

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Биполярный транзистор – прибор, состоящий из трех полупроводниковых областей с чередующимся типом проводимости (n - p - n или p - n - p) с двумя p - n -переходами, пригодный для усиления, генерации и переключения электрических сигналов. Основа принципа его действия состоит в том, что ток прямо смещенного p - n -перехода вызывает изменение тока другого перехода, смещенного в обратном направлении, т.е. это – прибор, управляемый током.

Как правило, одна из крайних областей содержит большую концентрацию примесей ($\sim 10^{18}$ см⁻³); это – эмиттер биполярного транзистора. Средняя область называется базой, вторая крайняя область – коллектором. Таким образом, запись вида n^+ - p - n означает, что в данном транзисторе область n^+ является эмиттером, p -область – базой и n -область – коллектором. От каждой из областей имеются выводы во внешнюю цепь (рис.1).

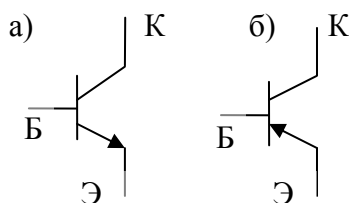


Рис. 1. Схемные изображения биполярных транзисторов: а) структура n - p - n , б) структура p - n - p

Режим работы транзистора зависит от полярности напряжений, подаваемых на переходы:

- режим отсечки (оба перехода смещены в обратном направлении);
- режим насыщения (оба перехода смещены в прямом направлении);
- активный режим (на эмиттерном переходе – прямое напряжение, на коллекторном – обратное);
- инверсный режим, противоположный активному.

Вариант схемы включения биполярного транзистора определяется тем, какой его электрод выбирается в качестве общей точки, относительно которой подаются напряжения на остальные выводы. На рис. 2 показаны три возможные схемы включения транзистора структуры n - p - n в активном режиме.

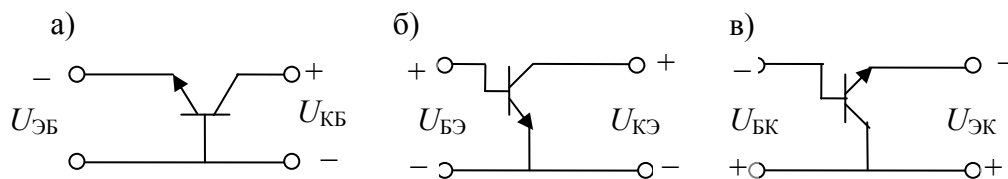


Рис. 2 Схемы включения $n-p-n$ -транзистора в активном режиме: а) с общей базой, б) с общим эмиттером, в) с общим коллектором

В схеме с общей базой полярности напряжений, подаваемых на выводы транзистора относительно общей точки различны, в остальных схемах полярности напряжений одинаковы, что позволяет в двух последних случаях легко применить один источник питания.

Одним из наиболее распространенных вариантов конструкции биполярного транзистора является структура, изготовленная по эпитаксиально-планарной технологии (рис. 3).

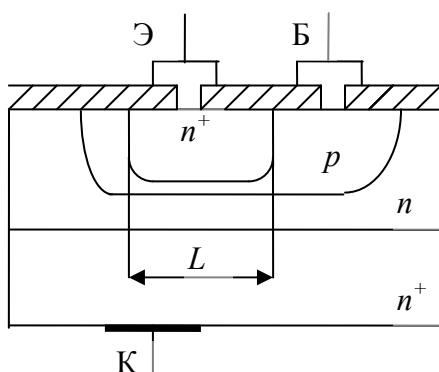


Рис. 3 Устройство биполярного $n-p-n$ транзистора, изготовленного по эпитаксиально-планарной технологии. Обозначения выводов: Э – эмиттер, Б – база, К – коллектор

Видно, что базовая p -область имеет два различных по конфигурации участка. Участок шириной L , в пределах которого расстояние между границами эмиттерного и коллекторного переходов очень мало, называется активной базой. Толщина активной базы должна быть меньше диффузионной длины неосновных носителей, так как только при таком условии подавляющее число инжектированных из эмиттера неосновных носителей достигнет коллекторного перехода, и потери за счет рекомбинации сведутся к минимуму. Подавляющее большинство электронов, инжектируемых эмиттером, проходит на коллектор по кратчайшему пути именно через активную область базы. Здесь возникает наибольший градиент концентрации инжектированных

неосновных носителей и наименьшее время пролета между границами эмиттерного и коллекторного переходов.

Остальная часть базовой области – «пассивная база». Смысл этого термина в том, что эта часть не является непосредственным элементом транзисторной структуры. В нее проникает очень малая доля общего диффузионного потока электронов из эмиттера, и в ее пределах инжектированные электроны практически полностью рекомбинируют и не достигают коллекторного перехода.

С использованием такой технологии изготавливают, как правило, высоковольтные транзисторы, для которых допускаются напряжения на коллекторном переходе более 100 Вольт. Эта возможность обеспечивается формированием двухслойной $n-n^+$ области коллектора. При этом решаются сразу две важные задачи:

- повышение напряжения лавинного пробоя, так как коллекторный переход состоит из полупроводников с относительно невысокой концентрацией примеси,
- уменьшение объемного сопротивления коллекторной области за счет слоя n^+ с высокой концентрацией примеси.

В дальнейшем, если это особо не оговорено, будут рассматриваться физические процессы в биполярных транзисторах со структурой $n-p-n$.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ В БАЗЕ ТРАНЗИСТОРА

Поскольку при работе транзистора на его переходы подаются напряжения, распределения концентрации инжектированных неосновных носителей в базе всегда отличаются от равновесных.

Для простоты рассмотрим характер распределения концентраций для бездрейфового (диффузионного) транзистора, так как в этом случае при наличии избыточных неосновных носителей в базе их концентрация почти линейно изменяется в ее пределах. При этом характер изменений для дрейфового и бездрейфового транзисторов одинаков.

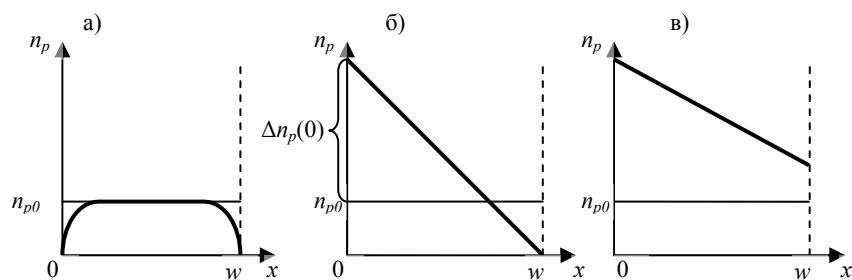


Рис. 4 . Распределение концентраций неосновных носителей в p -базе биполярного транзистора в различных режимах: а) режим отсечки, б) активный режим, в) режим насыщения. Координаты “0” и “ w ” соответствуют границам эмиттерного и коллекторного переходов в области базы

В режиме отсечки (рис. 4 , а) концентрация неосновных носителей совпадает с равновесной только в средней части базовой области. На границе с обратно смещенными переходами эмиттер-база и база-коллектор она стремится к нулю из-за экстракции неосновных носителей в смежные области [].

В активном режиме (рис. 4, б) концентрация неосновных носителей в базе у коллекторного перехода остается равной нулю. На границе с прямо смещенным эмиттерным переходом возникает избыточная концентрация неосновных носителей $\Delta n_p(0)$ за счет инжекции электронов из эмиттера.

В режиме насыщения (рис. 4 , в) возникает двойная инжекция в базу неосновных носителей: из эмиттера и из коллектора, поэтому их избыточные концентрации образуются у обеих границ базы. В зависимости от соотношения уровней инжекции избыточная концентрация неосновных носителей у коллекторного перехода может быть меньше или больше этой же величины у перехода эмиттер-база.

Наличие избыточной концентрации неосновных носителей в базе в активном режиме и в режиме насыщения обуславливает инерционность биполярного транзистора, ограничивающую его частотный диапазон и быстродействие, так как для удаления их из базы требуется конечное время.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ В АКТИВНОМ РЕЖИМЕ

Прямое смещение эмиттерного перехода вызывает инжекцию неосновных носителей в смежные области. Так как концентрация электронов в n^+ -области эмиттера всегда заметно (более, чем на порядок) превышает концентрацию основных носителей базы – дырок, то в первом приближении можно рассматривать только одностороннюю инжекцию электронов из эмиттера в базу. Таким образом, ток эмиттера I_e можно считать током инжекции электронов.

Концентрация электронов в базе у обратно смещенного коллекторного перехода равна нулю (см. рис. 4, б), поэтому в ней возникает градиент концентрации неосновных носителей. Инжектированные электроны движутся в базе к коллекторному переходу за счет диффузии (стрелка 1 на рис. 5); их концентрация постепенно уменьшается за счет рекомбинации.

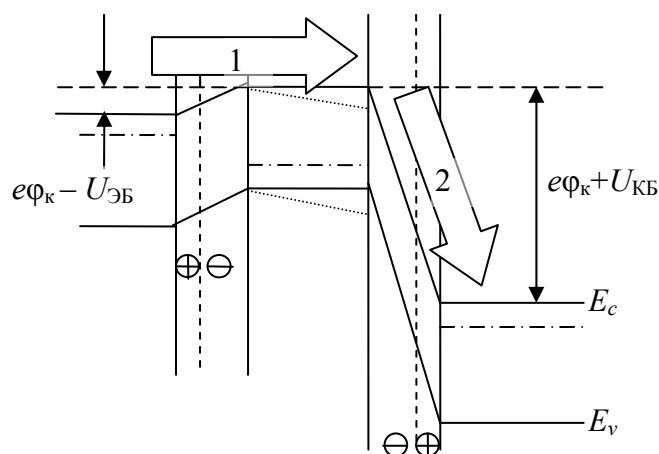


Рис. 5. Энергетическая диаграмма биполярного $n-p-n$ транзистора в активном режиме. Стрелка 1 – инжекция электронов в базу из эмиттера, стрелка 2 – экстракция электронов, пришедших в базе к коллекторному переходу, в коллектор. Пунктирные наклонные линии границ зон в базе соответствуют наличию в ней встроенного электрического поля

Необходимым условием работы биполярного транзистора является создание условий для наименьших потерь инжектированных в базу неосновных носителей на их пути от эмиттера к коллектору. Это достигается за счет малой ширины базы – меньшей, чем диффузионная

длина неосновных носителей, а также тем, что полупроводник базовой области легируется неравномерно для создания встроенного электрического поля, ускоряющего диффундирующие неосновные носители при их движении к коллекторному переходу. В результате потери инжектированных неосновных носителей за счет рекомбинации в базе сводятся к минимуму, и до коллекторного перехода доходит подавляющая их часть.

За счет электрического поля обратного смещенного перехода база-коллектор прошедшие через базу электроны втягиваются в коллекторную область, т.е. происходит их экстракция (стрелка 2 на рис. 5), и возникает ток коллектора. Качество биполярного транзистора тем выше, чем ближе значение тока коллектора к току эмиттера. Малый ток базы возникает из-за потери части инжектированных неосновных носителей на рекомбинацию.

В любой схеме включения ток эмиттера разветвляется в два направления: в коллектор и базу. По законам Кирхгофа сумма токов в ветвях (токов базы и коллектора) должна равняться току, выходящему из «узла», т.е. току эмиттера: $I_{\text{Э}} = I_{\text{К}} + I_{\text{Б}}$. Физическую картину возникновения тока базы можно представить следующим образом:

В момент возникновения инжекции электронов из эмиттера нарушается условие электронейтральности в базе. За время диэлектрической релаксации ($\sim 10^{-12}$ с) электронейтральность восстанавливается за счет оттока электронов в базовый вывод в количестве, равном числу пришедших из эмиттера (ток I_1 на рис. 6). При экстракции неосновных носителей из базы в коллектор вновь возникает нарушение электронейтральности, которое за такой же ничтожно малый промежуток времени компенсируется притоком электронов в базу из внешней цепи (ток I_2 на рис. 6).

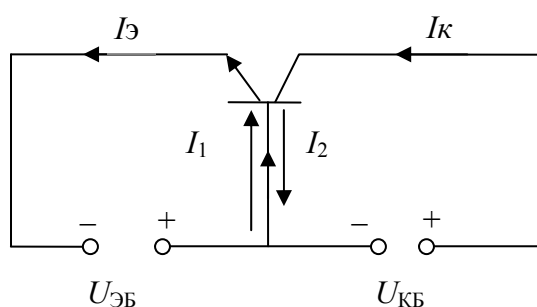


Рис. 6. Токи в биполярном транзисторе в активном режиме

Этот встречный компенсирующий ток оказывается меньше, чем ток I_1 на переходе эмиттер-база, так

как малая часть инжектированных неосновных носителей все же исчезает в базе за счет рекомбинации. В результате в цепи базы течет малый постоянный разностный ток, обусловленный рекомбинацией проходящих через базу неосновных носителей: $I_B = I_1 - I_2$.

МОДУЛЯЦИЯ ШИРИНЫ БАЗЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА (ЭФФЕКТ ЭРЛИ). ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ ПО НАПРЯЖЕНИЮ

В любой схеме включения в активном режиме на переход база-коллектор подается обратное напряжение. При снятии статических вольтамперных характеристик или при работе биполярного транзистора в качестве усилителя, генератора и т.п. величина обратного смещения на коллекторном переходе изменяется со временем. Так как ширина p - n -перехода увеличивается с ростом обратного напряжения и уменьшается при его снижении, в биполярном транзисторе возникает обратная связь, т.е., иначе говоря, входной ток оказывается зависящим от выходного напряжения.

Модуляцией ширины базы биполярного транзистора будем называть изменение расстояния между границами эмиттерного и коллекторного переходов при увеличении или уменьшении напряжения между базой и коллектором. Это явление часто называют «эффект Эрли».

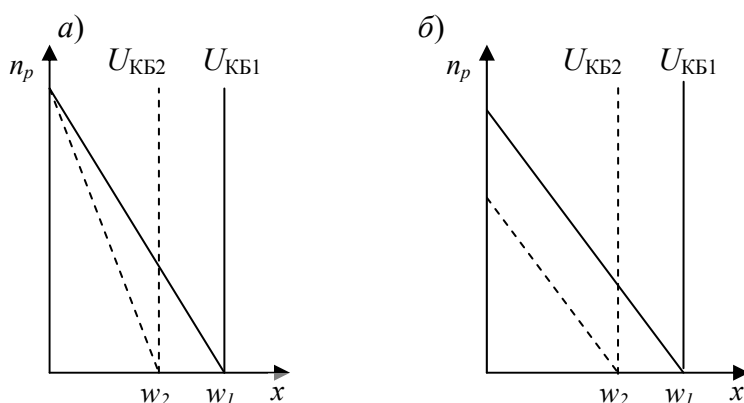


Рис. 7 Изменение распределения концентрации неосновных носителей в базе транзистора при уменьшении ее ширины: а) при возрастании тока эмиттера ($U_{ЭБ} = const$), б) при постоянстве тока эмиттера. $U_{КБ2} > U_{КБ1}$, $w_{1,2}$ – границы коллекторного перехода в области базы

Увеличение ширины коллекторного перехода с ростом обратного напряжения приводит к тому, что его граница сдвигается внутрь базовой области. Расстояние между границами эмиттерного и коллекторного переходов в базе уменьшается, что приводит к увеличению градиента концентрации инжектированных неосновных носителей (рис. 7, а). В результате ток эмиттера – диффузионный ток основных носителей – возрастает при неизменном входном напряжении. Для сохранения градиента концентрации неосновных носителей в базе на прежнем уровне и, соответственно, постоянства входного тока, необходимо уменьшить напряжение между базой и эмиттером (рис.7, б).

Еще одним следствием модуляции ширины базы при увеличении коллекторного напряжения является небольшое возрастание тока коллектора и уменьшение тока базы из-за сокращения потерь инжектированных неосновных носителей на рекомбинацию.

Модуляция ширины базы и связанные с ней изменения токов и напряжений в биполярном транзисторе определяют все особенности статических вольтамперных характеристик при увеличении или уменьшении коллекторного напряжения.

ЭФФЕКТ КИРКА

Рассмотренные явления, строго говоря, имеют место в случае, когда токи эмиттера и коллектора достаточно малы. В этом случае граничный двойной электрический слой коллекторного перехода можно считать состоящим только из ионов доноров и акцепторов. При относительно больших токах через коллекторный переход изменяется распределение зарядов в приконтактных областях. В этом случае необходимо учитывать, что к ионам примесей добавляется заряд проходящих в коллектор подвижных носителей. В транзисторе структуры *n-p-n* отрицательный заряд проходящих в коллектор электронов добавляется к отрицательному заряду ионов акцепторов со стороны базы и вычитается из положительного заряда ионов доноров со стороны коллектора. Таким образом, плотность заряда в переходе со стороны коллектора: $\rho_k = e(N_d - n)$, а со стороны базы $\rho_b = e(N_A + n)$, где n – концентрация электронов, проходящих из базы в коллектор. В

любом двойном электрическом слое, в частности, в области обеднения коллекторного перехода, соблюдается равенство зарядов противоположных знаков, следовательно,

$$e(N_D - n)l_n = e(N_A + n)l_p \quad (A)$$

При увеличении тока и, соответственно, концентрации проходящих электронов, плотность объемного заряда в переходе со стороны n -коллектора уменьшается, а со стороны p -базы – увеличивается. В силу условия (A) ширина перехода со стороны коллектора возрастает, а со стороны базы – сокращается. Весь пространственный заряд перехода сдвигается в сторону коллектора, и расстояние между эмиттерным и коллекторным переходами в базе растет. Это явление – увеличение ширины базы с ростом тока коллектора при больших его значениях – носит название «эффект Кирка».

СХЕМА С ОБЩЕЙ БАЗОЙ. ТОКИ В СХЕМЕ С ОБЩЕЙ БАЗОЙ

В данной схеме включения входным (управляющим) током является ток эмиттера $I_{\text{Э}}$, выходным (управляемым) – ток коллектора $I_{\text{К}}$. Ток базы – это ток общего электрода.

Ток коллектора $I_{\text{К}}$ имеет две составляющие: $\alpha I_{\text{Э}}$ – часть тока эмиттера, и ток обратно смещенного коллекторного перехода $I_{\text{КБ}_0}$:

$$I_{\text{К}} = \alpha I_{\text{Э}} + I_{\text{КБ}_0}, \quad (B)$$

где α – коэффициент передачи тока в схеме с общей базой:

$$\alpha = \frac{I_{\text{К}} - I_{\text{КБ}_0}}{I_{\text{Э}}} \approx \frac{I_{\text{К}}}{I_{\text{Э}}} \quad (B) \text{ – с учетом того, что } I_{\text{КБ}_0} \ll I_{\text{К}}.$$

Видно, что коэффициент $\alpha < 1$, и чем ближе его значение к единице, тем меньше потери инжектированных неосновных носителей в базе на рекомбинацию и, соответственно, тем выше качество транзистора. Из этого также следует, что в данной схеме включения не происходит усиление по току. Усиление по мощности обеспечивается за счет усиления по напряжению, так как напряжение на выходе $U_{\text{КБ}}$ значительно превышает входное напряжение $U_{\text{ЭБ}}$.

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА В СХЕМЕ С ОБЩЕЙ БАЗОЙ

Семейство входных характеристик – это зависимости тока эмиттера от напряжения эмиттер-база при различных значениях напряжения на коллекторе. Очевидно, что характер этих зависимостей подобен прямым ветвям вольтамперных характеристик $p-n$ -перехода, так как эмиттерный переход в активном режиме смещен в прямом направлении.

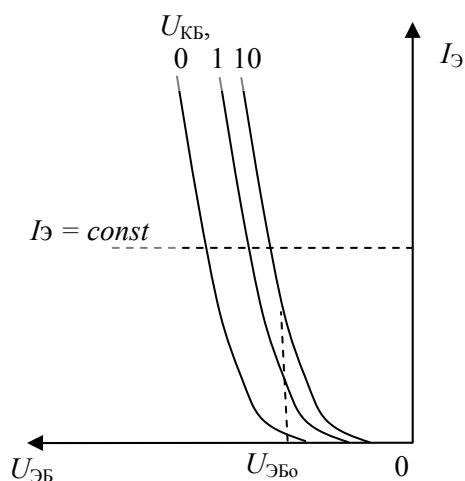


Рис. 8 . Семейство входных статических характеристик биполярного транзистора в схеме с общей базой в активном режиме. Величины U_{KB} соответствуют транзистору малой мощности

Входные характеристики меняют положение при изменении выходного напряжения коллектор-база: входной ток эмиттера в активном режиме при фиксированном значении $U_{ЭБ0}$ растет при увеличении коллекторного напряжения. Это – проявление обратной связи по напряжению: градиент концентрации инжектированных неосновных носителей увеличивается (рис 7, а), следовательно, диффузионный поток электронов от границы эмиттерного перехода вглубь базы (ток эмиттера) также возрастает.

Для сохранения постоянства тока эмиттера при увеличении напряжения U_{KB} требуется уменьшать входное напряжение, тем самым обеспечивая постоянство градиента концентрации неосновных носителей в базе (рис. 7 , б).

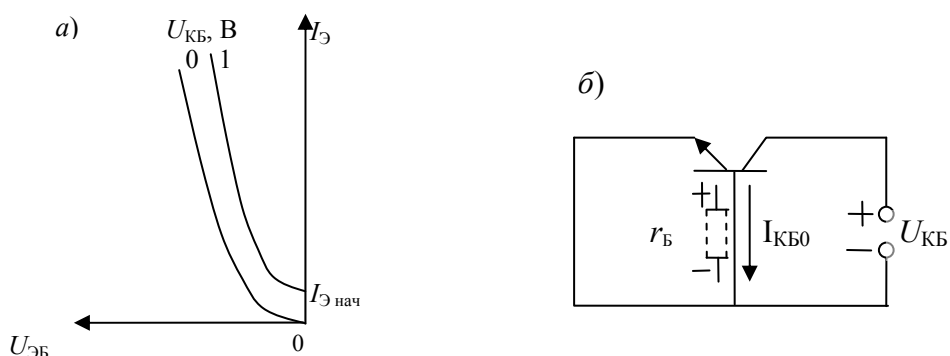


Рис. 9 а) начальный участок входных характеристик в схеме с общей базой; б) схема, поясняющая появление начального тока эмиттера $I_{Э\text{нач}}$

При исследовании начального участка входных характеристик при напряжениях $U_{ЭБ}$ вблизи нуля выясняется, что при $U_{КБ} > 0$ и $U_{ЭБ} = 0$ существует очень малый начальный ток эмиттера (рис. 9..., а):

Причиной существования начального тока эмиттера является то, что базовая область транзистора имеет конечное омическое сопротивление r_B (~ 100 Ом). В отсутствие инжекции на эмиттерном переходе ($U_{ЭБ} = 0$) при протекании обратного тока коллектора через базу на ее сопротивлении r_B возникает падение напряжения (рис. 9, б). Видно, что это напряжение прикладывается к эмиттерному переходу, и смещает его в прямом направлении. Возникающий при этом начальный ток эмиттера $I_{Э\text{ нач}}$ очень мал, так как падение напряжения на r_B составляет не более 0,01 В.

Форма выходных характеристик биполярного транзистора определяется тем, что коллекторный переход в активном режиме включен в обратном направлении: ток коллектора почти не зависит от

напряжения коллектор-база (рис. 10)

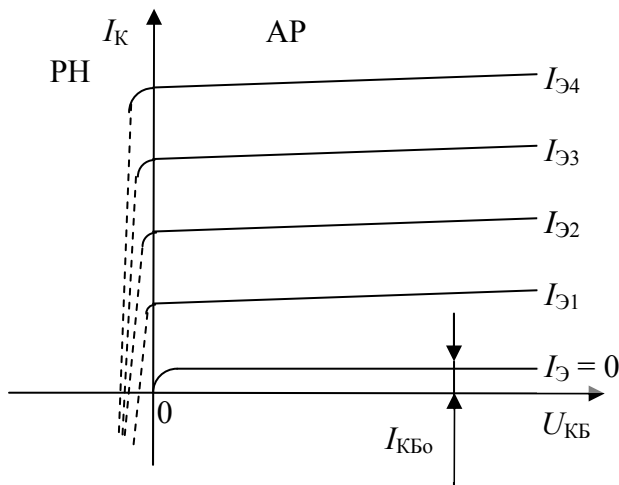


Рис. 10 . Семейство выходных статических характеристик биполярного транзистора в схеме с общей базой. Показаны смещения кривых при увеличении входного тока $I_Э$ в активном режиме (АР) и в режиме насыщения (РН)

При отсутствии входного тока в цепи коллектора протекает очень малый ток $I_{КБ0}$ – ток обратно смещенного коллекторного $p-n$ -перехода (масштаб на рис. 10 для характеристики при $I_Э = 0$ сильно увеличен). С увеличением тока эмиттера выходные характеристики в области активного режима поднимаются вверх: ток коллектора возрастает при повышении уровня инжекции на эмиттерном переходе. Основные особенности выходных характеристик в активном режиме – наличие

тока коллектора при $U_{КБ} = 0$ и малый положительный наклон пологих участков кривых.

Ток коллектора, как известно, обусловлен экстракцией неосновных носителей базы в коллектор за счет электрического поля обратно смещенного коллекторного перехода. При $U_{КБ} = 0$ на переходе остается только контактная разность потенциалов, и величина контактного поля оказывается достаточной для экстракции в коллекторную область всех неосновных носителей, пришедших в базе к переходу база-коллектор.

Слабое возрастание тока коллектора с увеличением $U_{КБ}$ связано с модуляцией ширины базы. Потери инжектированных неосновных носителей в базе на рекомбинацию уменьшаются за счет сокращения расстояния между границами переходов, и ток коллектора становится больше. Это явление объясняет также увеличение коэффициента передачи тока α с ростом коллекторного напряжения.

При смене полярности коллекторного напряжения $p-n$ -переход база-коллектор смещается в прямом направлении, и транзистор оказывается в режиме насыщения. Ток коллектора резко падает, так как возникает ток инжекции из коллектора в базу, направленный встречно к току коллектора в активном режиме. При достижении равенства этих противоположных токов общий ток коллектора оказывается равным нулю (рис10...).

СХЕМА С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ.

ТОКИ В ТРАНЗИСТОРЕ В СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

Управляющим током в таком включении транзистора является ток базы. Для нахождения коэффициента передачи тока используем очевидное соотношение (Б) с учетом того, что ток эмиттера есть сумма токов базы и коллектора:

$$I_K = \alpha I_K + \alpha I_B + I_{КБ_0}$$

Отсюда следует, что
$$I_K = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{1}{1-\alpha} I_{КБ_0},$$

и коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером β выражается формулой:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Так как величина α близка к единице ($\sim 0,99$), то величина $\beta \sim 100$. Следовательно, ток коллектора равен:

$$I_K = \beta I_B + (\beta + 1) I_{КБ_0}$$

Выразив коэффициент α через токи в транзисторе (I_B) получим:

$$\beta = \frac{I_K - I_{КБ_0}}{I_B + I_{КБ_0}} \approx \frac{I_K}{I_B}$$

Видно, что схема с общим эмиттером обеспечивает значительное усиление по току – в отличие от схемы с общей базой. Из соотношения величин входного ($U_{БЭ}$) и выходного ($U_{КЭ}$) напряжений видно также, что усиление по напряжению практически такое же, как в схеме с общей базой. Таким образом, схема с общим эмиттером обеспечивает наибольшее усиление по мощности.

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА В СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

Входные характеристики в этой схеме включения подобны тем же характеристикам в схеме с общей базой, так как ток базы – это часть тока эмиттера. Однако, зависимость их положения от коллекторного напряжения носит противоположный характер (рис. 11). Кроме того, активному режиму работы соответствуют только те характеристики, для которых напряжение $U_{КЭ}$ больше нуля и превышает некоторое критическое значение.

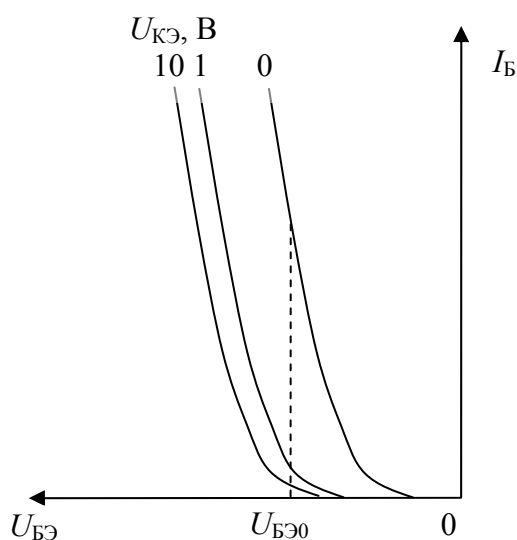


Рис. 11. Семейство входных статических характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером. Кривая при $U_{КЭ} = 0$ соответствует режиму насыщения, остальные – активному режиму

Для нахождения граничного напряжения $U_{КЭ гр}$, при превышении которого транзистор переходит из режима насыщения в активный

режим, рассмотрим два варианта схемы с общим эмиттером: а) с $U_{КЭ} = 0$, б) – с возможностью изменения $U_{КЭ}$ от нуля в положительную сторону (рис. 12).

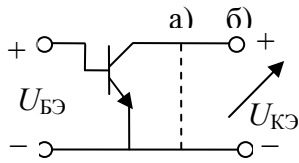
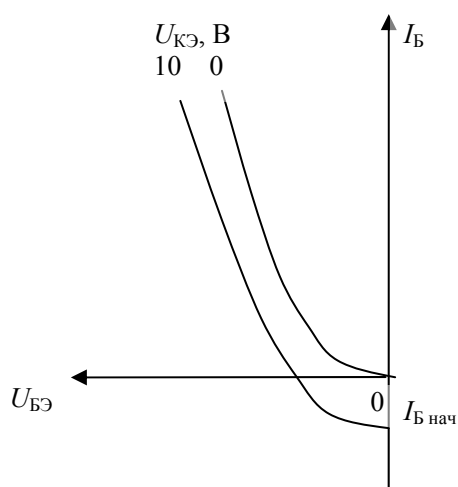


Рис. 12.... Схема с общим эмиттером: а) – выводы коллектора и эмиттера соединены ($U_{КЭ} = 0$, штриховая линия); б) – в цепь коллектора включен источник напряжения с возможностью регулировки величины $U_{КЭ}$

В случае а) потенциалы коллектора и эмиттера одинаковы, и напряжение $U_{БЭ}$, прямое для эмиттерного перехода, оказывается полностью приложенным к переходу база-коллектор и также смещает его в прямом направлении. Таким образом, в случае $U_{КЭ} = 0$ транзистор находится в режиме насыщения. При размыкании выводов коллектора и эмиттера и увеличении напряжения источника питания $U_{КЭ}$ (рис. 12 , б) прямое смещение коллекторного перехода будет уменьшаться, и при $U_{КЭ гр} = U_{БЭ}$ суммарное напряжение на коллекторном переходе окажется равным нулю. Дальнейшее увеличение $U_{КЭ}$ переводит транзистор в активный режим.

Из рис. 11 следует, что ток базы при фиксированном значении $U_{БЭ0}$ уменьшается при увеличении коллекторного напряжения. Основной причиной этого является уменьшение рекомбинационных потерь инжектированных неосновных носителей в базе из-за уменьшения ее ширины. Кроме того, при переходе из режима насыщения ($U_{КЭ} = 0$ В) в активный режим ($U_{КЭ} = 1$ В) ток базы уменьшается гораздо больше, чем при изменении $U_{КЭ}$ от 1 до 10 В, когда транзистор остается в активном режиме. Это связано с тем, что в режиме насыщения в ток базы вносится дополнительный вклад – ток рекомбинации электронов, инжектированных в базу из коллектора. При переходе в активный режим эта составляющая тока базы исчезает, и при дальнейшем увеличении $U_{КЭ}$ ток базы уменьшается только за счет эффекта Эрли.

Так же, как и в схеме с общей базой, при нулевом входном напряжении и наличии напряжения на коллекторе $U_{КЭ}$ существует очень



малый начальный входной ток $I_{Б\text{ нач}}$, но противоположной полярности (рис....13.).

Рис. 13 . Начальный участок входных характеристик в схеме с общим эмиттером

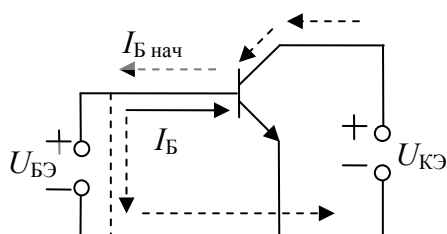


Рис. 14 Схема, поясняющая появление начального обратного тока базы $I_{Б\text{ нач}}$. Штриховые линии соответствуют случаю $U_{БЭ} = 0$

При коротком замыкании цепи база-эмиттер ($U_{БЭ} = 0$, рис.14) в цепи базы протекает ток обратного смещенного коллекторного перехода $I_{Б\text{ нач}} = I_{КБ0}$. Его направление оказывается противоположным тому, которое соответствует рабочим значениям напряжения $U_{БЭ}$. При увеличении $U_{БЭ}$ начинает расти ток базы обычного направления $I_{Б}$, и при некотором значении $U_{БЭ}$ суммарный ток в цепи базы становится равным нулю.

Выходные характеристики в схеме с общим эмиттером (рис. 15...) отличаются от тех же характеристик в схеме с общей базой. Во-первых, при уменьшении $U_{КЭ}$ до нуля ток коллектора также снижается до значений, близких к нулевым. Во-вторых, пологий участок кривых имеет гораздо больший положительный наклон, чем в схеме с общей базой.

В отсутствие инжекции ($I_{Б} = 0$) в цепи коллектора протекает начальный ток $I_{КЭ0} = (\beta+1)I_{КБ0}$, его величина значительно больше, чем в схеме с общей базой. Участок резкого роста тока коллектора при малых напряжениях ($U_{КЭ} < U_{БЭ}$) соответствует режиму насыщения (см. пояснения к рис. 12). Строго говоря, наклон кривых на этом участке не

одинаков: он тем больше, чем больше ток базы. Однако в масштабе, использованном на рис. 15, изменения наклона практически не заметны.

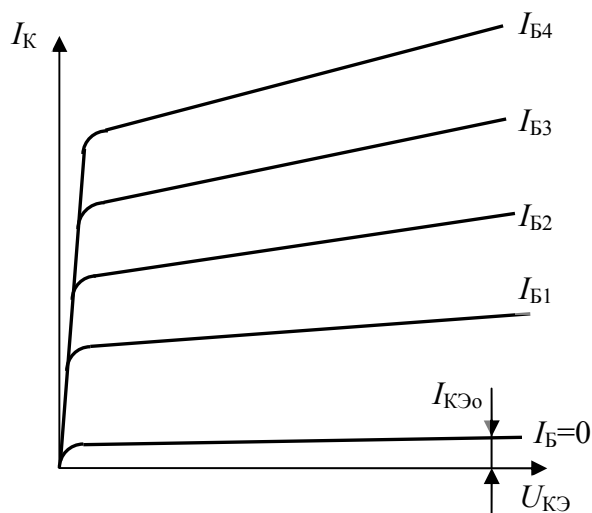


Рис. 15 Семейство выходных статических характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером при различных токах базы:

$$I_{Б1} < I_{Б2} < I_{Б3} < I_{Б4}$$

В условиях, когда коэффициент передачи тока β слабо зависит от тока эмиттера $I_{Э}$, и, следовательно, тока базы, расстояния между участками характеристик в активном режиме при равных приращениях тока базы практически одинаковы. Этот случай соответствует рабочему диапазону токов и напряжений на транзисторе. При увеличении $I_{Э}$ в области малых токов β растет из-за снижения влияния рекомбинационной составляющей тока прямо смещенного перехода эмиттер-база. При приближении тока к предельно-допустимому значению величина β уменьшается, главным образом, из-за увеличения потерь инжектированных в базу неосновных носителей на рекомбинацию за счет эффекта Кирка. Соответственно, расстояния между участками характеристик в активном режиме при равных приращениях малых токов базы увеличиваются, а для больших значений токов базы – уменьшаются.

Большой, чем в схеме с общей базой, наклон выходных характеристик в активном режиме связан с эффектом Эрли, но в данном случае его влияние оказывается гораздо более сильным. Уменьшение

рекомбинационных потерь инжектированных неосновных носителей должно приводить к снижению тока базы, однако при снятии выходных характеристик он поддерживается постоянным. Следствием этого является возрастание тока эмиттера, т.е. уровня инжекции на эмиттерном переходе, и, соответственно, заметное увеличение тока коллектора с ростом коллекторного напряжения. Иначе говоря, каждая выходная характеристика регистрируется при постоянном токе базы и возрастающем токе эмиттера. По этой причине коэффициент передачи тока β заметно возрастает с ростом напряжения коллектор-эмиттер в рабочем интервале (примерно на 20%).

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Транзисторы интегральных схем, а также отдельные транзисторы, используемые в схемах различного назначения, нагреваются из-за токов, протекающих через приборы, а также от внешних источников тепла. Повышение температуры приводит к возрастанию токов, протекающих через транзистор. Главной причиной этого является экспоненциальный рост обратного тока коллекторного перехода, который определяет значение начальных токов коллектора $I_{КБ0}$ и $I_{КЭ0}$ в схемах с общей базой и общим эмиттером.

Пусть температура увеличивается от значения T_1 до значения T_2 , при этом начальный ток коллектора в схеме с общей базой возрастает в k раз: $I_{КБ0}(T_2) = k I_{КБ0}(T_1)$; $k > 1$ – любое число. Будем считать, что коэффициенты передачи тока в первом приближении не зависят от температуры. Тогда для схемы с общей базой:

$I_K(T_1) = \alpha I_{\text{Э}} + I_{КБ0}(T_1)$, $I_K(T_2) = \alpha I_{\text{Э}} + k \cdot I_{КБ0}(T_1)$, и прирост тока коллектора за счет повышения температуры:

$$\Delta I_K(\text{ОБ}) = (k - 1) I_{КБ0}(T_1).$$

Для схемы с общим эмиттером:

$$I_K(T_1) = \beta I_{\text{Б}} + (\beta + 1) I_{КБ0}(T_1), \quad I_K(T_2) = \beta I_{\text{Б}} + (\beta + 1)k \cdot I_{КБ0}(T_1);$$

$$\Delta I_K(\text{ОЭ}) = (k - 1)(\beta + 1) I_{КБ0}(T_1)$$

С учетом того, что $\beta \sim 100$ очевидно, что схема с общим эмиттером обладает плохой термостабильностью в отличие от схемы с общей базой.

На рис. 16 показаны изменения выходных характеристик с температурой. В схеме с общим эмиттером изменения настолько велики, что требуются специальные меры для температурной стабилизации режима работы транзистора при его применении в различных электронных устройствах.

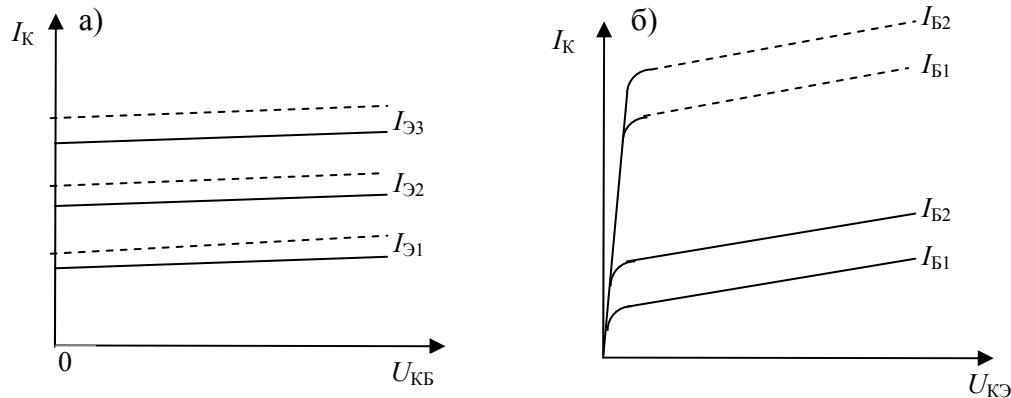


Рис. 16 Влияние температуры на выходные характеристики биполярного транзистора: а) – в схеме с общей базой, б) – в схеме с общим эмиттером. Штриховые линии соответствуют более высокой температуре при тех же значениях входных токов. Изменения температуры в обоих случаях одинаковы.

СТАТИЧЕСКИЕ И МАЛОСИГНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Статические параметры определяют рабочий диапазон транзистора по постоянному току: предельно допустимые значения токов и напряжений в цепях эмиттера, базы и коллектора, предельно допустимая мощность, рассеиваемая в цепи коллектора. Кроме того, к числу этих параметров относят статические коэффициенты передачи токов в схемах с общей базой (α) и общим эмиттером (β).

Параметры малого сигнала (h -параметры). Биполярные транзисторы – это приборы, управляемые током, в которых существует обратная связь по напряжению. По этой причине из различных систем уравнений линейного четырехполюсника выбирают ту, в которой в качестве независимых переменных выступают входной ток I_1 и выходное напряжение U_2 .

Уравнения четырехполюсника в таком случае:

$$U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2; I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2 ,$$

где U, I – комплексные амплитуды переменных напряжений и токов.

Малые приращения (дифференциалы) входного напряжения и выходного тока линейного четырехполюсника в данном случае:

$$dU_1 = h_{11}dI_1 + h_{12}dU_2;$$

$$dI_2 = h_{21}dI_1 + h_{22}dU_2$$

Эти уравнения соответствуют системе h -параметров. В общем случае h -параметры – комплексные величины, но в случае относительно невысоких частот (< 10 МГц), когда емкостные составляющие входного и выходного токов малы, они являются дифференциальными действительными величинами.

При коротком замыкании по переменному сигналу в выходной цепи $dU_2 = 0$, и определяются параметры h_{11} и h_{21} :

$$h_{11} = \frac{dU_1}{dI_1} \text{ – входное дифференциальное сопротивление,}$$

$$h_{21} = \frac{dI_2}{dI_1} \text{ – коэффициент передачи тока.}$$

В режиме холостого хода во входной цепи по переменному сигналу $dI_1 = 0$, и параметры h_{12} и h_{22} находятся следующим образом:

$$h_{12} = \frac{dU_1}{dU_2} \text{ – коэффициент обратной связи по напряжению;}$$

$$h_{22} = \frac{dI_2}{dU_2} \text{ – выходная дифференциальная проводимость, величина,}$$

обратная выходному дифференциальному сопротивлению.

Величины h -параметров зависят от схемы включения транзистора, а также от постоянных составляющих величин входных и выходных токов и напряжений. Значения h -параметров можно приближенно определить как отношения малых приращений напряжений и токов, используя входные и выходные вольтамперные характеристики транзистора.

Различие в величинах h -параметров схемах с общей базой и общим эмиттером показано в таблице 1.

Таблица 1

Параметр	Схема ОБ	Схема ОЭ
h_{11}	Единицы– десятки Ом	Сотни–тысячи Ом

h_{12}	$10^{-3} - 10^{-4}$	$10^{-3} - 10^{-4}$
h_{21}	≤ 1	Десятки-сотни
$r_{22} = 1/h_{22}$	Сотни кОм – единицы МОм	Десятки кОм

БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР КАК УСИЛИТЕЛЬ МАЛЫХ ПЕРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ

Усилительные свойства биполярного транзистора, как известно, зависят от схемы включения. Поскольку наибольшее усиление электрической мощности входного сигнала достигается в схеме с общим эмиттером, рассмотрим этот случай более подробно.

Простейшая схема усилительного каскада показана на рис. 17. Транзистор отделен от предыдущих и последующих элементов конденсаторами большой емкости $C1$ и $C2$ для развязки по постоянному току. Резистор R_B служит для создания постоянного тока базы: $I_B \approx E_K/R_B$, резистор R_K – нагрузочное сопротивление.

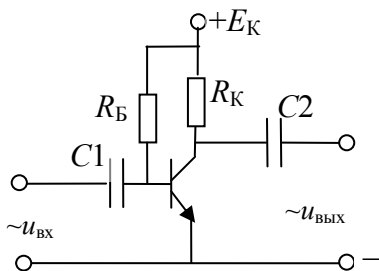


Рис...17... Усилительный каскад с активной нагрузкой на биполярном транзисторе в схеме с общим эмиттером

Усиливаемый синусоидальный сигнал малой амплитуды подается в цепь базы через конденсатор $C1$. Усиленный сигнал через конденсатор $C2$ подается на выход или на следующий каскад. Если входное сопротивление следующего каскада велико по сравнению с R_K , то сопротивление нагрузки данного усилителя $R_{нагр} \approx R_K$.

На рис.18 показаны три статических выходных характеристики и нагрузочная прямая усилительного каскада. Рабочая точка C выбирается на середине пологого участка для обеспечения неискаженного усиления малого сигнала.

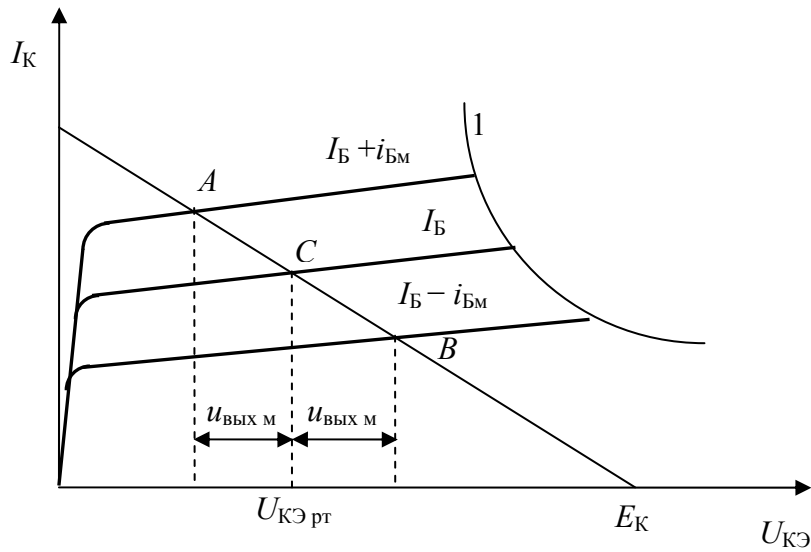


Рис. 18. Выбор рабочей точки усилителя на биполярном транзисторе в схеме с общим эмиттером. Кривая 1 – гипербола максимальной мощности постоянного тока: $I_K = P_{\text{макс}}/U_{КЭ}$

Пусть на вход подается малый гармонический сигнал с частотой, соответствующей рабочему диапазону $u_{\text{вх}} = u_{\text{вх м}} \sin \omega t$; ток базы будет изменяться также по синусоидальному закону $i_B = i_{\text{БМ}} \sin \omega t$, так как малый участок входной характеристики можно приближенно считать линейным. При этом рабочая точка будет перемещаться вдоль нагрузочной прямой в пределах отрезка AB , напряжение $U_{КЭ}$ будет изменяться в пределах $U_{КЭ \text{ рт}} \pm u_{\text{ВЫХ М}}$, и после конденсатора $C2$ на выходе появится усиленный переменный сигнал $u_{\text{ВЫХ}} = u_{\text{ВЫХ М}} \sin \omega t$.

В схеме на рис. 17 обязательно выполняется условие $R_B \gg h_{11Э}$, поэтому $i_{\text{БМ}} = u_{\text{вх м}}/h_{11Э}$. Выходное напряжение: $u_{\text{ВЫХ М}} = i_{\text{КМ}} \cdot R_K$, и так как $i_{\text{КМ}} = h_{21Э} i_{\text{БМ}}$, $u_{\text{ВЫХ М}} = h_{21Э} (u_{\text{вх}}/h_{11Э}) \cdot R_K$, коэффициент усиления переменного сигнала по напряжению равен

$$K_U = \frac{u_{\text{ВЫХ М}}}{u_{\text{вх м}}} = \frac{h_{21Э} \cdot R_K}{h_{11Э}}$$

Увеличение сопротивления нагрузки для повышения коэффициента усиления ограничено тем, что при больших R_K рабочая

точка C (рис 18) из-за уменьшения наклона нагрузочной прямой будет сдвигаться в сторону малых постоянных напряжений $U_{КЭ}$. При этом транзистор может выйти из активного режима и оказаться в режиме насыщения. Для предотвращения такого случая можно одновременно увеличивать напряжение источника питания E_K , но эта возможность также ограничена максимально допустимой мощностью $P_{\text{макс}}$, рассеиваемой в цепи коллектора.

В схеме с общим коллектором управляющим током в таком включении транзистора является ток базы, выходным током – ток эмиттера (рис. 2, в). Тогда:

$$I_{\text{Э}} = I_K + I_B \approx \beta I_B + I_B = (\beta + 1)I_B,$$

т.е. усиление по току в схеме с общим коллектором чуть больше, чем в схеме с общим эмиттером. Напряжение на выходе ($U_{\text{ЭК}}$) практически такое же, как и на входе ($U_{\text{БК}}$), следовательно, в данной схеме отсутствует усиление по напряжению.

Практическая схема усилителя переменного сигнала на биполярном транзисторе с общим коллектором (рис...19), на первый взгляд, отличается от «стандартной», когда входной сигнал подается в цепь база-коллектор. На самом деле никакого противоречия нет. Общая точка схемы по переменному сигналу – действительно цепь коллектора, так как источник питания E_K , зашунтированный конденсатором большой емкости, не оказывает практически никакого сопротивления переменному току. Резистор R_B служит для смещения коллекторного перехода в обратном направлении. Одновременно потенциал p -базы оказывается положительным по отношению к выводу n -эмиттера, и, таким образом, транзистор работает в активном режиме.

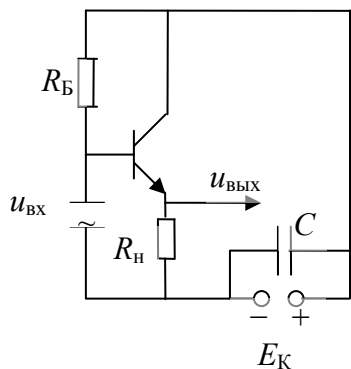


Рис. 19 . Простейший усилитель переменного сигнала на основе схемы с общим коллектором (эмиттерный повторитель)

Особенность такого каскада в том, что он является усилителем тока, а усиление по напряжению не наблюдается. Действительно, если на вход подается напряжение

$u_{\text{вх}} = u_{\text{вх м}} \sin \omega t$ и входной ток изменяется по тому же закону, то

$$K_i = \frac{i_{\text{эм}}}{i_{\text{бм}}} = \frac{i_{\text{км}} + i_{\text{бм}}}{i_{\text{бм}}} = K_{i\text{ОЭ}} + 1,$$

где $K_{i\text{ОЭ}}$ – коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером.

Выходное напряжение $u_{\text{вых}}$ как падение напряжения на нагрузочном резисторе $R_{\text{н}}$ полностью передается на вход в цепь базы, т.е. здесь имеется 100%-ная отрицательная обратная связь. Тогда коэффициент усиления по напряжению:

$$K_u = \frac{u_{\text{вых м}}}{u_{\text{вх м}}} = \frac{u_{\text{вых м}}}{u_{\text{бэм}} + u_{\text{вых м}}} < 1.$$

Выходное напряжение совпадает по фазе с входным, и их значения очень близки; по этой причине этот каскад называется «эмиттерный повторитель».

Из трех схем включения биполярного транзистора схема с общим коллектором обладает наибольшим входным сопротивлением. Входным током является ток базы, напряжение на входе равно сумме напряжения база-эмиттер и выходного напряжения, следовательно

$$R_{\text{вх(ОК)}} = \frac{u_{\text{бэм}} + u_{\text{вых м}}}{i_{\text{бм}}} > R_{\text{вх(ОЭ)}} > R_{\text{вх(ОБ)}}$$

Величина входного сопротивления эмиттерного повторителя составляет десятки килоом. Выходное же сопротивление этого каскада невелико (сотни Ом). Это позволяет использовать эмиттерный повторитель как согласующий элемент между устройствами с высоким выходным и низким входным сопротивлением.

БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР В СХЕМЕ КЛЮЧА

Биполярный транзистор часто находит применение как переключатель импульсных сигналов. В таком режиме ключа транзистор в отсутствие входного импульсного сигнала находится в режиме отсечки; при поступлении сигнала на вход транзистор в течение всей длительности импульса должен оказаться в режиме насыщения. Иначе говоря, до поступления импульса на вход транзистор закрыт, т.е. находится в состоянии, когда ток через него пренебрежимо мал и

падение напряжения на нем почти равно напряжению E_K , а с момента поступления импульса на вход до его окончания транзистор открыт: через него протекает большой ток при очень малом остаточном напряжении на коллекторе. В идеальном случае длительность и форма входного и выходного импульсов должна быть одинаковой.

Реальный транзистор вносит заметные искажения в выходной сигнал, главное из которых – увеличение длительности импульса на выходе по сравнению с входным. Физическая причина этого явления в том, что при переходе из режима насыщения в режим отсечки требуется конечное время для удаления («рассасывания») избыточных неосновных носителей из базы транзистора. При этом распределение концентрации неосновных носителей в базе должно измениться от вида в) на рис ... до распределения вида а) на том же рисунке.

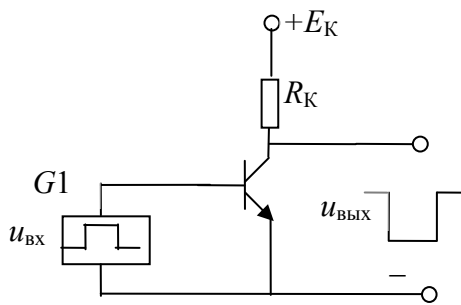


Рис. 20 . Схема ключа на биполярном $n-p-n$ -транзисторе. $G1$ – генератор импульсов положительной полярности

В простейшей схеме ключа на биполярном транзисторе (рис...20) начальное обратное смещение перехода эмиттер-база отсутствует, в цепь базы включен только источник импульсного сигнала. Тем не менее, транзистор находится в режиме отсечки, так как ток базы равен нулю. Амплитуда входного импульса должна быть достаточной для перевода транзистора в режим насыщения. Выходным сигналом $u_{\text{ВЫХ}}$ является изменение падения напряжения на транзисторе $U_{KЭ}$.

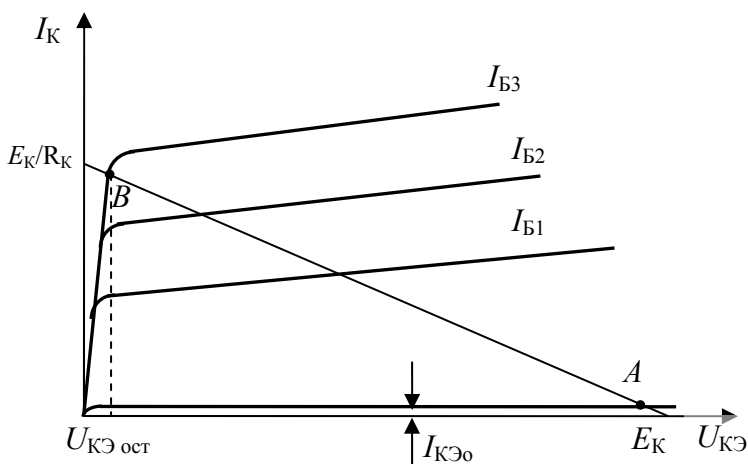


Рис. 21... Нагрузочная прямая и статические выходные характеристики. A – режим отсечки, B – режим насыщения

До поступления входного импульса падение напряжения на транзисторе равно напряжению источника питания E_K , ток через транзистор очень мал и равен величине $I_{KЭ0}$ (рис. 21). Видно, что для перевода транзистора из режима отсечки (А) в режим насыщения (В) амплитуда входного импульса должна быть настолько большой, чтобы падение напряжения на транзисторе в схеме ключа уменьшилось от $\sim E_K$ до величины $U_{KЭ\text{ост}}$ (десятые доли Вольта), соответствующей режиму насыщения. После окончания входного импульса транзистор переходит в закрытое состояние.

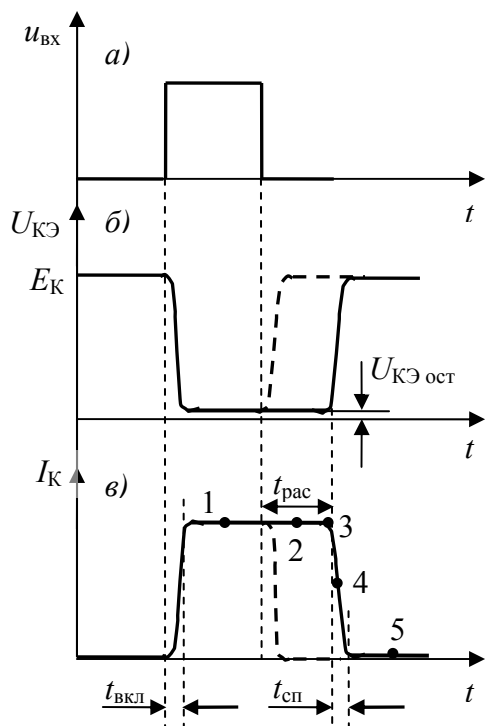


Рис. 22. Временные диаграммы напряжений и токов при работе *n-p-n* транзистора в режиме ключа. а) импульс входного напряжения, б) импульс выходного напряжения, в) импульс тока коллектора. Штриховая линия спада выходного импульса соответствует биполярному транзистору с диодом Шоттки. Номера точек 1-5 соответствуют обозначениям на рис. 23

На временных диаграммах рис. 22 отчетливо проявляется инерционность биполярного транзистора. Во-первых, ток в цепи коллектора появляется не мгновенно, а с небольшой задержкой, что связано с конечным временем пролета инжектированных электронов через область базы. Этому явлению соответствует параметр $t_{зд}$ – время задержки.

Инжектированные из эмиттера неосновные носители имеют разброс скоростей от нулевой до максимальной, поэтому для достижения постоянного значения тока коллектора требуется конечное время. Из-за этого установление амплитуд импульсов I_K и $U_{KЭ}$

происходит не мгновенно, а через промежуток времени нарастания $t_{нр}$. В течение этого времени транзистор находится в активном режиме: рабочая точка на нагрузочной прямой находится между крайними точками А и В (рис...21). Общее время перехода транзистора из режима отсечки в режим насыщения – это время включения (рис. 22, в). Далее, до момента выключения входного импульса ток коллектора в режиме насыщения транзистора остается неизменным; его величина определяется резистором R_K . Распределение концентрации неосновных носителей в базе при этом соответствует кривой 1 на рис...23

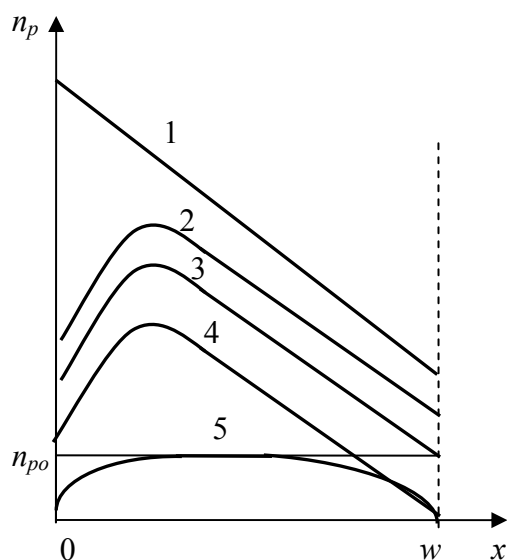


Рис...23. Изменения в распределении концентрации неосновных носителей в базе транзистора в процессе переключения из режима насыщения (1) в режим отсечки (5)

После выключения входного импульса амплитуда выходного сигнала остается неизменной, т.е. несмотря на прекращение инжекции на эмиттерном переходе транзистор остается в режиме насыщения. Это обусловлено тем, что концентрация неосновных носителей у эмиттерного ($x = 0$) и у коллекторного ($x = w$) переходов не может мгновенно измениться до нулевых значений, соответствующих режиму отсечки. Следовательно, для удаления этих носителей из базы требуется конечное время $t_{рас}$ – время рассасывания (см. рис.22, в). До тех пор, пока у коллекторного перехода в базе будут присутствовать избыточные неосновные носители, (кривые 1–3 на рис. 23 и соответствующие точки на рис. 22...), режим насыщения будет сохраняться. Кривая 3 соответствует началу перехода транзистора в активный режим: здесь избыточная концентрация неосновных носителей сравнялась с равновесной. Далее, в течение времени спада $t_{сп}$ активный режим (4)

сменяется режимом отсечки (5), и транзистор закрывается. Таким образом, запаздывание выключения транзистора по отношению к входному сигналу определяется суммой времен рассасывания и спада, т.е. временем выключения: $t_{\text{выкл}} = t_{\text{рас}} + t_{\text{сп}}$.

Отсчет всех временных параметров ключевой схемы проводится следующим образом: выбираются нижняя ($0,1I_{\text{КМ}}$) и верхняя ($0,9I_{\text{КМ}}$) границы тока коллектора. При переходе через эти значения происходит смена параметра. Так, время задержки $t_{\text{зд}}$ – это интервал, в течение которого тока коллектора достигает величины $0,1I_{\text{КМ}}$, время нарастания $t_{\text{нр}}$ соответствует изменению тока коллектора от $0,1I_{\text{КМ}}$ до $0,9I_{\text{КМ}}$, время рассасывания $t_{\text{рас}}$ – уменьшению тока от $I_{\text{КМ}}$ до $0,9I_{\text{КМ}}$, время спада $t_{\text{сп}}$ – уменьшению тока от $0,9I_{\text{КМ}}$ до $0,1I_{\text{КМ}}$.

Очевидно, что главной задачей при использовании биполярного транзистора в ключевой схеме является уменьшение времени включения и времени рассасывания. Для сокращения времени включения используются дрейфовые транзисторы, в которых инжектированные неосновные носители ускоряются в базе встроенным электрическим полем. Уменьшение времени рассасывания можно вызвать увеличением скорости рекомбинации неосновных носителей в базе, вводя дополнительные центры рекомбинации (атомы золота). Маломощные биполярные транзисторы, в которых использованы эти способы увеличения быстродействия, имеют следующие усредненные параметры: $t_{\text{зд}} = 1$ нс, $t_{\text{нр}} = 3$ нс, $t_{\text{рас}} = 40$ нс, $t_{\text{сп}} = 12$ нс.

Еще большее быстродействие имеют кремниевые транзисторы, в которых параллельно коллекторному переходу подключен диод Шоттки (рис. 24). Полярность его подключения такова, что он закрыт при обратном смещении перехода база-коллектор и открывается, когда транзистор оказывается в режиме насыщения. Как известно, прямое напряжение, отпирающее диод Шоттки, составляет $\sim 0,25$ В, что почти в три раза меньше того же напряжения для кремниевых $p-n$ -переходов. Поэтому, как только напряжение на выходе уменьшается до $U_{\text{КЭ ост}}$, сначала открывается диод Шоттки, и практически весь выходной ток течет по цепи, параллельной коллекторному переходу. Затем открывается коллекторный переход, но ток через него очень мал. Концентрация избыточных неосновных носителей в базе у

коллекторного перехода при этом остается близкой к нулю, и после выключения входного импульса распределение концентраций, соответствующее точке 2, оказывается подобным кривой 4 на рис. 23. Это означает, что время рассасывания заметно снижается, так как величина заряда, который нужно удалить из базы, гораздо меньше, чем в отсутствие диода Шоттки.

Вторым, не менее важным фактором, является то, что при прямом смещении диода Шоттки не происходит накопление избыточных носителей, так как его прямой ток – это ток электронов из n -полупроводника в металл. Благодаря этому диод переключается в обратное смещение практически безынерционно, и никакого вклада во время выключения транзистора не вносит. В результате разница длительностей выходного и входного импульсов значительно уменьшается (рис. 22, в). В современных кремниевых транзисторах с диодами Шоттки время рассасывания может составлять менее 10 наносекунд.

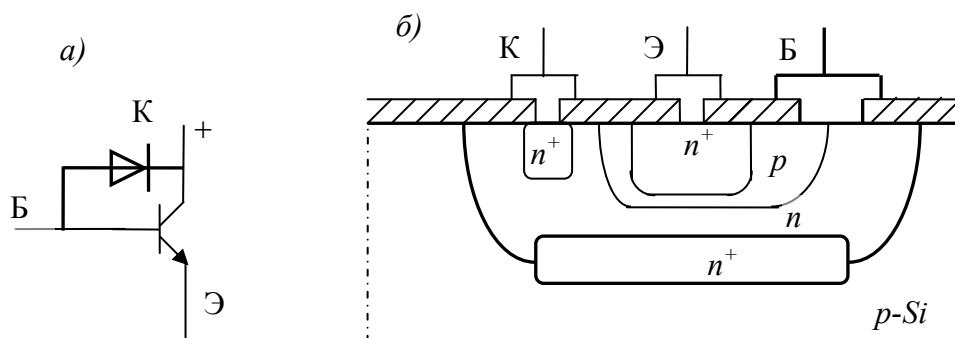


Рис. 24. Биполярный n - p - n -транзистор с диодом Шоттки. а) графический символ, б) один из вариантов его структуры как элемента интегральной схемы

Биполярные транзисторы с диодом Шоттки – важнейшие элементы интегральных цифровых схем. В структуре транзистора, показанной на рис. 24, б, контакты к полупроводниковым областям (К, Э, Б) выполнены из алюминия. Известно, что контакты алюминия с n^+ - и p -областями – омические; а контакт n -областью – выпрямляющий. Вывод базы (Б) такого транзистора одновременно имеет омический контакт с p -областью базы и выпрямляющий контакт с n -областью

коллектора. Таким образом, вывод базы оказывается связанным с коллектором через диод Шоттки (рис. 24 , а).

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ

Возможности использования биполярных транзисторов в силовых ключевых устройствах (коммутация больших токов при напряжениях более 1000 В, управление мощными электроприводами на электрическом транспорте) сильно ограничены теми недостатками, которые свойственны рассмотренной выше схеме ключа. Главным из ограничений является необходимость большого тока базы для переключения транзистора из режима отсечки в режим насыщения, что при высоких значениях коммутируемых токов сопровождается значительным потреблением мощности во входной цепи. Второй ограничивающий фактор – наличие времени рассасывания, из-за которого после снятия тока управления транзистор остается во включенном состоянии.

Более предпочтительным кажется применение для таких целей мощных МОП-транзисторов с индуцированным каналом, которые управляются напряжением, и их входная цепь (затвор-исток) практически не потребляет электрическую мощность (см. гл.). Однако переключаемые токи и напряжения для устройств на их основе не достигают значений, свойственных биполярным транзисторам.

Ясно, что близким к идеальному был бы такой прибор, в котором сочетались бы достоинства обоих типов транзисторов, как биполярного, так и полевого. Эта идея начала воплощаться в жизнь, когда в 1983-85 гг. были запатентованы первые устройства такого вида, выполненные в виде единой интегральной полупроводниковой структуры, содержащей мощный биполярный транзистор, связанный с МОП-транзистором с индуцированным каналом. Такой прибор получил название «*Insulated Gate Bipolar Transistor*» (*IGBT*); в отечественной литературе – «биполярный транзистор с изолированным затвором» (БТИЗ). Такие транзисторы последнего поколения (2000-2010 гг.) нашли самое широкое применение в современной силовой электронике.

БТИЗ сочетает достоинства двух типов транзисторов:

- высокое входное сопротивление, низкий уровень управляющей мощности — от МДП-транзисторов с изолированным затвором и индуцированным каналом;
- гораздо более высокая выходная мощность (большие токи и напряжения) – от биполярных транзисторов.

На рис. 25 , а показан один из вариантов структуры БТИЗ. Это устройство сформировано на основе мощного МДП-транзистора с изолированным затвором (см. раздел), в котором n^+ -слой, прилегающий к выводу стока, заменен высоколегированным p^+ -слоем.

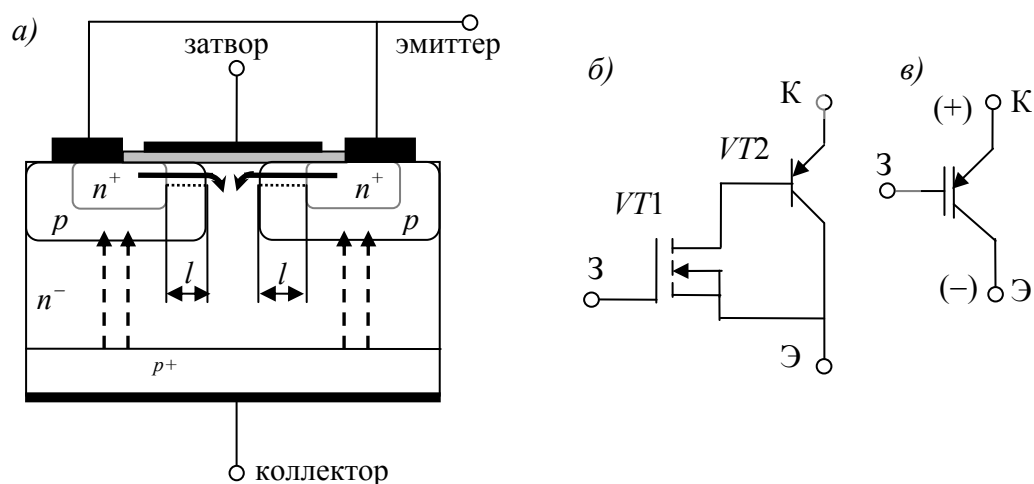


Рис. 25 . а) Структура биполярного транзистора с изолированным затвором. Нижняя граница индуцированного n -канала обозначена пунктиром; б) эквивалентная схема БТИЗ; в) условное графическое изображение БТИЗ. Сплошные стрелки показывают направление движения электронов, штриховые – движение дырок

В результате такой замены появилась структура, представляющая собой вертикальный биполярный $p-n-p^+$ транзистор. Базой служит низколегированный n^- -слой. В отличие обычных биполярных транзисторов, в структуре БТИЗ наиболее сильно легированный p^+ -слой является не эмиттером, а коллектором, т.е. выходной точкой ключевой схемы.

Эквивалентная схема (рис25, б) показывает, что БТИЗ можно рассматривать как составной транзистор. Каскадное включение транзисторов двух типов позволяет сочетать их достоинства в одном приборе: выходные характеристики биполярного (большое допустимое рабочее напряжение, большие сквозные токи) и входные

характеристики полевого (минимальные затраты на управление). Управляющий элемент – это МДП-транзистор $VT1$, который обеспечивает появление тока базы биполярного транзистора $VT2$ при очень малых затратах электрической мощности во входной цепи. На графическом изображении (рис...25, в) этот факт отражен тем, что вывод затвора омически не связан со структурой биполярного транзистора.

Принцип действия ключевой схемы на основе БТИЗ состоит в следующем. В отсутствие сигнала на входе $p-n-p^+$ -транзистор закрыт, так как в случае, когда на базу не подается никакое напряжение («оборванная база») и существует напряжение эмиттер-коллектор, один из переходов всегда смещается в обратном направлении.

При подаче на затвор положительного импульсного или постоянного напряжения, превышающего пороговое для МДП-транзистора, в p -областях появляется индуцированный n -канал длиной l (см. рис. 25, а). Полярность напряжения исток-сток такова, что электроны перемещаются по каналу в базу (n^-), понижая ее потенциал и вызывая инжекцию дырок из p^+ -области. Получающийся таким образом ток базы настолько велик, что $p-n-p^+$ транзистор полностью открывается. В этом состоянии через него протекает большой сквозной ток при малом остаточном напряжении между эмиттером и коллектором.

Величина остаточного напряжения в мощных БТИЗ – менее 1,5 В. С учетом того, что диапазон использования таких приборов — от десятков ампер до 2-3 тысяч ампер по току и от сотен вольт до 10 кВ по напряжению, относительные потери мощности при переключении очень малы.

Основной недостаток БТИЗ «унаследовал» от биполярного транзистора. Это – конечное время рассасывания избыточных неосновных носителей из базы. Выключение сигнала на выходе запаздывает относительно момента выключения входного импульса. В современных БТИЗ это время невелико – не более нескольких десятков наносекунд, и для преодоления этого недостатка применяются различные схемные решения. Мощные МДП-транзисторы, работающие

на основных носителях, обладают гораздо меньшей инерционностью, связанную в основном с емкостной реакцией на перепады напряжения.

Таким образом, для переключения больших токов и напряжений на относительно низких частотах предпочтительно использовать биполярные транзисторы с изолированным затвором. Для средних и малых значений токов и напряжений (десятки ампер, 500 В) и при высоких частотах переключения целесообразно применять мощные МДП-транзисторы.