

3. Элементная база транзисторных электронных устройств

3.1. Классификация и принцип работы усилительных приборов

Транзистор, это активный электронный полупроводниковый прибор имеющий, как правило, три вывода, один из которых является управляющим электродом, а два других электрода, являющиеся силовыми, включаются в цепь протекающего через нагрузку тока, создаваемого мощным источником питания. Принцип действия транзистора заключается в том, что небольшие изменения тока управляющего электрода транзистора или напряжения на нём приводят к связанными с ними большими изменениями значительного по величине тока нагрузки, протекающего через транзистор между его двумя силовыми электродами. Эта способность транзистора с помощью небольшого входного сигнала управлять большой мощностью в его выходной цепи позволяет использовать транзистор как для усиления, так и для генерирования, коммутации и преобразования электрических сигналов. В настоящее время наибольшее распространение получили транзисторы, выполненные на основе материала кремния (Si), являющиеся наиболее термостабильными, германия (Ge) и соединения из галлия и мышьяка – арсенид галлия (GaAs).

В зависимости от принципа действия и конструктивных признаков транзисторы подразделяются на два больших класса: биполярные и полевые. В токах биполярного транзистора присутствуют как электронные, так и дырочные составляющие. Поэтому такой транзистор называется биполярным. Полевой транзистор, работающий на иных принципах, чем биполярный, является униполярным прибором, поскольку через него протекает либо электронный, либо дырочный ток.

На рисунке 3.1 приведена классификация и условные графические обозначения основных типов семейства транзисторов, разработанных к настоящему времени. Рассмотрим принципы работы и условные графические обозначения (УГО) представленных на рисунке транзисторов.

Биполярный транзистор (БТ), обозначаемый в иностранной литературе аббревиатурой BJT (Bipolar Junction Transistor) представляет собой трехвыводной полупроводниковый прибор, в котором малый ток в цепи одного электрода управляет большим (основным) током, протекающим между двумя другими электродами. В биполярном транзисторе *n-p-n*-типа основной ток через транзистор обусловлен преимущественно отрицательными носителями заряда - электронами, а в биполярном транзисторе *p-n-p*-типа - преимущественно положительными зарядами – дырками.

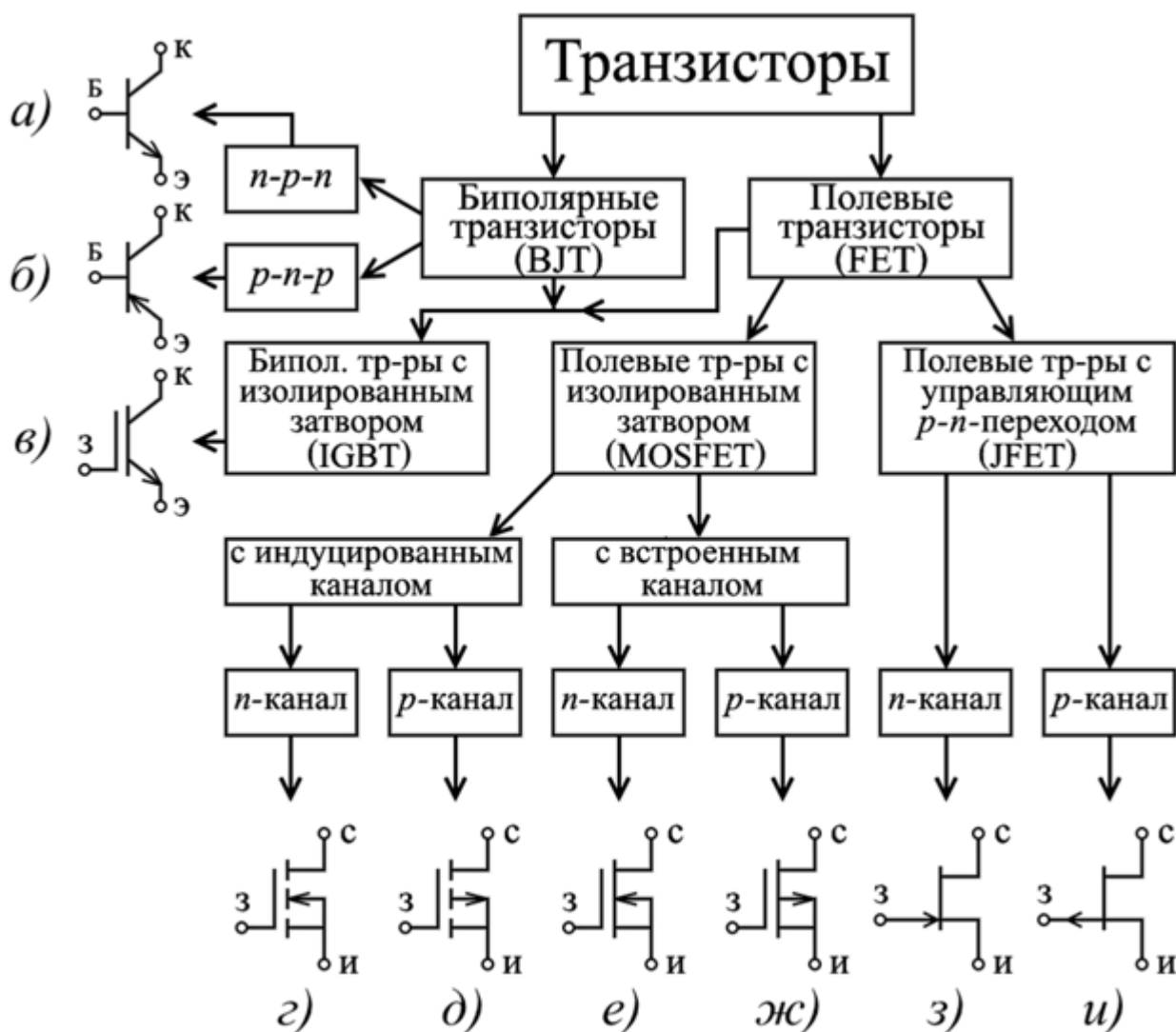


Рисунок 3.1 - Транзисторы. Классификация и УГО: а) БТ $n-p-n$; б) БТ $p-n-p$; в) БТ с изолированным затвором; г) ПТ с индуцированным n -каналом; д) ПТ с индуцированным p -каналом; е) ПТ с встроенным n -каналом; ж) ПТ с встроенным p -каналом; з) n -канальный ПТ с управляющим $p-n$ -переходом; и) p -канальный ПТ с управляющим $p-n$ -переходом

Выводы биполярного транзистора имеют следующие названия: Б – база, Э – эмиттер, К – коллектор. База является управляющим электродом. Эмиттер обозначается стрелкой, по направлению которой можно судить о структуре транзистора. Если стрелка направлена внутрь транзистора к короткой вертикальной черточке с выводом (база), то транзистор имеет $p-n-p$ структуру.

Если стрелка направлена наружу от базы, то считают, что транзистор является обратной проводимости и имеет $n-p-n$ структуру. Управляющий ток в биполярном транзисторе протекает между выводами базы и эмиттера в направлении, указанном стрелкой. Основной ток транзистора протекает между выводами коллектора и эмиттера по направлению стрелки на обозначении эмиттера.

Помимо показанных в классификационной таблице классических трехвыводных биполярных транзисторов также были разработаны биполярные транзисторы, имеющие от двух до восьми выводов эмиттера (многоэмиттерные транзисторы - МЭТ), которые составляют основу логических ТТЛ микросхем, а также разработаны многоколлекторные транзисторы (МКТ) *n-p-n* и *p-n-p* структур, которые используются для создания логических схем с инжекционным питанием, называемых схемами И²Л (интегральная инжекционная логика).

Полевые транзисторы (ПТ), имеющие в иностранной литературе аббревиатуру FET (Field Effect Transistor), в стандартном исполнении также являются трехвыводными приборами. Их еще называют униполярными транзисторами из-за того, что основной ток обусловлен только одним типом носителей: либо электронами, либо дырками. В отличие от БТ, управляемого током, основной ток в ПТ протекает через специально организованный канал, проводимость которого управляется напряжением, которое прикладывается к управляющему выводу (затвору) относительно другого вывода - истока. В зависимости от вида носителей заряда в канале, обусловленного его материалом, транзистор может быть либо *p*-канальным, либо *n*-канальным.

Из-за разных способов управления величиной тока в канале полевые транзисторы, в свою очередь, делятся на транзисторы с управляющим *p-n*-переходом JFET (Junction Field Effect Transistor) и с изолированным затвором MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). При этом они объединяются одним общим признаком: у них практически отсутствует потребление мощности во входной цепи, что объясняется очень большим входным сопротивлением со стороны затвора.

Несмотря на указанные различия, у всех типов полевых транзисторов есть три вывода:

З - затвор или G - gate (ворота) - управляющий электрод, вывод, на который подается управляющее напряжение относительно истока, иногда возможно относительно стока; И – исток или S - source (источник) - вывод транзистора, через который в канал поставляются носители заряда. Исток аналогичен эмиттеру у биполярных транзисторов;

С - сток или D - drain (слив) - является выводом, через который носители заряда выводятся из канала.

Иногда в полевом транзисторе для кристаллической подложки делают отдельный четвертый вывод. Благодаря этому выводу подложка может соединяться либо с истоком, либо с «землёй» (общим проводом схемы). Если же подложка не подключена никуда, то стоком становится тот вывод канала, где потенциал больше.

У полевых транзисторов с управляющим p - n переходом (JFET) канал отделен от затвора обратным смещенным p - n переходом. При прямом смещении на переходе транзистор не работает. При увеличении запирающего напряжения на p - n переходе увеличивается толщина запирающего (обедненного) слоя, приводящая к уменьшению площади сечения канала, и, соответственно, к уменьшению его проводимости. При определенном запирающем напряжении на затворе площадь поперечного сечения канала может стать равной нулю и протекание тока через канал транзистора прекращается. Обозначение полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом с каналом n - и p -типа отличаются направлением стрелки на затворе (рисунок 3.1, з, и). Стрелка указывает направление от p -слоя к n -слою.

У полевых транзисторов с изолированным затвором затвор отделяется от канала тонким слоем диэлектрика из двуокиси кремния (SiO_2). В отечественной практике в качестве названия для таких транзисторов используются равноценные аббревиатуры: МОП (металл-окисел-полупроводник) или МДП (металл-диэлектрик-полупроводник), а международной практике – MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor).

Помимо трехвыводных МДП-транзисторов также выпускаются полевые транзисторы тетродного типа, имеющие четыре активных вывода, два из которых являются изолированными друг от друга затворами, а два других являются выводами истока и стока. Управляющим является первый затвор, а второй затвор называют экранным, поскольку он уменьшает проходную емкость прибора, повышая устойчивость усилительного каскада на высоких частотах. Второй затвор тетродного полевого транзистора можно использовать для регулировки усиления каскада, подавая на него либо фиксированный потенциал, либо сигнал АРУ. Если соединить оба затвора вместе, общая крутизна получившегося триода будет равна сумме крутизн по каждому затвору в отдельности.

При использовании такого транзистора в качестве преобразователя частоты (смесителя) на второй затвор подается сигнал гетеродина, а на первый – усиливаемый ВЧ сигнал. Поскольку МДП-тетрод можно представить в виде двух последовательно соединенных МДП-транзисторов, где вывод стока первого транзистора соединяется с истоком второго, использование одного такого двухзатворного прибора позволяет существенно упростить конструирование смесительных схем.

В свою очередь полевые транзисторы с изолированным затвором делятся на:

- транзисторы с встроенным (собственным) каналом (рисунок 3.1,е,ж), когда канал, соединяющий исток и сток, существует и при нулевом напряжении на затворе (транзистор с обедненным типом канала), что уже даёт возможность протеканию через транзистор тока нагрузки;

- транзисторы с индуцированным каналом (рисунок 3.1,г,д), когда при нулевом напряжении на затворе канал отсутствует, что делает невозможным протекание тока через транзистор. Возможность протекания тока в таком транзисторе (транзистор обогащенного типа) появляется лишь после формирования канала между истоком и стоком, когда напряжение на затворе относительно истока превысит некоторое пороговое значение.

В настоящее время в силовых электронных устройствах широко используются комбинированные транзисторы – биполярные транзисторы с изолированным затвором БТИЗ или IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), которые объединяют свойства биполярных и полевых транзисторов. УГО IGBT транзисторов на схемах показано на рисунке 3.1, в.

Данный тип транзисторов объединяет в себе два транзистора в одной полупроводниковой структуре: биполярный *p-n-p* транзистор, образующий силовой канал, и полевой MOSFET транзистор, образующий канал управления. Принцип его работы заключается в том, что управляющее напряжение, подаваемое на изолированный затвор полевого транзистора, управляет мощным током, протекающим через участок цепи коллектор - эмиттер биполярного транзистора. В результате, управление мощной нагрузкой становится возможным при ничтожно малой мощности управляющего сигнала, поступающего на затвор полевого транзистора, где отсутствует потребление тока. Таким образом в IGBT транзисторе сочетаются положительные качества, как полевого, так и биполярного транзисторов.

Соответственно его выводы получили названия, присущие как тем, так и другим транзисторам:

З - затвор (G – gate);

Э – эмиттер (E – emitter);

К – коллектор (C – collector).

Достоинствами IGBT транзисторов являются:

- управляется напряжением (как любой полевой транзистор), а не током;
- имеет низкие потери в открытом состоянии;
- может работать при температуре более 100 °С;
- способен работать с напряжением более 1000 В и мощностями свыше 5 кВт.

Перечисленные качества IGBT транзистора обеспечили его приоритетное использование в инверторах, частотно-регулируемых приводах и в импульсных регуляторах тока, системах управления мощными

электроприводами, которые устанавливаются, например, на электровозы, трамваи, троллейбусы, обеспечивая при этом повышенный КПД и высокую плавность хода.

На принципиальных электрических схемах транзисторы, как биполярные, так и полевые обозначаются символом VT (в отечественной практике) или Q (в зарубежной практике) с порядковым номером

3.2. Структура биполярного транзистора и анализ его работы в режиме усиления сигналов

Транзистор, изобретенный американскими учеными-физиками Шокли, Бардиным и Браттейном в конце 1947 года, является активным усилительным прибором, выполненного в виде кристалла, образованного металлургическим последовательным соединением трёх слоев полупроводника (кремния, германия) с чередующимся типом проводимости: электронной n и дырочной p . При этом получаются структуры транзисторов $n-p-n$ и $p-n-p$ типов, условно показанные на рисунке 3.2. На границах трех слоёв при их соединении образуются $p-n$ переходы. Таким образом транзистор представляет собой двухпереходный полупроводниковый прибор. Переход, работающий в прямом направлении, называется эмиттерным переходом (ЭП), а соответствующий ему крайний слой эмиттером.

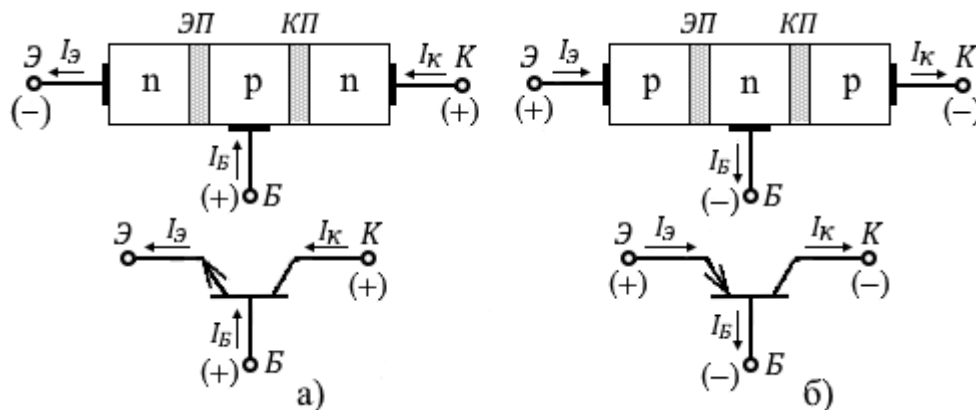


Рисунок 3.2 - Структуры трёхвыводных транзисторов $n-p-n$ и $p-n-p$ типа и соответствующие им условные графические изображения на схемах

Такое название отражает факт инжекции (введения) носителей заряда из крайнего слоя (эмиттера), где они являются основными, через $p-n$ переход в средний слой, где они становятся не основными. Средний слой называется базой. Второй переход, в активном режиме смещённый в обратном направлении, называется коллекторным переходом (КП), а соответствующий ему крайний слой – коллектором. Это название отражает функцию «собирания» инжектированных носителей, прошедших через слой базы. Для

того, чтобы инжектированные из эмиттера носители не успели рекомбинировать в базе с основными носителями и дошли до коллектора для «собираания», база должна иметь достаточно малую толщину.

Поскольку эмиттер является источником носителей заряда, проходящих через транзистор, он является наиболее легированным из трёх областей. Легированием называется добавление в чистый полупроводник небольшого количества известной примеси, в результате чего он приобретает либо электронную **n**, либо дырочную **p** проводимость. Базовый слой легируется слабо, а коллектор легирован в средней степени. Другими словами, уровень примесей в коллекторе выше, чем в базе, но намного меньше, чем в эмиттерной области. Из трех слоёв (областей) наибольший размер у коллектора, поскольку он должен собирать заряды, продрейфовавшие через базу к коллекторному переходу и не рекомбинировавшие в базе из-за её слабого легирования. База является узкой (тонкой) областью, а размер эмиттера, меньше, чем коллектора, но больше, чем размер базы. Из-за указанных особенностей нормальное и инверсное включение транзистора (замена коллектора на эмиттер) не является равноценным. У дискретных транзисторов, помещенных в корпуса, размеры менее 1 мм по ширине и менее 3 мм в длину. У транзисторов, сформированных в кристалле как часть интегральной схемы, размеры на порядки меньше.

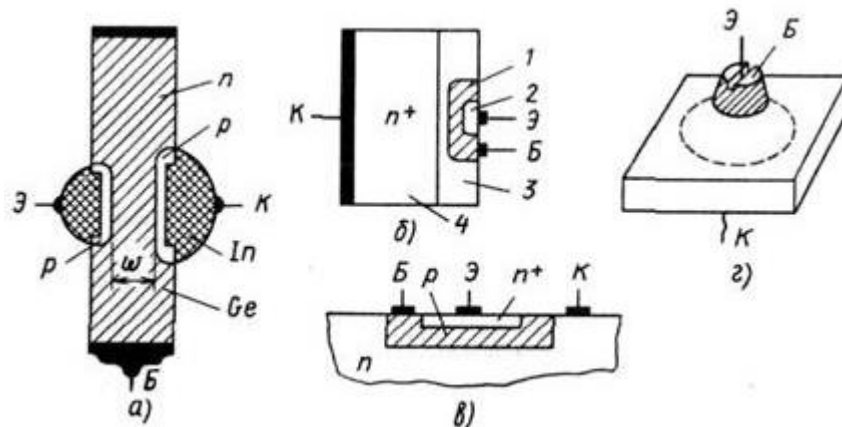


Рисунок 3.3 – Технологические особенности изготовления биполярных транзисторов

Технология изготовления биполярных транзисторов, которая в значительной мере определяет его характеристики, может быть различной: сплавление, диффузия, эпитаксия. Типовые структуры биполярных транзисторов, изготовленных по различной технологии, приведены выше на рисунке 3.3. В частности, на рисунке 3.3,а показаны конструктивные особенности сплавного, на рисунке 3.3,б – эпитаксиально-диффузионного, на рисунке 3.3,в – планарного, на рисунке 3.3,г – мезапланарного транзистора.

При использовании транзистора в качестве элемента схемы к каждому переходу подключается внешнее смещающее напряжение. В зависимости от полярности напряжений на эмиттерном и коллекторном переходах можно получить различные режимы работы транзистора: отсечки, насыщения и активный режим. Для того, чтобы транзистор работал как усилительный прибор, используется активный режим, при котором эмиттерный переход смещается в прямом, а коллекторный переход – в обратном направлении, как показано на рисунке 3.4.

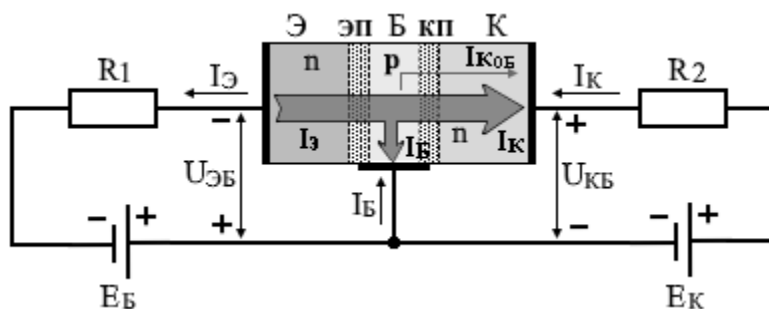


Рисунок 3.4 – Схема движения носителей заряда электронов в биполярном транзисторе n-p-n структуры при активном режиме работы

При подаче в соответствии со схемой на рисунке 3.4 прямого смещения $U_{ЭБ}$ на эмиттерный переход (ЭП) от отдельного источника E_B большое количество электронов **инжектируется** через ЭП из высоколегированного эмиттера в базу, создавая большой ток эмиттера $I_Э$. Этот ток является функцией от приложенного входного напряжения смещения $U_{ЭБ}$ и растет экспоненциально при его увеличении, как это происходит у прямосмещенного диода с p-n переходом. В области слаболегированной базы только малая часть инжектированных из эмиттера электронов рекомбинирует с дырками, являющимися там основными носителями заряда. Дефицит дырок в базе из-за процесса рекомбинации компенсируется их поступлением в базу от плюсового вывода источника смещения E_B , что создает образованный дырками ток базы I_B . Таким образом ток базы является током рекомбинации. Перемещение носителей заряда электронов в транзисторе n-p-n структуры на рисунке 3.4 показано широкими стрелками

Из-за низкой концентрации дырок в базе и её малой толщины процесс электронно-дырочной рекомбинации в базе является маловероятным. Поэтому ток базы I_B имеет небольшую величину. Обычно менее 1% электронов, инжектированных из эмиттера, рекомбинирует в области базы, а оставшиеся электроны (более 99%) имеют большое время жизни и успевают, пройдя тонкий базовый слой, достичь коллекторного перехода. Там под действием электрического поля обратносмещенного коллекторного перехода (КП)

происходит **экстракция** этих электронов в коллекторную область. Поэтому ток базы I_B по сравнению с током эмиттера I_E очень мал.

Переброшенные в коллекторную область электроны достигают вывода коллектора за счёт дрейфа, создавая большой коллекторный ток I_K . На контакте полупроводник – металлический электрод электроны встречаются с положительными зарядами, поступающими от плюсового вывода батареи E_K , и рекомбинируют. Рисунок 3.4 поясняет, почему ток коллектора I_K почти равен току эмиттера I_E , но не превышает его.

Перемещение через базу неосновных для неё носителей заряда – электронов является основой работы p-n-p транзистора. В p-n-p транзисторе неосновными носителями заряда, перемещающимися через область базы, являются дырки. Основные соотношения токов в биполярном транзисторе:

$$I_E = I_B + I_K. \quad \text{При } I_B \ll I_K \quad I_E \approx I_K \quad (3.1)$$

К рассмотренному выше току коллектора в транзисторе будет добавляться ещё один ток – обратный ток коллекторного перехода $I_{Kоб}$. Этот ток не является полезным, поскольку он образуется за счет термогенерации в области базы вблизи КП пар электрон - дырка с последующей экстракцией электронов через p-n переход в область коллектора под действием электрического поля обратного напряжения, приложенного к КП.

Соответственно, из области коллектора также получаемые за счет термогенерации неосновные носители заряда – дырки перемещаются через КП в область базы. Величина теплового тока $I_{Kоб}$ не зависит от приложенного обратного напряжения U_{KB} , но увеличивается с ростом температуры по экспоненциальному закону. Было подсчитано, что ток $I_{Kоб}$ удваивается на каждые 10 градусов увеличения температуры для германиевых транзисторов и увеличивается в 2,5 раза для кремниевых. И хотя этот ток составляет небольшую величину порядка единиц микроампер для германиевых и сотых долей микроампера для кремниевых, он, как будет показано далее, может негативно влиять на стабильность режима работы транзистора.

Доля тока эмиттера, участвующая в основном коллекторном токе I_K , записывается как αI_E , где коэффициент α на практике может принимать значения в диапазоне 0,95...0,998. Добавляя к этой доле обратный тепловой ток $I_{Kоб}$ неосновных носителей из базы в коллектор, получаем окончательное выражение для тока коллектора в схеме с ОБ на рисунке 3.4:

$$I_K = \alpha I_E + I_{Kоб}. \quad (3.2)$$

Отметим, что тепловой ток $I_{Kоб}$ называется обратным, поскольку он, во-первых, образован возникшими в базе в результате термогенерации

электронами, являющимися в базе транзистора n-p-n структуры неосновными носителями заряда. И, во-вторых, переход этих неосновных носителей-электронов через обратно смещенный коллекторный переход под действием поля будет являться противоположным потоку основных носителей - электронов из коллектора в базу, если бы коллекторный переход был смещён в прямом направлении. В активном же режиме работы при закрытом коллекторном переходе тепловой ток $I_{Коб}$ совпадает по направлению с дрейфующими в базе в коллекторную область от эмиттера электронами, которые не успели рекомбинировать с дырками в базе. Поэтому обратный ток $I_{Коб}$ будет дополнять часть тока эмиттера αI_E , но вклад этого теплового тока будет очень и очень мал.

3.3. Статические вольт - амперные характеристики биполярного транзистора

После задания режима работы транзистора в схеме усилительного каскада и подключения к нему источника входного сигнала и нагрузки один из трех выводов биполярного транзистора оказывается общим для входа и выхода схемы. При этом транзистор образует активный четырехполюсник с двумя входными и двумя выходными зажимами. Величины токов базы, эмиттера и коллектора будут зависеть от величины напряжений на входных и выходных зажимах образовавшегося четырехполюсника.

В зависимости от того, какой вывод является общим, существуют три варианта включения транзистора в схеме: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК). Эти варианты включения транзистора n-p-n структуры в составе усилительного каскада представлены на рисунке 3.5.

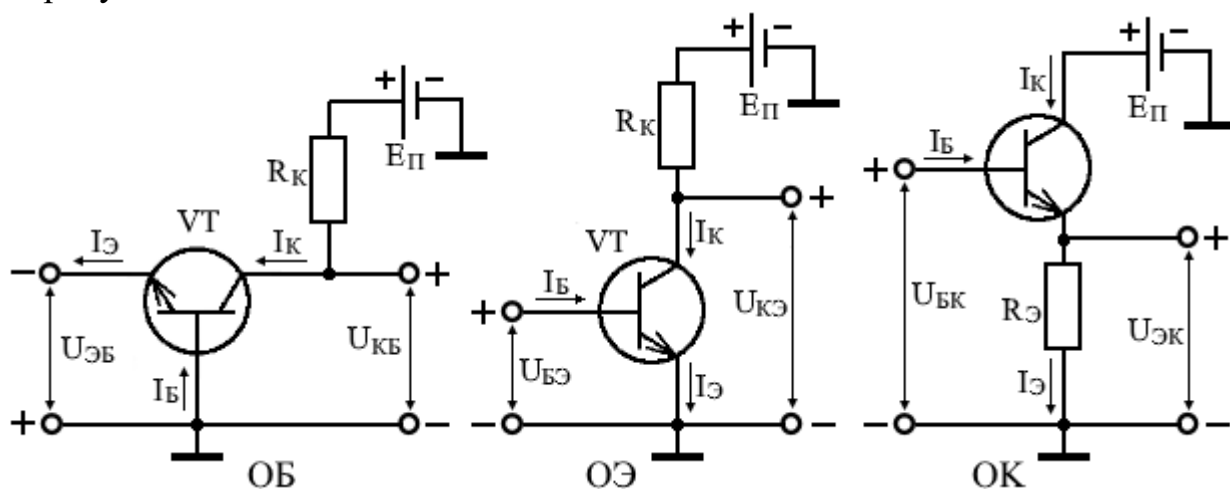


Рисунок 3.5 – Схемы включения биполярного транзистора n-p-n структуры с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ), с общим коллектором (ОК)

Обратим внимание на то, что в схеме включения транзистора с ОК коллектор соединен с общим проводом схемы через пренебрежимо малое сопротивление источника питания E_{Π} . Поэтому входное $U_{БК}$ и выходное $U_{ЭК}$ напряжения определяются в схеме относительно коллектора. Для транзистора р-п-р структуры в схемах включения изменятся лишь полярность напряжения источника питания и направления токов.

Для наиболее информативного анализа протекающих в усилительном каскаде процессов используются статические вольт-амперные характеристики (ВАХ) транзистора, которые получают при подаче на электроды транзистора меняющегося постоянного напряжения и измерения при этом токов, протекающих через входные и выходные зажимы без подключенной к ним нагрузки. По этим характеристикам можно определить ряд параметров транзистора и их зависимостей от режима работы, которые не приводятся в справочных материалах и технических условиях эксплуатации.

Для каждой схемы включения транзистора выделяют входные, выходные и проходные (сквозные) характеристики. Входная характеристика показывает зависимость входного тока от напряжения на входных зажимах, выходная - зависимость выходного тока от напряжения на выходных зажимах, проходная ВАХ показывает зависимость выходного тока от напряжения на входных зажимах или от входного тока. Наиболее распространены ВАХ для схем с ОБ и с ОЭ, которые приводятся в справочниках. Статические характеристики транзисторов в схеме с ОК на практике не применяются.

- Статические ВАХ п-р-п транзистора в схеме включения с ОБ

Для транзисторов, включенных по схеме с ОБ, основными являются следующие характеристики:

- входная эмиттерная характеристика $I_Э = f(U_{ЭБ})$, снимаемая при постоянном напряжении на коллекторном переходе $U_{КБ} = const$;
- выходная коллекторная характеристика $I_К = f(U_{КБ})$, снимаемая при постоянном входном токе эмиттера $I_Э = const$.

При включении транзистора по схеме с ОБ на выводы эмиттера и коллектора относительно базы подаются напряжения в соответствии со схемой на рисунке 3.6.

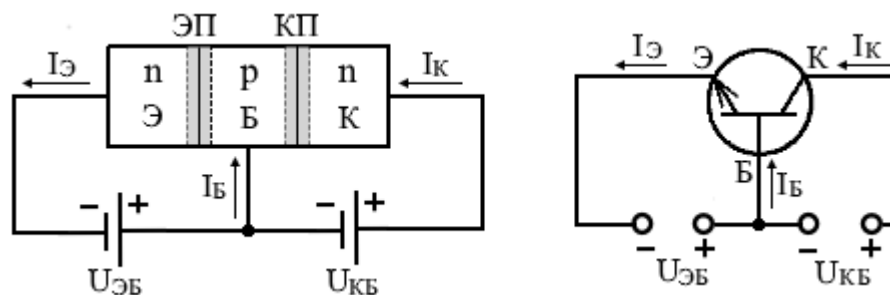


Рисунок 3.6 – Схема подключения смещающих напряжений к эмиттерному и коллекторному переходам при включении транзистора по схеме с ОБ

Построенные входные и выходные характеристики для транзистора n-p-n структуры при включении по схеме с ОБ приведены на рисунке 3.7.

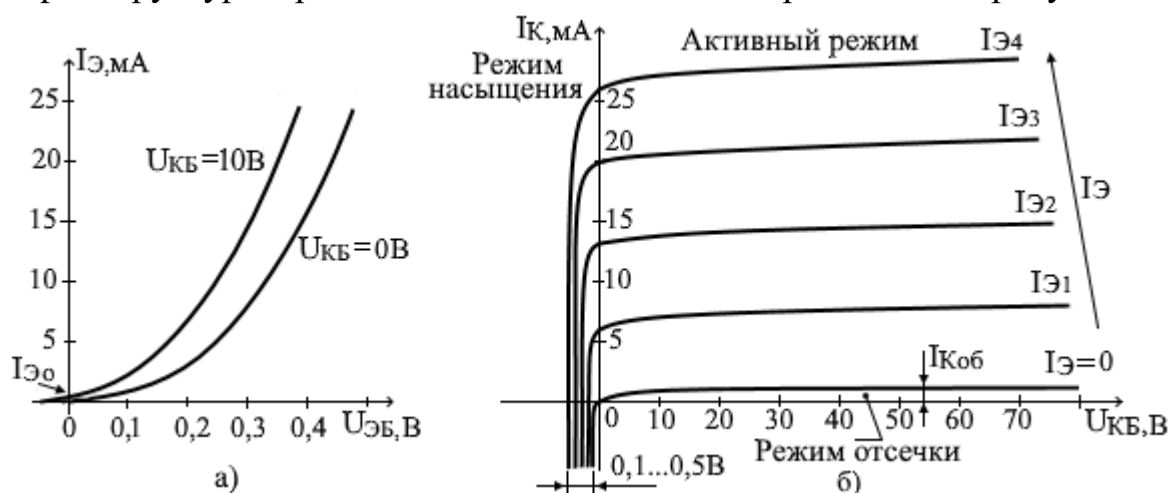


Рисунок 3.7 – Входные а) и выходные б) статические ВАХ биполярного транзистора n-p-n структуры для схемы включения с ОБ

Входная характеристика, снятая при обратном напряжении $U_{КБ} > 0$ на КП, как показано на рисунке 3.7.а, будет смещена влево и приподнята вверх относительно характеристики для случая $U_{КБ} = 0$. Причиной такого смещения характеристики при увеличении приложенного к КП обратного напряжения является уменьшение толщины базы из-за эффекта Эрли (модуляция ширины базы) за счет расширения зоны обеднения коллекторного перехода (КП), что приводит к росту в базе неосновных носителей - электронов, инжектированных из области эмиттера. Значительная часть этих электронов, продрейфовав до КП и не успев рекомбинировать в базе, перебрасывается полем обратнсмещенного КП в область коллектора, вызывая больший прирост тока эмиттера $I_Э$ при одном и том же значении напряжения $U_{ЭБ}$ на эмиттерном переходе.

Выходные (коллекторные) характеристики транзистора n-p-n структуры для схемы включения с ОБ, приведенные на рисунке 3.7.б, показывают зависимость тока коллектора от напряжения коллектор-база:

$I_K = f(U_{KB}, I_E)$, снимаемую для ряда постоянных значений тока эмиттера $I_E = const$. На выходных характеристиках можно отметить три области, соответствующие трем режимам работы транзистора.

В режиме отсечки, когда эмиттерный ток $I_E = 0$ (эмиттерная цепь разомкнута), характеристика выходит из начала координат и далее с ростом запирающего напряжения U_{KB} соответствует характеристике диода при обратном включении, а определяемый ею ток коллектора является тепловым обратным током I_{K06} p-n перехода коллектор-база.

В активном режиме работы при положительном запирающем напряжении на КП ток коллектора, определяемый по формуле $I_K = \alpha I_E + I_{K06}$, не зависит от напряжения на переходе U_{KB} , изменяясь лишь пропорционально величине тока эмиттера I_E , являющегося параметром в функции зависимости коллекторного тока от U_{KB} . Такое поведение характеристики объясняется тем, что количество неосновных носителей заряда, достигающих в базе коллекторного перехода и образующих коллекторный ток, является функцией прямого напряжения на эмиттерном, а не на коллекторном переходе.

Так как ток коллектора I_K в соответствии с приведенной выше формулой не зависит от величины обратного напряжения U_{KB} , выходные характеристики при разных значениях I_E должны идти параллельно оси напряжения U_{KB} . Однако в реальности выходные характеристики при увеличении напряжения U_{KB} идут с небольшим уклоном вверх, что объясняется эффектом Эрли (модуляция ширины базы). Поэтому для их более точной аппроксимации используется выражение:

$$I_K = \alpha I_E + I_{K06} + \frac{U_{KB}}{r_K}. \quad (3.3)$$

Определим, что представляет собой в этой формуле сопротивление r_K . Для этого представим напряжение U_{KB} функцией коллекторного тока I_K :

$$U_{KB} = I_K r_K - \alpha I_E r_K - I_{K06} r_K. \quad (3.4)$$

Из этого выражения найдем производную по I_K , считая ток эмиттера постоянной величиной:

$$\left. \frac{dU_{KB}}{dI_K} \right|_{I_E = const} = r_K, \quad (3.5)$$

откуда следует, что r_K – это дифференциальное сопротивление коллекторного перехода или выходное сопротивление транзистора в схеме с ОБ в активной области. Величина данного сопротивления составляет единицы и десятки мегаом.

Режим насыщения наступает при перемене полярности напряжения $U_{КБ}$ на коллекторном переходе, которое становится отрицательным ($U_{КБ} < 0$) по знаку, но прямым для данного перехода. При этом КП открывается, ток коллектора перестает зависеть от тока эмиттера и уже при долях вольта прямого напряжения резко уменьшается до нуля, меняя далее своё направление, что отражено на выходных характеристиках на рисунке 3.7,б.

Такая зависимость тока I_K обусловлена тем, что при открытии КП навстречу потоку неосновных носителей – электронов, движущихся через КП из базы в область коллектора, появляется встречный поток электронов – основных носителей из коллекторной области, диффундирующих через переход в область базы. Это приводит к резкому уменьшению тока коллектора, характеризующего активный режим работы транзистора, как показано на рисунке 3.7,б. Равенство $I_K = 0$ на этом участке характеристики означает, что составляющая тока коллектора, обусловленная движением неосновных носителей заряда – электронов из области базы, становится равной его встречной составляющей, обусловленной движением основных носителей заряда – электронов из области коллектора в базу.

Статические ВАХ n-p-n транзистора в схеме включения с ОЭ

При включении биполярного n-p-n транзистора по схеме с общим эмиттером на его выводы относительно эмиттера подаются смещающие напряжения в соответствии со схемой на рисунке 3.8.

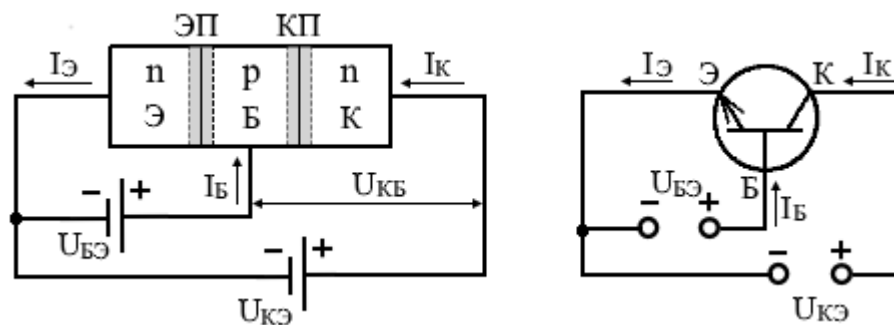


Рисунок 3.8 – Напряжения между выводами биполярного транзистора n-p-n структуры при включении по схеме с общим эмиттером

Входные характеристики транзистора для схемы включения с ОЭ, приведенные на рисунке 3.9.а, показывают зависимость тока базы I_B от напряжения база-эмиттер $U_{ЭБ}$: $I_B = f(U_{ЭБ}, U_{КЭ})$ при различных фиксированных напряжениях между коллектором и эмиттером $U_{КЭ} = const$. По своей форме они соответствуют ВАХ p-n перехода при прямом смещении и описываются экспоненциальной зависимостью.

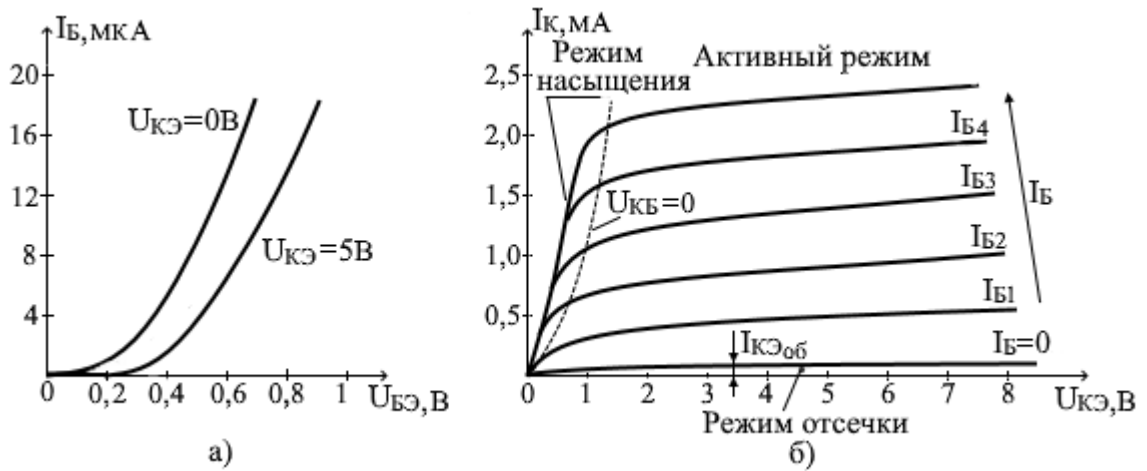


Рисунок 3.9 – Статические вольт-амперные характеристики биполярного транзистора *n-p-n* структуры для схемы включения с ОЭ:
а) входные характеристики, б) выходные характеристики

Отметим, что при увеличении обратного для коллекторного перехода смещения $U_{КЭ}$ характеристика смещается вправо, а базовый ток I_B снижается при одном и том же напряжении $U_{БЭ}$. Это происходит из-за того, что возникающее при увеличении $U_{КЭ}$ уменьшение ширины базы за счет расширения области обеднения коллектора (эффект Эрли) приводит к уменьшению числа рекомбинирующих пар электрон-дырка в базе, а следовательно, к уменьшению базового тока I_B , который является током рекомбинации.

С помощью входной характеристики можно определить входное дифференциальное сопротивление транзистора в схеме с ОЭ. Для этого на небольших линейных участках ВАХ при одном значении $U_{КЭ}$ берутся приращения тока ΔI_B и напряжения $\Delta U_{БЭ}$, с помощью которых вычисляется отношение:

$$R_{вхОЭ} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} \right|_{U_{КЭ} = const}. \quad (3.6)$$

Выходные (коллекторные) характеристики транзистора *n-p-n* структуры с ОЭ, приведенные на рисунке 3.9,б, строятся как функция коллекторного тока I_K от напряжения между коллектором и эмиттером $U_{КЭ}$: $I_K = f(U_{КЭ}, I_B)$, снимаемая при фиксированных значениях тока базы $I_B = const$. Эти характеристики можно разделить на три области, соответствующие режиму насыщения, режиму отсечки и области работы транзистора в активном режиме.

При включения транзистора в каскаде по схеме с ОЭ на коллекторный переход подается напряжение $U_{КБ} = U_{КЭ} - U_{БЭ}$, что следует из рисунка 3.8. **Режим насыщения** на графике характеристик (рисунок 3.9,б) соответствует

области, лежащей левее пунктирной линии, определяемой выполнением условия $U_{КБ} = 0$ из уравнения выше. В режиме насыщения, когда транзистор полностью открывается и напряжение между эмиттером и коллектором $U_{КЭ}$ не превышает 0,1...0,2 В, что меньше напряжения базового смещения $U_{БЭ} = 0,3 \dots 0,8$ В, на коллекторном переходе появляется отрицательный потенциал $U_{КБ} < 0$, смещающий его в прямом направлении и приводящий к началу инжекции электронов из области коллектора в базу.

В результате основной ток неосновных носителей заряда-электронов из базы в коллектор резко уменьшается, что приводит к слиянию в одну спадающую линию характеристик левее разделительной пунктирной линии. В этой линии слияния характеристик ток коллектора и ток базы связаны между собой линейной зависимостью $I_K = \beta I_B$, где β – коэффициент передачи тока базы в схеме с ОЭ.

Считается, что режим насыщения для кремниевого транзистора наступает при смещении на базе $U_{БЭ} = 0,8$ В. Транзистор при этом считается полностью «открытым» с остаточным напряжением между коллектором и эмиттером $U_{КЭ} = 0,2$ В. Для германиевого транзистора режиму насыщения соответствует остаточное напряжение $U_{КЭ} = 0,1$ В при смещении $U_{БЭ} = 0,3$ В.

В режиме отсечки, когда ток базы $I_B = 0$, что соответствует размыканию базовой цепи, определим величину теплового обратного тока $I_{КЭоб}$ между коллектором и эмиттером. Подставляя в выражение (3.2) для суммарного тока коллектора запись тока эмиттера как сумму коллекторного и базового токов (3.1), получаем

$$I_K = \alpha(I_K + I_B) + I_{Коб}, \quad (3.7)$$

откуда находим

$$I_K = \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) I_B + \frac{1}{1 - \alpha} I_{Коб}. \quad (3.8)$$

Пренебрегая вторым слагаемым как величиной второго порядка малости из-за незначительной величины теплового обратного тока $I_{Коб}$, можно записать, что ток коллектора I_K линейно связан с током базы I_B через коэффициент

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}, \quad (3.9)$$

который называется коэффициентом передачи тока базы в схеме с ОЭ или параметром транзистора $h_{21Э}$. Соответственно, из формулы (3.9) можно получить коэффициент α :

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}, \quad (3.10)$$

являющийся коэффициентом передачи тока эмиттера в схеме с ОБ или параметром транзистора $h_{21Б}$ для этого вида включения. При значении $\alpha = 0,95 \dots 0,998$ величина коэффициента β может составлять $50 \dots 450$ единиц.

С учетом введенных обозначений выражение (3.8) для суммарного тока коллектора приобретает следующий вид:

$$I_K = \beta I_B + (1 + \beta)I_{K0б} = \beta I_B + I_{KЭ0б}, \quad (3.11)$$

где $I_{KЭ0б} = (1 + \beta)I_{K0б} \approx \beta I_{K0б}$ – обратный тепловой ток при схеме включения транзистора с ОЭ, который представляет собой усиленный в десятки, сотни раз ($\sim \beta$ раз) тепловой ток $I_{K0б}$ коллекторного перехода в схеме с ОБ. Из-за этого ток $I_{KЭ0б}$ может существенно влиять на стабильность режима работы транзистора по постоянному току. Неуправляемый тепловой ток $I_{KЭ0б}$ в схеме с ОЭ измеряется при разомкнутой входной цепи, когда ток базы $I_B = 0$.

В активном режиме работы в области правее пунктирной линии на рисунке 3.9,б характеристики при $I_B = const$ идут с положительным уклоном при увеличении запирающего напряжения $U_{КЭ}$ между коллектором и эмиттером. Данный уклон можно учесть, воспользовавшись выражением (3.3) для аппроксимации характеристик в схеме с ОБ:

$$I_K = \alpha I_Э + I_{K0б} + \frac{U_{КБ}}{r_K}.$$

Произведя в нем замену тока эмиттера $I_Э = I_B + I_K$, запишем

$$I_K = \alpha(I_K + I_B) + I_{K0б} + \frac{U_{КБ}}{r_K}, \quad (3.12)$$

откуда получим соотношение для тока коллектора:

$$I_K = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B + \frac{I_{K0б}}{1 - \alpha} + \frac{U_{КБ}}{r_K(1 - \alpha)}. \quad (3.13)$$

Далее, воспользовавшись определением коэффициент передачи тока β для схемы с ОЭ через коэффициент α (3.9) и делая допущение, что $U_{КБ} = U_{КЭ} - U_{БЭ} \approx U_{КЭ}$ из-за того, что $U_{КЭ} \gg U_{БЭ}$ в активной области. получаем окончательное выражение для графика ВАХ в активной области:

$$I_K = \beta I_B + (1 + \beta)I_{K0б} + (1 + \beta) \frac{U_{КЭ}}{r_K}, \quad (3.14)$$

в котором последнее слагаемое отвечает за наклон выходных характеристик.

Очевидно, что наклон характеристик в активной области для схемы с ОЭ будет в $(1 + \beta) \approx \beta$ раз больше, чем в схеме с ОБ.

Определим дифференциальное сопротивление коллекторного перехода r_{K03} в схеме с ОЭ, предварительно выразив в выражении (3.14) напряжение U_{K3} через коллекторный ток I_K :

$$U_{K3} = \frac{r_K I_K}{1 + \beta} - \frac{\beta r_K I_B}{1 + \beta} - r_K I_{K06}. \quad (3.15)$$

Считая напряжение на коллекторе U_{K3} функцией коллекторного тока и беря производную по I_K при постоянном токе базы I_B , получаем:

$$\left. \frac{\partial U_{K3}}{\partial I_K} \right|_{I_B = \text{const}} = \frac{r_K}{1 + \beta} = r_{K03}. \quad (3.16)$$

Дифференциальное сопротивление коллекторного перехода в схеме с ОЭ в десятки, сотни раз меньше, чем сопротивление перехода в схеме с ОБ и составляет порядка десятков или сотен килоом. В активном режиме с помощью выходных характеристик сопротивление коллекторного перехода r_{K03} , являющееся по сути выходным сопротивлением транзистора в схеме с ОЭ, можно найти из следующего выражения:

$$r_{K03} = \left. \frac{\Delta U_{K3}}{\Delta I_K} \right|_{I_B = \text{const}}. \quad (3.17)$$

Помимо входной и выходной характеристик иногда используется **сквозная (передаточная по току) ВАХ** биполярного транзистора. Эта характеристика в схеме с ОЭ представляет собой зависимость выходного тока транзистора I_K от входного тока I_B : $I_K = f(I_B)$ при постоянном напряжении между коллектором и эмиттером $U_{K3} = \text{const}$. Данная характеристика представлена на рисунке 3.10 для двух значений напряжения $U_{K32} > U_{K31}$.

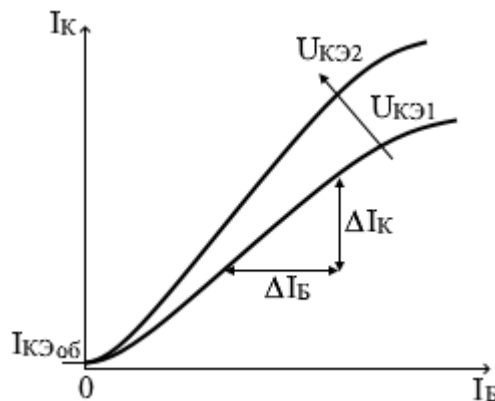


Рисунок 3.10 – Сквозная (передаточная по току) вольт-амперная характеристика биполярного транзистора *n-p-n* структуры

Влияние напряжения U_{K3} на проходные ВАХ проявляется через эффект Эрли. При увеличении обратного напряжения U_{K3} ширина базы уменьшается

и, следовательно, ток коллектора I_K будет больше при одном и том же токе базы I_B , определяемым напряжением смещения на эмиттерном переходе $U_{БЭ}$. При нулевом токе базы, когда транзистор находится в состоянии отсечки, ток коллектора приобретает значение обратного теплового тока $I_{КЭоб}$. Отношение приращения тока коллектора ΔI_K к приращению тока базы ΔI_B на линейном участке сквозной характеристики определяет коэффициент усиления транзистора по току β в схеме включения транзистора с ОЭ или параметр транзистора для малых сигналов $h_{21э}$. Подробно эти параметры транзистора будут рассмотрены позже.

3.4. Структуры и статические характеристики полевых транзисторов

3.4.1. Полевые транзисторы с управляющим p - n -переходом

Полевой транзистор с управляющим p - n переходом представляет собой полупроводниковое устройство с тремя выводами, у которого изменение проводимости канала происходит за счет изменения толщины слоя объемного заряда p - n перехода, смещенного в обратном направлении. Условное графическое изображение такого транзистора на схемах показано на рисунке 3.1,з,и, а его структура и схема подачи напряжений на выводы для n -канального транзистора приведены на рисунке 3.11.

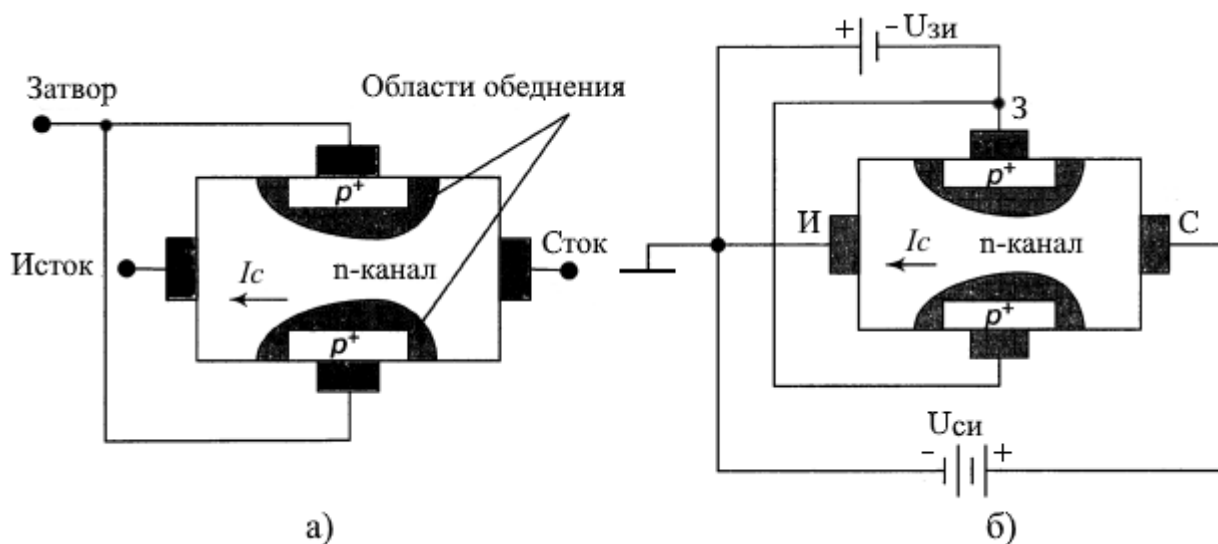


Рисунок 3.11 – а) Структура n -канального полевого транзистора с p - n переходом, б) схема подачи напряжений на выводы полевого транзистора

В структуре полевого транзистора с управляющим p - n переходом, показанной на рисунке 3.11,а, 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. Поскольку при этом p - n переход является закрытым и ток через него практически отсутствует, то главным преимуществом полевых транзисторов является большое входное сопротивление $R_{вх}$ со стороны затвора порядка $10^8 \dots 10^9$ Ом. Благодаря этому, полевые транзисторы практически не потребляют ток у источника усиливаемого сигнала.

Независимо от типа электропроводности канала n - или p -типа, электроды, подключенные к выводам канала, называются исток «И» (S - Source) и сток «С» (D - Drain). Управление током, протекающим по этому каналу, достигается изменением напряжения $U_{зи}$, приложенного между затвором $З$ (G - Gate) и истоком И (рисунок 3.11,б). В условном графическом обозначении этого типа транзисторов стрелка, представляющая затвор, указывает направление из p -области в n -область.

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 . Поскольку ток затвора полевых транзисторов равен нулю, то управление величиной тока стока осуществляется изменением напряжения на затворе по отношению к истоку. Поэтому вместо входных характеристик используются проходные или сток-затворные характеристики, представляющие собой зависимость $I_C = f(U_{зи})$ для одного фиксированного напряжения сток-исток $U_{си}$ в области насыщения. На рисунках 3.12,а и 3.12,б представлены проходные характеристики соответственно для полевых транзисторов с n и p каналами. На рисунке 3.12,в в качестве примера показана выходная ВАХ только для транзистора с n -каналом.

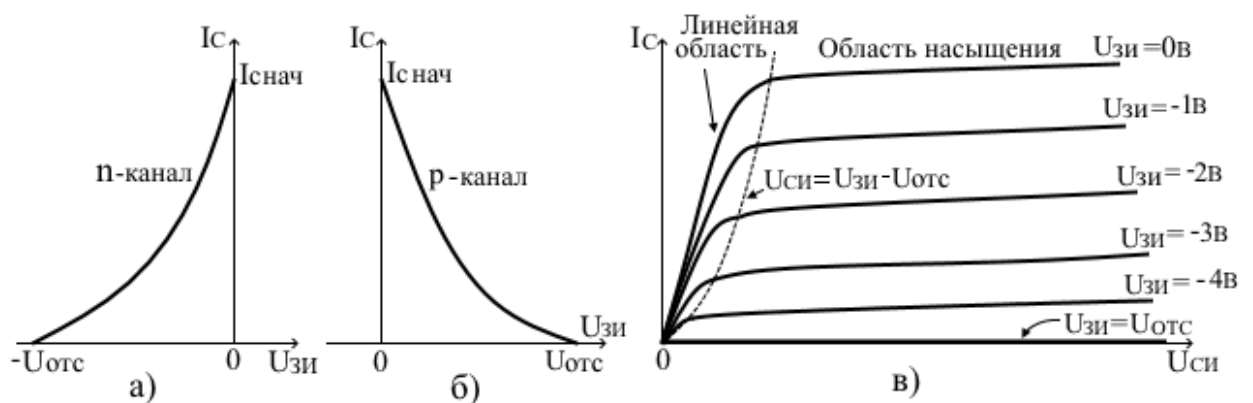


Рисунок 3.12 – Вольт-амперные характеристики полевого транзистора с управляющим p - n переходом: а) и б) проходные характеристики соответственно для транзисторов с каналом n -типа и p -типа, в) выходные характеристики для полевого транзистора с каналом n -типа

С помощью проходной характеристики можно вычислить такой важный параметр транзистора как крутизну характеристики прямой передачи S , характеризующую усилительные свойства транзистора при постоянном напряжении сток-исток $U_{СИ}$:

$$S = \left. \frac{dI_C}{dU_{ЗИ}} \right|_{U_{СИ} = const}. \quad (3.18)$$

При $U_{ЗИ} = 0$ крутизна имеет максимальное значение и называется начальной крутизной $S_{нач}$ характеристики. С ростом запирающего напряжения $U_{ЗИ}$ между затвором и истоком крутизна уменьшается в соответствии с выражением:

$$S = S_{нач} \cdot \left(1 - \frac{U_{ЗИ}}{U_{ЗИ\text{ отс}}} \right). \quad (3.19)$$

Величина крутизны S для большинства транзисторов составляет 2...50 мА/В. Она приводится в справочных данных на транзистор наряду с $I_{С\text{ нач}}$. Данный параметр используется для анализа и расчета схем на полевых транзисторах с р-п переходом и на полевых транзисторах другого типа.

При напряжении на затворе относительно истока $U_{ЗИ} = 0$ канал транзистора является открытым и через него протекает начальный ток стока $I_{С\text{ нач}}$. С ростом отрицательного потенциала на затворе для транзистора с п-каналом (или положительного потенциала для транзистора с р-каналом) ток стока начинает уменьшаться ввиду уменьшения ширины канала из-за расширения зон обеднения вблизи р-п переходов. И при некотором отрицательном напряжении на затворе, называемом напряжением отсечки $-U_{отс}$, канал полностью перекрывается расширившимися обедненными зонами (рисунок 3.11,б). При этом ток стока I_C становится равным нулю.

По выходным (стоковым) характеристикам, представленным на рисунке 3.12,в для транзистора с п-каналом, видно, что в линейной области (слева от пунктирной параболы) ток стока I_C с увеличением напряжения между стоком и истоком $U_{СИ}$ возрастает линейно («омическая область») до тех пор, пока сумма отрицательного напряжения на затворе $U_{ЗИ}$ и напряжения сток-исток $U_{СИ}$, взятого с отрицательным знаком, не станет равной напряжению отсечки $U_{отс}$ для этого типа транзистора. После чего расширившиеся зоны обеднения у стока начинают перекрывать канал. Ток стока перестает расти пропорционально росту $U_{СИ}$ и начинает стабилизироваться на определенном уровне при $|U_{СИ}| \geq |U_{отс}|$ за счет саморегулирующего процесса. Эта пологая часть характеристик соответствует области насыщения. Если бы ток рос дальше, то падение напряжения вдоль канала от стока к истоку тоже бы

увеличилось, и области обеднения вдоль канала смыкались бы на большей длине, препятствуя возрастанию тока. Момент перехода от линейной области к области насыщенного (постоянного) тока для каждого значения напряжения $U_{зи}$ начинается на графике выходных характеристик на рисунке 3.12, в с пересечения графиком характеристики пунктирной параболической линии, образуемой группой точек, при которых на линиях ВАХ начинается режим отсечки (насыщения). Начало этого режима достигается при напряжении сток-исток, равном

$$U_{си} = U_{зи} - U_{отс} . \quad (3.20)$$

Отметим, что в омической области сопротивление канала между стоком и исток может регулироваться напряжением на затворе в пределах от 100 Ом до 10 кОм.

3.4.2. Полевые транзисторы с встроенным каналом

У полевых транзисторов МДП (МОП) - структуры (металл-диэлектрик-полупроводник или металл-окисел-полупроводник) затвор отделен от полупроводникового канала диэлектрическим слоем из двуокиси кремния SiO_2 . Поэтому этот тип полевых транзисторов называют транзисторами с изолированным затвором. Сопротивление канала МДП-транзистора регулируется электрическим полем, создаваемым напряжением между затвором и полупроводником. Транзисторы делятся на обедненные и обогащенные с каналами **n** и **p** типа. Структура обедненного МДП-транзистора с n-каналом показана на рисунке 3.13, а. На подложке p-типа создают два сильнолегированных участка, обозначенных **n**⁺, один из которых служит истоком, другой — стоком. Между стоком и истоком имплантирован n-канал, следовательно, в канале имеются подвижные электроны, обеспечивающие его проводимость.

Вывод затвора сформирован осаждением алюминия на слой диэлектрика над каналом без образования p-n перехода. Для создания выводов истока и стока через окна, открытые в изолирующем слое над легированными участками, также осаждается алюминий.

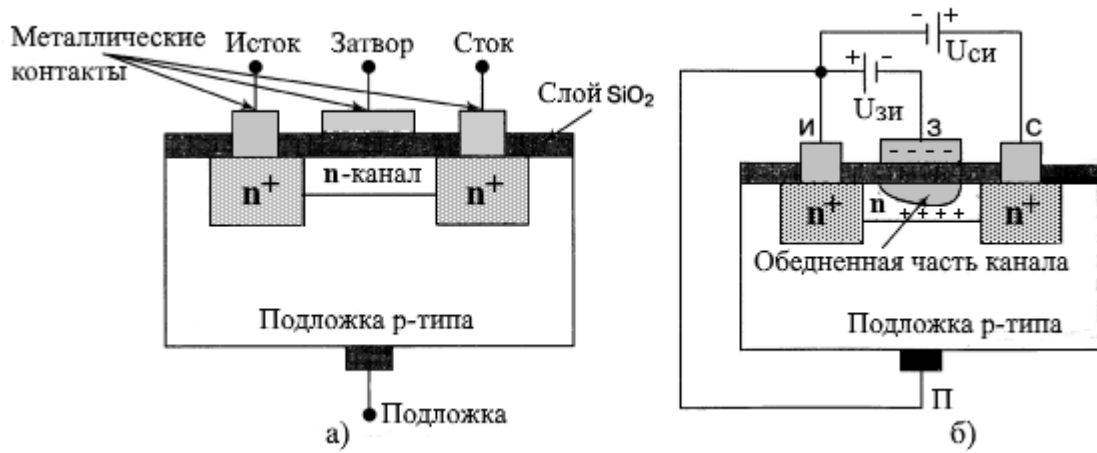


Рисунок 3.13 – а) Структура полевого транзистора с изолированным затвором и встроенным n-каналом, б) типовая схема подачи напряжений на выводы полевого транзистора в режиме обеднения

Подложка имеет вывод, обозначенный буквой П. Она может иметь внутреннее соединение с истоком. Обедненный МДП-транзистор с n-каналом обычно работает с положительным напряжением между стоком и истоком, как показано на типовой схеме подключения напряжений к электродам на рисунке 3.13,б.

Напряжение между затвором и истоком $U_{зи}$ может быть положительным, нулевым или отрицательным, что определяет его режим работы. Проходные характеристики для n-канального и p-канального МДП-транзистора, отражающие зависимость тока стока I_c от напряжения на затворе $U_{зи}$ при фиксированном напряжении между стоком и истоком $U_{си}$, представлены на рисунке 3.14.



Рисунок 3.14 – Проходные вольт-амперные характеристики (ВАХ) полевых транзисторов с изолированным затвором и технологически встроенным каналом: на рисунке а) - для транзистора с каналом n-типа; на рисунке б) - для транзистора с каналом p-типа

Схема подключения напряжений к электродам n-канального транзистора на рисунке 3.16,б соответствует его работе в режиме обеднения. В этом режиме при отрицательном напряжении на затворе во встроенном канале индуцируются положительные заряды, которые в результате

рекомбинации с отрицательными зарядами n -канала создают обедненный слой, который с ростом отрицательного напряжения на затворе расширяется и, перекрывая канал, уменьшает ток стока. При пороговом напряжении на затворе $-U_{\text{пор}}$ ток стока I_C прекращается полностью. При положительном напряжении на затворе транзистор начинает работать в режиме обогащения. При этом под воздействием поля от положительного потенциала затвора в канале индуцируется больше отрицательных зарядов (электронов), что повышает проводимость канала и увеличивает ток стока I_C .

Проходные и стоковые характеристики обедненного МДП-транзистора с встроенным p -каналом аналогичны характеристикам n -канального транзистора. Только в этом случае для режима обеднения требуется положительное напряжение на затворе $+U_{\text{зи}}$, а для режима обогащения на затворе должно быть отрицательное напряжение $-U_{\text{зи}}$. Ниже на рисунке 3.15 представлены стоковые характеристики обедненного n -канального МДП-транзистора в режимах обеднения и обогащения.



Рисунок 3.15 – Выходная (стоковая) вольт-амперная характеристика (ВАХ) полевого транзистора с изолированным затвором и технологически встроенным каналом n -типа

3.4.3. Полевые транзисторы с индуцированным каналом

Устройство обогащенного n -канального МДП-транзистора с изолированным затвором аналогично устройству обедненному транзистору, рассмотренному ранее с той лишь разницей, что канал в нём не формируется заранее технологически, например, легированием, как в обеднённых транзисторах, а создаётся зарядами, индуцированными полем, наведенным напряжением, подаваемым на затвор транзистора относительно истока. Поэтому данный тип полевых транзисторов также называют транзисторами с индуцированным каналом. МДП-транзисторы с индуцированным n -каналом имеют лучшие параметры, чем p -канальные транзисторы вследствие того, что канал в них формируется более подвижными электронами. Образование n -

канала поясним на структуре транзистора с подложкой р-типа, показанной на рисунке 3.16,а, где соединенная с истоком подложка заземлена, а напряжение между стоком и истоком установлено нулевым.

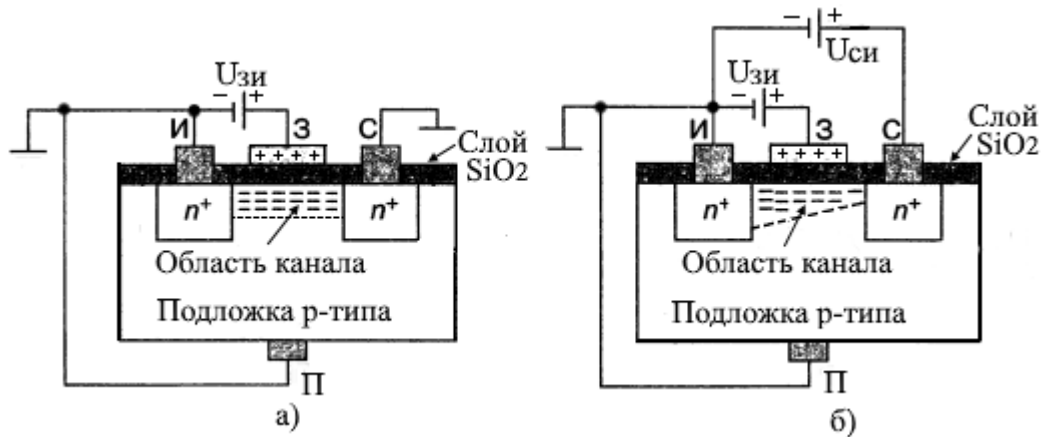


Рисунок 3.16 – Структура полевого транзистора с изолированным затвором и индуцированным каналом: а) образование n-канала при напряжении на затворе больше $U_{\text{пор}}$; б) переход транзистора в режим насыщения

Изначально при нулевом потенциале на затворе канал отсутствует. Металлизированный затвор и р-полупроводник подложки вместе с изолирующим оксидным слоем между ними в области канала образуют конденсатор с параллельными обкладками. При подаче положительного напряжения на затвор оно своим полем через слой диэлектрика SiO_2 будет вытеснять дырки подложки из слоя будущего канала, увеличивая в нём плотность электронов. При дальнейшем увеличении напряжения $U_{\text{зи}}$ количество индуцированных им электронов в области канала будет увеличиваться ещё больше.

При превышении напряжением $U_{\text{зи}}$ некоторого порогового уровня $U_{\text{пор}}$ число электронов под оксидным слоем становится достаточным, чтобы между истоком и стоком (сильнолегированными участками n^+ на подложке) образовался инверсионный (обращенный) слой, насыщенный электронами: n-канал, проводимость которого увеличивается при дальнейшем повышении напряжения на затворе. При приложении положительного напряжения между стоком и истоком $U_{\text{си}}$ через индуцированный канал будет протекать ток $I_{\text{с}}$. Зависимость величины данного тока от напряжения на затворе $U_{\text{зи}} > U_{\text{пор}}$ при постоянном напряжении $U_{\text{си}}$ является проходной (сток-затворной) характеристикой обогащенного МДП-транзистора, приведенной на рисунке 3.17,а.

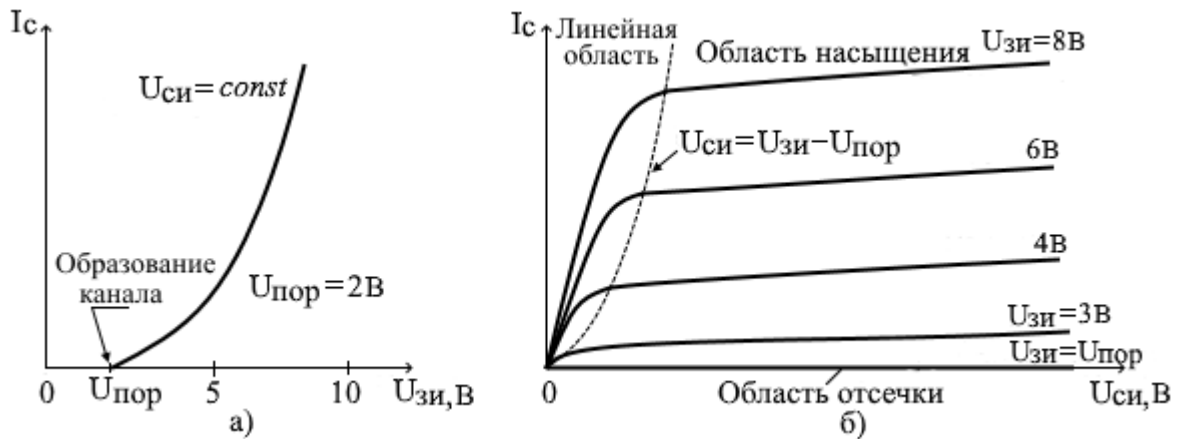


Рисунок 3.17 – Вольт-амперные характеристики (ВАХ) полевого транзистора с изолированным затвором и индуцированным каналом n -типа: а) проходная характеристика, б) выходная (стоковая) характеристика

При малых значениях $U_{си} < U_{зи} - U_{пор}$ ток стока I_c зависит от напряжения $U_{си}$ линейно (линейная область). При дальнейшем увеличении $U_{си}$ наступает момент, когда напряжение между стоком и затвором $U_{сз} = U_{зи} - U_{си}$ уменьшается настолько, что электрическое поле возле стока уменьшается до нуля, и канал там начинает исчезать (сужаться), как показано на рисунке 3.16,б. Сопротивление канала существенно возрастает, и ток стока I_c перестает расти при дальнейшем увеличении $U_{си}$. Транзистор начинает работать в режиме насыщения, которому соответствует область насыщения в виде слегка наклонных линий при $U_{зи} = const$ на выходных (стоковых) характеристиках транзистора $I_c = f(U_{си})$ на рисунке 3.17,б. Однако ток насыщения $I_{c\text{ нас}}$ зависит от величины превышения напряжением затвор-исток $U_{зи}$ порогового уровня $U_{пор}$. При больших значениях $U_{зи}$ будет и больший ток насыщения $I_{c\text{ нас}}$. Пунктирной линией в виде параболы на стоковых характеристиках на рисунке 3.17,б показана граница перехода транзистора из линейного режима в режим насыщения.

Отметим, что МДП транзистор имеет симметричную конструкцию, что позволяет менять между собой выводы стока и истока, если подложка внутри транзистора не подключена ни к одному концу канала.

Для совмещения схем на МДП транзисторах с индуцированным каналом со схемами на биполярных транзисторах необходимо, чтобы они могли работать при питании +5 В, а пороговое напряжение $U_{пор}$ было около 2 В. Указанная величина порога была достигнута при применении изолирующего слоя из нитрида кремния (Si_3N_4) вместо двуокиси кремния (SiO_2) и имеющего к тому же в три раза большую диэлектрическую проницаемость.

Преимущества полевых транзисторов перед биполярными заключаются в следующем:

1. Очень высокое входное сопротивление, составляющее десятки и сотни мегаом. Поэтому они потребляют чрезвычайно малые токи, что увеличивает их время работы от батарей.
2. Способность работать на более высоких частотах.
3. Занимают в десятки раз меньше места, чем биполярные, что дает более высокую плотность размещения в микросхемах. Их можно применять там в качестве нагрузок, резисторов и конденсаторов.
4. Отсутствует необходимость в начальном смещении. Для биполярных транзисторов необходимо начальное смещение $U_{бэ0} \approx 0,6 \text{ В}$.
5. Меньший коэффициент шума, чем у биполярных. Поэтому они чаще используются во входных каскадах усилителей малых сигналов.

Недостатки полевых транзисторов перед биполярными следующие:

1. Биполярные транзисторы имеют существенно больший коэффициент усиления (в десятки раз).
2. Из-за высокого входного сопротивления малые токи создают высокие напряжения, что сильно повышает вероятность пробоя.