

ДИСЦИПЛИНА	<b>Схемотехника электронных устройств. Часть 2</b> <small>полное название дисциплины без аббревиатуры</small>
ИНСТИТУТ	<b>радиоэлектроники и информатики</b>
КАФЕДРА	<b>радиоволновых процессов и технологий</b> <small>полное название кафедры</small>
ГРУППЫ	<b>РИБО-01, 02, 03, 04-19, РРБО-01, 02-19, РССО-01, 02, 03-19</b> <small>номер групп/ы, для которых предназначены материалы</small>
ВИД УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА	<b>Лекции</b> <small>лекция; материал к практическим занятиям; контрольно-измерительные материалы к практическим занятиям; руководство к КР/КП, практикам</small>
ПРЕПОДАВАТЕЛЬ	<b>Битюков Владимир Ксенофонович</b> <small>фамилия, имя, отчество</small>
СЕМЕСТР	<b>6</b> <small>указать номер семестра обучения</small>

## ЛЕКЦИЯ 3

### Составной транзистор

Составной транзистор — это электрическое соединение двух (или более) биполярных, полевых или комбинированных биполярно-полевых транзисторов с целью улучшения их электрических характеристик, например, для увеличения коэффициента усиления по току  $\beta$ .

К этим схемам относят пару Дарлингтона и пару Шиклаи, нашедших широкое применение в радиоэлектронике.

Пара Дарлингтона, то есть транзистор построенный по схеме Дарлингтона, состоит из двух биполярных транзисторов одинаковой структуры  $n-p-n$  или  $p-n-p$ , включённых таким образом, что нагрузкой в эмиттерной цепи предыдущего каскада является переход база-эмиттер транзистора последующего каскада (то есть эмиттер предыдущего транзистора соединяется с базой последующего), при этом коллекторы транзисторов между собой соединены (рисунок 2.17).

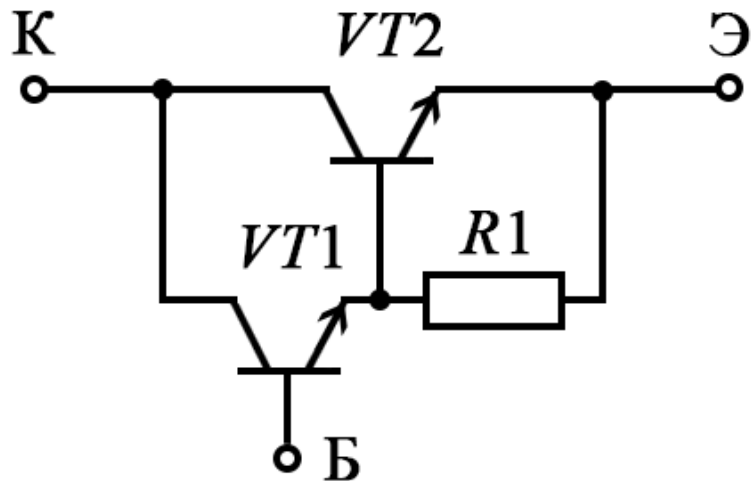


Рисунок 2.17 - Составной транзистор построенный по схеме Дарлингтона (пара Дарлингтона)

В такой схеме ток эмиттера предыдущего транзистора является базовым током последующего транзистора. Транзисторы, включенные по такой схеме, образуют так называемый составной транзистор или транзистор включенный по схеме Дарлингтона (по имени инженера Bell Laboratories Sidney Darlington).

В данной схеме ток эмиттера  $I_{Э VT1}$  транзистора  $VT1$  фактически является током базы  $I_{Б VT2}$  транзистора  $VT2$ , так как транзисторы  $VT1$  и  $VT2$  соединены коллекторами, а эмиттер входного транзистора  $VT1$  соединен с базой выходного транзистора  $VT2$ . Кроме того, в составе схемы для ускорения закрывания может использоваться резистивная нагрузка  $R1$  первого транзистора  $VT1$ .

Такое соединение транзисторов рассматривают как один эквивалентный транзистор структуры  $n-p-n$ , коэффициент усиления по току  $\beta_{\text{сост}}$  которого при работе транзисторов в активном режиме приблизительно равен произведению коэффициентов усиления первого  $\beta_1$  и второго  $\beta_2$  транзисторов, то есть

$$\beta_{\text{сост}} = \beta_1 \cdot \beta_2. \quad (2.13)$$

Это соотношение можно получить следующим образом. По определению коэффициент усиления по току  $\beta_{\text{сост}}$  составного транзистора, построенного по схеме Дарлингтона, можно записать в виде (рисунок 2.18)

$$\beta_{\text{сост}} = \frac{I_{К VT2}}{I_{Б VT1}}. \quad (2.14)$$

Для транзистора  $VT2$  можно записать

$$I_{К VT2} = \beta_2 \cdot I_{Б VT2}.$$

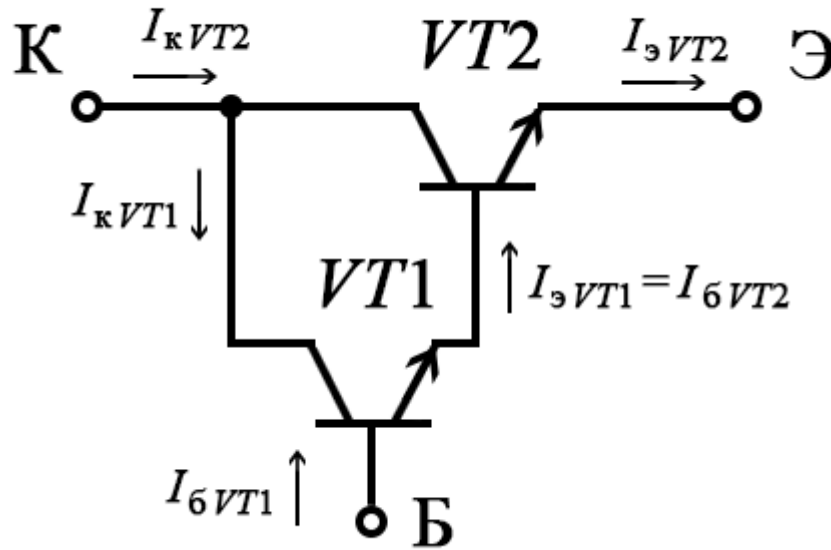


Рисунок 2.18 – Иллюстрация схемотехники составного транзистора, построенного по схеме Дарлингтона, для вывода формулы определения его коэффициента усиления по току  $\beta_{\text{сост}}$

А учитывая, что ток эмиттера  $I_{\text{Э} VT1}$  транзистора  $VT1$  равен току базы  $I_{\text{Б} VT2}$  транзистора  $VT2$ , полученное соотношение принимает вид

$$I_{\text{К} VT2} = \beta_2 \cdot I_{\text{Э} VT1}. \quad (2.15)$$

В соответствии с первым законом Кирхгофа для транзистора  $VT1$  выполняется условие

$$I_{\text{Э} VT1} = I_{\text{К} VT1} + I_{\text{Б} VT1}.$$

Учитывая, что  $I_{\text{К} VT1} = \beta_1 \cdot I_{\text{Б} VT1}$  это уравнение можно переписать в виде

$$I_{\text{Э} VT1} = \beta_1 \cdot I_{\text{Б} VT1} + I_{\text{Б} VT1} = (\beta_1 + 1) \cdot I_{\text{Б} VT1}.$$

С учетом полученного соотношения формулу (2.15) можно записать в виде

$$I_{\text{К} VT2} = \beta_2 \cdot (\beta_1 + 1) \cdot I_{\text{Б} VT1}.$$

Это позволяет преобразовать уравнение (2.14) для коэффициента усиления по току  $\beta_{\text{сост}}$  составного транзистора, построенного по схеме Дарлингтона, к виду

$$\beta_{\text{сост}} = \beta_2 \cdot (\beta_1 + 1).$$

Учитывая, что коэффициент усиления первого  $\beta_1$  транзистора много больше единицы, окончательно можно записать

$$\beta_{\text{сост}} \approx \beta_1 \cdot \beta_2. \quad (2.16)$$

Основным преимуществом составного транзистора (схемы Дарлингтона) является высокий коэффициент усиления по току  $\beta_{\text{сост}}$ . Как следует из (2.16), если коэффициент усиления одного маломощного транзистора равен 70, а другого мощного 100 то коэффициент усиления

составного транзистора равен произведению этих величин, то есть  $\beta_{\text{сост}}=7000$ . Высокий коэффициент усиления по току обеспечивает управление малым током, поданным на управляющий вход составного транзистора, выходным током, превышающим входной на несколько порядков.

В биполярных транзисторах коэффициент усиления по току существенно зависит от тока коллектора. Поэтому при малых токах коллектора транзистора  $VT1$  его значение  $\beta_1$  может значительно уменьшиться. Чтобы при всех значениях входного тока коэффициент усиления транзистора оставался высоким, между базой и эмиттером транзистора  $VT2$  включают резистор  $R1$ , являющийся нагрузкой транзистора  $VT1$ , что позволяет улучшить некоторые характеристики составного транзистора. Величину резистора  $R1$  выбирают с таким расчётом, чтобы ток коллектор-эмиттер транзистора  $VT1$  в закрытом состоянии (начальный ток коллектора) создавал на резисторе падение напряжения ниже порога открывания транзистора  $VT2$ . Таким образом, ток утечки транзистора  $VT1$  не усиливается транзистором  $VT2$ , снижая общий ток коллектор-эмиттер составного транзистора в закрытом состоянии. Наличие резистора  $R1$  также способствует стеканию заряда неосновных носителей из базы транзистора  $VT2$  при его запираании и способствует увеличению быстродействия. Величина сопротивления  $R1$  составляет сотни Ом для мощного и единицы кОм - для маломощного составного транзистора.

Такое техническое решение использовано, например, в транзисторе КТ825, являющимся кремниевым составным, большой мощности, низкочастотным  $p-n-p$  транзистором. Он используется в ключевых и линейных схемах.

Из недостатков схемы Дарлингтона следует отметить повышенное напряжение  $U_{\text{кэ нас}}$  в режиме насыщения. Если в обычных транзисторах  $U_{\text{кэ нас}}$  составляет  $\sim 0,4$  В, то в составном транзисторе из двух транзисторов это напряжение возрастает до 0,9 В. Объясняется это тем, что для открывания составного транзистора необходимо открыть транзистор  $VT1$ , а для этого на его базу следует подать напряжение  $U_{\text{бэ } VT1}$  примерно равное 0,7 В плюс падение напряжения на открытом транзисторе  $VT2$ .

Этого недостатка лишена схема составного транзистора на комплементарных транзисторах с разным типом проводимости, но близкими параметрами, предложенная инженером Шиклаи (Sziklai) и получившая название пара Шиклаи (рисунок 2.19), которая работает как эквивалентный транзистор с  $n-p-n$  проводимостью. Напряжение насыщения база - эмиттер составного транзистора по схеме Шиклаи намного ниже, чем для схемы Дарлингтона.

В отличие от схемы Дарлингтона, состоящей из двух транзисторов одного типа проводимости, схема Шиклаи содержит транзисторы разного типа проводимости ( $p-n-p$  и  $n-p-n$ ).

Приведённая на рисунке 2.19 пара Шиклаи электрически эквивалентна  $n-p-n$  транзистору с большим коэффициентом усиления. Входное напряжение — это напряжение между базой и эмиттером транзистора  $VT2$ .

Между базой и эмиттером транзистора  $VT1$  обычно включают резистор с небольшим сопротивлением.

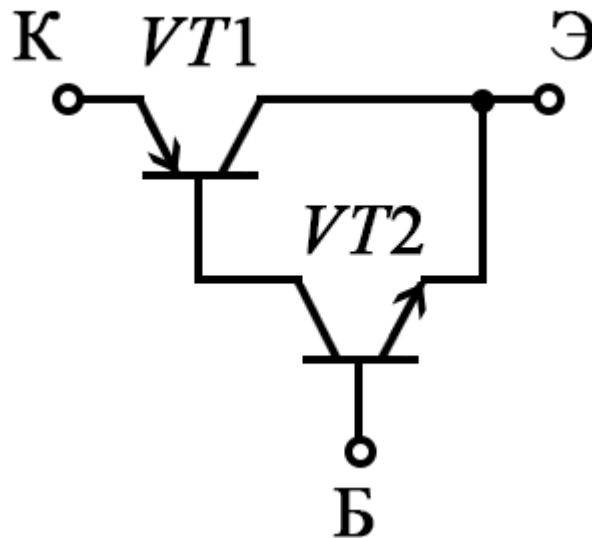


Рисунок 2.19 - Составной транзистор построенный по схеме Шиклаи (пара Шиклаи)

Общим недостатком составных транзисторов является невысокое быстродействие, поэтому они нашли широкое применение в низкочастотных схемах. В схемах на высоких частотах составные транзисторы уже не имеют таких преимуществ — граничная частота усиления по току и быстродействие составных транзисторов меньше, чем эти же параметры для каждого из транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ .

Составные транзисторы прекрасно зарекомендовали себя во входных каскадах операционных усилителей, в выходных каскадах мощных усилителей низкой частоты, в линейных стабилизаторах напряжения, в схемах управления электродвигателями, а также в коммутаторах электронных схем зажигания автомобилей.

## 2.5. Полевые транзисторы

Сегодня полевые транзисторы стали одними из самых распространенных элементов электронной индустрии и входят в состав широчайшего круга изделий - от микропроцессоров до силовых интегральных схем. Семейство полевых транзисторов достаточно широко и разнообразно, однако в электропреобразовательной технике в основном используются полевые транзисторы с изолированным затвором типа МОП (Металл Оксид Полупроводник) или МДП (Металл Диэлектрик Полупроводник), которые по зарубежной терминологии называют MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). Термины МОП и МДП являются синонимами для кремниевой технологии, так как в структуре полевого транзистора в качестве диэлектрического слоя, препятствующего протеканию тока между

управляющим электродом (затвором) и каналом (исток-сток) используется окись кремния  $\text{SiO}_2$  - дешевая и технологичная разновидность диэлектрика. В других технологиях (например, GaAs – арсенид галлия) в качестве подзатворного диэлектрика используется пленка  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Таким образом, термин МДП не привязан к кремниевой технологии и является более универсальным. В англоязычной литературе есть единственный вариант MOS (Metal Oxide Semiconductor), что буквально соответствует МОП.

Принцип работы полевых транзисторов чрезвычайно прост и был предложен примерно на 20 лет раньше появления биполярных транзисторов. Однако первые маломощные (сигнальные) полевые транзисторы появились лишь в конце пятидесятих годов прошлого века, в то время как силовые полевые транзисторы удалось создать только в середине 70-х годов.

У полевого транзистора сила проходящего через него тока регулируется внешним электрическим полем, то есть напряжением. Это принципиальное различие между полевым и биполярным транзистором. У биполярных транзисторов сила основного тока регулируется управляющим током. Входное сопротивление полевых транзисторов очень высокое, достигает  $10^{11}$  Ом и выше (для сравнения у биполярных транзисторов оно составляет единицы кОм). В литературе полевые транзисторы иногда называют униполярными транзисторами, поскольку ток через транзистор в них осуществляется переносом только основными носителями заряда электронами (*n*-типа) или дырками (*p*-типа).

Технологически полевые транзисторы (FET - Field Effect Transistors) разделяются на два типа:

- полевые транзисторы с управляющим *p-n* переходом, когда канал протекания тока через транзистор отделен от управляющего электрода (затвора) обратным смещенным *p-n* переходом (JFET - Junction Gate FET);
- полевые транзисторы с изолированным каналом, когда управляющий электрод отделен от канала слоем диэлектрика (MOSFET – Metal Oxide Semiconductors FET).

### 2.5.1. Полевые транзисторы с управляющим *p-n* переходом

Полевой транзистор с управляющим *p-n* переходом представляет собой полупроводниковое устройство с тремя выводами, у которого модуляция проводимости канала которого происходит за счет изменения толщины слоя объемного заряда *p-n* перехода, смещенного в обратном направлении. Как полевым транзисторам с управляющим *p-n* переходом, так и биполярным транзисторам свойственна высокая эффективность, быстродействие, надежность и дешевизна. Они выполняют сходные функции в большинстве электронных схем, а также характеризуются хорошей технологической совместимостью с биполярной технологией и используются при производстве аналоговых ИС. Полевые транзисторы с управляющим *p-n* переходом существует в виде двух разновидностей - с *n*- и *p*-каналом, подобно, как

биполярные в виде  $p-n-p$  и  $n-p-n$  структуры. Главным преимуществом полевых транзисторов JFET является большое входное сопротивление  $R_{вх}$ .

Устройство полевого транзистора с управляющим  $p-n$  переходом проще, чем устройство биполярного транзистора (рисунок 2.18). В отличие от биполярного, у полевого транзистора нет  $p-n$  переходов в пределах основного пути «канала», образованным узким участком полупроводникового материала с высоким удельным сопротивлением. Подобно биполярным транзисторам разного типа проводимости, полевые транзисторы выполняются с разной электропроводностью канала  $n$ - или  $p$ -типа, подключенным к выводам исток «И» ( $S$  - Source) и сток «С» ( $D$  - Drain). Управление током, протекающим по этому каналу, достигается изменением напряжения, приложенного к затвору «З» ( $G$  - Gate).

Транзистор с полевым эффектом является «однополярным» устройством, проводимость которого зависит только от носителей заряда в канале:  $n$ -канальные или  $p$ -канальные полевые транзисторы. Каналом является слой полупроводникового материала с высоким удельным сопротивлением, ограниченный  $p-n$  переходом. Области затвора и канала образуют управляющий  $p-n$  переход. Канал существует только при  $p-n$  переходе, смещённом в обратном направлении.

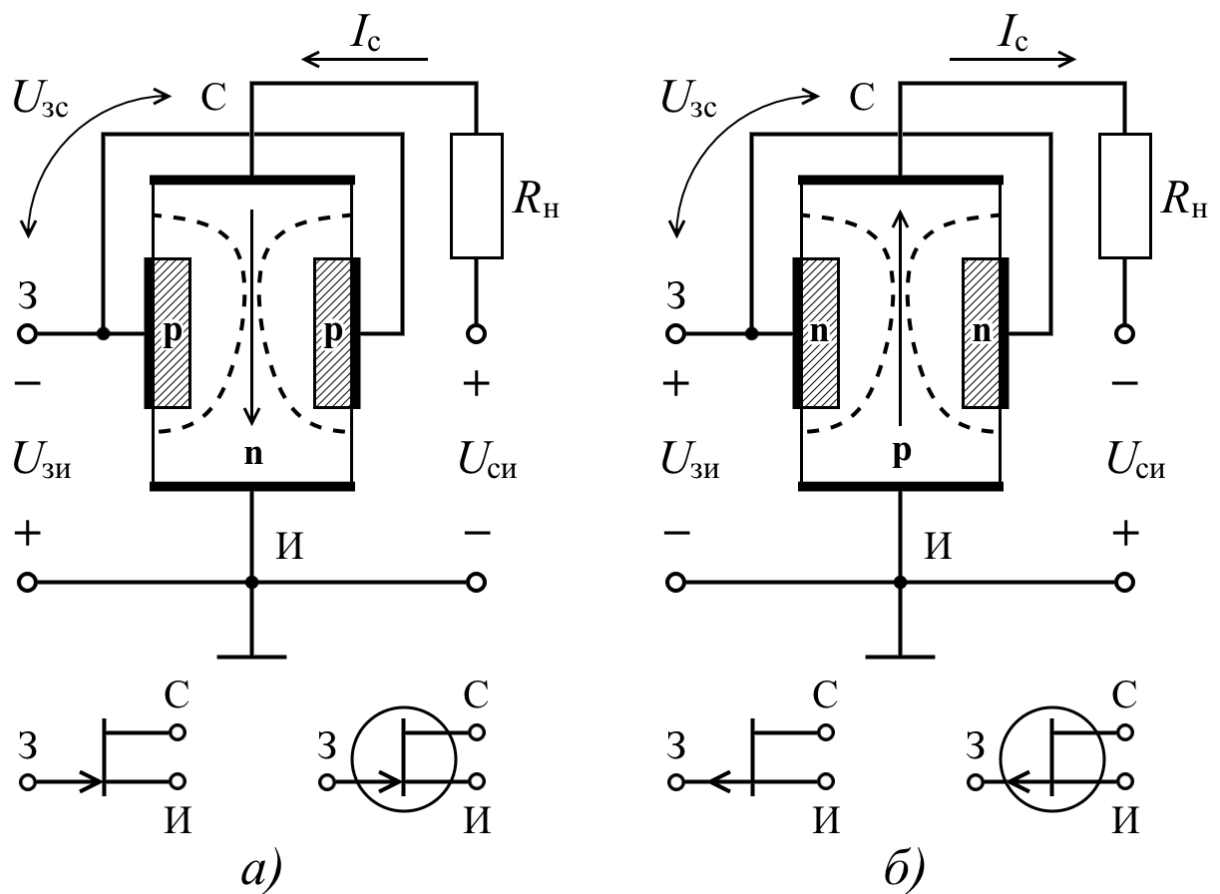


Рисунок 2.18 - Структура, полярность напряжений на выводах и УГО полевых транзисторов с управляющим  $p-n$  переходом (JFET): а) с  $n$ -каналом; б) с  $p$ -каналом

В транзисторе с  $n$ -каналом основными носителями заряда в канале являются электроны, которые движутся вдоль канала от истока с низким потенциалом к стоку с более высоким потенциалом, образуя ток стока  $I_c$ . Между затвором и истоком полевого транзистора приложено обратное напряжение, запирающее  $p$ - $n$  переход. При увеличении запирающего напряжения на затворе возрастает толщина обедненного слоя между областями  $p$  и  $n$ , что приводит к сужению сечения канала, уменьшению электропроводности, увеличению его сопротивления, уменьшению тока стока  $I_c$  между стоком и истоком.

При достижении некоторого напряжения  $U_{з0}$  на затворе относительно истока, канал смыкается, ток стока  $I_c$  уменьшается до нуля и транзистор оказывается запертым. Очевидно, что канал может существовать только при запирающем напряжении на затворе. Поэтому для транзистора с  $n$ -каналом напряжение  $U_{зи}$  между затвором и истоком должно быть отрицательным при положительном напряжении между стоком и истоком  $U_{си}$  (рисунок 2.18, а). У транзистора с  $p$  каналом напряжение  $U_{зи}$  должно быть положительным при отрицательном напряжении между стоком и истоком  $U_{си}$  (рисунок 2.18, б).

Встречается два вида УГО. При отображении дискретного транзистора условное графическое обозначение транзистора помещают в кружок, символизирующий его корпус. При отображении транзистора в интегральном исполнении его УГО выполняют без кружка (рисунок 2.18).

Канал изображают так же, как и базу биполярного транзистора, но помещают его в середине кружка-корпуса. Символы истока и стока присоединяют к нему с одной стороны, а затвора — с другой стороны на продолжении линии истока. Электропроводность канала указывают стрелкой на символе затвора.

Планарная технология, когда на одной подложке в едином технологическом процессе изготавливается большое число полупроводниковых приборов или ИС, позволяет существенно снизить их стоимость, обеспечивает максимальную идентичность их параметров.

Конструктивно у полевого транзистора для планарной технологии выводы должны располагаться с одной стороны подложки. Структура планарного полевого транзистора с  $p$ - $n$  переходом показана на рисунке 2.19, а.

На монокристаллической подложке из слаболегированного кремния  $p$ -типа ( $p$ -) наращивается слаболегированный эпитаксиальный слой  $n$ -типа ( $n$ -) с такой же кристаллической ориентацией, как и у подложки. Методом диффузии формируются сильнолегированные области затвора  $p+$  и  $n+$  истока и стока, которые омическими контактами связываются с электродами затвор «З», сток «С» и исток «И», соответственно.



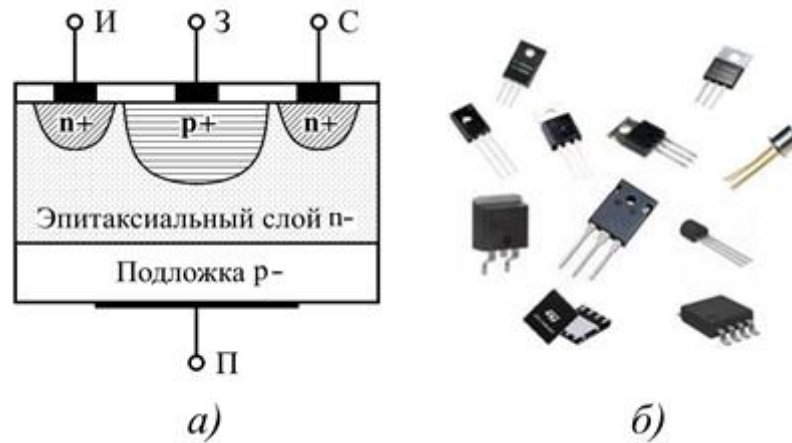


Рисунок 2.19 - Планарный вариант полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$  переходом: а) структура с  $n$ -каналом; б) конструктивное исполнение

Между выводами исток-сток образуется проводящий канал  $n$ -типа с проводимостью резистивного типа, то есть позволяющий току исток-сток  $I_c$  протекать в прямом и обратном направлении. При напряжении между затвором и истоком  $U_{зи} = 0$  и, соответственно, нулевом напряжении на  $p$ - $n$  переходе, ширина канала максимальная, через канал будет протекать ток стока  $I_c$  максимальной величины, если между стоком и истоком будет приложено напряжение  $U_{си}$  с положительной полярностью на стоке. В  $n$ -канальном JFET носителями тока через канал являются электроны. Аналогично, для  $p$ -канального JFET, легированного акцепторными примесями, носителями тока через канал являются дырки.

Проводимость канала  $n$ -канальных JFET выше (меньше сопротивление канала), чем у аналогичных транзисторов с  $p$ -каналом, поскольку электроны обладают большей подвижностью через проводник по сравнению с дырками. Это делает  $n$ -канальный JFET более эффективным проводником по сравнению с их  $p$ -канальными аналогами.

К важнейшим характеристикам полевых транзисторов относят стоко-затворную вольт-амперную характеристику и семейство стоковых вольт-амперных характеристик. Стоко-затворная ВАХ отражает зависимость тока стока  $I_c$  от приложенного к выводам затвор-исток напряжения  $U_{зи}$  при фиксированном напряжении сток-исток  $U_{си}$ . Характерная конфигурация ВАХ для полевых транзисторов с управляющим переходом и каналами  $n$ -типа и  $p$ -типа показана на рисунке 2.18 и рисунке 2.19.

Если напряжение  $U_{си}$  между стоком и истоком равно нулю, то продольное электрическое поле, обеспечивающее дрейф основных носителей от истока к стоку отсутствует, поэтому ток стока  $I_c = 0$ . При увеличении абсолютной величины напряжения  $U_{си}$  напряженность продольного электрического поля растет, вызывая рост тока стока  $I_c$ . Ток  $I_c$ , протекающий через канал, создает по длине последнего падение напряжения, которое оказывается запирающим для  $p$ - $n$  перехода затвор-канал. Это приводит к изменению ширины обедненного слоя  $p$ - $n$  перехода вдоль канала, причем ширина  $p$ - $n$  перехода увеличивается по мере приближения к стоку.

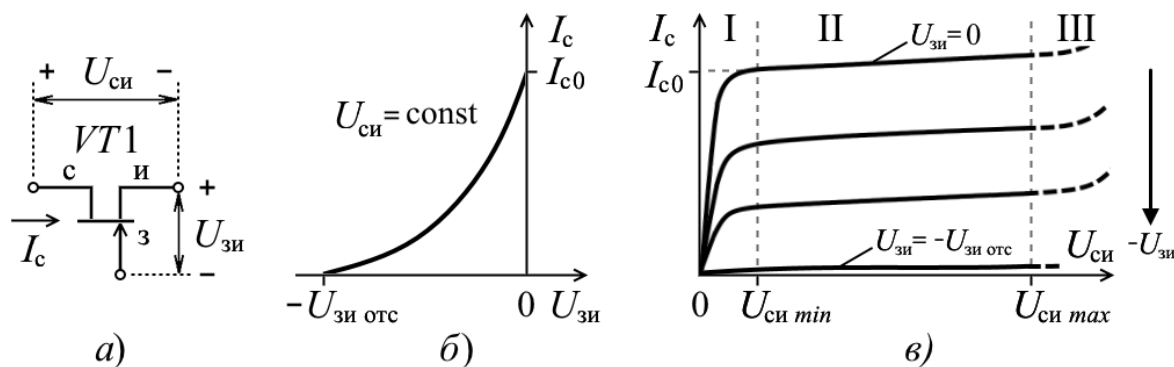


Рисунок 2.18 - ВАХ JFET с каналом n-типа: а) УГО и полярность напряжений; б) стоко-затворная; в) стоковая (выходная)

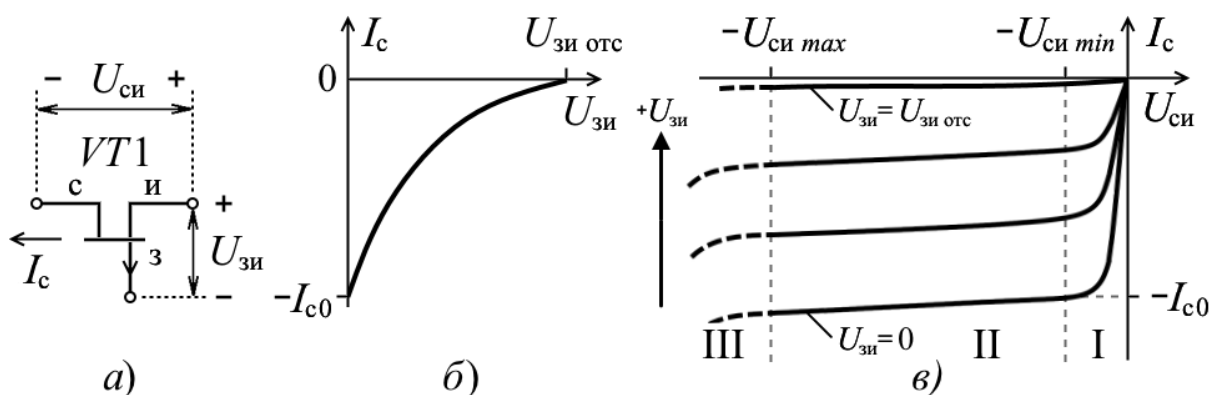


Рисунок 2.19 - ВАХ JFET с каналом p-типа: а) УГО и полярность напряжений; б) стоко-затворная; в) стоковая (выходная)

При определенном напряжении между стоком и истоком, называемым напряжением насыщения  $U_{си \text{ нас}}$ , ток стока создает вдоль канала такое падение напряжения, что происходит перекрытие канала у области стока. Дальнейший рост напряжения  $U_{си}$  приводит к динамическому равновесию, когда увеличение напряжения  $U_{си}$  и рост тока  $I_c$  вызывают увеличение длины перекрытого участка канала, а, следовательно, значительное увеличение сопротивления канала. В результате рост тока стока существенно замедляется, а транзистор переходит в режим насыщения. В режиме насыщения напряжение  $U_{си}$  перераспределяется между перекрытой и не перекрытой частями канала. При этом на перекрытой части канала напряжение остается постоянным и равным  $U_{си \text{ нас}}$ , а на участке перекрытия напряжение сток-исток составляет  $U_{си \text{ нас}}$ .

На выходной ВАХ (рисунок 2.18, б) можно четко выделить три зоны. В линейной, малосигнальной области ( $0 < U_{си} < 0,2 \dots 0,6$  В) тока стока  $I_c$  резко возрастает (зона I). Это так называемая «омическая» область. Канал «исток-сток» ведет себя как резистор, а его сопротивление управляется напряжением на затворе транзистора.

Вторая зона (II) — область пологих характеристик зависит от управляющего напряжения на затворе. Она получила название области

насыщения или «усилительная». Эта область имеет почти линейный вид. Здесь происходит перекрытие канала в области стока, и это перекрытие увеличивается при дальнейшем росте напряжения исток-сток. Соответственно, растет и сопротивление канала, а стоковый ток изменяется очень слабо. Именно этот участок характеристики используют в усилительной технике, поскольку здесь наименьшие нелинейные искажения сигналов и оптимальные значения малосигнальных параметров, существенных для усиления. К таким параметрам относятся крутизна стоко-затворной характеристики (*Mutual Transconductance*)  $S = dI_c / dU_{зи} = 2 \dots 50$  мА/В, внутреннее сопротивление и коэффициент усиления.

Третья область графика (III) — область пробоя, ограничивающая диапазон возможных напряжений на стоке. При пробое разрушается резистивный канал и через транзистор протекает неконтролируемый ток. В справочниках обычно приводится значение  $U_{си \max}$  - допустимое напряжение на стоке.

Стоко-затворные характеристики полевых транзисторов (рисунок 2.18, а) с управляющим  $p$ - $n$  переходом хорошо аппроксимируются выражением

$$I_c = I_{c \text{ нач}} \cdot \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зи \text{ отс}}}\right)^n, \quad (2.23)$$

где  $I_{c \text{ нач}} = I_{c0}$  — начальный ток стока (ток стока при  $U_{зи} = 0$ );  $U_{зи \text{ отс}}$  — напряжение отсечки, которое по величине не отличается от напряжения перекрытия канала (напряжения насыщения).

Теоретическое значение показателя степени  $n = 2$ . Однако экспериментально наблюдаются значения  $n = 1,5 \dots 2,5$ . Такой разброс экспериментальных значений показателя степени  $n$  объясняется конструктивно-технологическими различиями, в частности, различиями распределений концентраций примесей в области канала и затвора.

Учитывая, что управление полевым транзистором осуществляется напряжением  $U_{зи}$  между затвором и истоком, то для количественной оценки управляющего воздействия  $U_{зи}$  на ток стока  $I_c$  введено понятие крутизны стоко-затворной характеристики  $S$  при постоянном напряжении сток-исток  $U_{си}$

$$S = \left. \frac{dI_c}{dU_{зи}} \right|_{U_{си} = \text{const}}. \quad (2.24)$$

Учитывая зависимость тока стока от напряжения затвор-исток (2.23) формулу (2.24) можно записать

$$S = \frac{d}{dU_{зи}} \left( I_{c \text{ нач}} \cdot \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зи \text{ отс}}}\right)^2 \right) = \frac{2 \cdot I_{c \text{ нач}}}{U_{зи \text{ отс}}} \cdot \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зи \text{ отс}}}\right). \quad (2.25)$$

При  $U_{зи} = 0$  полученное выражение представляет собой начальную крутизну  $S_{\text{нач}}$  характеристики

$$S_{\text{нач}} = \frac{2 \cdot I_{c \text{ нач}}}{U_{зи \text{ отс}}}. \quad (2.26)$$

С учетом (2.26) выражение для крутизны стоко-затворной характеристики  $S$  можно записать в виде

$$S = S_{\text{нач}} \cdot \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зи \text{ отс}}}\right). \quad (2.27)$$

Крутизна характеристики полевого транзистора уменьшается при увеличении напряжения затвор-исток.

Одно из важнейших свойств полевых транзисторов, как уже упоминалось ранее, это очень высокое входное сопротивление  $R_{вх}$  ( $R_{in}$ ), для *JFET* составляющее  $10^8 \dots 10^9$  Ом. Благодаря этому, полевые транзисторы практически не потребляют ток у источников усиливаемого сигнала.

Быстродействие *JFET* приборов связано в первую очередь со скоростью перезаряда паразитных емкостей. В связи с малыми рабочими токами через транзистор, их быстродействие, как правило, невысокое.

Значительным недостатком *JFET* по сравнению с биполярными транзисторами является очень низкий коэффициент усиления по напряжению. Если построить усилитель на основе *JFET*, то можно добиться коэффициента стабилизации по напряжению  $K_u$  в лучшем случае около 20. При аналогичном использовании биполярного транзистора с высоким значением  $\beta$  (коэффициент усиления биполярного транзистора в схеме с *ОЭ*) можно достичь  $K_u$  в несколько сотен.

Поэтому для качественных усилителей нередко используются совместно оба типа транзисторов. Например, входной каскад выполняется на полевом транзисторе с высоким входным сопротивлением  $R_{вх}$ , благодаря чему обеспечивается согласование входного сопротивления усилителя с высокоомным источником сигнала. А уже потом, с помощью биполярного транзистора усиливают сигнал по напряжению.

*JFET* как в дискретном исполнении, так и в виде ИС выпускаются только как маломощные приборы с небольшими токами стока  $I_c$  (единицы мА) и допустимыми напряжениями на стоке  $U_{си доп}$  (десятки В). Как любые транзисторы, в схемах они обозначаются *VT*. В справочниках за кремниевыми *JFET* транзисторами зарезервировано буквенное обозначение КП или 2П (например, транзисторы КП103М). Вследствие хорошей технологической совместимости с биполярными ИС иногда используется в составе аналоговых ИС. В электропреобразовательной технике приборы *JFET* имеют ограниченное применение, например, в схемах маломощных генераторов стабильного тока, эталонных источников тока и напряжения.

### 2.3.2. Полевые транзисторы со встроенным каналом

Полевые транзисторы с изолированным затвором, у которых затвор отделен в электрическом отношении от канала слоем диэлектрика, являются наиболее востребованными транзисторами в настоящее время. Порядок чередования слоев (металл – диэлектрик – полупроводник) дал название таким приборам МДП транзисторы. В кремниевой технологии в качестве диэлектрика используется оксид кремния  $SiO_2$ . Отсюда второе распространенное название МОП-транзисторы (металл – оксид – полупроводник).

Принцип действия МДП – транзисторов основан на изменении проводимости поверхностного слоя полупроводника под воздействием поперечного электрического поля. Поверхностный слой является

токопроводящим каналом этих транзисторов. У МДП транзисторов кроме электродов исток, сток и затвор, имеется еще один электрод (так называемый «подложка», этот вывод обозначают «П»), напряжение на котором также может изменять свойства транзистора.

МДП транзисторы с изолированным затвором выпускаются двух видов: со встроенным (depletion mode transistor – транзистор в режиме обеднения) и индуцированным каналом (enhancement mode transistor – транзистор в режиме обогащения). В первом случае канал создается при изготовлении транзистора технологически, путем ионной имплантации примесей. Во втором случае канал индуцируется (возникает) под воздействием поперечного электрического поля. Каждый из перечисленных видов транзисторов может быть реализован с каналом  $p$ - или  $n$ -типа.

Структура МДП транзистора с изолированным затвором и встроенным каналом  $n$ -типа показана на рисунке 2.19, а. В исходной пластинке кремния  $p$ -типа с относительно высоким удельным сопротивлением с помощью диффузионной технологии созданы две легированные области с противоположным типом электропроводности. На эти области нанесены металлические электроды – исток и сток. Между истоком и стоком имеется поверхностный канал с электропроводностью  $n$ -типа. Поверхность кристалла полупроводника между истоком и стоком покрыта тонким слоем диэлектрика. На этот слой нанесен металлический электрод – затвор. Наличие слоя диэлектрика позволяет подавать на затвор управляющее напряжение обеих полярностей.

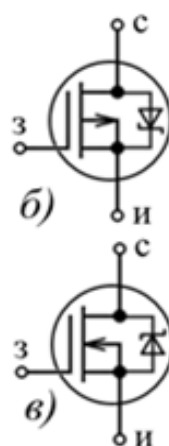
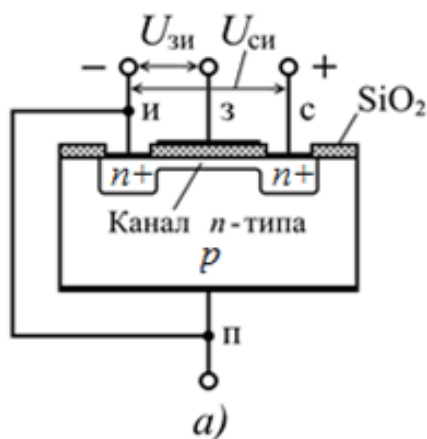


Рисунок 2.19. Полевой транзистор с изолированным затвором и встроенным каналом:  
а) структура  $n$ -канального транзистора;  
б) УГО  $p$ -канального транзистора;  
в) УГО  $n$ -канального транзистора

Канал создается технологически при изготовлении транзистора путем ионной имплантации (внедрение атомов примеси бомбардировкой ионами) примесей. При отрицательном напряжении на затворе относительно истока имеет место явление обеднения канала (уменьшение числа носителей заряда). При этом электроны выталкиваются из канала в  $p$ -область, что приводит к уменьшению тока через канал. При положительном напряжении затвор-исток наоборот имеет место обогащение канала электронами, пришедших в канал из областей  $p$  и  $n+$ , что приводит к увеличению тока через канал. Таким образом, такой полевой транзистор может работать и при положительных и при

отрицательных значениях напряжения затвор-исток. Транзистор с встроенным каналом проводит ток уже при нулевом напряжении на затворе. При отрицательном напряжении на затворе работает в обеднённом режиме (транзистор открыт, но пропускает меньший ток через канал). Если же к затвору приложить положительное напряжение, то он продолжит открываться и перейдёт в так называемый режим обогащения - ток стока будет увеличиваться. При этом ток по цепи затвора не протекает, так как затвор изолирован от канала.

Примерный вид семейства выходных ВАХ полевых транзисторов с изолированным затвором и встроенным каналом изображен на рисунок 2.20.

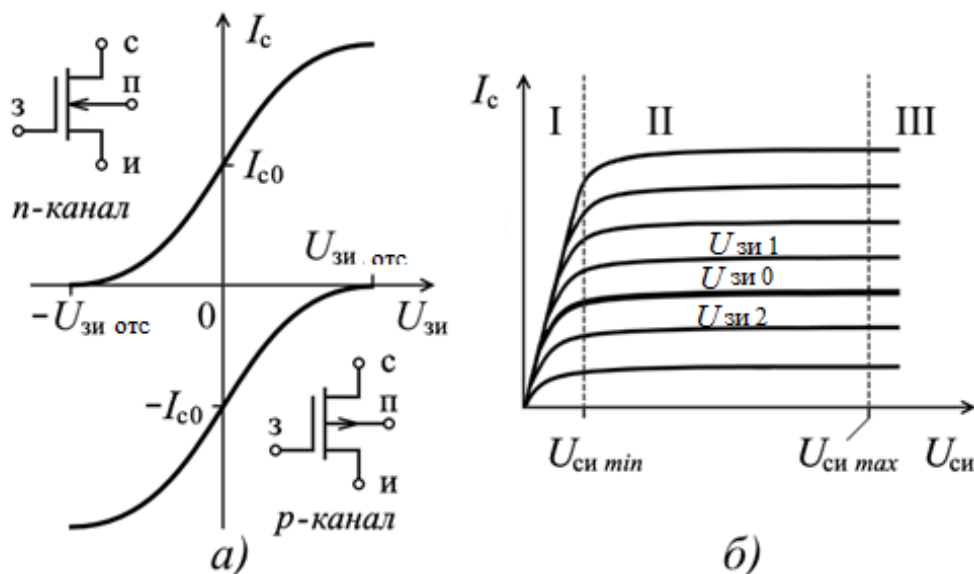


Рисунок 2.20 - ВАХ полевого транзистора с изолированным затвором и встроенным каналом: а) сток-затворная (передаточная) ВАХ  $n$ - и  $p$ -канального транзистора; б) выходная ВАХ  $n$ -канального транзистора, где  $U_{з0} = U_{з.отс}$ ,  $U_{з1} > U_{з0}$ ,  $U_{з2} < U_{з0}$

Особенностью полевого транзистора является то, что на проводимость канала оказывает влияние как управляющее напряжение  $U_{зи}$ , так и напряжение  $U_{си}$ . При напряжении  $U_{си} = 0$  выходной ток стока  $I_c = 0$ . При напряжении  $U_{си} > 0$  и  $U_{зи} = 0$  через канал протекает ток стока  $I_c$ , в результате чего создается падение напряжения, возрастающее в направлении стока. Суммарное падение напряжения на участке исток-сток равно  $U_{си}$ .

Повышение напряжения  $U_{си}$  вызывает увеличение падения напряжения в канале и уменьшение его сечения, и, следовательно, уменьшение проводимости канала. При некотором напряжении  $U_{си}$  происходит сужение канала, при котором границы обоих  $p$ - $n$  переходов сужаются и сопротивление канала становится высоким. Такое напряжение  $U_{си}$  называют напряжением насыщения  $U_{си.нас}$ . При подаче на затвор обратного напряжения  $U_{зи}$  происходит дополнительное сужение канала, и его перекрытие наступает при меньшем значении напряжения  $U_{си.нас}$ . В режиме усиления используются пологие участки выходных характеристик.

Для транзистора с  $n$ -каналом режим отсечки характеризуется некоторым отрицательным значением напряжения отсечки  $U_{з\text{отс}}$ .

Эти характеристики справедливы для случая, когда электрод подложки соединен с истоком. Если этот электрод используется для управления током стока, то тогда его называют «нижним затвором», причем механизм этого управления аналогичен управлению самого затвора.

Напряжение на затворе может быть, как положительным, так и отрицательным. При нулевом напряжении на затворе  $U_{зи}=0$  через канал протекает ток  $I_{с0}$ .

Условие запираания для МДП транзистора с встроенным  $n$ -каналом состоит в том, что напряжение на затворе  $U_{зи}$  должно быть более отрицательным, чем напряжение отсечки  $U_{отс}$ . Для МДП транзисторов с встроенным  $p$ -каналом условие запираания транзистора происходит при напряжении на затворе  $U_{зи}$  более положительным, чем напряжение отсечки  $U_{отс}$ .

Динамические характеристики устройств с подобными транзисторами всецело зависят от скорости перезаряда паразитных емкостей и при малых токах  $I_c$  их быстродействие относительно невысокое.

МДП транзисторы с встроенным каналом выпускаются в дискретном и интегральном исполнении только как маломощные приборы.

В линейной области стоковых характеристик полевые транзисторы ведут себя подобно резисторам, управляемым напряжением, а в области насыщения они являются источниками тока, управляемыми напряжением.

С любыми МДП транзисторами необходимо соблюдать меры предосторожности с целью предотвращения пробоя статическим электрическим зарядом изолирующего слоя между затвором и каналом на стадии производства, во время транспортировки, хранения и эксплуатации. Основными составляющими комплексной антистатической защиты являются антистатические браслеты, покрытия, пакеты, контейнеры, наклейки, измерители статического напряжения, ионизаторы. Выводы транзистора замыкаются перемычкой, которая удаляется после установки транзистора в схему.

Область применения МДП транзисторов с встроенным каналом:

- входные каскады усилителей низких и высоких частот;
- зарядочувствительные усилители;
- переключающие и коммутирующие устройства;
- регулируемое сопротивление, управляемое напряжением на затворе (электронный потенциометр) с гальванической развязкой между управляющими и регулируемыми цепями;
- интегральный резистор в цифровых ИС.