

## **Лекция № 7. Полевые транзисторы, их устройство, принцип работы, характеристики, области применения.**

### **Особенности структур полевых транзисторов**

*Полевой транзистор – это полупроводниковый прибор, имеющий три электрода: исток, сток и затвор.* Между истоком и стоком в кристалле полупроводника, из которого выполнен полевой транзистор, расположен канал, через который течёт ток транзистора. Канал выполняется из полупроводника одного типа –  $n$  или  $p$ . Управление током, текущим через канал, осуществляется путём изменения проводимости канала, которая зависит от напряжения между затвором и истоком. В отличие от биполярных транзисторов, в которых ток транзистора от эмиттера к коллектору течёт последовательно через два  $p$ - $n$ -перехода, в полевых транзисторах ток течёт через канал, который образуется в полупроводнике одного типа проводимости, и через  $p$ - $n$ -переход не течёт. Так как направление тока в полевом транзисторе – от истока – через канал – к стоку, а управление током осуществляется напряжением между затвором и истоком, то исток соответствует эмиттеру биполярного транзистора; сток – коллектору, а затвор – базе.

Изменение проводимости канала может осуществляться двумя способами. В зависимости от этого полевые транзисторы делятся на два основных вида: транзисторы с *управляющим  $p$ - $n$ -переходом* и транзисторы с *изолированным затвором*.

### **Полевые транзисторы с управляющим $p$ - $n$ -переходом**

В полевых транзисторах с управляющим  $p$ - $n$ -переходом управление током транзистора достигается путём изменения сечения канала за счёт изменения области, занимаемой этим переходом. Управляющий  $p$ - $n$ -переход образуется между каналом и затвором, которые выполняются из полупроводников противоположных типов проводимости. Так, если канал образован полупроводником  $n$ -типа (рис. 40,а), то затвор – полупроводником  $p$ -типа. Напряжение между затвором и истоком всегда подаётся обратной полярности, т. е. запирающей  $p$ - $n$ -переход. При подаче напряжения обратной полярности область, занимаемая  $p$ - $n$ -переходом, расширяется. При этом расширяется и область, обеднённая носителями заряда, а значит, сужается область канала, через которую может течь ток. Причём, чем больше значение запирающего напряжения, тем шире область, занимаемая  $p$ - $n$ -переходом, и тем меньше сечение и проводимость канала. Условные обозначения транзисторов с разными каналами показаны на рис. 40 б, в.

В отличие от биполярного, работа полевого транзистора может также описываться непосредственной зависимостью выходного параметра – тока стока от входного – управляющего напряжения между затвором и истоком.

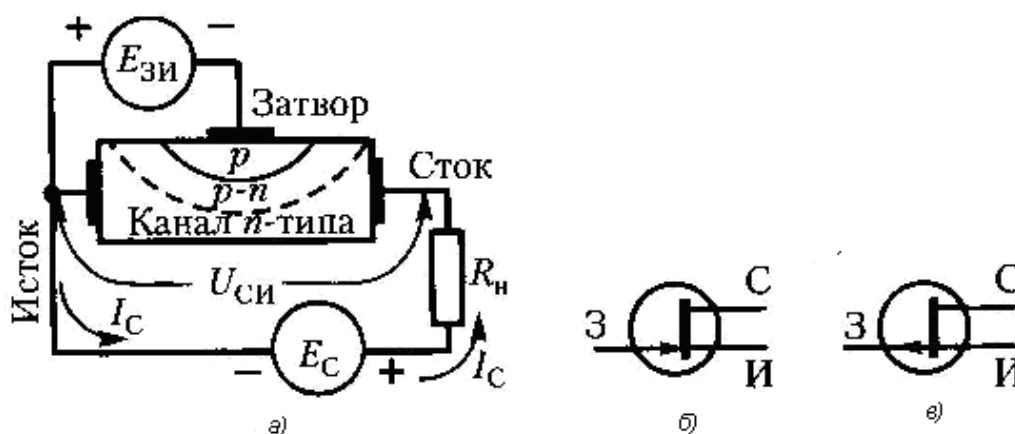
Эти характеристики называются *передаточными (переходными)*, или *стокзатворными*.

Так как управляющий *p-n*-переход всегда заперт, у полевого транзистора практически отсутствует входной ток. Благодаря этому они имеют очень высокое входное сопротивление и практически не потребляют мощности от источника управляющего сигнала. Это свойство относится не только к транзисторам с управляющим *p-n*-переходом, но и ко всем полевым транзисторам, что выгодно отличает их от биполярных с точки зрения более высокого КПД.

### Полевые транзисторы с изолированным затвором

Если в полевых транзисторах с управляющим *p-n*-переходом затвор имеет электрический контакт с каналом, то в полевых транзисторах с изолированным затвором такой контакт отсутствует. В этих транзисторах (рис. 5, а) затвор представляет собой тонкую плёнку металла, изолированного от полупроводника. В зависимости от вида изоляции различают МДП и МОП-транзисторы. Аббревиатура «МДП» расшифровывается как «металл – диэлектрик – полупроводник», а «МОП» – как «металл – оксид – полупроводник». В последнем случае под «оксидом» понимается оксид кремния, который является высококачественным диэлектриком.

Исток и сток формируют в виде сильно легированных областей полупроводника. За счёт этого области стока и истока имеют высокую концентрацию носителей, что отмечено на рисунке знаком «+». Как МДП-, так и МОП- транзисторы могут быть выполнены с каналом *p*- и *n*-типов. Канал в этой группе транзисторов может быть *встроенным* (т. е. созданным при изготовлении) и *индуцированным* (т. е. наводящимся под влиянием напряжения, приложенного к затвору).



**Рисунок 40 – Полевые транзисторы:**

а) с управляющим *p-n*-переходом; б) и в) – условное обозначение транзисторов с *n*-каналом и *p*-каналом

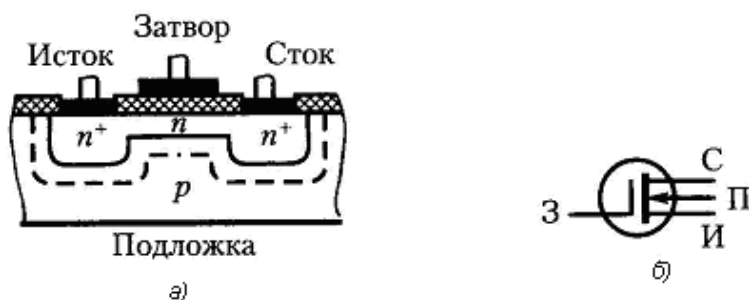


Рисунок 41 – Полевой транзистор:

а) с изолированным затвором и встроенным каналом и его условное обозначение б)

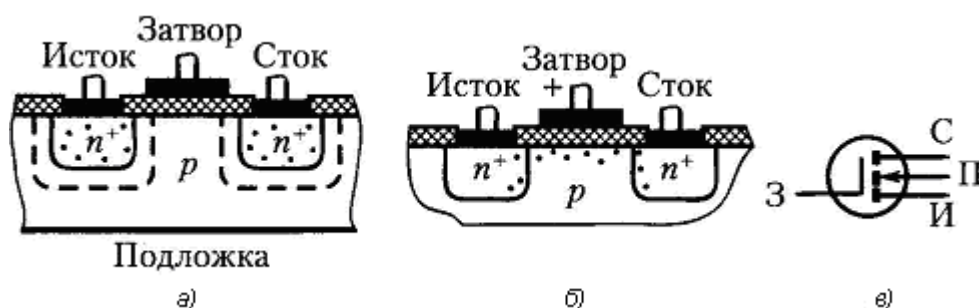
### Полевые транзисторы с встроенным каналом

Разновидностью транзистора с изолированным затвором является транзистор с встроенным каналом. На рис. 41, а изображён МДП-транзистор с встроенным каналом  $n$ -типа (тонким слоем полупроводника  $n$ -типа), соединяющим исток и сток ( $n^+$  – области). Эти области образованы в подложке – полупроводнике  $p$ -типа. Строго говоря, в МДП- и МОП-транзисторах не три, а четыре электрода, включая подложку. Однако часто подложку электрически соединяют с истоком (или стоком), образуя три вывода.

В зависимости от полярности напряжения  $U_{зи}$ , приложенного к затвору относительно истока, в канале может изменяться концентрация основных носителей (в рассматриваемом случае – электронов). При отрицательном напряжении на затворе  $U_{зи}$  электроны выталкиваются из области канала в области  $n^+$ , канал обедняется носителями и ток  $I_C$  снижается. Положительное напряжение на затворе втягивает электроны из областей  $n^+$  в канал и ток  $I_C$  через канал возрастает. Таким образом, в отличие от полевого транзистора с  $p$ - $n$ -переходом в этом полевом транзисторе управляющее напряжение может быть как отрицательным, так и положительным.

### Полевой транзистор с индуцированным каналом

Этот вид транзистора отличается от предыдущего тем, что при отсутствии напряжения на затворе канал отсутствует, так как  $n$ -области истока и стока образуют с  $p$ -подложкой два  $p$ - $n$ -перехода, включённые навстречу друг другу, и, значит, при любой полярности напряжения  $U_{си}$  один из переходов заперт (рис. 42, а).



### **Рисунок 42 – Полевой транзистор:**

а) с индуктивным каналом в исходном состоянии; б) при приложенном напряжении на затворе; в) условное обозначение

Если же на затвор подать напряжение больше порогового  $U_{зи} > U_{зипор.}$ , то созданное им электрическое поле вытягивает электроны из  $n^+$ -областей ( и в какой то мере из подложки), образуя тонкий слой  $n$ -типа в приповерхностной области  $p$ -подложки (рис. 42,б). Этот слой соединяет исток и сток, являясь каналом  $n$ -типа. От подложки канал изолирован возникшим обеднённым слоем.

Таким образом, полевые транзисторы с индуцированным  $n$ -каналом ( $n$ -МОП-транзисторы), в отличие от рассмотренных ранее полевых транзисторов, управляются только положительным сигналом  $U_{зи}$ . Значение порогового напряжения у них  $0,1 \div 0,2$  В.

Значительно больше пороговое напряжение у  $p$ -МОП-транзистора, принцип работы которого аналогичен  $n$ -МОП-транзистору. Но в связи с тем, что носителями в нём служат дырки, а не электроны, полярность всех напряжений у этого транзистора противоположна  $n$ -МОП-транзистору.

Значение порогового напряжения этого типа транзисторов составляет  $2 \div 4$  В.

Особенностью таких транзисторов является то, что форма переходной характеристики такая же как входная характеристика у биполярных транзисторов.

Как и биполярные, полевые транзисторы можно включать по схеме с общим затвором (ОЗ), общим истоком (ОИ) и общим стоком (ОС). Наиболее распространена схема включения с ОИ, которая, подобно схеме с ОЭ биполярных транзисторов, обеспечивает одновременно усиление по току, напряжению и мощности.

### **Преимущества полевых транзисторов**

К преимуществам полевых транзисторов следует отнести:

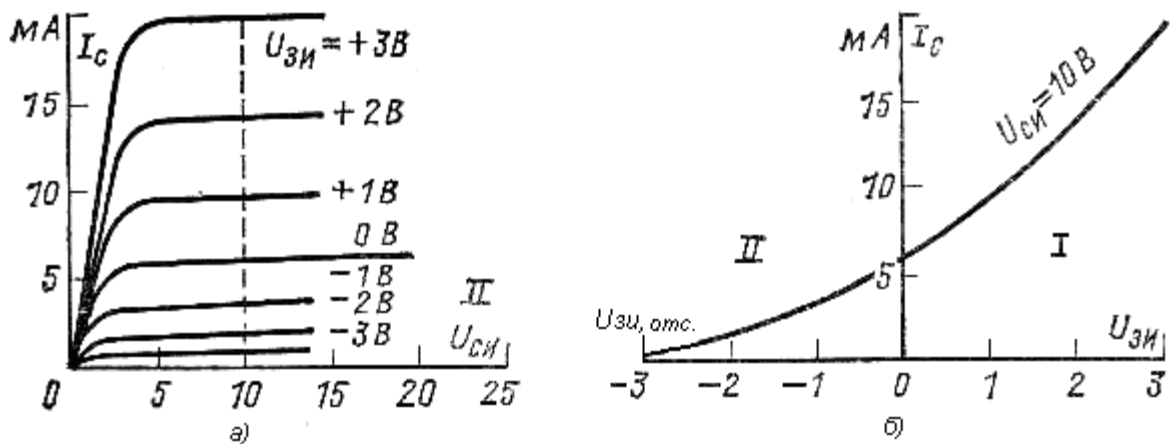
- 1) высокое входное сопротивление в схеме с ОИ;
- 2) малый уровень собственных шумов, т. к. перенос тока осуществляют только основные для канала носители и, следовательно, нет рекомбинационного шума;
- 3) высокая устойчивость против температурных и радиоактивных воздействий;
- 4) высокая плотность расположения элементов при изготовлении интегральных микросхем.

В транзисторах со встроенным каналом ток в цепи стока протекает и при нулевом напряжении на затворе. Для его прекращения необходимо к затвору приложить положительное (при структуре с каналом  $p$ -типа) или отрицательное (при структуре с каналом  $n$ -типа), равное или большее  $U_{зиотс.}$  (рис.43,б).

Отметим также интересную особенность полевых транзисторов: в принципе исток и сток в транзисторах равноправны, т. е. в зависимости от полярности приложенного напряжения исток и сток могут меняться местами. На этом свойстве основано использование полевых транзисторов в качестве электронных ключей вместо обычных контактных переключателей.

Полевые транзисторы широко используются в усилителях, генераторах, преобразователях сигналов и другой радиоэлектронной аппаратуре, а МОП-транзисторы являются основой для разработки всех современных средств вычислительной техники и аппаратуры цифровой обработки информационных сигналов.

Сравнивая условные обозначения полевых транзисторов, заметим, что стрелка в них *всегда направлена от p-области к n-области*, что позволяет легко установить, например, тип канала транзистора.



**Рисунок 43 – Характеристики полевого транзистора с изолированным затвором со встроенным каналом**

а) выходная; б) переходная. В области I транзистор работает с индуцированным каналом, а в области II – в режиме со встроенным каналом

### Основные параметры полевых транзисторов и их ориентировочные значения

1. Крутизна характеристики  $S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \approx \mu_n \cdot C_{зп} \cdot U_{зи}$   $S = 0,1 - 500$  mA/V.
2. Начальный ток стока  $I_{с.нач}$  – ток стока при нулевом напряжении  $U_{зи}$ , у транзисторов с управляющим *p-n-переходом* составляет 0,2 – 600 мА; с технологически встроенным каналом – 0,1–100 мА; с индуцированным каналом – 0,01 – 0,5 мкА.
3. Напряжение отсечки  $U_{зи.отс.}$  (0,2 – 10 В).
4. Пороговое напряжение  $U_{зи.пор.}$  (1 – 6 В).
5. Сопротивление сток – исток в открытом состоянии  $R_{си.отк.}$  (2 – 300 Ом).
6. Постоянный ток стока  $I_{с.мах}$  (от 10 мА до 0,7 А).

7. Остаточный ток стока  $I_{C.ост.}$  – остаточный ток при напряжении  $U_{ЗИ.ост}$  (0, 001 – 10 мА).

8. Максимальная частота усиления  $f_P$  – частота, на которой коэффициент усиления по мощности равен единице (десятки – сотни МГц).

Обозначения полевых транзисторов аналогичны обозначениям биполярных транзисторов, только вместо буквы Т ставится буква П, например КП103А, КП 105Б.

### ***Контрольные вопросы и задания***

1. Принципиальное отличие структуры р-п-переходов биполярных и полевых транзисторов.
2. Почему полевой транзистор по способу управления сравнивается с электронной лампой?
3. Способ изменения типа проводимости у полевых транзисторов.
4. Схемы включения полевых транзисторов.
5. Структура и принцип работы транзистора с управляющим р-п-переходом.
6. Структура и принцип работы транзистора с индуцированным затвором (каналом).
7. Разница в структуре МДП- и МОП-транзисторов.
8. Особенности структуры транзисторов со встроенным и индуцированным каналом.
9. Почему в схеме с ОИ у полевых транзисторов высокое входное сопротивление?
10. Почему у транзисторов с индуцированным каналом управляющее напряжение однополярное, а с встроенным каналом – как положительное, так и отрицательное?
11. Преимущества полевых транзисторов перед биполярными.
12. Основные параметры полевых транзисторов.
13. Какие из полевых транзисторов чаще всего применяются в интегральных микросхемах?

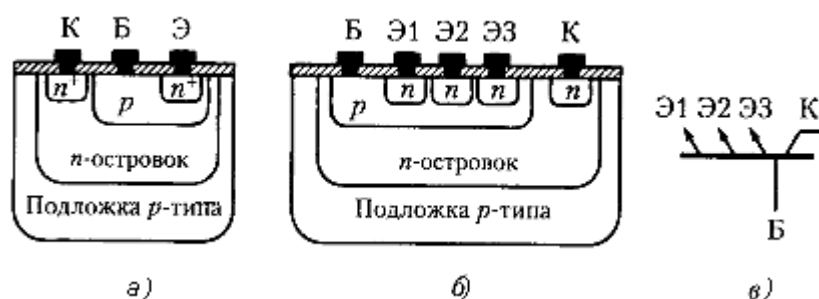
### **Транзисторы интегральных микросхем (ИМС)**

Транзисторы ИМС получают последовательной диффузией донорных и акцепторных примесей в островки, созданные тем или иным способом (рис. 44, а). Характерным для них является расположение выводов в одной плоскости.

Для осуществления логических операций созданы *многоэмиттерные транзисторы* (рис.44, б, в), применение которых основано на их свойстве оставаться открытыми, если хотя бы к одному из эмиттеров приложено относительно базы прямое напряжение. Запирание транзисторов происходит тогда, когда на все эмиттеры поданы обратные напряжения.

Наряду с биполярными в ИМС широко применяют полевые МДП-транзисторы и особенно МОП-транзисторы с индуцированным каналом. В основе их изготовления также как и биполярных, лежит планарная технология. Так, при изготовлении островков по планарно-диффузионной технологии получается практически готовая заготовка для МОП-транзистора. Каждый из двух соседних островков может быть стоком или истоком этого транзистора. Поэтому для их изготовления требуется меньшее по сравнению с эпитаксиально-планарной технологией количество операций.

Полевые и биполярные транзисторы, применяемые в ИМС, изготавливают по технологии монокристаллических ИС. Иногда используют отдельные дискретные миниатюрные бескорпусные транзисторы, поскольку тонкопленочная технология пока не всегда позволяет получать биполярные транзисторы удовлетворительного качества.



**Рисунок 44 – Транзисторы интегральных микросхем**

а) биполярный; б) многоэмиттерный; в) условное обозначение многоэмиттерного транзистора

Биполярные транзисторы монокристаллических ИС по сравнению с дискретными транзисторами имеют более высокое сопротивление коллектора из-за необходимости выводить контакт наверх и добавления сопротивления (кристалла) между коллекторным контактом и переходом. Для уменьшения этого сопротивления под коллекторным переходом иногда создают сильно легированный скрытый слой с большой удельной проводимостью.

Технология изготовления монокристаллических ИС сводится к следующему. В пластинку кремния (подложку), имеющую проводимость *p-типа*, проводят локальную диффузию мышьяка для формирования скрытого слоя  $n^+$ . Затем на неё наращивают эпитаксиальный слой *n*. Полученную поверхность окисляют. В результате получается диэлектрический слой диоксида  $SiO_2$ , который называют *маскирующим*. Маскирующие свойства его основываются на том, что скорость диффузии примесей, используемых для получения областей транзистора, в нём значительно меньше, чем в кремнии. Поэтому в процессе диффузии последняя происходит только на участках, свободных от  $SiO_2$ .

Используя фотошаблон базового слоя и процесс фотолитографии, в маскирующем слое травлением вскрывают окно под базу транзистора. Далее проводится двухэтапная диффузия атомов бора. В результате в эпитаксиальном слое проявляется зона с электропроводностью *p-типа*.