

6. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Введение.....	1
1. Полевой транзистор с управляющим р-n-переходом.....	4
Статические ВАХ полевых транзисторов с р – n переходом	6
Стоковая характеристика	7
Стоко–затворная характеристика	7
2. Базовые схемы включения	8
Схема с общим истоком	8
Основные параметры полевого транзистора с управляющим р-n-переходом	10
3. Особенности МДП-транзисторов (Metall-Oxide-Semiconductor FET (MOSFET))	11
Полевые транзисторы с изолированным затвором.....	Ошибка! Закладка не определена.
МДП-транзистор с индуцированным каналом	14
Достоинства и недостатки полевых транзисторов	15
Биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT - транзисторы)	15

Введение

История изобретения и создания этого класса полупроводниковых приборов достаточно туманна: в разных источниках скупно упоминаются различные люди и даты. Возможно, что это связано с большой разновидностью подобных устройств. Поэтому, не анализируя, перечислим все известные нам факты в хронологическом порядке.

В 1925 г. Юлиус Лилленфельд изобрел полевой транзистор с р-п переходом и полевой транзистор с изолированным затвором.

В 1939 г. английский ученый О. Хейл получил патент на устройство, в котором электрическое поле изолированного электрода управляло током, протекающим в тонком слое полупроводника.

В 1952 г. Уильям Шокли дал теоретическое описание униполярного полевого транзистора.

Такие транзисторы, получившие название полевых с управляемым р-п переходом были впоследствии изготовлены Дейси и Россом, которые в 1955 г. также дали аналитическое описание их характеристик.

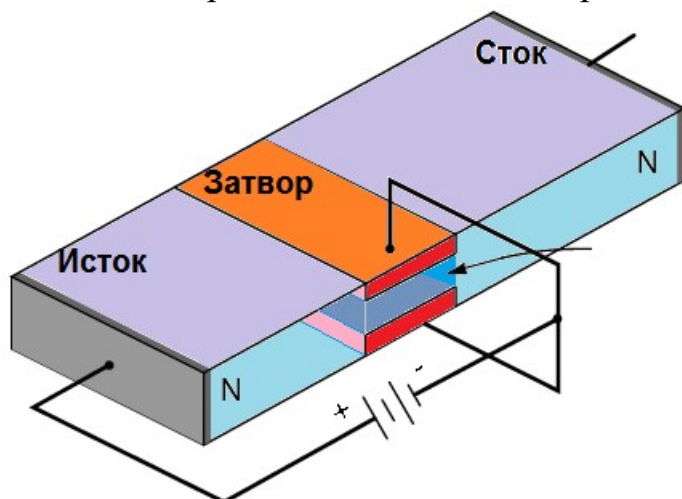
В 1956 г. С. Тешнер (Франция) изобрел одну из разновидностей полевых транзисторов.

В 1960 г. М. Атала и Д. Канг предложили использовать структуру металл-окисел-полупроводник (МОП) в качестве основы для создания особого вида полевых транзисторов. Очевидно, что именно с этих транзисторов, которые стали широко использоваться в интегральных микросхемах, и по-настоящему началась эра полевых транзисторов.

Полевые транзисторы не вытеснили биполярные, а лишь удачно дополнили их, так как обладали рядом уникальных особенностей, с которыми мы ознакомимся в виртуальных моделях.

Полевой транзистор – это полупроводниковый полностью управляемый ключ, управляемый электрическим полем. Это главное отличие с точки зрения практики от биполярных транзисторов, которые управляются током. Электрическое поле

создается напряжением, приложенным к затвору относительно истока. Полярность управляющего напряжения зависит от типа канала транзистора. Здесь прослеживается хорошая аналогия с электронными вакуумными лампами.



Другое название полевых транзисторов – униполярные. «УНО» - значит один. В полевых транзисторах в зависимости от типа канала ток осуществляется только одним типом носителей дырками или электронами. В биполярных транзисторах ток формировался из двух типов носителей зарядов – электронов и дырок, независимо от типа приборов.

Полевые транзисторы в общем случае можно разделить на:

- транзисторы с управляющим p-n-переходом;
- транзисторы с изолированным затвором.

Каналом называется центральная область транзистора. Электрод, из которого в канал входят носители заряда, называется истоком, а электрод, через который основные носители уходят из канала – стоком. Электрод, служащий для регулирования поперечного сечения канала, называется затвором.

Разновидности названия этого класса полупроводниковых приборов связаны с их принципом действия. В некоторой области полупроводника (канале, отсюда одно из названий - каналные) протекает ток основных носителей заряда, одного знака отсюда - униполярные транзисторы. Управление значением тока осуществляется поперечным электрическим полем, отсюда другое название - полевые транзисторы (в английской транслитерации - *Field Effect Transistor*, сокращенно *FET*). Все эти названия с разных сторон характеризуют один и тот же прибор и являются общепотребительными.

Все разновидности полевых транзисторов можно, по существу, разделить на два больших класса: полевые транзисторы с управляющим p-n переходом - *Junction* (плоскостной) *FET*, или *JFET*, и полевые транзисторы с изолированным затвором - *Insulated* (изолированный) *Gate* (затвор), т.е. *Insulated Gate FET*, или сокращенно *IJFET*. Транзисторы последнего типа содержат в своей структуре Металл-Оксид-Полупроводник, отсюда сокращенно МОП или, на английском, *Metall-Oxide-Semiconductor FET* (*MOSFET*). (см. рис. 6.2)

Поскольку используемые оксиды (диоксид кремния SiO_2) являются частным случаем диэлектрика, то в русском наименовании слово «оксид» меняют на «диэлектрик» и тогда аббревиатура превращается в МДП (соответственно в

английском это Insulator и сокращенно *MISFET*). Выделяют также полевые транзисторы с каналом п-типа на основе арсенида галлия *GaAsFET*.

Использование комплементарных структур добавляет в русской аббревиатуре в их названии префикс «К»: КМОП или в английском «С» (от *Complementary*): *CMOS*. Именно последний акроним используется для обозначения энергонезависимой памяти компьютера, выполненной в виде интегральной микросхемы по соответствующей технологии. Данная микросхема хранит все начальные установки конфигурации ПК и, обладая малым потреблением энергии, работает годами без выключения, питаясь от миниатюрного аккумулятора.

В символике условно-графических обозначений (УГО) полевых транзисторов (см. рис. 6.1) присутствует все та же направляющая стрелка, обозначающая электрод, называемый затвором (Gate), два других электрода имеют очевидные названия: исток (Source) - аналог эмиттера, сток (Drain) - аналог коллектора.

Так как в полевых транзисторах ток определяется движением носителей только одного знака, ранее их называли униполярными, что подчеркивало движение носителей заряда одного знака.

Полевые транзисторы изготавливают из кремния и, в зависимости от электропроводности исходного материала, подразделяют на транзисторы с р-каналом и транзисторы с n-каналом.

Главное достоинство полевых транзисторов – высокое входное сопротивление.

Классификация и условные графические обозначения полевых транзисторов приведены на рис.

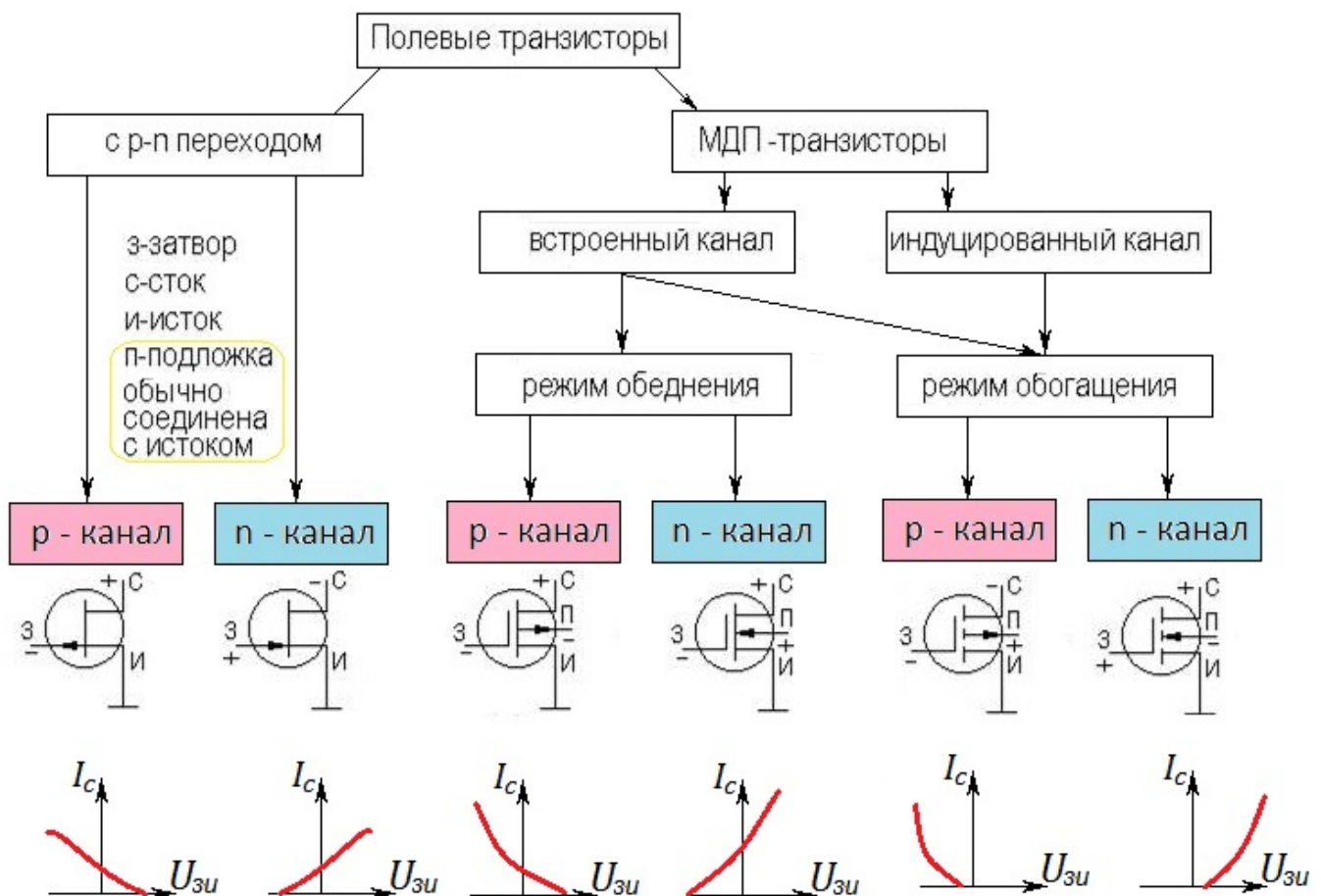


Рис. 6.2. Классификация и условные графические обозначения полевых транзисторов

1. Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом

Основные носители заряда, протекающие через проводящий канал *управляются поперечным электрическим полем* (а не током, как в биполярных транзисторах, о чем свидетельствует сам термин «полевые транзистор»)

Различают два основных вида полевых транзисторов: с управляющим $p - n$ переходом и с изолированным затвором.

Конструкция: на полупроводниковую пластину n – типа сделаны выводы металлических контактов. *Слой между контактами называется проводящим каналом* (n или p – типа). Электрод полевого транзистора, *через который в проводящий канал втекают носители заряда*, называют *истоком* (И), а электрод, *через который из канала вытекают носители заряда*, называют *стоком* (С).

На грань пластины в ее центральной части (как правило с двух сторон) наплавляют акцепторное вещество, создающее область p – типа: в результате образуется $p - n$ переход. От p – области сделан вывод третьего электрода для подачи на $p - n$ переход обратного напряжения. В этом случае проводящий канал образуется в пластине между двух $p - n$ переходов. При подаче обратного напряжения на данный электрод, слои обедненные носителями заряда имеют проводимость близкую к нулю. Электрод, на который подается напряжение, создающее электрическое поле для управления протекающим через канал током, называют *затвором* (З) (Рис. 6.3).

Напряжение между стоком и истоком $U_{зи}$ подается в такой полярности, чтобы основные носители двигались по каналу от истока к стоку. Цепь между стоком и истоком является главной.

На затвор относительно истока подается *напряжение $U_{зи}$ обратное* относительно $p - n$ перехода. Оно создает поперечное по отношению к каналу электрическое поле, напряженность которого зависит от величины приложенного напряжения.

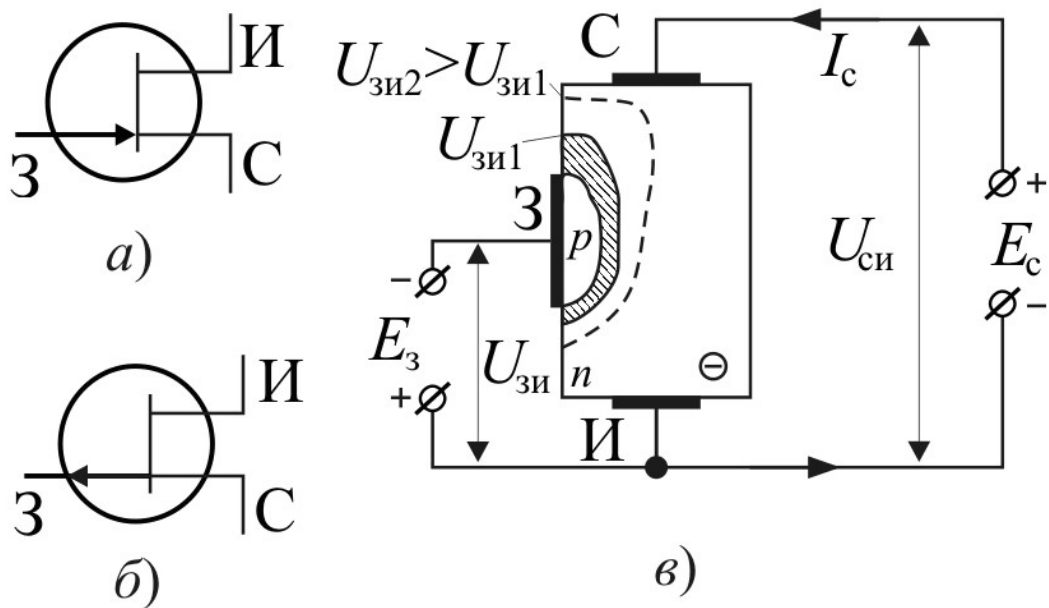


Рис. 6.3

Цепь между затвором и истоком является управляющей. Принцип действия основан на изменении проводимости канала за счет изменения ширины области $p-n$ – перехода под действием поперечного электрического поля, которое создается напряжением затвор–исток.

Первое состояние – приложим внешнее напряжение.

Если к такому транзистору приложить напряжение, к стоку плюс, а к истоку минус, через него потечет ток большой величины, он будет ограничен только сопротивлением канала, внешними сопротивлениями и внутренним сопротивлением источника питания. Можно провести аналогию с нормально-замкнутым ключом. Этот ток называется $I_{сн}$ или начальный ток стока при $U_{зи}=0$.

Полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом, без приложенного управляющего напряжения к затвору является максимально открытым.

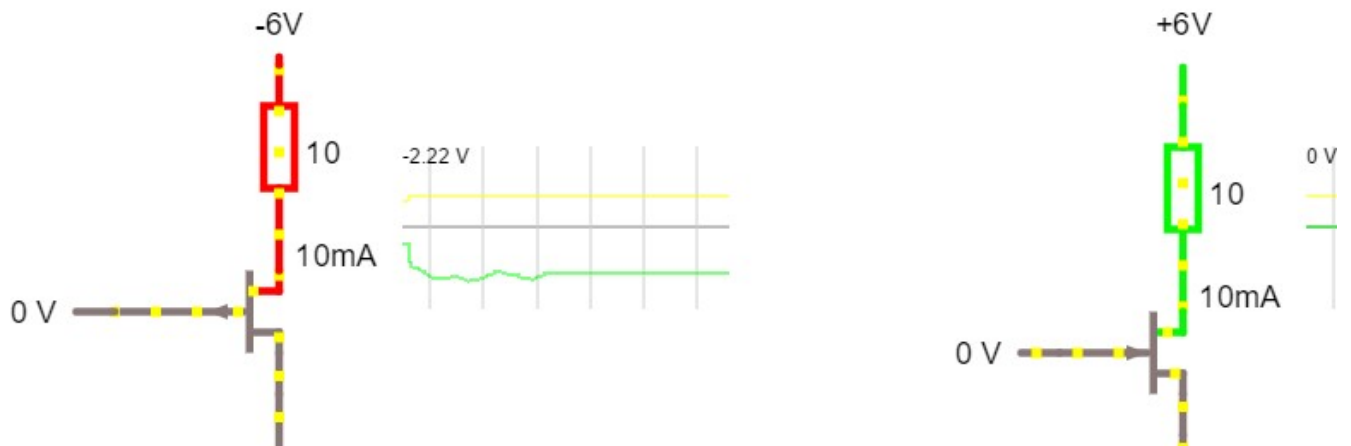
Напряжение к стоку и истоку прикладывается таким образом:

Через исток вводятся основные носители зарядов!

Это значит, что если транзистор p -канальный, то к истоку подключают положительный вывод источника питания, т.к. основными носителями являются дырки (положительные носители зарядов) – это так называемая дырочная проводимость. Если транзистор n -канальный к истоку подключают отрицательный вывод источника питания, т.к. в нем основными носителями заряда являются электроны (отрицательные носители зарядов).

Исток - источник основных носителей заряда.

Вот результаты моделирования такой ситуации. Слева расположен p -канальный, а справа n -канальный транзистор.



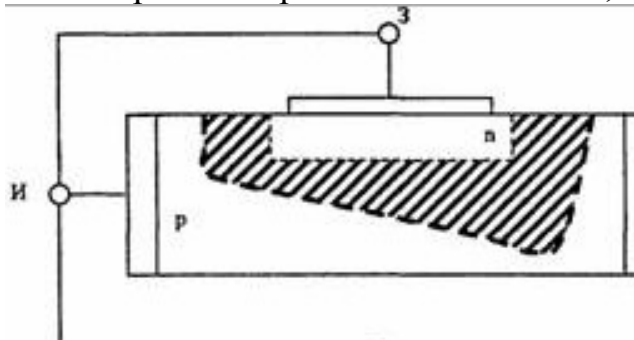
Если включить в цепь источник усиливаемого сигнала $U_{вх}$ последовательно с источником постоянного напряжения $E_{зи}$ и последовательно с $E_{си} - R_n$ (Рис. 6.4), то слабый сигнал вызывает изменение поперечного электрического поля; оно пульсирует с частотой сигнала, что в свою очередь приводит к расширению и сужению канала. Это вызывает пульсацию тока I_c и напряжения на нагрузке R_n .

Отсюда следует, что в отличие от биполярного транзистора, полевой управляется не током, а напряжением $U_{зи}$.

Поскольку это напряжение обратное, то в цепи затвора ток не протекает, входное сопротивление остается очень большим, на управление потоком носителей заряда, а значит, и выходным током I_c мощность не затрачивается. В этом преимущество полевого транзистора по сравнению с биполярным.

Второе состояние – подаём напряжение на затвор

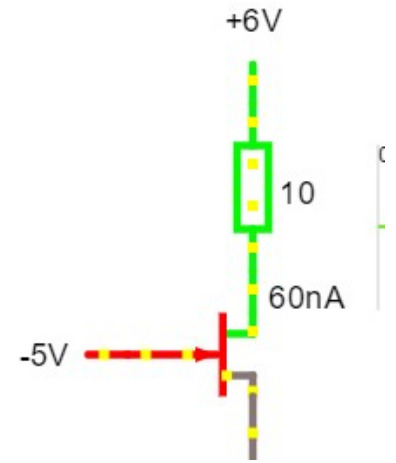
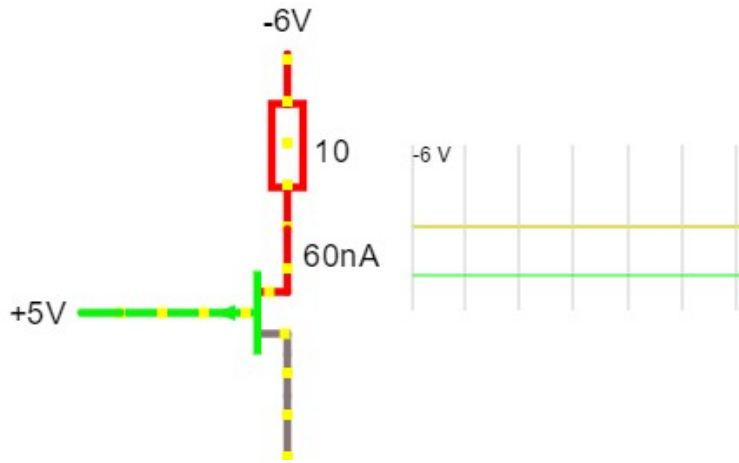
При подаче положительного напряжения на затвор относительно истока ($U_{зи}$) для р-канального и отрицательное для н-канального, он смещается в обратном направлении, область р-п-перехода расширяется в сторону канала. В результате чего ширина канала уменьшается, ток снижается. Напряжение затвора, при котором ток через ключ перестает протекать называется, напряжением отсечки.



Ключ начинает закрываться.



Достигнуто напряжение отсечки, и ключ полностью закрыт. На картинке с результатами моделирования отображено такое состояние для р-канального (слева) и н-канального (справа) ключа. Кстати на английском языке такой транзистор называется JFET.



Режимы работы

Рабочий режим транзистора при напряжении $U_{зи}$ либо нулевое, либо обратное. За счет обратного напряжения можно «прикрывать транзистор», используется в усилителях класса А и прочих схемах где нужно плавное регулирование.

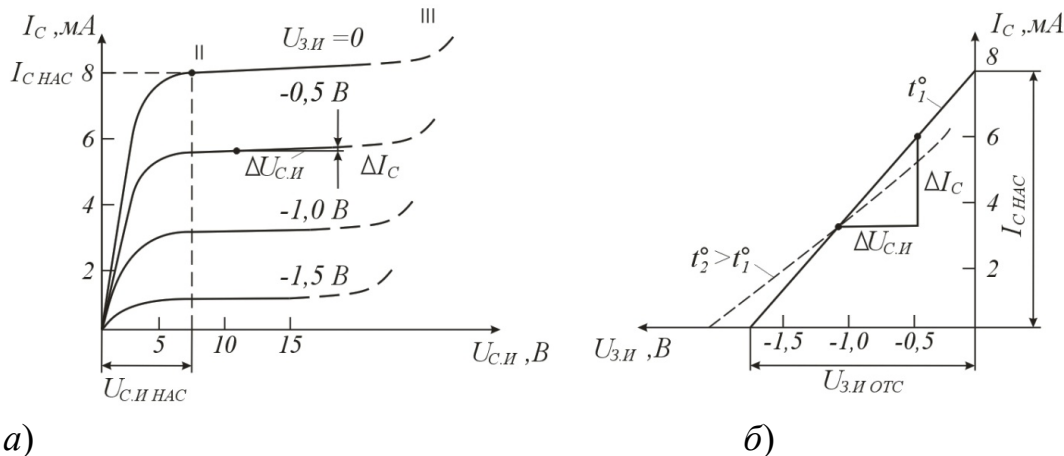
Режим отсечки наступает, когда $U_{зи} = U_{отсечки}$ для каждого транзистора оно своё, но в любом случае прикладывается в обратном направлении.

Статические ВАХ полевых транзисторов с $p-n$ переходом

Основные характеристики полевых транзисторов – выходные (стоковые) и передаточные (стокзатворные).

Стоковая характеристика

Стоковая характеристика – отражает зависимость тока стока от напряжения сток–исток при постоянном напряжении затвор исток: $I_c = f(U_{си})$ при $U_{зи} = \text{const}$ (Рис. 6.4,а).



а)
Рис. 6.4

В начале участка кривая выходит из начала координат и соответствует малым значениям $U_{си}$ изменение которого почти не влияет на проводимость канала, канал полностью открыт. Поэтому ток I_c на этом участке растет пропорционально напряжению $U_{си}$. По мере дальнейшего увеличения напряжения $U_{си}$ начинает сказываться его влияние на проводимость канала. Причиной этого служит возрастание потенциала точек канала в направлении к стоку и соответственно рост обратного напряжения на $p-n$ -переходе, которое при $U_{зи} = 0$, у стокового конца равно величине $U_{си}$. По мере увеличения $U_{си}$ происходит сужение канала, уменьшается его проводимость и замедляется рост тока I_c .

Максимальное сужение канала называется перекрытием канала. Этот режим называют режимом насыщения. Напряжение, при котором начинается режим насыщения, называют напряжением насыщения – ток током насыщения $I_{c,нас}$. Участок характеристики, соответствующий режиму насыщения, используется в усилителях как рабочий.

При дальнейшем увеличении напряжения $U_{си}$, происходит лавинный пробой $p-n$ -перехода, вблизи стока. Пробой транзистора недопустим поэтому в рабочем режиме $U_{си}$ ограничивается максимально допустимым значением.

Сток–затворная характеристика

Передаточная характеристика отражает зависимость тока стока I_c от напряжения $U_{зи}$ при неизменной величине напряжения сток–исток $I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = \text{const}$, то есть зависимость характеризует управляющее действие входного напряжения на величину выходного тока. При $U_{зи} = 0$ и $U_{си} = \text{const}$ точка лежит на оси 8 мА (Рис. 6.4,б). С увеличением напряжения $U_{зи}$, проводимость канала уменьшается, ток стока уменьшается до тех пор, пока канал не окажется перекрытым: ток через канал прекращается, транзистор закрывается. Напряжение,

при котором ток через сток–исток прекращается, называют напряжением отсечки.

Между напряжением насыщения и напряжением отсечки существует зависимость. $U_{си.нас} = U_{зи.отс} - U_{зи}$, отсюда при $U_{зи} = 0$, $U_{си.нас} = U_{зи.отс}$.

Изменение температуры мало влияет на работу полевого транзистора, т.к. при увеличении температуры уменьшается ширина $p - n$ перехода, что должно способствовать увеличению I_c , однако с увеличением температуры уменьшается подвижность основных носителей, что вызывает рост сопротивления канала и уменьшает I_c . Повышение температуры снижает напряжение $U_{вх}$ из-за увеличения обратного тока $p - n$ –перехода.

2. Базовые схемы включения

Как и у биполярных транзисторов есть три типовых схемы включения:

1. С общим истоком (а). Используется чаще всех, даёт усиление по току и мощности.
2. С общим затвором (б). Редко используется, низкое входное сопротивление, усиления нет.
3. С общим стоком (в). Усиление по напряжению близко к 1, большое входное сопротивление, а выходное низкое. Другое название – истоковый повторитель.

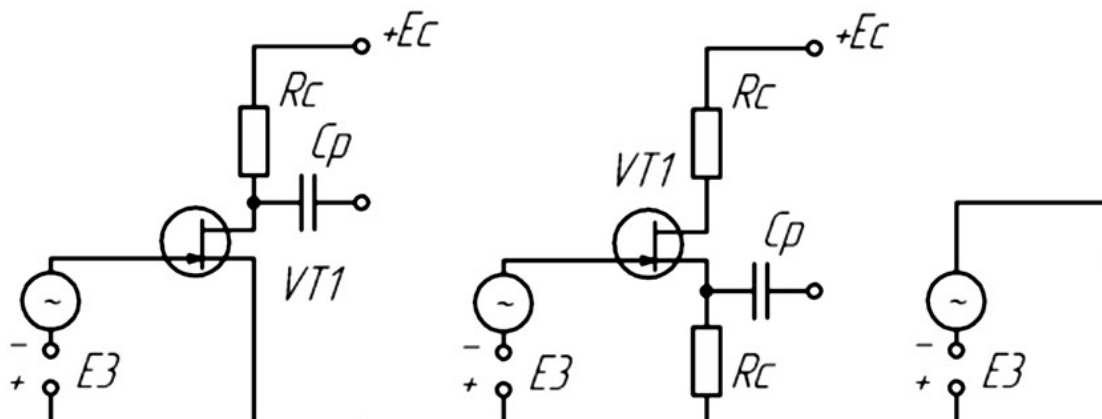


Рис. 6.5. Схемы включения полевого транзистора

Схема с общим истоком

В схеме с ОИ цепь сток–исток (с n -типом электропроводности) является выходной цепью усилительного каскада. Эта цепь питается от источника $U_{си}$ и в нее включается сопротивление нагрузки. Входная (управляющая) цепь образована с помощью третьего электрода (затвора) с другим типом электропроводности (p -типа). Источник напряжения затвор–исток $U_{зи}$ создает на p - n -переходе обратное напряжение, которое изменяет ширину запирающего слоя (эффект модуляции ширины базы). Во входную цепь включается источник сигналов (ИС).

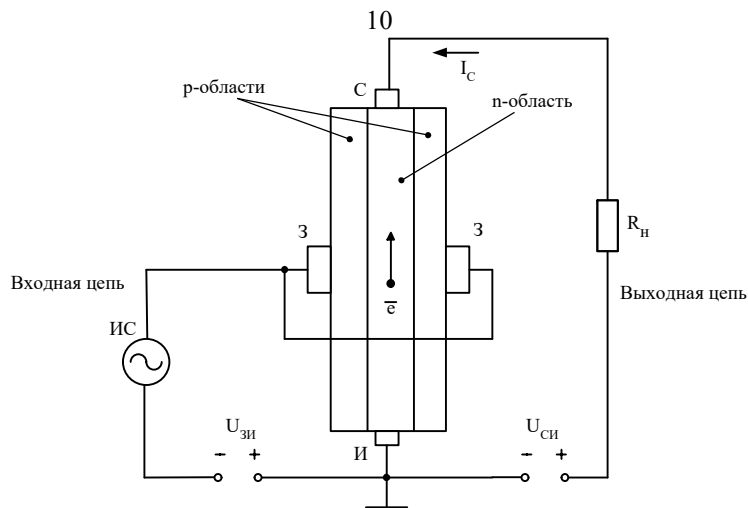


Рис. 6.5. Схема включения полевого транзистора с общим истоком

Основными параметрами полевого транзистора с управляющим p - n -переходом являются см рис. 6.6:

- 1) максимальное значение тока стока $I_{смакс}$ (точка $в$ на выходной характеристике при $U_{зи} = 0$);
- 2) максимальное значение напряжения сток-исток $U_{симакс}$ (в 1,2-1,5 раз меньше напряжения участка сток-затвор (точка $в'$) при $U_{зи} = 0$);
- 3) напряжение отсечки (запирания) $U_{зи0} = U_{зан}$, при котором ток стока $I_{смакс}$ стремится к нулю;
- 4) внутреннее сопротивление (характеризует наклон выходных характеристик на участке II):

$$R_i = \frac{dU_{си}}{dI_c} \quad \text{при} \quad U_{зи} = \text{const}; \quad (6.1)$$

- 5) крутизна стоко-затворной характеристики (отражает влияние напряжения $U_{зи}$ на выходной ток стока I_c):

$$S = \frac{dI_c}{dU_{зи}} \quad \text{при} \quad U_{си} = \text{const}; \quad (6.2)$$

- 6) входное сопротивление (определяется сопротивлением p - n -переходов, смещенных в обратном направлении; даже при больших приращениях $\Delta U_{зи}$ приращение тока затвора приблизительно равно нулю, а значит входное сопротивление очень большое):

$$R_{вх} = \frac{dU_{зи}}{dI_з} \quad \text{при} \quad U_{си} = \text{const}; \quad (6.3)$$

- 7) выходное сопротивление

$$R_{вых} = \frac{dU_{си}}{dI_c} \quad \text{при} \quad U_{зи} = \text{const}. \quad (6.4)$$

Основные параметры полевого транзистора с управляющим p-n-переходом

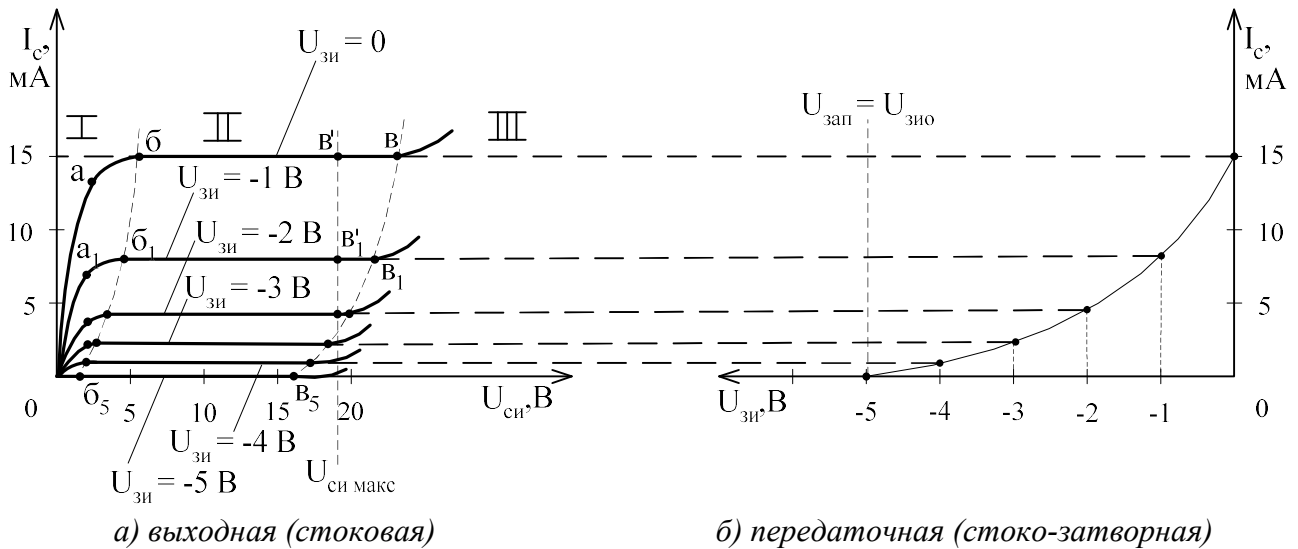


Рис. 6.6. Вольт-амперные характеристики транзисторов с управляющим p-n-переходом

В режиме насыщения значительное приращение напряжения $dU_{си}$ вызывает незначительное приращение тока dI_c , поэтому выходное сопротивление $R_{вых}$ большое и составляет десятки кОм;

8) коэффициент усиления

$$\mu = \frac{dU_{си}}{dU_{зи}} \quad \text{при} \quad I_c = \text{const.} \quad (6.5)$$

Показывает во сколько раз изменение напряжения $dU_{зи}$ сильнее влияет на изменение тока dI_c , чем напряжение $U_{си}$. Обычно $\mu = 10-100$.

Особенности, преимущества, недостатки

Главное преимущество полевого транзистора высокое входное сопротивление. Входное сопротивление это отношения тока к напряжению затвористок. Принцип действия лежит в управлении с помощью электрического поля, а оно образуется при приложении напряжения. То есть полевые транзисторы управляются напряжением.

Полевой транзистор практически не потребляет тока управления, это снижает потери управления, искажения сигнала, перегрузку по току источника сигнала...

В среднем частотные характеристики полевых транзисторов лучше, чем у биполярных, это связано с тем, что нужно меньше времени на «рассасывание» носителей заряда в областях биполярного транзистора. Некоторые современные биполярные транзисторы могут и превосходить полевые, это связано с использованием более совершенных технологий, уменьшения ширины базы и прочего.

Низкий уровень шумов у полевых транзисторов обусловлен отсутствием процесса инжекции зарядов, как у биполярных.

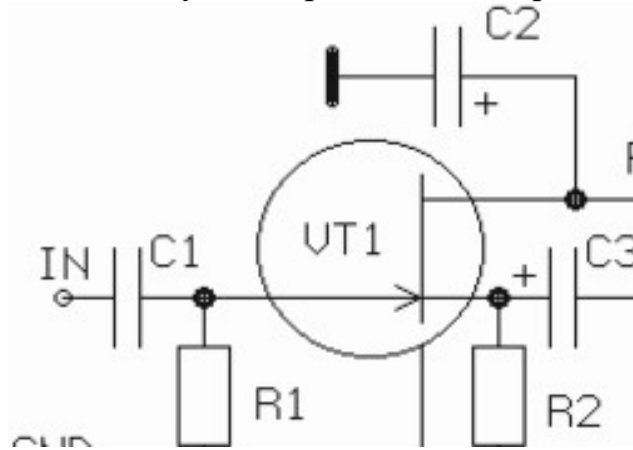
Стабильность при изменении температуры.

Малое потребление мощности в проводящем состоянии – большой КПД ваших устройств.

Простейший пример использования высокого входного сопротивления – это приборы согласователи для подключения электроакустических гитар с

пьезозвукоснимателями и электрогитар с электромагнитными звукоснимателями к линейным входам с низким входным сопротивлением.

Низкое входное сопротивление может вызвать просадки входного сигнала, исказив его форму в разной степени в зависимости от частоты сигнала. Это значит что нужно этого избежать, введя каскад с высоким входным сопротивлением. Вот простейшая схема такого устройства. Подойдет для подключения электрогитар в линейный вход аудио-карты компьютера. С ней звук станет ярче, а тембр богаче.



Главным недостатком является то, что такие транзисторы боятся статики. Вы можете взять наэлектризованными руками элемент, и он тут же выйдет из строя, это и есть следствие управления ключом с помощью поля. С ними рекомендуют работать в диэлектрических перчатках, подключенным через специальный браслет к заземлению, низковольтным паяльником с изолированным жалом, а выводы транзистора можно обвязать проволокой, чтобы закоротить их на время монтажа.

Современные приборы практически не боятся этого, поскольку по входу в них могут быть встроены защитные устройства типа стабилитронов, которые срабатывают при превышении напряжения.

3. Особенности МДП-транзисторов (Metall-Oxide-Semiconductor FET (MOSFET))

Этот вид транзисторов активно используется в качестве полупроводниковых управляемых ключей. Причем работают они чаще всего именно в ключевом режиме (два положения «вкл» и «выкл»). У них есть несколько названий:

1. МДП-транзистор (металл-диэлектрик-полупроводник).
2. МОП-транзистор (металл-окисел-полупроводник).
3. MOSFET-транзистор (metal-oxide-semiconductor).

В транзисторах с изолированным затвором затвор отделен от полупроводникового канала тонким слоем диэлектрика. Иначе эти приборы называют МДП-транзисторы (металл-диэлектрик-полупроводник). МДП-транзисторы выполняют из кремния. В качестве диэлектрика используют оксид (окисел) кремния SiO_2 , отсюда и другое название – МОП-транзисторы (металл-оксид-полупроводник). Наличие диэлектрика обеспечивает высокое входное сопротивление (10^{12} - 10^{14} Ом).

Диэлектрик исключает электрический контакт между электродом затвора и подложкой. В отличие от управляющего p-n-перехода он работает не на принципе расширения перехода и перекрытия канала, а на принципе изменения концентрации

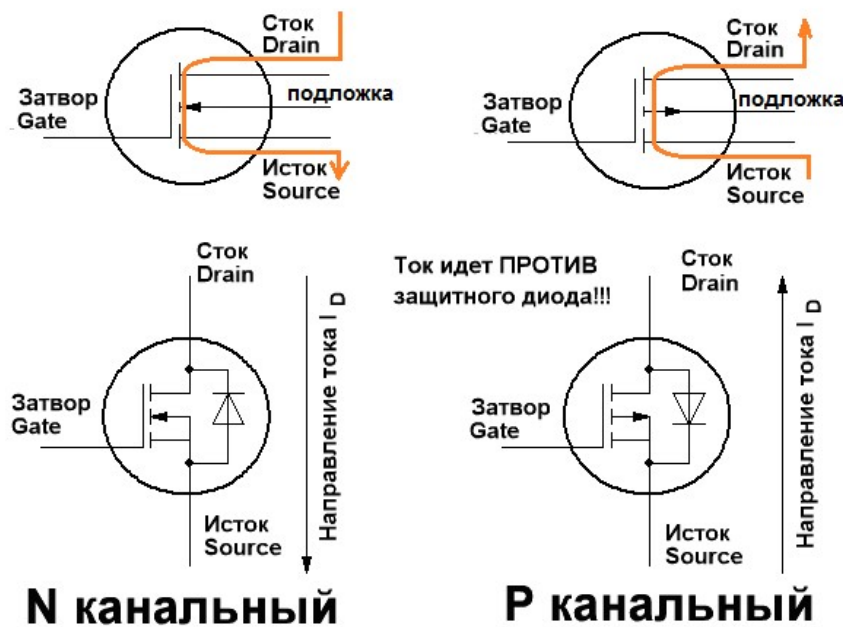
носителей заряда в полупроводнике под действием внешнего электрического поля. МОП-транзисторы бывают двух типов:

1. Со встроенным каналом.
 2. С индуцированным каналом
- Условные графические изображения

Они напоминают полевые транзисторы с управляющим затвором, но отличаются тем, что на УГО, как и в самом транзисторе, затвор отделен от подложки, а стрелка в центре указывает на тип канала, но направлена от подложки к каналу, если это n-канальный mosfet – в сторону затвора и наоборот.

Для ключей с индуцированным каналом:

МОП — МДП — MOSFET транзисторы



Обратите внимание на англоязычные названия выводов, в datasheet'ах и на схемах часто указываются они.

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 токоведущим каналом.

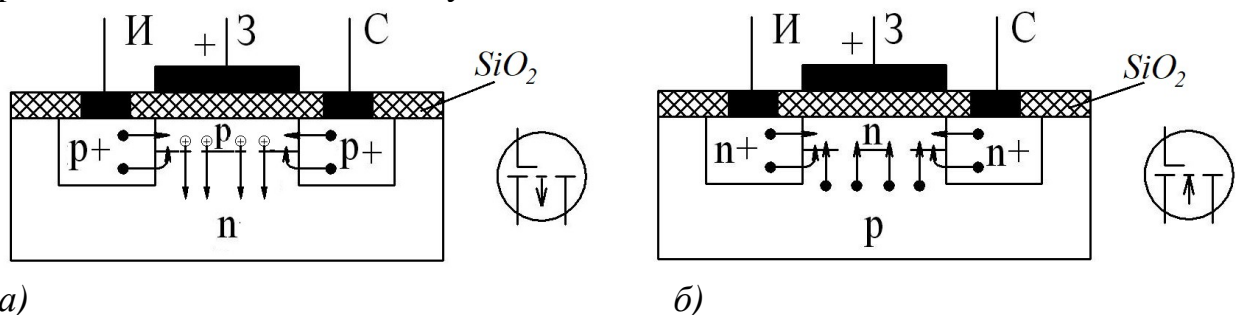


Рис. 6.6. Принцип устройства и условное графическое обозначение транзисторов с индуцированным каналом *p*- (а) и *n*- типа (б)

Основанием МДП-транзистора служит кремниевая пластинка с электропроводностью типа *p* (рис.6.7,б). В ней созданы две области с

электропроводностью n^+ - типа с повышенной проводимостью. Эти области являются истоком и стоком. От них сделаны выводы.

Между истоком и стоком имеется тонкий приповерхностный канал с электропроводностью n -типа. Длина канала от истока до стока составляют обычно ед. мкм, а его ширина – сотни микрометров и более, в зависимости от рабочего тока транзистора.

Четвертый электрод – подложку в большинстве схем соединяют с истоком. Иногда от кристалла бывает сделан отдельный вывод. Прибор с такой структурой называют транзистором с собственным (или встроенным) каналом, и работает он следующим образом.

Если при нулевом напряжении затвора приложить между стоком и истоком напряжение, то через канал потечет ток, представляющий собой поток электронов. Через кристалл ток не пойдет, т.к. один из n - p -переходов находится под обратным напряжением.

При подаче на затвор напряжения, отрицательного относительно истока, а, следовательно, и относительно кристалла, в канале создается поперечное электрическое поле, под влиянием которого электроны проводимости выталкиваются из канала в области истока и стока и в кристалл. Канал обедняется электронами, сопротивление его увеличивается, и ток стока уменьшается. Чем больше отрицательное напряжение затвора, тем меньше этот ток. Такой режим транзистора называют режимом обеднения.

Рассмотрим характеристики МДП-транзистора со встроенным каналом. ВАХ полевых транзисторов с изолированным затвором в основном аналогичны характеристикам транзисторов с управляющим p - n -переходом.

Стоковые (выходные) характеристики транзистора $I_c = f(U_{ci})$ при $U_{зи} = const$ приведены на рис. 6.8.

Изолированный затвор позволяет работать в области положительных значения напряжений затвор-исток $U_{зи}$. На рис. 6.8 показаны три семейства выходных характеристик в зависимости от значений напряжения $U_{зи}$.

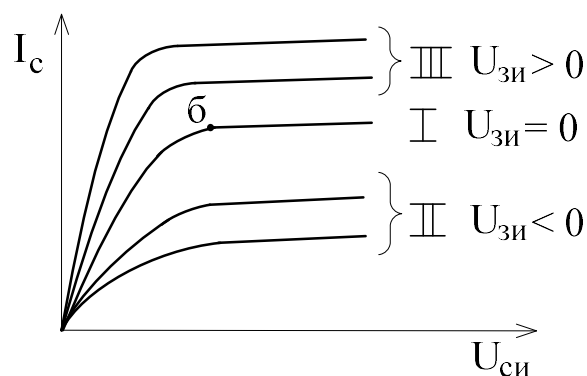


Рис. 6.8. Стоковые (выходные) характеристики МДП-транзистора со встроенным каналом

Первое семейство ($U_{зи}=0$). Ток стока I_c определяется исходной проводимостью канала. При малых значениях влияния напряжения U_{ci} на проводимость канала мало, так как по мере приближения к стоку, потенциал возрастает и увеличивается запиорный слой (модуляция). При увеличении значений напряжения U_{ci} канал сужается, ток уменьшается. В точке б канал сужается до минимума.

Второе семейство ($U_{зи} < 0$). При $U_{зи} < 0$ электрическое поле выталкивает электроны, что приводит к уменьшению концентрации их в канале, снижая его проводимость. Этот режим называется режимом «обеднения» канала.

Третье семейство ($U_{зи} > 0$). При $U_{зи} > 0$ электрическое поле притягивает электроны из р-области, увеличивается концентрация их и повышается проводимость канала. Этот режим называется режимом «обогащения» канала носителями.

Стоко-затворная (передаточная) характеристика $I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = const$ приведена на рис. 6.9.

Меняя полярность и значение напряжения затвор-исток $U_{зи}$, можно изменить проводимость канала и, следовательно, ток стока I_c при неизменном значении напряжения сток-исток $U_{си}$. В отличие от полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом, при этом изменяется не площадь сечения канала, а концентрация основных носителей заряда.

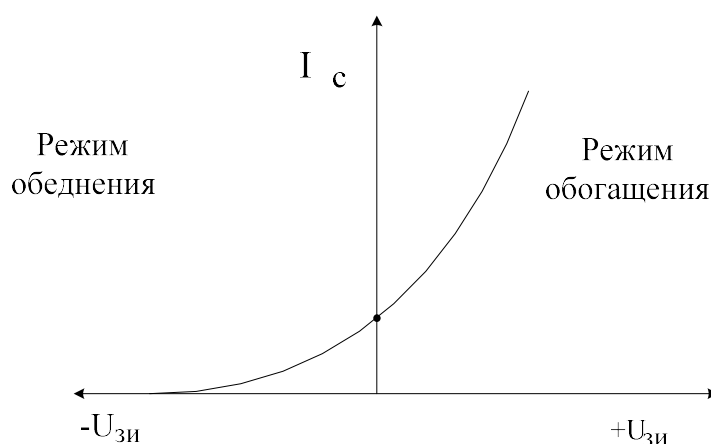


Рис. 6.9. Стоко-затворная (передаточная) характеристика МДП-транзистора со встроенным каналом

МДП-транзистор с индуцированным каналом

Канал проводимости тока в этом типе транзистора не создается, а индуцируется благодаря притоку электронов из р-области при приложении к затвору напряжения положительной полярности.

Схема включения МДП-транзистора с индуцированным каналом приведена на рис. 6.10.

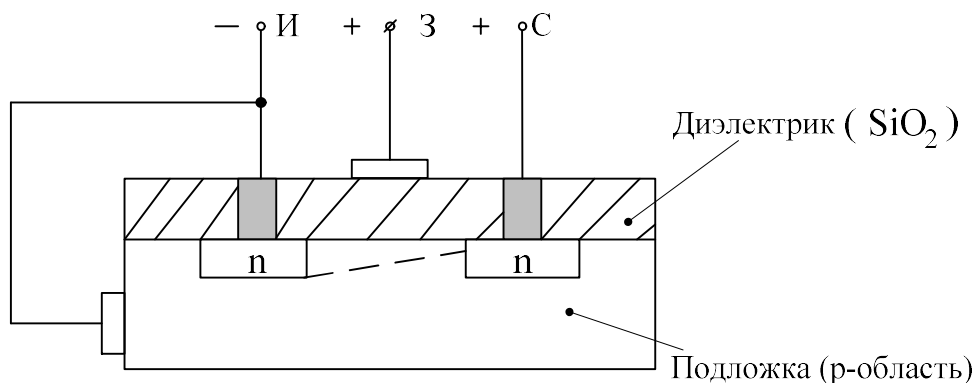
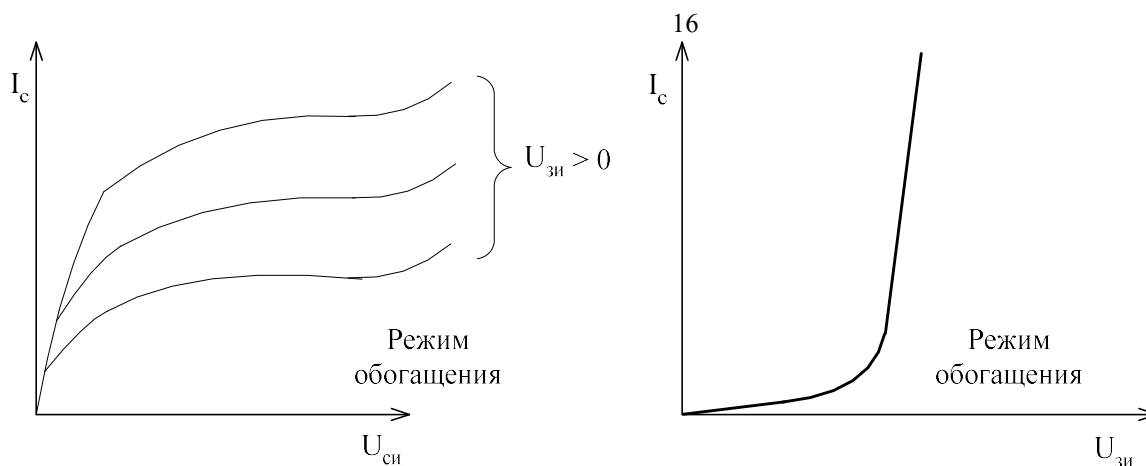


Рис. 6.10. Структурная схема МДП-транзистора с индуцированным каналом

Транзистор с индуцированным каналом работает только в режиме обогащения. ВАХ транзистора с индуцированным каналом приведены на рис. 6.11.



а) стоковая $I_c = f(U_{си})$ при $U_{зи} = \text{const}$ (выходная); б) стоко-затворная $I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = \text{const}$ (передаточная)

Рис 6.11. Вольт-амперные характеристики транзистора с индуцированным каналом

Достоинства и недостатки полевых транзисторов

Достоинствами полевых транзисторов являются:

- 1) высокое входное сопротивление, что соответствует повышенному коэффициенту усиления по мощности управления;
- 2) обусловленность рабочего тока только основными носителями заряда и, как следствие, высокое быстродействие. Время переключения современных МОП-транзисторов составляет единицы наносекунд (10^{-9} с). Такая скорость переключения обусловлена тем, что в них практически исключены токи накопленных зарядов неосновных носителей;
- 3) почти полное разделение выходного сигнала от входного;
- 4) малый уровень шумов;
- 5) возможность работы на высокой частоте (до 100 кГц).

К недостаткам полевых транзисторов можно отнести:

- 1) низкие значения коммутируемого тока (десятки ампер) и напряжения (до 500-600 В);
- 2) высокие значения прямых потерь вследствие большого сопротивления во включенном состоянии (0,2-0,5 Ом).

Полевые транзисторы имеют такую же маркировку как и биполярные, но с заменой второй буквы на букву П. Например, КП-302 А, КП-904 Б.

Биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT - транзисторы)

Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT – *Insulated Gate Bipolar Transistor*) – полностью управляемый полупроводниковый прибор, в основе которого трехслойная структура. Его включение и выключение осуществляются подачей и снятием положительного напряжения между затвором и истоком. На рис. 6.12 приведено условное обозначение IGBT-транзистора.

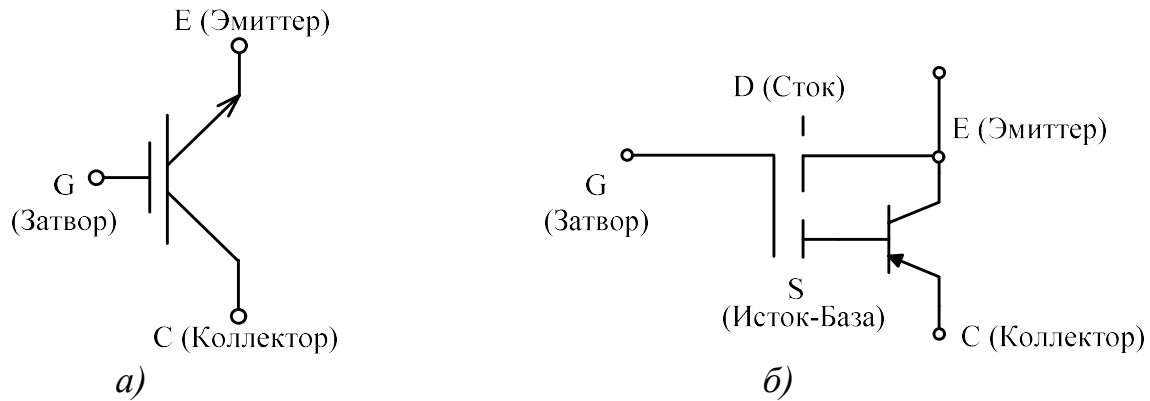


Рис. 6.12. Условное обозначение IGBT-транзистора и эквивалентная схема замещения

Биполярные транзисторы с изолированным затвором являются продуктом развития технологии силовых транзисторов со структурой МОП, управляемых электрическим полем (*MOSFET – Metal-Oxid-Semiconductor-Field-Effect-Transistor*) и сочетают в себе два транзистора в одной полупроводниковой структуре: биполярный (образующий силовой канал) и полевой (образующий канал управления). Эквивалентная схема включения двух транзисторов приведена на рис. 6.12,б.

Прибор введен в силовую цепь выводами биполярного транзистора – Е (эмиттер) и С (коллектор), а в цепь управления – выводом G (затвор).

Таким образом, *IGBT* имеет три внешних вывода: эмиттер, коллектор, затвор. Соединение эмиттера и стока (D), базы и истока (S) являются внутренними.

Сочетание двух приборов в одной структуре позволило объединить достоинства биполярного и полевого транзисторов: высокое входное сопротивление с высокой токовой нагрузкой и малым сопротивлением во включенном состоянии, малую мощность сигнала управления, способность выдерживать высокие значения обратного напряжения, хорошие температурные характеристики.

Схематичный разрез структуры IGBT-транзистора приведен на рис. 6.13. Биполярный транзистор образован слоями p^+ (эмиттер), n (база), p (коллектор). Полевой транзистор образован слоями n (исток), n^+ (сток) и металлической пластиной (затвор). Слои p^+ и p имеют внешние выводы, включаемые в силовую цепь. Затвор имеет вывод, включаемый в цепь управления.

Процесс включения биполярного транзистора с изолированным затвором можно разделить на два этапа: после подачи положительного напряжения между затвором и истоком происходит открытие полевого транзистора (формируется (индуцируется) n -канал между истоком и стоком). Движение зарядов из области n в область p приводит к открытию биполярного транзистора и возникновению тока от эмиттера к коллектору. Таким образом полевой транзистор управляет работой биполярного.

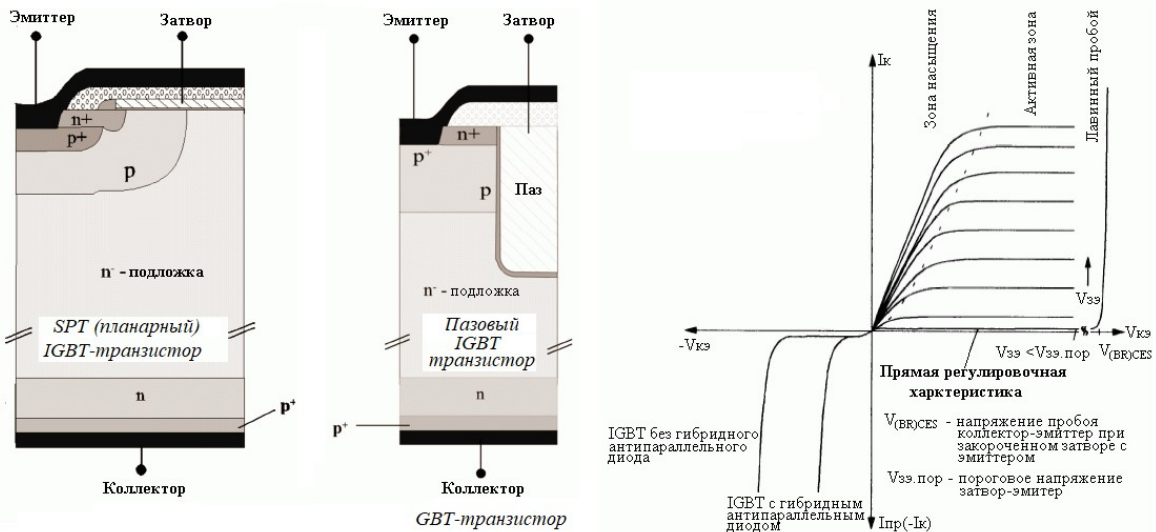
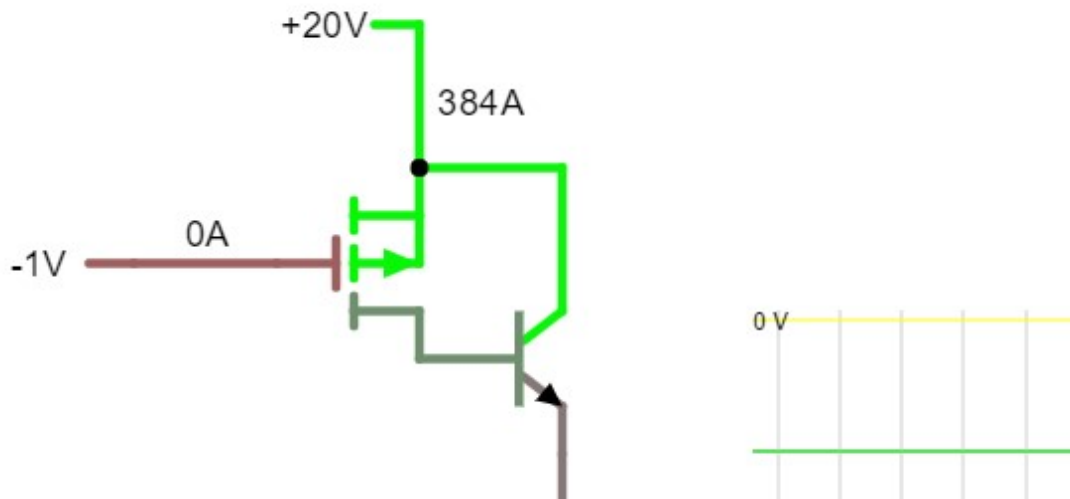


Рис. 6.13. Структура ячеек IGBT-транзисторов (а) и выходные характеристики (б)



Последние разработки IGBT-транзисторов, выполнены либо по планарной технологии SPT, либо с пазовой структурой затвора. На рисунке 6.13,а показано строение данных кристаллов. Так как вследствие особенностей структуры МОП-транзисторы проводят в обратном направлении, это ограничивает возможность применения МОП-транзисторов в мостовых схемах (особенно при наличии высоких напряжений). В отличие от них – IGBT-транзистор, непроводящий в обратном направлении, поэтому в состав IGBT-модулей входят неуправляемые диоды, включенные антипараллельно IGBT-транзистору этим обеспечивается:

Малый максимальный обратный ток i_{rs} и, таким образом, снижается пусковая нагрузка IGBT-транзисторов в мостовых схемах.

«Плавность» увеличивает обратный ток в пределах всего рабочего температурного диапазона, за счет чего минимизируются импульсные выбросы и излучения.

Более надежная работа при коммутации с высокой скоростью нарастания тока по сравнению с другими типами диодов.

Возможность параллельного соединения, благодаря малому отрицательному температурному коэффициенту прямого напряжения.

Как отмечалось выше, для обозначения электродов IGBT-транзистора использованы термины «эмиттер», «коллектор» и «затвор». Названия выводов IGBT-транзистора могут представляться непривычными (особенно это относится к коллектору, так как фактически он подключен к эмиттеру силового биполярного транзистора р-п-р-типа). И, тем не менее, эти названия общеприняты.



Рис. 6.14. IGBT-модуль производства АО «Ангстрем»

В настоящее время производство силовых модулей на основе IGBT-транзисторов осваивает ОАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск).

IGBT-модули обладают следующими преимуществами:

- электрическая изоляция элементов схем модулей от охлаждающих устройств, что позволяет устанавливать их на одном радиаторе (охладителе);
- легкость монтажа и удобство объединения с другими схемами преобразователя;
- минимизация паразитных индуктивностей в силовых цепях и, за счет этого, снижение всплесков перенапряжений и коммутационных потерь в транзисторах;
- надежная работа обеспечивается при предельных нагрузках по току и напряжению;
- возможность использования IGBT-модулей в параллельных соединениях;
- малые времена спада тока при выключении;
- очень низкие и практически не зависящие от температуры остаточные токи;
- высокие значения коммутируемых токов (до 1200 А) и напряжения (до 3,3 кВ).

С 1998 года ОАО Электровыпрямитель наладило производство модулей на ток 1200 А и напряжением 3300 В шириной 140 мм.