**ТЕМА 5. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ**

Полевой транзистор – это электропреобразовательный прибор, в котором ток, протекающий через канал, управляется электрическим полем, возникающим при приложении напряжения между затвором и истоком, и который предназначен для усиления мощности электромагнитных колебаний.

К классу полевых относят транзисторы, принцип действия которых основан на использовании носителей заряда только одного знака (электронов или дырок). Управление током в полевых транзисторах осуществляется изменением проводимости канала, через который протекает ток транзистора под воздействием электрического поля. Вследствие этого транзисторы называют полевыми.

По способу создания канала различают полевые транзисторы с затвором в виде управляющего р-n- перехода и с изолированным затвором (МДП - или МОП - транзисторы): встроенным каналом и индуцированным каналом.

В зависимости от проводимости канала полевые транзисторы делятся на: полевые транзисторы с каналом р- типа и n- типа. Канал р- типа обладает дырочной проводимостью, а n- типа – электронной.

**5.1 Полевые транзисторы с управляющим р-n- переходом**

**5.1.1 Устройство и принцип действия**

Полевой транзистор с управляющим р-n- переходом – это полевой транзистор, затвор которого отделен в электрическом отношении от канала р-n-переходом, смещенным в обратном направлении.



Рисунок 5.1 – Устройство полевого транзистора с управляющим р-n-переходом (каналом n- типа)



Рисунок 5.2 – Условное обозначение полевого транзистора с р-n-переходом и каналом n- типа (а), каналом р- типа (б)

Каналом полевого транзистора называют область в полупроводнике, в которой ток основных носителей заряда регулируется изменением ее поперечного сечения.

Электрод (вывод), через который в канал входят основные носители заряда, называют истоком. Электрод, через который из канала уходят основные носители заряда, называют стоком. Электрод, служащий для регулирования поперечного сечения канала за счет управляющего напряжения, называют затвором.

Как правило, выпускаются кремниевые полевые транзисторы. Кремний применяется потому, что ток затвора, т.е. обратный ток р-n- перехода, получается во много раз меньше, чем у германия.

Условные обозначения полевых транзисторов с каналом n- и р- типов приведены на рис. 5.2.

Полярность внешних напряжений, подводимых к транзистору, показана на рис. 5.1. Управляющее (входное) напряжение подается между затвором и истоком. Напряжение Uзи является обратным для обоих р-n- переходов. Ширина р-n- переходов, а, следовательно, эффективная площадь поперечного сечения канала, его сопротивление и ток в канале зависят от этого напряжения. С его ростом расширяются р-n- переходы, уменьшается площадь сечения токопроводящего канала, увеличивается его сопротивление, а, следовательно, уменьшается ток в канале. Следовательно, если между истоком и стоком включить источник напряжения Uси, то силой тока стока Iс, протекающего через канал, можно управлять путем изменения сопротивления (сечения) канала с помощью напряжения, подаваемого на затвор. На этом принципе и основана работа полевого транзистора с управляющим р-n- переходом.

При напряжении Uзи = 0 сечение канала наибольшее, его сопротивление наименьшее и ток Iс получается наибольшим.

Ток стока Iс нач при Uзи = 0 называют начальным током стока.

Напряжение Uзи, при котором канал полностью перекрывается, а ток стока Iс становится весьма малым (десятые доли микроампер), называют напряжением отсечки Uзи отс.

**5.1.2 Статические характеристики полевого транзистора с управляющим р-n- переходом**

Рассмотрим вольт - амперные характеристики полевых транзисторов с р-n- переходом. Для этих транзисторов представляют интерес два вида вольт - амперных характеристик: стоковые и стоко - затворные.

Стоковые (выходные) характеристики полевого транзистора с р-n- переходом и каналом n- типа показаны на рис. 5.3, а. Они отражают зависимость тока стока от напряжения Uси при фиксированном напряжении Uзи: Ic = f(Uси) при Uзи = const.

а) б)



Рисунок 5.3 – Вольт-амперные характеристики полевого транзистора с р-п- переходом и каналом п- типа: а – стоковые (выходные); б – стоко - затворная

Особенностью полевого транзистора является то, что на проводимость канала оказывает влияние как управляющее напряжение Uзи, так и напряжение Uси. При Uси = 0 выходной ток Iс = 0. При Uси > 0 (Uзи = 0) через канал протекает ток Ic, в результате чего создается падение напряжения, возрастающее в направлении стока. Суммарное падение напряжения участка исток-сток равно Uси. Повышение напряжения Uси вызывает увеличение падения напряжения в канале и уменьшение его сечения, а следовательно, уменьшение проводимости канала. При некотором напряжении Uси происходит сужение канала, при котором границы обоих р-n- переходов смыкаются и сопротивление канала становится высоким. Такое напряжение Uси называют напряжением перекрытия или напряжением насыщения Uси нас. При подаче на затвор обратного напряжения Uзи происходит дополнительное сужение канала, и его перекрытие наступает при меньшем значении напряжения Uси нас. В рабочем режиме используются пологие (линейные) участки выходных характеристик.

Стоко - затворная характеристика полевого транзистора показывает зависимость тока Iс от напряжения Uзи при фиксированном напряжении Uси: Ic = f(Uси) при Uси = const (рис. 5.3, б).

**5.1.3 Основные параметры**

* максимальный ток стока Iс max (при Uзи = 0);
* максимальное напряжение сток-исток Uси max;
* напряжение отсечки Uзи отс;
* внутреннее (выходное) сопротивление ri − представляет собой сопротивление транзистора между стоком и истоком (сопротивление канала) для переменного тока:

при Uзи = const;



* крутизна стоко-затворной характеристики:

при Uси = const,



отображает влияние напряжение затвора на выходной ток транзистора;

* входное сопротивление при Uси = const транзистора определяется сопротивлением р-n- переходов, смещенных в обратном направлении. Входное сопротивление полевых транзисторов с р-n- переходом довольно велико (достигает единиц и десятков мегаом), что выгодно отличает их от биполярных транзисторов.



**5.2 Полевые транзисторы с изолированным затвором**

**5.2.1 Устройство и принцип действия**

Полевой транзистор с изолированным затвором (МДП - транзистор) – это полевой транзистор, затвор которого отделен в электрическом отношении от канала слоем диэлектрика.

МДП - транзисторы (структура: металл-диэлектрик-полупроводник) выполняют из кремния. В качестве диэлектрика используют окисел кремния SiO2. отсюда другое название этих транзисторов – МОП - транзисторы (структура: металл-окисел-полупроводник). Наличие диэлектрика обеспечивает высокое входное сопротивление рассматриваемых транзисторов (1012 … 1014Ом).

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.

Рассмотрим особенности МДП - транзисторов со встроенным каналом. Конструкция такого транзистора с каналом n-типа показана на рис. 5.4, а. В исходной пластинке кремния р- типа с относительно высоким удельным сопротивлением, которую называют подложкой, с помощью диффузионной технологии созданы две сильнолегированные области с противоположным типом электропроводности – n. На эти области нанесены металлические электроды – исток и сток. Между истоком и стоком имеется тонкий приповерхностный канал с электропроводностью n- типа. Поверхность кристалла полупроводника между истоком и стоком покрыта тонким слоем (порядка 0,1 мкм) диэлектрика. На слой диэлектрика нанесен металлический электрод – затвор. Наличие слоя диэлектрика позволяет в таком полевом транзисторе подавать на затвор управляющее напряжение обеих полярностей.



Рисунок 5.4 – Конструкция МДП - транзистора со встроенным каналом n- типа (а); семейство его стоковых характеристик (б); стоко-затворная характеристика (в)

При подаче на затвор положительного напряжения, электрическим полем, которое при этом создается, дырки из канала будут выталкиваться в подложку, а электроны вытягиваться из подложки в канал. Канал обогащается основными носителями заряда – электронами, его проводимость увеличивается и ток стока возрастает. Этот режим называют режимом обогащения.

При подаче на затвор напряжения, отрицательного относительно истока, в канале создается электрическое поле, под влиянием которого электроны выталкиваются из канала в подложку, а дырки втягиваются из подложки в канал. Канал обедняется основными носителями заряда, его проводимость уменьшается и ток стока уменьшается. Такой режим транзистора называют режимом обеднения.

В таких транзисторах при Uзи = 0, если приложить напряжение между стоком и истоком (Uси > 0), протекает ток стока Iс нач, называемый начальным и, представляющий собой поток электронов.

Конструкция МДП - транзистора с индуцированным каналом n- типа показана на рис. 5.5, а



Рисунок 5.5 – 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 (подложки) в случае приложения к затвору напряжения положительной полярности относительно истока. При отсутствии этого напряжения канала нет, между истоком и стоком n-типа расположен только кристалл р- типа и на одном из р-n- переходов получается обратное напряжение. В этом состоянии сопротивление между истоком и стоком очень велико, т.е. транзистор заперт. Но если подать на затвор положительное напряжение, то под влиянием поля затвора электроны будут перемещаться из областей истока и стока и из р- области (подложки) по направлению к затвору. Когда напряжение затвора превысит некоторое отпирающее, или пороговое, значение Uзи пор, то в приповерхностном слое концентрация электронов превысит концентрацию дырок, и в этом слое произойдет инверсия типа электропроводности, т.е. индуцируется токопроводящий канал n-типа, соединяющий области истока и стока, и транзистор начинает проводить ток. Чем больше положительное напряжение затвора, тем больше проводимость канала и ток стока. Таким образом, транзистор с индуцированным каналом может работать только в режиме обогащения.

Условное обозначения МДП - транзисторов приведены на рис. 5.6.



Рисунок 5.6 – Условное обозначение МДП - транзисторов:

а − со встроенным каналом n- типа;

б − со встроенным каналом р- типа;

в − с выводом от подложки;

г − с индуцированным каналом n- типа;

д − с индуцированным каналом р- типа;

е − с выводом от подложки

**5.2.2 Статические характеристики МДП - транзисторов**

Стоковые (выходное) характеристики полевого транзистора со встроенным каналом n- типа Ic = f(Uси) показаны на рис. 5.4, б.

При Uзи = 0 через прибор протекает ток, определяемый исходной проводимостью канала. В случае приложения к затвору напряжения Uзи < 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 Uзи < 0 располагаются ниже кривой, соответствующей Uзи = 0.

При подаче на затвор напряжения Uзи > 0 поле затвора притягивает электроны в канал из полупроводниковой пластины (подложки) р- типа. Концентрация носителей заряда в канале увеличивается, проводимость канала возрастает, ток стока Iс увеличивается. Стоковые характеристики при Uзи > 0 располагаются выше исходной кривой при Uзи = 0.

Стоко-затворная характеристика транзистора со встроенным каналом n-типа Ic = f(Uзи) приведена на рис. 5.4, б.

Стоковые (выходные) характеристики Ic=f(Uси) и стоко-затворная характеристика Ic = f(Uзи) полевого транзистора с индуцированным каналом n-типа приведены на рис. 5.5, б; в.

Отличие стоковых характеристик заключается в том, что управление током транзистора осуществляется напряжением одной полярности, совпадающей с полярностью напряжения Uси. Ток Ic = 0 при Uси = 0, в то время как в транзисторе со встроенным каналом для этого необходимо изменить полярность напряжения на затворе относительно истока.

**5.2.3 Основные параметры МДП - транзисторов**

Параметры МДП - транзисторов аналогичны параметрам полевых транзисторов с р-n- переходом.

Что касается входного сопротивления то МДП - транзисторы имеют лучшие показатели, чем транзисторы с р-n- переходом. Входное сопротивление у них составляет rвх = 1012 … 1014 Ом.

**5.2.4 Область применения**

Полевые транзисторы применяются в усилительных каскадах с большим входным сопротивлением, ключевых и логических устройствах, при изготовлении интегральных схем и др.

**5.3 Основные схемы включения полевых транзисторов**

Полевой транзистор можно включать по одной из трех основных схем: с общим истоком (ОИ), общим стоком (ОС) и общим затвором (ОЗ) (рис. 5.7).



Рисунок 5.7 – Схемы включения полевого транзистора: а) ОИ; б) ОЗ; в) ОС

На практике чаще всего применяется схема с ОИ, аналогичная схеме на биполярном транзисторе с ОЭ. Каскад с общим истоком дает очень большое усиление тока и мощности. Схема с ОЗ аналогична схеме с ОБ. Она не дает усиления тока, и поэтому усиление мощности в ней во много раз меньше, чем в схеме ОИ. Каскад ОЗ обладает низким входным сопротивлением, в связи с чем он имеет ограниченное практическое применение.

**5.4 Простейший усилительный каскад на полевых транзисторах**

В настоящее время широко применяются усилители, выполненные на полевых транзисторах. На рис. 5.9 приведена схема усилителя, выполненного по схеме с ОИ и одним источником питания.



Рисунок 5.9

Режим работы полевого транзистора в режиме покоя обеспечивается постоянным током стока Iсп и соответствующим ему напряжением сток-исток Uсип. Этот режим обеспечивается напряжением смещения на затворе полевого транзистора Uзип. Это напряжение возникает на резисторе Rи при прохождении тока Iсп (URи = Iсп Rи) и прикладывается к затвору благодаря гальванической связи через резистор R3. Резистор Rи, кроме обеспечения напряжения смещения затвора, используется также для температурной стабилизации режима работы усилителя по постоянному току, стабилизируя Iсп. Чтобы на резисторе Rи не выделялась переменная составляющая напряжения, его шунтируют конденсатором Си и таким образом обеспечивают неизменность коэффициента усиления каскада. Сопротивление конденсатора Си на наименьшей частоте сигнала должно быть намного большим сопротивления резистора Rи, которое определяют по выражению:

(5.1)



где Uзип, Iсп – напряжение затвор-исток и ток стока при отсутствии входного сигнала.

Емкость конденсатора выбирается из условия:

(5.2)



где fmin – наинизшая частота входного сигнала.

Конденсатор Ср называется разделительным. Он используется для развязки усилителя по постоянному току от источника входного сигнала.

Емкость конденсатора:

(5.3)



Резистор Rс выполняет функцию создания изменяющегося напряжения в выходной цепи за счет протекания в ней тока, управляемого напряжением между затвором и истоком.

При подаче на вход усилительного каскада переменного напряжения uвх напряжение между затвором и истоком будет изменяться во времени ΔUзи(t) = uвх; ток стока также будет изменяться во времени, т.е. появится переменная составляющая ΔIc(t) = ic. Изменение это тока приводит к изменению напряжения между стоком и истоком; его переменная составляющая uс равная по величине и противоположная по фазе падению напряжения на резисторе Rс, является входным напряжением усилительного каскада ΔUси(t) = uc = uвых = −Rcic.

В усилителях на МДП - транзисторах с индуцированным каналом необходимое напряжение Uзип обеспечивается включением в цепь затвора делителя R1R2 (рис. 5.10).



Рисунок 5.10

При этом

(5.4)



От выбранного значения тока делителя Iд = Ес/(R1+R2) зависят сопротивления резисторов R1 и R2. Поэтому ток делителя выбирают исходя из обеспечения требуемого входного сопротивления усилителя.

**5.5 Расчет электрических цепей с полевыми транзисторами**

В усилителе на полевом транзисторе, схема которого приведена на рис. 5.9, ток стока Ic и напряжение Uси связаны уравнением:

(5.5)



В соответствии с этим уравнением можно построить линию нагрузки (нагрузочную характеристику):

(5.6)



Для ее построения на семействе статических выходных (стоковых) характеристик полевого транзистора достаточно определить две точки:

1-я точка: полагает Ic = 0, тогда Uси = Ес;

2-я точка: полагает Uси = 0, тогда Ic = Ес/(Rc+Rи).

Графическим решением уравнения для выходной цепи рассматриваемого каскада являются точки пересечения линии нагрузки со стоковыми характеристиками.



Рисунок 5.11 – Графический расчет режима покоя каскада на полевом транзисторе при помощи выходных и входной характеристик

Значение тока стока Iс и напряжения Uси зависят также от напряжения затвора Uзи. Три параметра Iсп, Uсип и Uзип определяют исходный режим, или режим покоя усилителя. На выходных характеристиках этот режим отображается точкой По, лежащей на пересечении выходной нагрузочной характеристики с выходной статической характеристикой, снятой при заданном значении напряжения затвора.

Резистор R3 предназначен для подачи напряжения Uзип с резистора Rи между затвором и истоком транзистора. Сопротивление R3 принимают равным 1…2 МОм.

Сопротивление резистора Rи для обеспечения режима покоя, харак-теризуемого значениями Iс = Iсп и Uзи = Uзип (точка По, рис. 5.11), рассчитывают по формуле:

