

1. Биполярные транзисторы
2. Полевые транзисторы

1. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Биполярным транзистором называют полупроводниковый прибор с двумя $p-n$ -переходами и тремя выводами, обеспечивающий усиление мощности электрических сигналов.

Основой биполярного транзистора (в дальнейшем будем называть его просто транзистором) является кристалл полупроводника, в котором создано два $p-n$ -перехода. В зависимости от чередования слоев с разным типом электропроводности различают два вида транзисторов: $p-n-p$ и $n-p-n$. На рис. 12.12 приведены соответственно их структурные схемы (а, б) и условные обозначения (в, г).

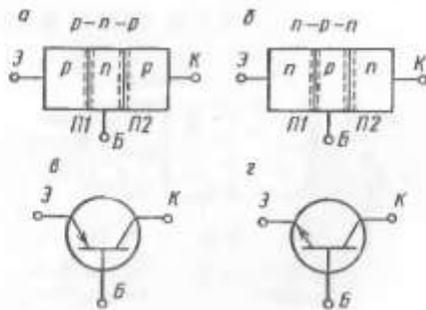


Рис. 12.12

чения (в, г). Средний слой кристалла называют базой. Ее толщина составляет всего несколько микрометров, и концентрация примесей здесь значительно меньше, чем в соседних слоях. Крайние слои называют эмиттером и коллектором. Все три слоя имеют выводы. Для защиты от внешних воздействий кристалл герметично закрывается металлическим или пластмассовым корпусом.

Для нормальной работы между выводами транзистора должны быть включены источники питания. Их можно включить таким образом, чтобы оба перехода оказались под обратным напряжением. Этот режим работы транзистора называют *отсечкой*. Все токи транзистора практически равны нулю и между электродами существует как бы разрыв цепи. Если изменить полярность источников, то оба перехода окажутся под прямым напряжением. Сопротивление переходов в этом случае мало, и транзистор можно рассматривать как узел электрической цепи. Такой режим его работы называют *насыщением*. Транзистор работает в активном режиме, когда эмиттерный переход находится под прямым напряжением (открыт), а коллекторный — под обратным напряжением (закрыт).

На рис. 12.13 показана схема включения транзистора $p-n-p$ при работе в активном режиме. Пусть вывод эмиттера разомкнут. Тогда через коллекторный переход будет протекать малый ток $I_{К0}$ закрытого перехода, обусловленный концентрацией неосновных носителей в базе и коллекторе. Как и обратный ток через диод, он практически не зависит от E_K .

Теперь включим эмиттерный источник $E_Э$. Эмиттерный переход открыт, и через него начнут проходить основные носители — дырки из эмиттера в базу, а электроны — из базы в эмиттер. Потечет ток эмиттера $I_Э$. Так как концентрация примесей в базе значительно меньше, чем в

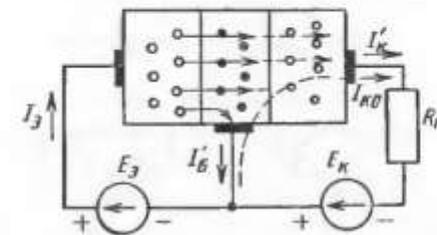


Рис. 12.13

эмиттере, то $I_{\text{Э}}$ обусловлен в основном перемещением дырок. Попав в область базы, дырки будут перемещаться под действием диффузии от эмиттерного перехода к коллекторному, поскольку концентрация их у эмиттерного перехода выше, чем у коллекторного.

Как изменится при этом ток коллектора: а) увеличится? б) уменьшится?

Источник питания $E_{\text{К}}$ включен так, что область коллектора отрицательна по отношению к базе. Дырки — это положительные носители заряда. Поэтому они пройдут через коллекторный переход в коллектор и тем самым увеличат ток коллектора на некоторую величину $I'_{\text{К}}$. Чем больше $I_{\text{Э}}$, тем больше дырок проходит из эмиттера в базу и тем больше их подойдет к коллекторному переходу. Поэтому можно считать, что $I'_{\text{К}} = \alpha I_{\text{Э}}$, где α — коэффициент передачи тока эмиттера. Часть дырок успевает рекомбинировать в базе, и $\alpha < 1$. В современных транзисторах база очень тонкая и рекомбинация невелика, поэтому $\alpha = 0,99$ и больше.

Полный ток коллектора

$$I_{\text{К}} = I'_{\text{К}} + I_{\text{К0}} = \alpha I_{\text{Э}} + I_{\text{К0}}. \quad (12.1)$$

Рекомбинация дырок в базе уменьшает концентрацию электронов и повышает потенциал базы. Источник $E_{\text{Э}}$ восполняет убыль электронов и создает дополнительную составляющую тока базы $I'_{\text{Б}}$.

Полный ток базы

$$I_{\text{Б}} = I'_{\text{Б}} + I_{\text{К0}}. \quad (12.2)$$

По первому закону Кирхгофа, для транзистора можно записать следующее уравнение токов:

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{К}} + I_{\text{Б}}. \quad (12.3)$$

Откуда, используя (12.1) и (12.2),

$$I_{\text{Б}} = I_{\text{Э}} - I_{\text{К}} = (1 - \alpha)I_{\text{Э}} - I_{\text{К0}}. \quad (12.4)$$

Если пренебречь относительно малым током $I_{\text{К0}}$, то уравнения (12.1) и (12.4) можно упростить:

$$I_{\text{К}} = \alpha I_{\text{Э}}; \quad I_{\text{Б}} = (1 - \alpha)I_{\text{Э}}.$$

Ясно, что $I_{\text{К}} \approx I_{\text{Э}}$ и $I_{\text{Б}} \ll I_{\text{К}}$.

Три схемы позволяют получить усиление мощности электрического сигнала. Если источник сигнала включить в эмиттерную цепь, а нагрузку в цепь коллектора (см. рис. 12.13), то получим схему включения транзистора с

общей базой (ОБ). База является общим электродом для входной и выходной (источника сигнала и нагрузки) цепей. Эта схема включения обеспечивает усиление сигнала по напряжению и мощности, но ток в нагрузке будет меньше, чем входной ток источника сигнала.

На рис. 12.14 показаны еще две схемы включения транзистора: а — с общим эмиттером (ОЭ) и б — с общим

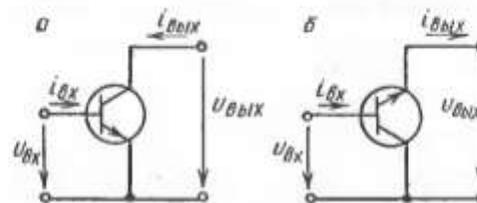


Рис. 12.14

коллектором (ОК). В схеме ОЭ входной ток — это ток базы $I_{\text{Б}}$, а выходной ток — ток коллектора $I_{\text{К}}$. Отношение этих токов называют коэффициентом передачи тока базы β . Так как $\alpha = 0,99$ и больше, то $\beta \gg 1$. Схема ОЭ обеспечивает усиление тока и напряжения сигнала и максимальное усиление мощности. Она чаще всего применяется в электронных устройствах.

Будет ли усиление сигнала по току в схеме ОК? — в) да; г) нет.

Характеристики транзистора зависят от схемы его включения. Чаще всего используются два семейства характеристик: входные (рис. 12.15, а) и выходные (рис. 12.15, б). Они приведены для транзистора КТ315, включенного по схеме ОЭ.

Выходные характеристики транзистора — это зависимости $I_{\text{К}} = f(U_{\text{КЭ}})$ при $I_{\text{Б}} = \text{const}$. При $I_{\text{Б}} = 0$ $I_{\text{К}} = I_{\text{К0}}$.

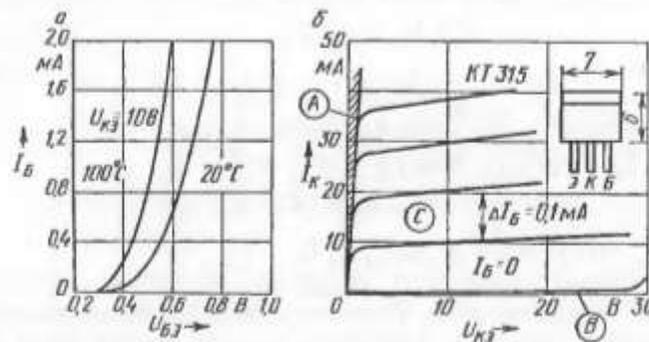


Рис. 12.15

Этот ток протекает через эмиттер и коллектор и мало зависит от напряжения $U_{кэ}$. При увеличении тока базы ток коллектора увеличивается в соответствии с уравнением.

$$I_k = \beta I_B + I_{к0}.$$

Каждому значению I_B соответствует своя характеристика. Характеристики смещены относительно начала координат, так как

$$U_{кб} = U_{кэ} - U_{бэ},$$

и при $U_{кэ} < U_{бэ}$ коллекторный переход оказывается под прямым напряжением, т. е. открытым. Этой области характеристик соответствует режим насыщения (область *A* на рис. 12.15, *б*). Режиму отсечки соответствует область *B*, а активному режиму — область *C*.

Зависимости $I_B = f(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = \text{const}$ называют входными характеристиками.

При нагреве транзистора во всех его областях увеличивается концентрация неосновных носителей. Это ведет к увеличению обратного тока через *p-n*-переходы, и все характеристики смещаются в область больших токов. Поэтому в практических схемах приходится предусматривать особые мероприятия для термостабилизации работы транзистора.

Биполярные транзисторы делятся на группы в зависимости от частоты сигнала и мощности, которую транзистор может рассеять. Для выбора типа транзистора в конкретных схемах применяются основные параметры, которые приводятся в справочниках. Напряжение $U_{кэ}$ транзистора при его работе не должно превышать предельно допустимое $U_{кэ \text{ max}}$, иначе коллекторный переход транзистора может быть пробит и транзистор выйдет из строя. Во избежание перегрева мощность, которая выделяется в транзисторе, не должна превышать предельно допустимую $P_{к \text{ max}}$.

Можно ли увеличить предельно допустимую мощность транзистора? — д) да; е) нет.

Для увеличения предельно допустимой мощности транзисторы устанавливают на радиаторах, увеличивающих отвод тепла. Например, у транзистора ГТ705 без теплоотвода допустимая мощность составляет 1,6 Вт, а при использовании радиатора — 15 Вт.

Полевым транзистором называют полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления мощности электрического сигнала. Выходной ток транзистора управляется электрическим полем.

Различают полевые транзисторы с управляющим *p-n*-переходом и с изолированным затвором. На рис. 12.16, *а* представлена структура транзистора с изолированным затвором или МОП-транзистора, на рис. 12.16, *б* — его условное обозначение, на рис. 12.16, *в* — схема включения. В кристалле кремния с *n*-электропроводностью по специальной технологии создаются две области с *p*-электропроводностью. Одна из областей называется *истоком* (И), вторая — *стоком* (С). Исток и сток соединены тонким каналом из такого же материала. Поверхность кристалла покрывается слоем диэлектрика, в качестве которого часто используется пленка оксида кремния. На диэлектрик над каналом напыляется слой металла — *затвор* (З). Все три электрода — исток, сток и затвор — имеют внешние выводы. Сам кристалл закрыт от внешних воздействий корпусом.

Между истоком и стоком включен источник питания E_H . Он включен так, чтобы основные носители в канале (на рис. 12.16 — дырки) перемещались от истока к стоку. Полевые транзисторы могут быть и с *n*-каналом.

При отсутствии напряжения между затвором и истоком ток стока I_C определяется сопротивлением канала.

Если между затвором и истоком подать напряжение $U_{зи}$ таким образом, что на затворе будет (+), а на истоке (-), то между затвором и *n*-областью возникает электрическое поле, которое выталкивает дырки из канала в *n*-область. Концентрация носителей становится меньше. Такой режим называют *режимом обеднения*.

При уменьшении концентрации носителей сопротивление канала возрастает и ток стока I_C уменьшается. При некотором $U_{зи}$, называемом *напряжением отсечки*, ток равен нулю.

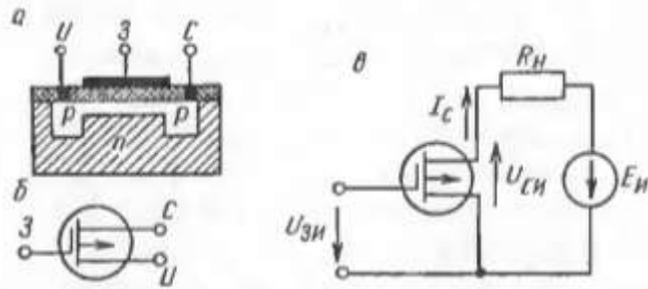


Рис. 2.16

Если поменять полярность и на затворе будет (-), а на истоке (+), то направление напряженности электрического поля изменится, и дырки будут втягиваться в канал из n-области. Концентрация носителей увеличится. Этот режим называют **режимом обогащения**.

Увеличение концентрации основных носителей заряда приводит к увеличению проводимости канала и возрастанию I_C .

Зависимость тока стока I_C от $U_{зи}$ при $U_{си} = \text{const}$ называют **характеристикой управления** транзистора. На рис. 12.17 показан ее внешний вид для рассмотренного

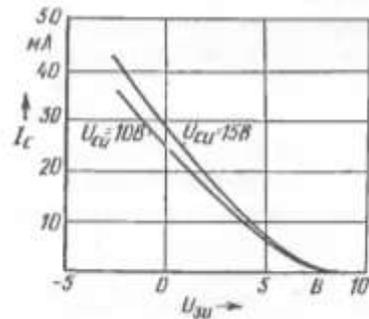


Рис. 12.17

типа транзистора. Так как затвор изолирован от канала с помощью диэлектрика, входное сопротивление полевого транзистора составляет $10^{12} - 10^{14}$ Ом, что значительно превосходит входное сопротивление биполярных транзисторов (около 10^3 Ом). Поэтому ток затвора практически равен нулю, а током I_C можно управлять почти без затрат мощности в управляющей цепи.

Основными параметрами полевых транзисторов являются **крутизна характеристики S** и **внутреннее сопротивление R_i** :

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{зи}} \quad \text{при } U_{си} = \text{const};$$

$$R_i = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_C} \quad \text{при } U_{зи} = \text{const}.$$

Обозначение транзисторов, как и других полупроводниковых приборов, состоит из четырех элементов. Первый из них — буква или цифра — указывает на полупроводниковый материал. Второй элемент обозначения для биполярного транзистора — буква Т, а для полевого — П. Далее трехзначная группа цифр обозначает тип транзистора по принятой классификации, и четвертый элемент — буква — разновидность данного типа. Например, КТ315А — это кремниевый биполярный транзистор малой мощности, высокой частоты, разновидность по классификационному параметру — А.

<https://eandc.ru/news/detail.php?ID=27664>

Полевым транзистором (ПТ) называется полупроводниковый радиокомпонент, используемый для усиления электрического сигнала. В цифровых устройствах схемы на основе ПТ исполняют функции ключей, управляющих переключениями логических элементов. В последнем случае использование полевых транзисторов оказывается крайне выгодным с точки зрения миниатюризации аппаратуры. Это обусловлено тем, что для цепей управления этими радиокомпонентами требуются небольшие мощности, вследствие чего на одном кристалле полупроводниковой микросхемы можно размещать десятки тысяч транзисторов.

Полупроводниковым сырьём для изготовления полевых транзисторов являются следующие материалы: карбид кремния; арсенид галлия; нитрид галлия; фосфид индия.

Устройство и принцип работы полевого транзистора

ПТ состоит из трёх элементов – истока, стока и затвора. Функции первых двух очевидны и состоят соответственно в генерировании и приёме носителей электрического заряда, то есть электронов или дырок. Предназначение затвора заключается в управлении током, протекающим через полевой транзистор. Таким образом, мы получаем классический триод с катодом, анодом и управляющим электродом.

В момент подачи напряжения на затвор возникает электрическое поле, изменяющее ширину р-п-переходов и влияющее на величину тока, который протекает от истока к стоку. При отсутствии управляющего напряжения ничто не препятствует потоку носителей заряда. С повышением управляющего напряжения канал, по которому движутся электроны или дырки, сужается, а при достижении некоего предельного значения закрывается вовсе, и ПТ входит в так называемый режим отсечки. Как раз это свойство полевых транзисторов и позволяет использовать их в качестве ключей.

Усилительные свойства радиокомпонента обусловлены тем, что мощный электрический ток, протекающий от истока к стоку, повторяет динамику напряжения, прикладываемого к затвору. Другими словами, с выхода усилителя снимается такой же по форме сигнал, что и на управляющем электроде, только гораздо более мощный.



Распространённые типы полевых транзисторов

В настоящее время в радиоаппаратуре применяются ПТ двух основных типов – с управляющим р-п-переходом и с изолированным затвором. Опишем подробнее каждую модификацию.

Тип транзистора	С каналом n-типа		С каналом p-типа	
	Полярность напряжений	Вольт-амперная характеристика	Полярность напряжений	Вольт-амперная характеристика
С управляющим p-n-переходом				
МДП со встроенным каналом				
МДП с индуцированным каналом				

1. С управляющим p-n-переходом

Эти полевые транзисторы представляют собой удлинённый полупроводниковый кристалл, противоположные концы которого с металлическими выводами играют роль стока и истока. Функцию затвора исполняет небольшая область с обратной проводимостью, внедрённая в центральную часть кристалла. Так же, как сток и исток, затвор комплектуется металлическим выводом.

Электронно-дырочный p-n-переход в таких полевых транзисторах получил название управляющего, поскольку напрямую изменяет мощность потока носителей заряда, представляя собой физическое препятствие для электронов или дырок (в зависимости от типа проводимости основного кристалла).

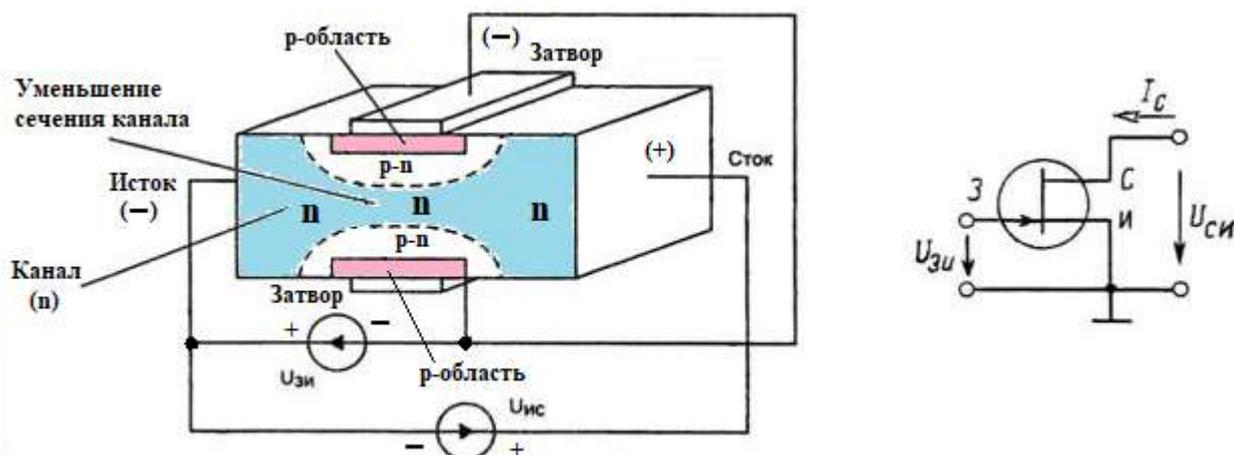
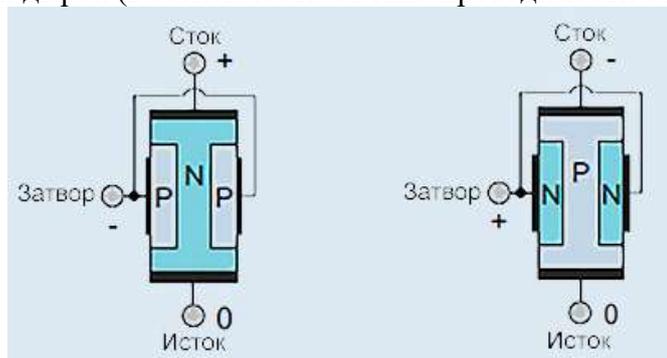


Схема работы полевого транзистора с управляющим p-n-переходом

В транзисторе с n-каналом основными носителями заряда в канале являются электроны, которые движутся вдоль канала от истока с отрицательным потенциалом к стоку с положительным потенциалом, образуя ток стока I_C . Между затвором и истоком приложено обратное напряжение, запирающее p-n-переход, образованный n-областью канала и p-областью затвора.

При подаче запирающего напряжения $U_{зи}$ на p - n -переход на границах канала возникает равномерный слой, обедненный носителями заряда и обладающий высоким удельным сопротивлением. Это приводит к уменьшению проводящей ширины канала.

2. С изолированным затвором

Конструкция этих полевых транзисторов отличается от описанных выше ПТ с управляющим p - n -переходом. Здесь полупроводниковый кристалл играет роль подложки, в которую на некотором удалении друг от друга внедрены две области с обратной проводимостью. Это исток и сток соответственно. Функцию затвора выполняет металлический вывод, который отделяется от кристалла слоем диэлектрика и, таким образом, электрически с ним не контактирует.

Из-за того, что в конструкции этих полевых транзисторов используются три типа материалов – металл, диэлектрик и полупроводник, – данные радиокомпоненты часто именуют МДП-транзисторами. В элементах, которые формируются в кремниевых микросхемах планарно-эпитаксиальными методами, в качестве диэлектрического слоя используется оксид кремния, в связи с чем буква «Д» в аббревиатуре заменяется на «О», и такие компоненты получают название МОП-транзисторов.

Существует два вида этих полевых транзисторов – с встроенным и индуцированным каналом.

У первых канал между истоком и стоком физически внедрён в подложку, и напряжение на затворе требуется не для формирования канала, а лишь для управления его характеристиками.

У вторых физический канал отсутствует и возникает только в результате воздействия электрического поля от затвора на подложку.

Для МДП-транзистора характерно то, что в нем между истоком и стоком располагается n -область, представляющая собой подложку. Поэтому образуется два p - n -перехода, которые включены навстречу друг другу. При этом вне зависимости от того, какую именно полярность имеет питающее напряжение, один из этих переходов всегда закрыт, так что в направлении «исток-сток» ток равен нулю.



Схема МОП-транзистора с встроенным каналом

Принцип работы транзисторов с индуцированным каналом.

В транзисторах с n -подложкой для появления индуцированного канала на затвор подают (-) относительно истока. В результате, под действием электрического поля в приповерхностный слой под диэлектриком начнут подтягиваться дырки из n -подложки. Таким образом, образуется индуцированный токопроводящий канал p -типа.

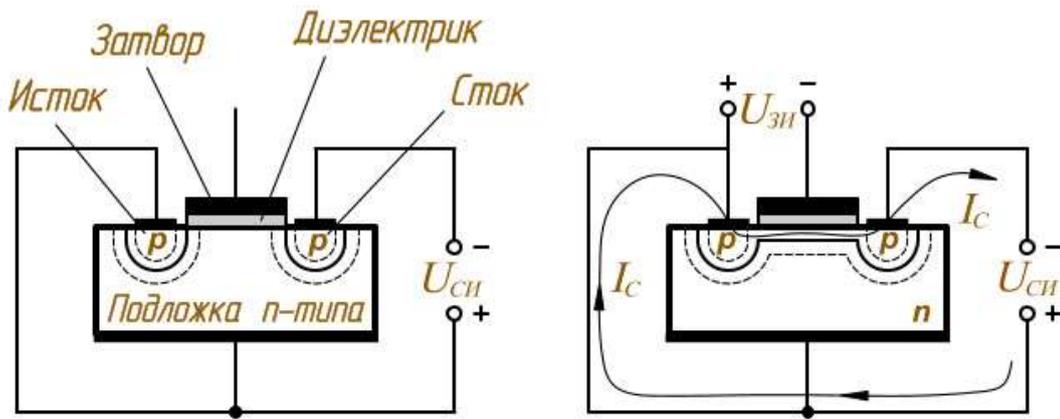


Схема работы МДП-транзистора с индуцированным каналом *p*-типа в *n*-подложке

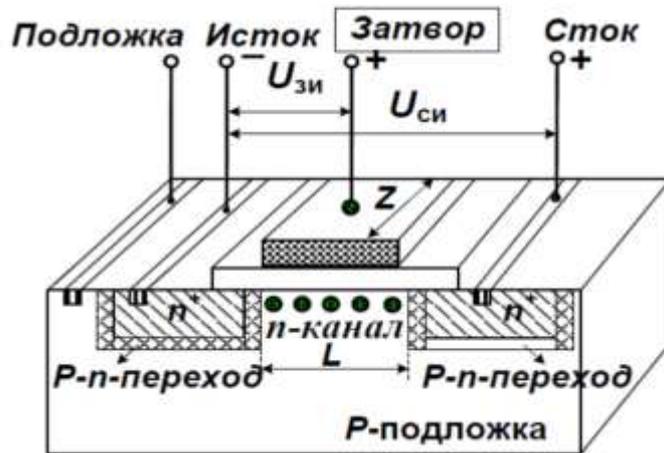
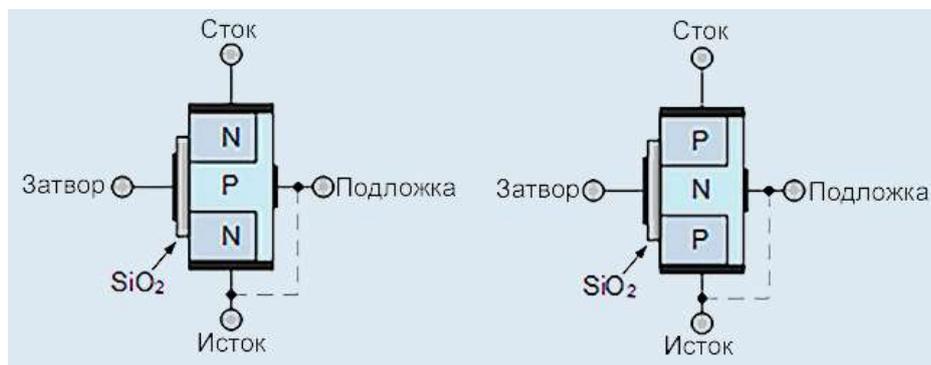


Схема МДП-транзистора с индуцированным каналом *n*-типа в *p*-подложке

В транзисторах с *p*-подложкой на затвор подают (+) относительно истока. Тогда под действием электрического поля в приповерхностный слой под диэлектриком начнут подтягиваться электроны из *p*-подложки и образуется индуцированный токопроводящий канал *n*-типа.



Схемы МОП-транзисторов с индуцированным каналом

Схемотехническое преимущество ПТ с изолированным затвором перед транзисторами с управляющим *p-n*-переходом заключается в более высоком входном сопротивлении. Это расширяет возможности применения данных элементов. К примеру, они используются в высокоточных устройствах и прочей аппаратуре, критичной к электрическим режимам.

В силу конструктивных особенностей МОП-транзисторы чрезвычайно чувствительны к внешним электрическим полям. Это вынуждает соблюдать особые меры предосторожности при работе с этими радиодетальями. В частности, в процессе пайки необходимо использовать паяльную станцию с заземлением, а, кроме того, заземляться должен и человек, выполняющий пайку. Даже маломощное статическое электричество способно повредить полевой транзистор.

Схемы включения полевых транзисторов

В зависимости от того, каким образом ПТ включается в усилительный каскад, существует три схемы – с общим истоком, с общим стоком и с общим затвором. Способы различаются тем, на какие электроды подаются питающие напряжения, и к каким цепям присоединяются источник сигнала и нагрузка.

Схема с общим истоком используется чаще всего, так как именно в этом случае достигается максимальное усиление входного сигнала. Способ включения ПТ с общим стоком используется, главным образом, в устройствах согласования, поскольку усиление здесь небольшое, но входной и выходной сигналы совпадают по фазе. И, наконец, схема с общим затвором находит применение, в основном, в высокочастотных усилителях. Полоса пропускания при таком включении полевого транзистора гораздо шире, чем при других схемах.

Основные параметры полевых транзисторов

Максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность;

Максимально допустимая рабочая частота;

Напряжение сток-исток;

Напряжение затвор-сток;

Напряжение затвор-исток;

Максимально допустимый ток стока;

Ток утечки затвора;

Крутизна характеристики;

Начальный ток стока;

Емкость затвор-исток;

Входная ёмкость;

Выходная ёмкость;

Проходная ёмкость;

Выходная мощность;

Коэффициент шума;

Коэффициент усиления по мощности.