БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра систем телекоммуникаций

**РЕФЕРАТ**

**На тему:**

**«Нелинейные и линейные модели биполярного транзистора»**

МИНСК, 2008

В зависимости от сочетания напряжений на p-n-переходах биполярный транзистор (БПТ) может работать в нормальном (активном), инверсном режимах, режимах насыщения и запирания (отсечки). Различают три схемы его включения: с общим эмиттером (ОЭ); общей базой (ОБ); общим коллектором (ОК).

Наиболее распространенной нелинейной моделью БПТ является модель Эберса – Молла в схеме ОБ , приведенная на рис. 1, а для Т типа p-n-p. Она отличается сравнительной простотой и не учитывает эффект Эрли, пробой переходов, зависимость коэффициента α передачи от тока, объемные сопротивления слоев эмиттера, коллектора, базы и ряд других факторов. В модели переходы представлены диодами, их взаимодействие – генераторами токов I1 и I2, где I1 (I2 ) – ток эмиттерного (коллекторного) Д, () – интегральный коэффициент передачи эмиттерного (коллекторного) тока. В общем случае (независимо от режима) ток IЭ (IК ) эмиттера (коллектора) состоит из двух компонент: инжектируемого I1 (I2 ) и собираемого I2 (I1). Поэтому



а б

Рис. 1. Нелинейные модели БПТ в схеме с ОБ

, , (1)



где по аналогии с (1.1)

, ; (2)



() – тепловой ток эмиттерного (коллекторного) Д при напряжении



UК =0 (UЭ =0).

Последующей подстановкой (2) в (1) получаем известные формулы Эберса – Молла:

,



, (3)



.



Описываемые (3) зависимости IЭ =f1 (UЭ , UК ) и IК =f2 (UЭ , UК ) представляют собой статические ВАХ БПТ. Они, несмотря на идеализацию, хорошо отражают особенности прибора при любых сочетаниях напряжений на переходах. В случае кремниевых Т расчеты дают бόльшую погрешность, так как у них, по сравнению с германиевыми, обратный ток существенно отличается от теплового.

Известно, что тепловой ток коллектора IК0 (эмиттера IЭ0) соответствует режиму обрыва цепи эмиттера (коллектора) и большого запирающего напряжения |UК |>>mϕT (|UЭ |>>mϕT ) на коллекторе (эмиттере). Полагая с учетом этого в (1) и (2) IЭ = 0, IК =IК0 , I2 =– (IК =0, IЭ =IЭ0 , I1 =–), устанавливаем необходимую связь между тепловыми токами:



(4)



В БПТ выполняется условие . Используя его, из выражений (3) можно получить



,



. (5)



Семейства (5) коллекторных характеристик IК =φ1(UК ) с параметром IЭ и эмиттерных характеристик UЭ =φ2 (IЭ ) с параметром UК более удобны для практики, поскольку проще задать ток IЭ , а не напряжение UЭ . В активном режиме UК <0 и |UК |>>mϕT , поэтому зависимости (1.13) переходят в следующие:

, (6)



. (7)



Реальные коллекторные характеристики БПТ, в отличие от (7), неэквидистантны: расстояние между кривыми уменьшается при больших токах IЭ вследствие уменьшения коэффициента (далее просто ). Они имеют конечный, хотя и очень небольшой, наклон, который существенно увеличивается в области, близкой к пробою. Наклон кривых обусловлен неучтенным сопротивлением коллекторного перехода (вследствие модуляции толщины базы – эффекта Эрли). При нагреве Т характеристики смещаются в область бόльших токов IК из-за роста тока IК0 . Реальные эмиттерные характеристики с повышением температуры смещаются влево в область меньших напряжений UЭ . При высоких уровнях инжекции они деформируются: возникает омический участок ВАХ.



Усредняя нелинейное сопротивление rК коллекторного перехода и добавляя слагаемое в (7), приходим к выражению, описывающему семейство реальных коллекторных характеристик БПТ в схеме с ОБ:

(8)



Этому уравнению соответствует нелинейная модель на рис. 2, б, в которую введено объемное сопротивление rБ базы. Модель удобна для расчета усилительных каскадов в режиме большого сигнала. При необходимости в нее дополнительно вводят сопротивления слоев rЭЭ (эмиттера) и rКК (коллектора). Последние, однако, в большинстве случаев несущественны.

Коллекторные характеристики IК =ψ1 (UК ) БПТ в схеме с ОЭ имеют следующие отличия от аналогичных в схеме с ОБ: полностью расположены в первом квадранте, поскольку |UКЭ | =|UКБ | +UЭ ; менее регулярны, имеют значительно больший и неодинаковый наклон, заметно сгущаются при значительных токах; ток IК при обрыве базы (IБ = 0) намного больше тока IК =IК0 при обрыве эмиттера (IЭ =0); входной ток IБ может иметь не только положительную, но и небольшую отрицательную величину; имеют меньшее напряжение Uβ пробоя. Входные характеристики IБ =ψ2 (UБ ), по сравнению с аналогичными в схеме с ОБ, имеют другой масштаб токов; сдвинуты вниз на величину тока IК0 , который протекает в базе при IЭ =0; несколько более линейны; с увеличением напряжения |UКЭ |сдвигаются вправо, в сторону бόльших напряжений UБ .

Подстановкой IЭ =IК +IБ из выражения (8) вытекает аналитическая зависимость для семейства коллекторных характеристик IК =ψ1(UК) БПТ в активном режиме в схеме с ОЭ:

, (9)



где – интегральный коэффициент передачи тока IБ базы;



;



.



Минимальное значение IК =IК0 соответствует IБ = -IК0 . Поэтому в диапазоне IБ = 0…-IК0 БПТ в схеме с ОЭ управляется отрицательным входным током.

Уравнению (9) отвечает нелинейная модель БПТ в схеме с ОЭ (рис. 2). Она, как и предыдущая модель, не отражает сдвига входных характеристик вследствие эффекта Эрли, что несущественно в режиме большого сигнала.

Малосигнальная Т-образная модель БПТ в схеме с ОБ (рис.3, а) вытекает из нелинейной модели (см. рис.1, б). В ней исключен генератор постоянного тока IК0 ; введено дифференциальное сопротивление rК коллекторного пере-

хода; эмиттерный Д заменен дифференциальным сопротивлением rЭ; обратная связь по напряжению отражена генератором μЭКUК ; коэффициент является комплексной величиной; введены емкости СЭ и СК переходов.



Рис. 2. Нелинейная модель БПТ в схеме с ОЭ

В общем случае дифференциальный коэффициент передачи эмиттерного тока отличается от интегрального и с учетом (4) имеет вид



. (10)



Но эти отличия в большинстве случаев невелики, и на практике часто полагают .



Дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода в активном режиме описывается выражением

, (11)



из которого следует: при UЭ =0 (IЭ =0) ().



Дифференциальное сопротивление



(А – постоянный коэффициент, зависящий от свойств Т) обусловлено эффектом модуляции толщины базы, который тем сильнее, чем меньше |UК | и больше удельное сопротивление базы. В случае маломощных БПТ значения rК лежат в пределах от сотен до тысяч килоом.

Коэффициент внутренней обратной связи по напряжению



(B>0 – постоянный коэффициент, зависящий от свойств Т) характеризует влияние напряжения UК на напряжение UЭ из-за модуляции толщины базы и имеет отрицательный знак, так как увеличение |UК | уменьшает эмиттерное напряжение. Обычно параметр |μЭК| имеет малые значения порядка 10–6…10–4, что означает слабое смещение входныххарактеристик при изменении коллекторного напряжения. Иногда отрицательную обратную связь в БПТ отражают в модели не генератором μЭКUК, а диффузионным сопротивлением rБд базы, включенным последовательно с ее объемным сопротивлением rБ . При этом

.



В общем случае каждая из емкостей СК , СЭ переходов состоит из диффузионной (СКд , СЭд) и барьерной (СКб , СЭб) составляющих. Учитывая, что в активном режиме эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном, с допустимой погрешностью можно положить: СЭ =СЭд ; СК =СКб . Емкости СЭд и СКб определяются так же, как в Д. Коллекторная емкость СК , шунтируя большое сопротивление rК , существенно влияет на работу Т, начиная с десятков килогерц. Наоборот, емкость СЭ обычно учитывают на частотах, превышающих десятки мегагерц.

Частотно-временные характеристики коэффициента α передачи, в основном определяемые динамическими свойствами коэффициента χ переноса, задают комплексным коэффициентом передачи тока в схеме с ОБ:



, (12)



где – граничная частота коэффициента передачи тока в схеме с ОБ;



tD – среднее время пролета носителей (см. подраз. 1.2).

Малосигнальная Т-образная модель БПТ в схеме с ОЭ (рис.3, б) вытекает из соответствующей нелинейной модели (см. рис.2). В нее, в отличие от схемы с ОБ, входит дифференциальный коэффициент



а



б

Рис. 3. Малосигнальные Т-образные модели БПТ

передачи базового тока, который с учетом (11) равен

.(1.21)



Его динамические характеристики задают присутствующим в модели комплексным коэффициентом , вытекающим из соотношений:



, (13)



где – граничная частота коэффициента передачи тока в схеме с ОЭ.



В области высоких частот () , где – предельная частота коэффициента усиления тока, соответствующая значению . При этом в справочниках чаще приводят значения параметра , а не , что связано с бόльшим удобством измерения. Иногда дают значения параметра – максимальной частоты генерации (наибольшая частота, на которой способен работать Т в схеме автогенератора при оптимальной обратной связи). Приближенно , где – постоянная цепи обратной связи, характеризующая частотные и усилительные свойства Т, его устойчивость к самовозбуждению. Параметры () и в формуле выражены соответственно в мегагерцах и пикосекундах.



В схеме с ОБ при заданном токе IЭ приращение выходного напряжения падает полностью на коллекторном переходе (сопротивлением rБ пренебрегаем). В схеме с ОЭ при заданном токе IБ приращение напряжения UК распределяется между обоими переходами. В результате изменение тока IК сопровождается равным изменением тока IЭ (рис.3, а, б). Учитывая это и полагая дополнительно СК = 0, с помощью (12) приходим к операторному уравнению для приращений, откуда при имеем



, (14)



что на низких частотах соответствует . Аналогично определим коллекторную емкость в схеме с ОЭ. Для этого с целью упрощения положим rК = ∞. Теперь для переходных процессов роль сопротивления rК играет емкостное сопротивление (в операторной форме). Составляя далее уравнение для приращений, находим



, (15)



что на низких частотах соответствует .



Таким образом, входящие в модель БПТ в схеме с ОЭ параметры и являются комплексными (операторными), что необходимо учитывать при анализе быстрых процессов. При этом, как следует из (14) и (15), в схемах с ОЭ и ОБ постоянная времени коллекторного перехода имеет одинаковое значение .



Исключительное значение для стабильности схем на БПТ имеет температурная зависимость IК0 (T), приводящая к смещению выходных и входных характеристик Т. Поведение функции IК0 (T) применительно к Д: она имеет экспоненциальный характер; температура удвоения составляет примерно 8 (5) оС для Ge (Si); у кремниевых транзисторов до температуры порядка 100 оС основную роль играет не тепловой ток, а ток термогенерации, который достаточно мал, что позволяет во многих случаях с ним не считаться. Аналогична Д и температурная зависимость UЭ (T) напряжения на эмит-терном переходе. При этом для кремниевых и германиевых Т значение температурного коэффициента ε составляет примерно минус 2 мВ/град.

Помимо Т-образных на практике широко используются малосигнальные П-образные модели БПТ в схеме с ОЭ: основная и гибридная (схема Джиаколетто) (рис.4, а, б). В обеих моделях используются проводимости (комплексные или активные g), а усилительным параметром является комплексная крутизна . Наиболее распространена и специфична для БПТ гибридная П-образная схема (см. рис. 4, б), в которой выделено сопротивление rБ базы. Установим связь ее параметров с параметрами малосигнальной Т-образной модели (см. рис. 3, б).



а б

Рис. 4. Малосигнальные П-образные модели БПТ

Для выражения одних параметров через другие исключим сопротивление rБ, одинаковое в обеих схемах, и составим 4 уравнения: приравняем друг к другу входные (базовые) и выходные (коллекторные) токи обеих схем при заданном входном напряжении и коротком замыкании на выходе, а затем базовые напряжения и коллекторные токи при заданном выходном напряжении и холостом ходе на входе (аналогично системе h-параметров). Тогда при дополнительном условии и получим:



, ,



,



, (16)



где смысл параметров α, β, rЭ , rК , , ωα , ωβ , tD и τК пояснен выше.



Из полученных выражений вытекает: структура проводимости соответствует параллельному соединению сопротивления 2rК и емкости , поэтому и ; структура проводимости отвечает параллельному соединению сопротивления и емкости , равной диффузионной емкости эмиттерного перехода. Кроме того, в гибридной П-образной модели, в отличие от Т-образной, частотная зависимость “сосредоточена” во входной цепи (), а крутизна зависит от частоты сравнительно слабо ().



Параметры основной П-образной модели нетрудно получить, учитывая сопротивление rБ на входе. Но параметры этой модели зависят от частоты, что неудобно. Поэтому основная П-образная схема применяется редко: при анализе цепей с практически постоянной рабочей частотой.

В Т- и П-образных малосигнальных моделях внутренняя базовая точка Б’ недоступна для подключения измерительных приборов. Поэтому в справочной литературе часто приводят параметры Т, измеренные со стороны внешних разъемов. При этом Т рассматривается в виде четырехполюсника с произвольной структурой, который в общем случае можно описать любой из шести систем уравнений, связывающих входные и выходные токи и напряжения. На практике больше применяются системы Z-, Y- и h-параметров (рис.5):

, , ,



, , . (17)



а) б) в)

Рис. 5 Малосигнальные модели транзисторов в системах Z- , Y- и h-параметров

Системы параметров равносильны, но в транзисторной технике по ряду причин используется смешанная h-система, где h11 (h21) – входное сопротивление (коэффициент прямой передачи тока) при коротком замыкании на выходе, а h12 (h22) – коэффициент обратной передачи напряжения (выходная проводимость) при холостом ходе на входе.

Задавая в Т-образной модели БПТ в схеме с ОБ ток IЭ и полагая напряжение UК = 0, затем задавая напряжение UК и принимая ток IЭ = 0, устанавливаем взаимосвязь ее параметров на низких частотах с системой h-параметров:

, ,



, ,



, ,



, ,



. (18)



Аналогично устанавливается связь h-параметров с параметрами Т-образной модели БПТ в схеме с ОЭ:

, ,



, .(1.28)



Малосигнальная модель БПТ в системе h-параметров во многом подобна Т-образной и совпадает с ней для идеального одномерного Т (при rБ = 0).

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Бытовая радиоэлектронная техника: Энциклопедический справочник/ Под ред. А.П. Ткаченко. – Мн.: Бел. Энциклопедия, 2005. – 832 с.
2. Хохлов Б. Н. Декодирующие устройства цветных телевизоров. – 3-е изд., перераб и доп. – М.: Радио и связь, 2008. – 512 с.
3. Ткаченко А.П., Хоминич А.Л. Повышение качества изображения и звукового сопровождения. Ч. 1: Тракты промежуточной частоты изображения и звукового сопровождения телевизионных приемников: Учебное пособие для студентов специальностей “Телекоммуникационные системы” “Радиотехника” и “Радиотехнические системы”: В 2-х ч.– Мн.: БГУИР, 2001.– 55 с.