

Калужский филиал ПГУПС

Методическая разработка
по учебной дисциплине
ОП.02 Электротехника и электроника

программы подготовки специалистов среднего звена
по специальности СПО
13.02.07 Электроснабжение (по отраслям)

Тема: Полевые транзисторы.

Преподаватель: Жукова И.И

2017



ПОЧЕМУ ТРАНЗИСТОР – ПОЛЕВОЙ?

Слово «транзистор» образовано от двух английских слов translate и resistor, то есть, иными словами, это преобразователь сопротивления.

Среди всего многообразия транзисторов есть и полевые, т.е. такие, которые управляются электрическим полем.

Электрическое поле создается напряжением. Таким образом, полевой транзистор – это полупроводниковый прибор, управляемый напряжением.

В англоязычной литературе используется термин MOSFET (MOS Field Effect Transistor). Есть другие типы полупроводниковых транзисторов, в частности, биполярные, которые управляются током. При этом на управление затрачивается и некоторая мощность, так как к входным электродам необходимо прикладывать некоторое напряжение.

Канал полевого транзистора может быть открыт только напряжением, без протекания тока через входные электроды (за исключением очень небольшого тока утечки). Т.е. мощность на управление не затрачивается. На практике, однако, полевые транзисторы используются большей частью не в статическом режиме, а переключаются с некоторой частотой.

Конструкция полевого транзистора обуславливает наличие в нем внутренней переходной емкости, через которую при переключении протекает некоторый ток, зависящий от частоты (чем больше частота, тем больше ток). Так что, строго говоря, некоторая мощность на управление все-таки затрачивается.



ГДЕ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ?

Полевые транзисторы на материнской плате. Настоящий уровень технологии позволяет сделать сопротивление открытого канала мощного полевого транзистора (ПТ) достаточно малым – в несколько сотых или тысячных долей Ома!

И это является большим преимуществом, так как при протекании тока даже в десяток ампер рассеиваемая на ПТ мощность не превысит десятых или сотых долей Ватта.

Таким образом, можно отказаться от громоздких радиаторов или сильно уменьшить их размеры.

ПТ широко используются в компьютерных блоках питания и низковольтных импульсных стабилизаторах на материнской плате компьютера.

Из всего многообразия типов ПТ для этих целей используются ПТ с индуцированным каналом.

КАК РАБОТАЕТ ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР?

ПТ с индуцированным каналом содержит три электрода — исток (source), сток (drain), и затвор (gate).

Полевые транзисторы. Принцип работы ПТ наполовину понятен из графического обозначения и названия электродов.

Канал ПТ — это «водяная труба», в которую втекает «вода» (поток заряженных частиц, образующих электрический ток) через «источник» (исток).

«Вода» вытекает из другого конца «трубы» через «слив» (сток). Затвор — это «кран», который открывает или перекрывает поток. Чтобы «вода» пошла по «трубе», надо создать в ней «давление», т.е. приложить напряжение между стоком и истоком.

Если напряжение не приложено («давления в системе нет»), тока в канале не будет.

Схема включения полевого транзистора. Если приложено напряжение, то «открыть кран» можно подачей напряжения на затвор относительно истока.

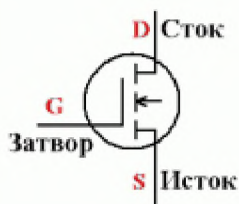
Чем большее подано напряжение, тем сильнее открыт «кран», больше ток в канале «сток-исток» и меньше сопротивление канала.

В источниках питания ПТ используется в ключевом режиме, т.е. канал или полностью открыт, или полностью закрыт.

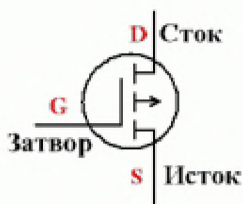
Честно сказать, принципы действия ПТ гораздо более сложны, он может работать не только в ключевом режиме. Его работа описывается многими заумными формулами, но мы не будем здесь все это описывать, а ограничимся этими простыми аналогиями.

Скажем только, что ПТ могут быть с n-каналом (при этом ток в канале создается отрицательно заряженными частицами) и p-каналом (ток создается положительно заряженными частицами). На графическом изображении у ПТ с n-каналом стрелка направлена внутрь, у ПТ с p-каналом — наружу.

Собственно, «труба» — это кусочек полупроводника (чаще всего — кремния) с примесями химических элементов различного типа, что обуславливает наличие положительных или отрицательных зарядов в канале.

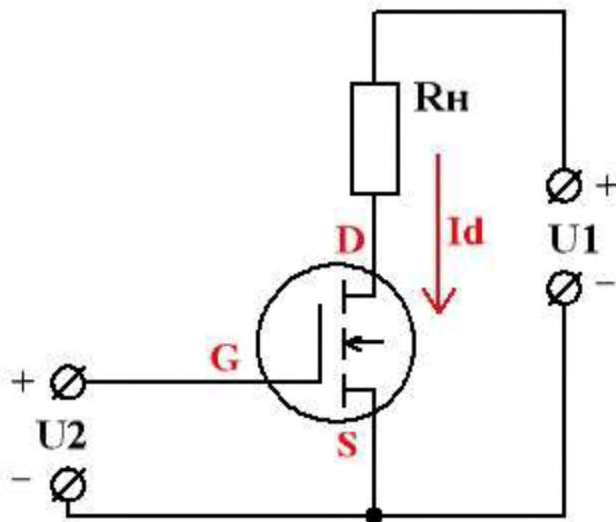


ПТ с n-каналом



ПТ с p-каналом

ПТ с приложенными напряжениями



КАК ПРОВЕРИТЬ ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР?

Встроенный защитный диод полевого транзистора в норме сопротивление между любыми выводами ПТ бесконечно велико.

И, если тестер показывает какое-то небольшое сопротивление, то ПТ, скорее всего, пробит и подлежит замене.

Во многих ПТ имеется встроенный диод между стоком и истоком для защиты канала от обратного напряжения (напряжения обратной полярности).

Таким образом, если поставить «+» тестера (красный щуп, соединенный с «красным» входом тестера) на исток, а «-» (черный щуп, соединенный с черным входом тестера) на сток, то канал будет «звониться», как обычный диод в прямом направлении.

Проверка защитного диода полевого транзистора. Это справедливо для ПТ с n-каналом. Для ПТ с p-каналом полярность щупов будет обратной.

Как проверить диод с помощью цифрового тестера, описано в соответствующей статье. Т.е. на участке «сток — исток» будет падать напряжение 500-600 мВ.

Если поменять полярность щупов, к диоду будет приложено обратное напряжение, он будет закрыт и тестер это зафиксирует.

Однако исправность защитного диода еще не говорит об исправности транзистора в целом. Более

того, если «прозванивать» ПТ, не выпаивая из схемы, то из-за параллельно подключенных цепей не всегда можно сделать однозначный вывод даже об исправности защитного диода.

В таких случаях можно выпаивать транзистор, и, используя небольшую схему для тестирования, однозначно ответить на вопрос – исправен ли ПТ или нет.

Схема для проверки MOSFET в исходном состоянии кнопка S1 разомкнута, напряжение на затворе относительно стока равно нулю. ПТ закрыт, и светодиод HL1 не светится.

При замыкании кнопки на резисторе R3 появляется падение напряжения (около 4 В), приложенное между истоком и затвором. ПТ открывается, и светодиод HL1 светится.

Эту схему можно собрать в виде модуля с разъемом для ПТ. Транзисторы в корпусе D2 pack (который предназначен для монтажа на печатную плату) в разъем не вставишь, но можно припаять к его электродам проводники, и уже их вставить в разъем. Для проверки ПТ с р-каналом полярность питания и светодиода нужно изменить на обратную.

Иногда полупроводниковые приборы выходят из строя бурно, с пиротехническими, дымовыми и световыми эффектами.

В этом случае на корпусе образуются дыры, он трескается или разлетается на куски. И можно сделать однозначный вывод об их неисправности, не прибегая к приборам.

В заключение скажем, что буквы MOS в аббревиатуре MOSFET расшифровываются как Metal — Oxide — Semiconductor (металл – оксид – полупроводник). Такова структура ПТ – металлический затвор («кран») отделен от канала из полупроводника слоем диэлектрика (оксида кремния).

Массивный полевой транзистор рис./схема.

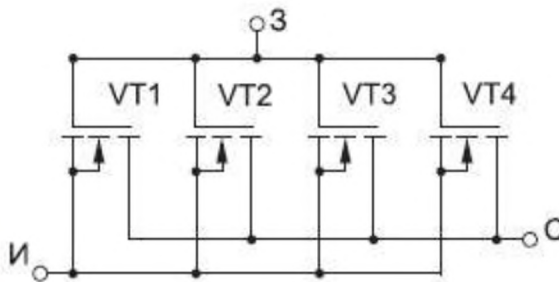
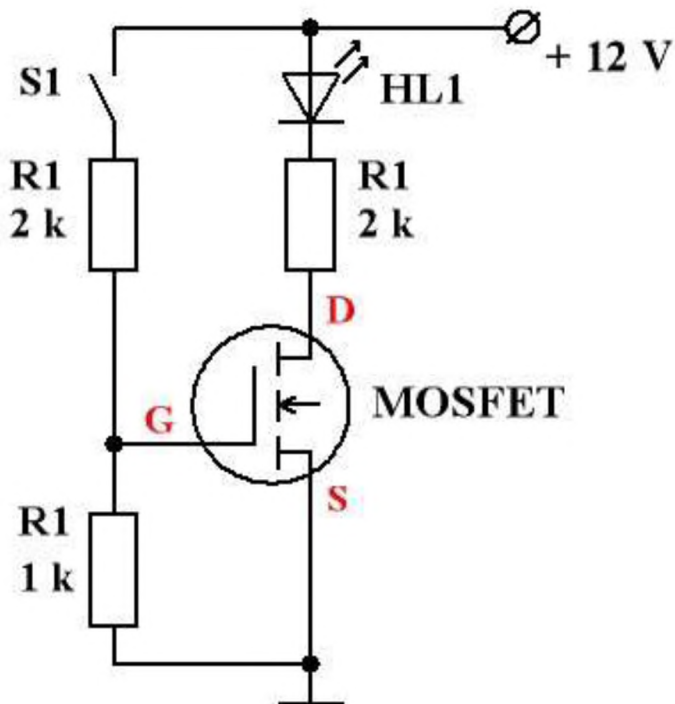


Схема для проверки ПТ



2.

Полевые транзисторы

Полевыми транзисторами называют активные полупроводниковые приборы, в которых выходным током управляют с помощью электрического поля (в биполярных транзисторах выходной ток управляется входным током). Полевые транзисторы называют также униполярными, так как в процессе протекания электрического тока участвует только один вид носителей.

Различают два вида полевых транзисторов: с управляющим переходом и с изолированным затвором. Все они имеют три электрода: исток (источник носителей тока), затвор (управляющий электрод) и сток (электрод, куда стекают носители).

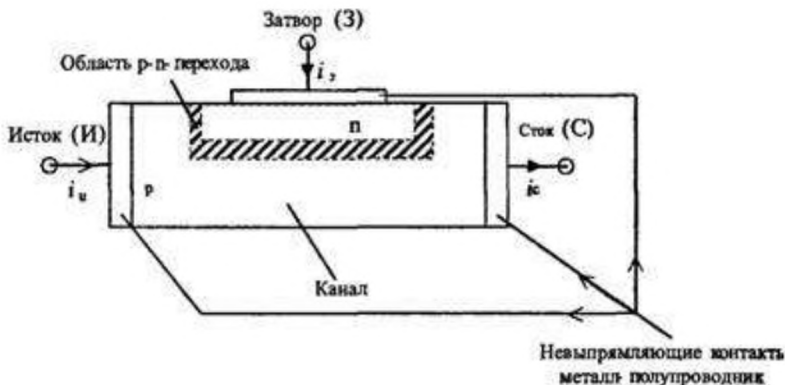


Рис. 1. Графическое изображение: а – канал р-типа; б – канал n-типа

Удельное сопротивление слоя n (затвора) намного меньше удельного сопротивления слоя p (канала), поэтому область p-n-перехода, обедненная подвижными носителями заряда и имеющая очень большое удельное сопротивление, расположена главным образом в слое p. (рис.1.)

Если типы проводимости слоев полупроводника в рассмотренном транзисторе изменить на противоположные, то получим полевой транзистор с управляющим

p-n-переходом и каналом n-типа. Если подать положительное напряжение между затвором и истоком транзистора с каналом p-типа: $u_{зи} > 0$, то оно сместит p-n-переход в обратном направлении.

При увеличении обратного напряжения на переходе он расширяется в основном за счет канала (в силу указанного выше различия в удельных сопротивлениях). Увеличение ширины перехода уменьшает толщину канала и, следовательно, увеличивает его сопротивление. Это приводит к уменьшению тока между истоком и стоком. Именно это явление позволяет управлять током с помощью напряжения и соответствующего ему электрического поля. Если напряжение $u_{зи}$ достаточно велико, то канал полностью перекрывается областью p-n-перехода (напряжение отсечки).

В рабочем режиме p-n-переход должен находиться под обратным или нулевым напряжением. Поэтому в рабочем режиме ток затвора примерно равен нулю ($i_z \approx 0$), а ток стока практически равен току истока.

На ширину p-n-перехода и толщину канала прямое влияние также оказывает напряжение между истоком и стоком. Пусть $u_{зи} = 0$ и подано положительное напряжение $u_{ис}$ (рис.2.). Это напряжение окажется поданным и на промежуток затвор – сток, т.е. окажется, что $u_{зс} = u_{ис}$ и p-n-переход находится под обратным напряжением.

Обратное напряжение в различных областях p-n-перехода различно. В областях вблизи истока это напряжение практически равно нулю, а в областях вблизи стока это напряжение примерно равно величине $u_{ис}$. Поэтому p-n-переход будет шире в тех областях, которые ближе к стоку. Можно считать, что напряжение в канале от истока к стоку увеличивается линейно.

При $u_{ис} = U_{зи}$ отс канал полностью перекрывается вблизи стока (рис. 3.). При дальнейшем увеличении напряжения $u_{ис}$ эта область канала, в которой он перекрыт, будет расширяться.

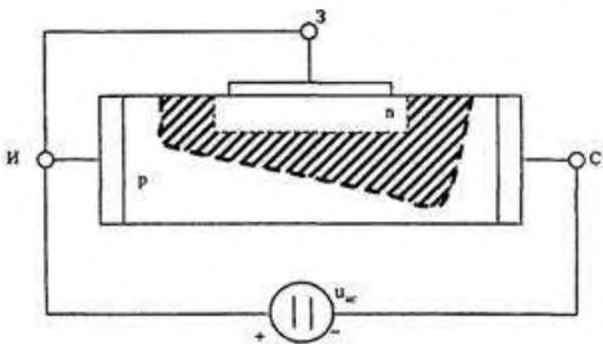


Рис. 2. Принцип действия транзистора

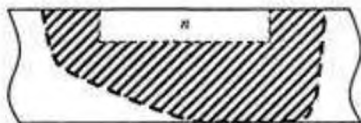


Рис. 3. Режим отсечки

Схемы включения транзистора. Для полевого транзистора, как и для биполярного, существуют три схемы включения: схемы с общим затвором (ОЗ), общим истоком (ОИ) и общим стоком (ОС). Наиболее часто используются схемы с общим истоком (рис. 4.).

Выходные характеристики для транзистора с р-п-переходом и каналом n-типа приведены на рис. 5.

Обратимся к характеристике, соответствующей условию $u_{зи} = 0$. В линейной области ($u_{ис} < 4$ В) характеристика почти линейна (все характеристики этой области представляют собой почти прямые линии, веерообразно выходящие из начала координат). Она определяется сопротивлением канала. Транзистор, работающий в линейной области, можно использовать в качестве линейного управляемого сопротивления.

При $u_{ис} > 4$ В канал в области стока перекрывается. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к очень незначительному росту тока, так как с увеличением напряжения область, в которой канал перекрыт, расширяется. При этом сопротивление промежутка исток-сток увеличивается, а ток i_c практически не изменяется. Это область насыщения. Ток стока в области насыщения $u_{зи} = 0$ и при заданном напряжении $u_{ис}$ называют начальным током стока и обозначают через $i_{с\text{ нач}}$. Для рассматриваемых характеристик $i_{с\text{ нач}} = 5$ мА при $u_{ис} = 10$ В.

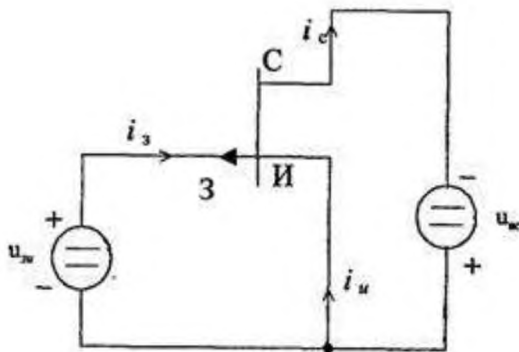


Рис. 4. Схема с общей базой

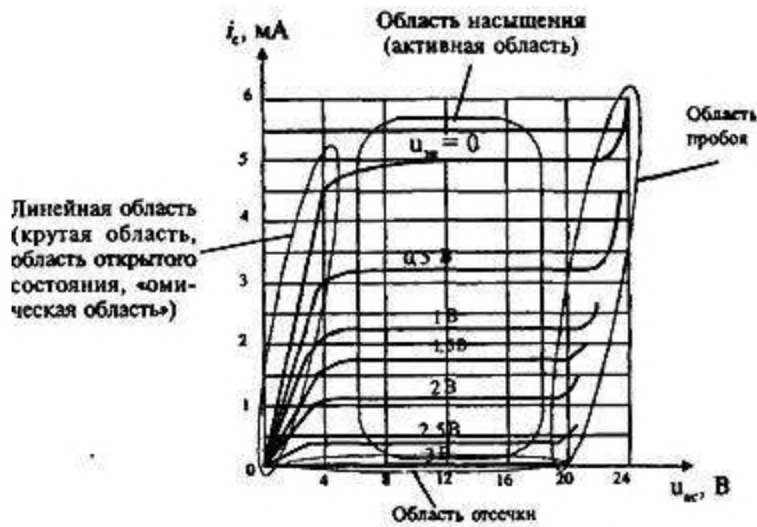


Рис. 5. Выходные характеристики

Параметрами, характеризующими свойства транзистора усиливать напряжение, являются:

- 1) Крутизна стокзатворной характеристики S (крутизна характеристики полевого транзистора):
- 2) Внутреннее дифференциальное сопротивление $R_{ис\ диф}$
- 3) Коэффициент усиления

Можно заметить, что

Транзисторы с изолированным затвором. Полевой транзистор с изолированным затвором – это транзистор, затвор которого отделен в электрическом отношении от канала слоем диэлектрика. Физической основой работы таких транзисторов является эффект поля, который состоит в изменении концентрации свободных носителей заряда в приповерхностной области полупроводника под действием внешнего электрического поля. В соответствии с их структурой такие транзисторы называют МДП-транзисторами (металл-диэлектрик-полупроводник) или МОП-транзисторами (металл-оксид-полупроводник). Существуют две разновидности МДП-транзисторов: с индуцированным и со встроенным каналами.

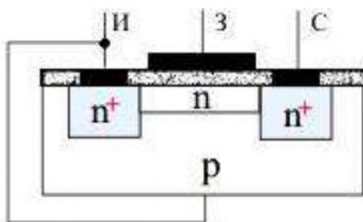
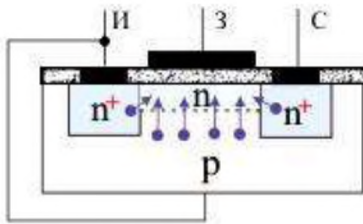


Рис. 6. Устройство МДП-транзистора со встроенным каналом n-типа

На рис. 6. показан принцип устройства транзистора со встроенным каналом.

Основанием (подложкой) служит кремниевая пластинка с электропроводностью р-типа. В ней созданы две области с электропроводностью n+-типа с повышенной проводимостью. Эти области являются истоком и стоком и от них сделаны выводы. Между стоком и истоком имеется при поверхностный канал с электропроводностью n-типа. Заштрихованная область – диэлектрический слой из диоксида кремния (его толщина обычно составляет 0,1 – 0,2 мкм). Сверху диэлектрического слоя расположен затвор в виде тонкой металлической пленки. Кристалл такого транзистора обычно соединен с истоком, и его потенциал принимается за нулевой. Иногда от кристалла бывает сделан отдельный вывод.



Если к затвору приложено нулевое напряжение, то при подаче между стоком и истоком напряжения через канал потечет ток, представляющий собой поток электронов. Через кристалл ток не пойдет, так как один из p-n-переходов находится под обратным напряжением. При подаче на затвор напряжения отрицательной полярности относительно истока (следовательно, и кристалла) в канале образуется поперечное электрическое поле, которое выталкивает электроны из канала в области истока, стока и кристалла. Канал обедняется электронами, его сопротивление увеличивается, ток уменьшается. Чем больше напряжение на затворе, тем меньше ток. Такой режим называется режимом обеднения. Если подать положительное напряжение на затвор, то под действием поля из областей стока, истока и кристалла в канал будут приходить электроны. Сопротивление канала падает, ток увеличивается. Такой режим называется режимом обогащения. Если кристалл n-типа, то канал должен быть p-типа и полярность напряжения меняется на противоположную.

Другим типом является транзистор с индуцированным (инверсным) каналом. От предыдущего он отличается тем, что канал возникает только при подаче на затвор напряжения определенной полярности.

При отсутствии напряжения на затворе канала нет, между истоком и стоком

n+-типа расположен только кристалл p-типа и на одном из p-n+-переходов получается обратное напряжение. В этом состоянии сопротивление между стоком и истоком велико и транзистор закрыт. При подаче на затвор напряжения положительной полярности под влиянием поля затвора электроны проводимости будут перемещаться из областей стока и истока и p-области по направлению к затвору. Когда напряжение на затворе достигает своего отпирающего (порогового) значения (единицы вольт), в приповерхностном слое концентрация электронов настолько увеличивается, что превышает концентрацию дырок, и в этом слое произойдет так называемая инверсия типа электропроводности, т.е. образуется тонкий канал n-типа, и транзистор начнет проводить ток. Чем больше напряжение на затворе, тем больше ток стока. Очевидно, что такой транзистор может работать только в режиме обогащения. Если подложка n-типа, то получится индуцированный канал p-типа. Транзисторы с индуцированным каналом часто встречаются в устройствах переключения. Схемы включения полевых транзисторов подобны схемам включения биполярных. Следует отметить, что полевой транзистор позволяет получить намного больший коэффициент усиления, нежели биполярный. Обладая высоким входным сопротивлением (и низким выходным) полевые транзисторы постепенно вытесняют биполярные.

По электропроводности канала различают р-канальные и n-канальные МДП-транзисторы. Условное обозначение этих приборов на электрических схемах показано на (рис. 7). Существует классификация МДП-транзисторов по конструктивно-технологическим признакам (чаще по виду материала затвора).

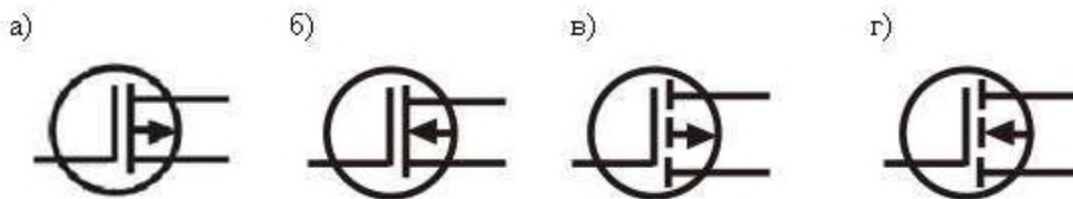


Рис. 7. Условные графические обозначения полевых транзисторов

с изолированным затвором: а – со встроенным р-каналом; б – со встроенным n-каналом; в – с индуцированным р-каналом; г – с индуцированным n-каналом.

Интегральные микросхемы, содержащие одновременно р-канальные и n-канальные МДП-транзисторы, называют комплементарными (сокращенно КМДП-ИМС). КМДП-ИМС отличаются высокой помехоустойчивостью, малой потребляемой мощностью, высоким быстродействием.

Частотные свойства полевых транзисторов определяются постоянной времени RC-цепи затвора. Поскольку входная емкость $C_{зи}$ у транзисторов с р-n-переходом велика (десятки пикофарад), их применение в усилительных каскадах с большим входным сопротивлением возможно в диапазоне частот, не превышающих сотен килоггерц – единиц мегагерц.

При работе в переключающих схемах скорость переключения полностью определяется постоянной времени RC-цепи затвора. У полевых транзисторов с изолированным затвором входная емкость значительно меньше, поэтому их частотные свойства намного лучше, чем у полевых транзисторов с р-n-переходом.

Таблица полевого транзистора .

Тип ПТ	Канал	Подложка	Режим	$U_{зи}$	$U_{зи\ отс}$ ($U_{зи\ пор}$)	$U_{см}$	$U_{пи}$
С управляющим р-n переходом	n	p	обедн.	<0	<0	>0	—
	p	n	обедн.	>0	>0	<0	—
МДП транзистор с индуцированным каналом (с изолир. затв. обогаш. типа)	n	p	обогащ.	>0	(>0)	>0	≤ 0
	p	n	обогащ.	<0	(<0)	<0	≥ 0
МДП - транзистор со встроенным каналом (с изолированным затвором обеднённого типа)	n	p	обедн.	<0	<0	>0	≤ 0
			обогащ.	>0			
	p	n	обедн.	>0	>0	<0	≥ 0
			обогащ.	<0			

Таблица обозначений ПТ.




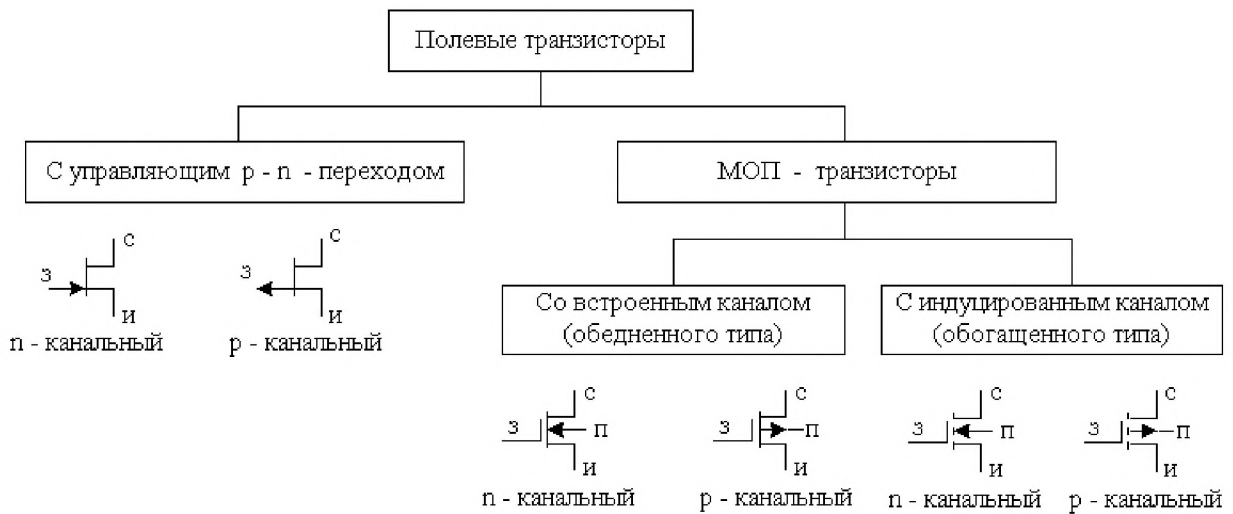
Наименование	Обозначение	
Полевой транзистор с управляющим переходом с <i>p</i> -каналом и <i>n</i> -каналом		
Полевой транзистор с изолированным затвором обогащенного типа с <i>p</i> -каналом и <i>n</i> -каналом (с индуцированным каналом)		
Полевой транзистор с изолированным затвором обедненного типа с <i>p</i> -каналом и <i>n</i> -каналом (со встроенным каналом)		

Таблица значений параметров ПТ .

ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

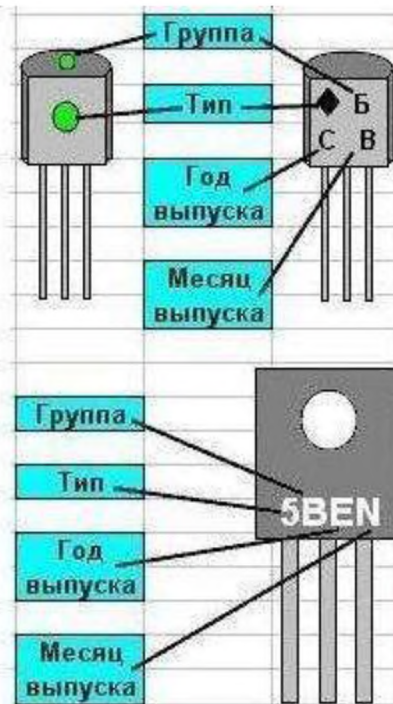
Тип транзистора	Параметры					
	S , мА/В	R_c , МОм	$U_{си\max}$, В	$P_{с\max}$, Вт	$I_{с\max}$, мА	$I_{э}$, А
С <i>p</i> - <i>n</i> -переходом	1—20	0,1—0,5	5—100	0,1—10	10—1000	10^{-6} — 10^{-9}
С изолированным затвором	0,5—50	0,1—0,5	5—1000	0,01—50	0,1—5000	10^{-10} — 10^{-15}

Классификация ПТ.



Обозначения ПТ .

Тип	Код	Цв. С торца
Для корпуса типа КТ-27		
КТ814	4	Серо-бежевый
КТ815	5	Серенево-фиолетовый
КТ816	6	Розово-красный
КТ817	7	Серо-зелёный
КТ683	8	Фиолетовый
КТ9115	9	Голубой
КУ112	12	-
КТ940	40	-
КТ972а	—	-
КТ9726	—	-
КТ973а	■	-
КТ9736	■ ■	-
КТ646а	▲	-
КТ6466	● ▲	-



**Вопросы для закрепления
изученного материала:**

- 1.Приведите классификацию полевых транзисторов.**
- 2.Перечислите области полевого транзистора.**
- 3.Укажите, как происходит управление проводимостью канала в полевом транзисторе с управляющим p-n переходом.**
- 4.Укажите, что представляет собой полевой МДП транзистор.**
- 5.Перечислите основные параметры полевых транзисторов.**
- 6.Укажите, какая информация о транзисторах включена в систему условных обозначений.**