

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Гобеева Ирина Ибрагимовна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Изучение характеристик полевого транзистора с изолированным
затвором**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19314

Научный руководитель:

ст.лаб. Д. С. Винник

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

И. И. Морозов

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

В рамках данной курсовой работы были изучены принципы работы, параметры и характеристики полевых транзисторов, а также основные схемы (каскады) на полевых транзисторах. На примере полевого транзистора с изолированным затвором IRFI4228PbF были экспериментально получены значения основных параметров полевых транзисторов, проведено их сравнение с данными из технического описания.

Ключевые слова: полевые транзисторы, MOSFET, каскады с полевыми транзисторами

Оглавление

Введение	4
1 Теоретические данные и методика расчетов	5
1.1 Устройство полевого транзистора и его классификация	5
1.2 Характеристики полевого транзистора	6
2 Экспериментальная часть	8
Заключение	10
Список литературы	12

Введение

Большинство современных схем, усиливающих электрический сигнал, или регулирующих работу устройств с помощью маломощного сигнала, имеют в своём составе полупроводниковые приборы, к которым относятся и транзисторы. Транзистор – это полупроводниковое устройство, увеличивающее мощность сигнала за счет внешнего источника питания. По принципу действия транзисторы делятся на два типа: полевые и биполярные.

В состав биполярного транзистора входят три последовательно расположенных чередующихся области полупроводника двух типов проводимости. К каждой области подключен электрод: к средней – база, к двум крайним коллектор и эмиттер. Различают *p-n-p* и *n-p-n* типы биполярных транзисторов. По биполярному транзистору протекает два тока: базовый ток и коллекторный ток, управляемый базовым.

В полевом транзисторе проводимостью канала управляет электрическое поле, создаваемое приложенным к затвору напряжением. Полевые транзисторы классифицируют на транзисторы с управляющим *p-n* переходом и с изолированным затвором. Последние подразделяются на приборы с индуцированным каналом и со встроенным каналом. Также все полевые транзисторы делят по типу проводимости на *p*-канальные и *n*-канальные.

Несмотря на разные принципы работы транзисторов, они имеют одинаковые электрические и временные параметры и, кроме того, схемы включения транзисторов практически идентичны, поэтому изучение процессов измерения параметров транзистора одного типа позволит в дальнейшем применить полученные навыки для получения параметров транзистора другого типа. В рамках данной курсовой работы была поставлена цель знакомства с устройством и принципом действия полевых транзисторов, изучение основных схем включения полевых транзисторов, их особенностей и некоторых характеристик на примере полевого транзистора с изолированным затвором.

1 Теоретические данные и методика расчетов

1.1 Устройство полевого транзистора и его классификация

Полевые транзисторы (ПТ) — это активные полупроводниковые приборы, предназначенные для усиления мощности электрических сигналов. Полевой транзистор имеет три электрода: затвор (управляющий электрод), сток (электрод, на который стекают заряды), исток (источник носителей заряда). Управление током, протекающим через канал «сток-исток», в ПТ осуществляется с помощью поперечного электрического поля, создаваемого приложенным к затвору напряжением.

Как уже было сказано, в общем случае полевые транзисторы можно разделить на два типа: с управляющим p - n переходом и с изолированным затвором:

а) В полевом транзисторе с управляющим p - n переходом затвор всегда должен быть смещен в обратном направлении или иметь нулевое напряжение относительно стока и истока. Полевой транзистор с управляющим p - n переходом состоит из пластины с проводимостью p - или n -типа, на противоположных концах которой расположены два электрода сток и исток. Сверху этой пластины находится область с противоположным типом проводимости, к которой присоединён третий электрод — затвор. На границе раздела полупроводников находится p - n переход с запирающим слоем. При подаче напряжения на затвор относительно истока $U_{зи}$ изменяется толщина p - n слоя, и, следовательно, толщина канала, по которому течет ток. В зависимости от величины $U_{зи}$ транзистор может работать в разных режимах: режим отсечки (в отсутствие или при отрицательном значении напряжения $U_{зи}$ ПТ представляет собой разрыв цепи при любом напряжении между стоком и истоком $U_{си}$), режим насыщения (после некоторой величины $U_{зи} = U_{насыщения}$ ток стока I_c перестаёт зависеть от $U_{си}$, транзистор полностью открыт) и линейный режим (ток стока I_c имеет линейную зависимость от $U_{си}$, $0 < U_{зи} < U_{насыщения}$).

б) Полевой транзистор с изолированным затвором имеет несколько названий: МДП-транзистор (металл-диэлектрик-полупроводник), МОП-транзистор

(металл-окисел-полупроводник), MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor).

Схема устройства полевого транзистора с изолированным затвором приведена на рис.1. У МОП-транзистора затвор электрически изолирован от канала тонким слоем диэлектрика, что полностью изолирует затвор от основного канала ПТ. Высокое входное сопротивление MOSFET-транзистора обеспечивается оксидным диэлектриком, а не обратносмещенным р-п-переходом, как у полевого транзистора с р-п-переходом. Управляющее напряжение воздействует на плотность носителей заряда в инверсионном слое под затвором. Этот слой образует проводящий канал между истоком и стоком и тем самым делает возможным протекание тока в канале.

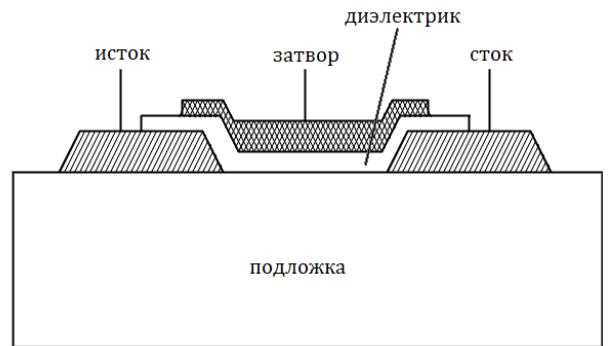


Рис.1. Устройство полевого транзистора с изолированным затвором

1.2 Характеристики полевого транзистора

Базовыми параметрами ПТ являются следующие электрические и временные характеристики:

- крутизна S ;
- паразитная емкость между затвором и истоком $C_{зи}$;
- паразитная емкость между затвором и стоком $C_{зс}$;
- время включения транзистора $t_{вкл}$;
- время выключения транзистора $t_{выкл}$;
- сопротивление открытого канала транзистора $R_{откр}$.

Крутизна S — величина, описывающая зависимость тока на стоке I_c от напряжения между затвором и истоком $U_{зи}$. Она определяется как

$$S = \frac{dI_c}{dU_{зи}}$$

и имеет размерность проводимости. Обычно величина крутизны транзисторов составляет единицы или десятки $\frac{\text{мА}}{\text{В}}$. Чем больше крутизна транзистора, тем быстрее он выходит в область насыщения из линейной области.

На включение и выключение полевого транзистора затрачивается некоторое время. Это происходит в силу инерционности ПТ (конечной скорости распространения электрического управляющего поля), что усугубляется наличием паразитных входных емкостей между за $C_{зи}$ и $C_{зс}$, накапливающих основные носители заряда в канале. Наличие этих емкостей связано со структурой ПТ, более того, ёмкость $C_{зс}$ со стороны затвора будет увеличена в соответствии с эффектом Миллера, поскольку она является отрицательной обратной связью в каскаде с затвором в качестве входа и стоком в качестве выхода транзистора:

$$C_{вх} = (1 + K_y) C_{зи},$$

где $K_y = SR_c$ – коэффициент усиления каскада.

При включении транзистора сначала заряжается ёмкость $C_{зи}$ (транзистор пока закрыт) (рис.2). Транзистор начнет открываться при достижении $U_{зи}$ порогового значения. В этот момент начинает срабатывать эффект Миллера, увеличивается входная ёмкость и скорость открывания транзистора замедляется. При открытии транзистора обратная связь обрывается.

Транзистор не является безынерционным устройством и, как и любой элемент цепи, обладает своим внутренним сопротивлением открытого канала $R_{откр}$; обычно эта величина не более 100 мОм, что в приближении и в сравнении с другими элементами цепи, может считаться как короткое замыкание.

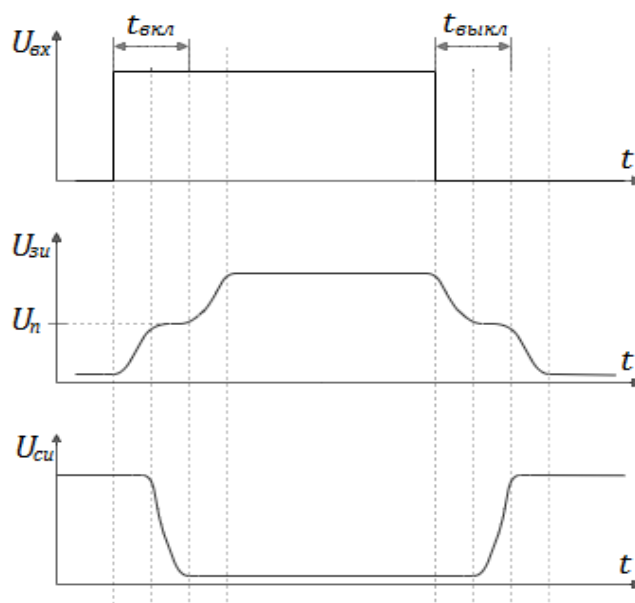


Рис.2. К объяснению задержки включения и выключения полевого транзистора.

2 Экспериментальная часть

Измерение характеристических параметров ПТ производится как без его включения в усилительные каскады ($R_{откр}$, $t_{вкл}$, $t_{выкл}$), так и с включением (S , $C_{зи}$, $C_{зс}$). В Таблице 1 представлены полученные экспериментально характеристики полевого транзистора и данные, взятые из технического описания (ТО) MOSFET IRFI4228PbF [1]. Важно отметить, что в техническом описании приведены не все параметры или приведены для определённых условий, что отражено подписью в скобках.

Таблица 1. Характеристики MOSFET IRFI4228PbF

	$S, \frac{mA}{V}$	$C_{зи}, нФ$	$C_{зс}, нФ$	$t_{вкл},$ мкс	$t_{выкл},$ мкс	$R_{откр}, МОм$
Эксперимент	15	$0,35 \pm 0,05$	$0,079 \pm 0,029$	3	7,6	110
Теория	-	5 $(f(U_{зи}) =$ 1МГц)	0,2 $(f(U_{зи})$ = 1МГц)	-	-	11 $(I_c = 20A)$

Ниже приведены условия, при которых были получены данные характеристики:

1) Для нахождения крутизны была собрана схема истокового повторителя, представленная на рисунке 3.

Коэффициент усиления истокового повторителя можно вычислить по формуле

$$K = \frac{R_{и}S}{R_{и}S+1} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} < 1,$$

Откуда крутизна

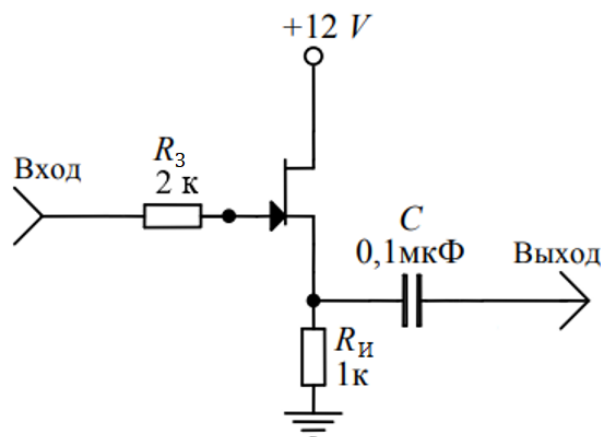


Рис.3. Схема истокового повторителя для нахождения крутизны

$$S = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{И}}(U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ВЫХ}})}$$

Полученная величина крутизны соответствует типичным значениям крутизны для полевых транзисторов; данные по величине S в ТО не представлены;

2) Для определения паразитной ёмкости между затвором и истоком также использовалась схема истокового повторителя. Эту схему можно представить как RC-цепь (рис.4.), тогда напряжение на

выходе

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{\sqrt{1 + R_3^2 \omega^2 C_{\text{ЗИ}}^2}},$$

отсюда можно выразить паразитную ёмкость:

$$C_{\text{ЗИ}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}}\right)^2 - 1}}{R_3 \omega}$$

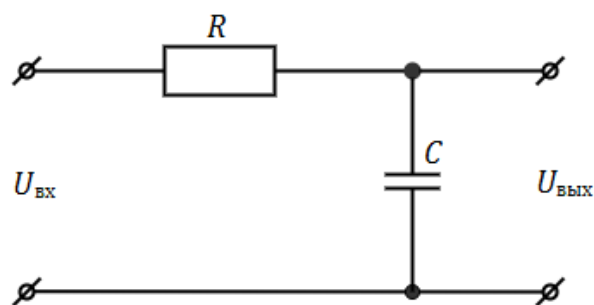


Рис.4. Схема RC-цепи

Измерения проводились при различных значениях частоты подаваемого на затвор синусоидального сигнала (амплитуда 5 В) от 100 до предельной частоты генератора (500 кГц) с шагом 50 кГц, после чего было посчитано среднее значение из полученных. Полученная величина ёмкости на порядок ниже представленной в ТО, что можно объяснить, как несовпадение условий эксперимента из ТО с используемыми в данной работе условиями (частота входного сигнала из ТО – 1 МГц, производилась вариация $U_{\text{СИ}}$). Тем не менее, полученная величина нуждается в дополнительной проверке в будущем.

3) Чтобы определить ёмкость между затвором и стоком была собрана схема с общим стоком (рис.5.). Эта схема так же представляется как RC-цепь (рис.4). С учетом эффекта Миллера ёмкость между затвором и стоком вычисляется по формуле:

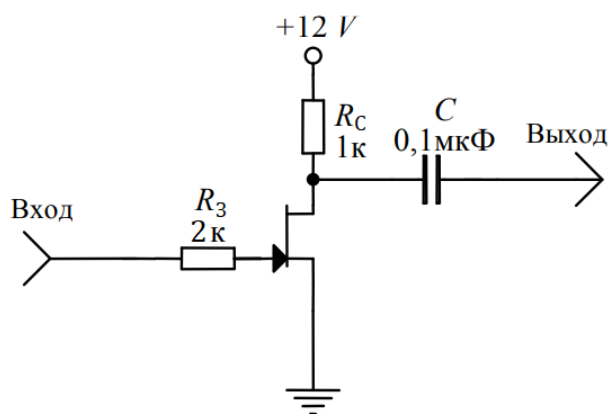


Рис.5. Каскад с общим истоком

$$C_{3c} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_{ВХ}}{U_{ВЫХ}}\right)^2 - 1}}{R_3 \omega (1 + SR_C)}$$

На вход подавался синусоидальный сигнал амплитудой 5 В. Было проведено 16 измерений. Из полученных измерений было взято среднее значение, причём в данном случае величина отличается меньше чем в три раза от теоретической, что вполне удовлетворительно для сравнения.

4) Для определения временных характеристик на затвор транзистора подавался прямоугольный сигнал с амплитудой 5 В и периодом 50 мкс и измерялась разница во времени между моментом прихода сигнала на затвор и моментом появления тока стока через канал транзистора. Поскольку аналогичных величин в ТО не представлено, анализ величин проводился из общих соображений, что характерные времена открытия ПТ находятся в диапазоне от десятков наносекунд до десятков микросекунд, причём время закрытия ПТ всегда больше времени открытия из-за присутствия носителей заряда в канале в открытом состоянии ПТ. Как видно из полученных данных, эксперимент полностью удовлетворяет теории.

5) Для измерения сопротивления открытого канала транзистора на его затвор было подано прямое напряжение 5 В, после чего к выводам «исток» и «сток» были приложены клеммы мультиметра. Более высокое в сравнении с теоретическим значением сопротивление может быть обусловлено на несколько порядков меньшим протекающим током через канал транзистора (от генератора тока на транзистор подавался ток 100 мА).

Заключение

В рамках данной работы был изучен принцип работы полевых транзисторов, рассмотрены основные усилительные каскады на транзисторах, получены основные параметры полевого транзистора с изолированным затвором IRFI4228PbF. Сравнительный анализ показал некоторое расхождение экспериментальных данных с теоретическими из технического описания, что может потребовать более детальной проверки, выходящей за рамки данной

курсовой работы. Тем не менее, полученные данные находятся в согласии с общепринятыми величинами характеристических параметров полевых транзисторов, что позволяет их расценивать как справедливые.

Список литературы

1. IRFI4228. – El Segundo: International Rectifier, 2006. – [9]p. – (Data Sheet IRFI4228).
2. Быков Е. В., Воскобойников Р. В., Иванов А. В., Кузин Г. И., Лебедев Н. Н., Павлов А. Ф., Тенкеджи О. А. Практикум по радиоэлектронике: Методическое руководство / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2013. 76 с.
3. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 3-х томах: Т1. Пер. с англ. – 4-е изд. перераб. и доп.– М.: Мир, 1993.– 413 с., ил.
4. Гринфилд Дж. Транзисторы и линейные ИС: Руководство по анализу и расчету: Пер. с англ.– М.: Мир, 1992.– 560 с., ил.