов аналогична схеме замещения полевых транзисторов с  $p-n$ -переходом.

МДП-транзисторы широко применяются в интегральном исполнении. Микросхемы на МДП-транзисторах обладают хорошей технологичностью, низкой стоимостью, способ-

ностью работы при более высоком напряжении питания, чем микросхемы на биполярных транзисторах.

Отличительная особенность транзистора МДП-транзисторов – очень большое входное сопротивление, достигающее  $10^{12} - 10^{14}$  Ом, поэтому мощность от управляющего источника практически не потребляется. Ток во входной цепи протекает только в переходных режимах и обусловлен перезарядкой входных емкостей. Поэтому затраты на управление полевыми транзисторами во много раз меньше затрат на управление биполярными транзисторами.

Важными достоинствами МДП-транзисторов являются малое время переключений (от единиц до сотен наносекунд), отсутствие теплового пробоя. Они технологичны и имеют высокую температурную и радиационную устойчивость. Все это обуславливает то, что они с успехом заменяют биполярные транзисторы в устройствах мощностью до нескольких киловатт, особенно при частотах переключений больших 4 кГц. Однако по предельным значениям выходного напряжения и тока полевые транзисторы заметно уступают биполярным транзисторам. Это объясняется зависимостью предельного напряжения от электрической прочности полупроводникового слоя.

Для повышения рабочего напряжения необходимо увеличивать толщину полупроводниковых слоев, что влечет увеличение сопротивления транзистора в открытом состоянии (примерно до 1 Ом), а, следовательно, и падение напряжения на них в открытом состоянии  $U_{СИ\text{ нас}}$ , которое растет с ростом тока  $I_C$ . Предельное напряжение МДП-транзисторов обычно не превышает 500 – 600 В, а предельный прямой ток достигает 200 А.

В поисках решения отмеченной проблемы созданы комбинированные приборы, сочетающие достоинства полевых и биполярных транзисторов – биполярные транзисторы с изолированным затвором, называемые часто IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). В них соединены в одном кристалле мощный биполярный и управляющий МДП-транзисторы,

причем полевой транзистор управляет работой биполярного транзистора. Транзистор IGBT сочетает простоту управления МДП-транзистора с низким падением напряжения в открытом состоянии, что свойственно биполярному транзистору. Предельные значения выходного напряжения и тока у них такие же, как у биполярных транзисторов, т. е. значительно выше, чем у полевых.

Эквивалентная схема IGBT представлена на рис. 5.9, а, а их обозначение на электрических схемах показано на рис. 5.9,б. IGBT имеют три внешних вывода: эмиттер (Э), коллектор (К) и затвор (З). Соединения коллектора и истока, базы и стока являются внутренними. Сочетание двух приборов в одной структуре позволило объединить достоинства полевых и биполярных транзисторов: высокое входное сопротивление с высокой предельной токовой нагрузкой и малым сопротивлением во включённом состоянии.

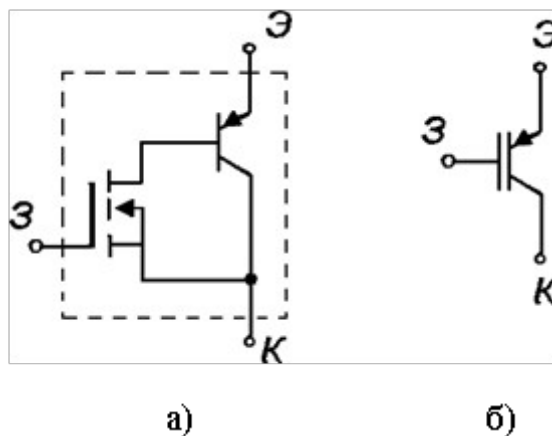


Рис. 5.9. Эквивалентная схема (а) и условное графическое изображение (б) IGBT.

Для IGBT с номинальным напряжением в диапазоне 600-1200 В в полностью включённом состоянии прямое падение напряжения, так же как и для биполярных транзисторов, находится в диапазоне 1,5- 3,5 В. Это значительно меньше, чем характерное значение падения напряжения на силовых МДП-транзисторах в проводящем состоянии с такими же номинальными токами.



С другой стороны, МДП-транзисторы с номинальными напряжениями 200 В и меньше имеют более низкое значение напряжения во включённом состоянии, чем IGBT, и остаются непревзойдёнными в этом отношении в области низких рабочих напряжений и коммутируемых токов до 50 А.

С момента промышленного выпуска IGBT в середине 80-х годов прошлого века выделяют четыре поколения этих приборов. Четвертое поколение (1998 г.) имеет следующие характеристики: коммутируемое напряжение до 4500 В, токи до 1800 А в модульном исполнении; прямое падение напряжения 1,0-1,5 В, частота коммутации до 50 кГц (времена переключения около 200 нс).

В настоящее время транзисторы IGBT выпускаются, как правило, в виде модулей. В модулях IGBT цепи управления непосредственно включены в их структуру. "Интеллектуальные" транзисторные модули (ИТМ), выполненные на IGBT, также содержат системы диагностирования возможных аварийных ситуаций и устройства защиты. IGBT-модуль по внутренней электрической схеме может представлять собой единичный IGBT, либо различные варианты соединения одного или нескольких IGBT с силовыми диодами.

### ***5.3. Усилительные каскады на полевых транзисторах***

Принцип построения усилительных каскадов на полевых транзисторах тот же, что и каскадов на биполярных транзисторах. Особенность заключается в том, что полевой транзистор управляется по входной цепи напряжением, а не током. По этой причине задание режима покоя в каскадах на полевых транзисторах осуществляется подачей во входную цепь каскада постоянного напряжения соответствующей величины и полярности. Этой особенности уделяется главное внимание при анализе каскадов на полевых транзисторах по постоянному току.

Полевые транзисторы, так же как и биполярные, имеют три схемы включения. В соответствии с названиями электродов различают каскады с общим стоком (ОС), с общим ис-

током (ОИ) и с общим затвором (ОЗ). Каскад с ОЗ обладает низким входным сопротивлением, в связи с чем он имеет ограниченное практическое применение. Рассмотрим транзисторы с каналом *n*-типа. С учетом изменения полярности напряжений питания его можно использовать и для усилительных каскадов на транзисторах с каналом *p*-типа.

Схема усилителя с ОИ приведена на рис. 5.10.

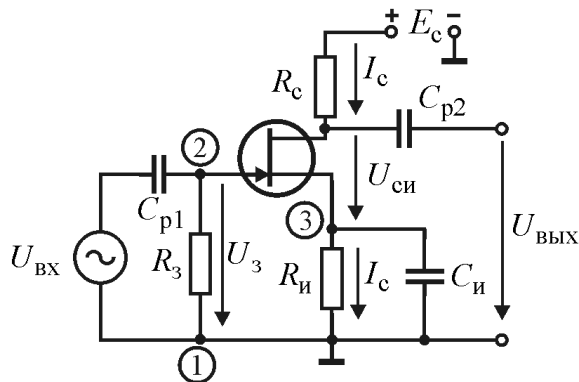


Рис. 5.10. Усилительный каскад с общим истоком.

Использование полевого транзистора в качестве управляемого нелинейного элемента не изменяет основные способы построения усилительного каскада. Отличие заключается в способе задания точки покоя. По аналогии с каскадом с ОЭ на стоковых характеристиках полевого транзистора рис. 5.11, строим линию нагрузки по уравнению

$$E_c = I_c \cdot (R_c + R_u) - U_{си} \quad (5.1)$$

По точкам пересечения ее с выходными характеристиками транзистора строим переходную (проходную) характеристику  $I_c = f(U_{зи})$ . Выбираем на ней точку *П* на середине линейного участка. Ей соответствует точка *П'* на нагрузочной прямой. Точка покоя *П* обеспечивается при отрицательном напряжении  $U_{зи}$ . Это напряжение создается соедине-

нием затвора через высокоомный резистор  $R_3$  с общей точкой. Действительно, так как входная цепь транзистора практически не потребляет ток, можно считать, что потенциалы точек 1 и 2, рис. 5.10, равны и в режиме покоя  $U_3 = 0$ .

В этих условиях  $U_{зи} + I_{c0} \cdot R_u = 0 \Rightarrow U_{зи} = -I_{c0} \cdot R_u$  и сопротивление  $R_u$  выбира-

ется из соотношения  $R_u = \frac{|U_{зи}|}{I_{c0}}$ . Таким образом, в отличие от каскада с ОЭ резистор  $R_u$  предназначен не для температурной стабилизации (полевой транзистор достаточно термостабилен), а для задания точки покоя. Назначение остальных элементов схемы аналогично каскаду с ОЭ.

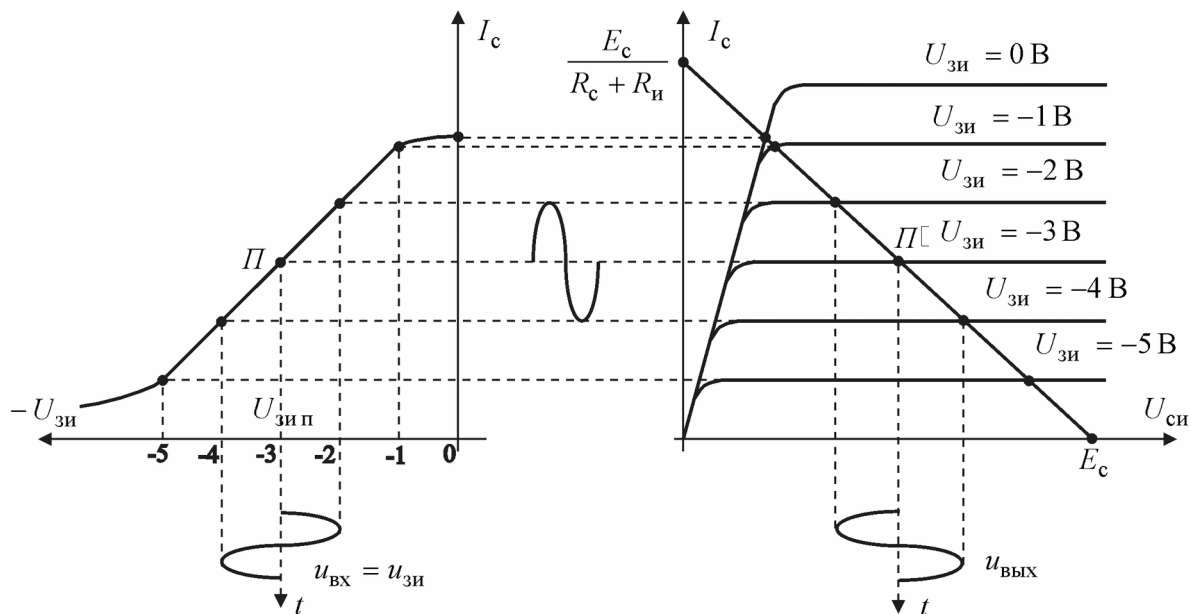


Рис. 5.11. Графоаналитический расчет каскада ОИ.