

Методы идентификации параметров моделей интегральных транзисторов

Часть 2. Идентификация параметров модели, описывающих вольтамперные характеристики биполярных транзисторов

Олег Дворников, Юрий Шульгевич (г. Минск, Беларусь)

Рассмотрены особенности идентификации параметров модели биполярных транзисторов (БТ) из электрических измерений, предложена целесообразная последовательность измерений, приведены методы идентификация параметров и результаты их экспериментального апробирования.

ОСОБЕННОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ БТ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Необходимость адекватного описания характеристик интегральных элементов, особенно имеющих малые размеры, обуславливает усложнение математических моделей. Так, модель Гуммеля–Пуна для автоматизированного моделирования БТ содержит 59 параметров. Идентифицировать все эти параметры из однократных измерений невозможно.

Традиционный подход к идентификации заключается в том, что транзистор включается по схеме и в режимах работы, при которых преобладающее влияние на его характеристики оказывает минимальное число параметров модели. Сравнивая характеристики, полученные с помощью упрощённой модели и эксперимента для одной и той же схемы включения транзистора, определяют сочетание нескольких доминирующих в данном случае параметров модели, которые в дальнейшем целесообразно подстроить при выполнении оптимизации для удовлетворения выбранному критерию качества [1, 13].

Большие проблемы возникают при определении параметров, описывающих сопротивление полупроводниковых областей транзисторов. Это

связано с противоречивостью требований к условиям измерений, обеспечивающих преобладающее влияние малого числа параметров модели, и зависимостью сопротивления полупроводниковых областей от режима работы.

Так, применение импульсных или высокочастотных методов измерений позволяет избежать саморазогрева интегральных элементов, однако при этом точность определения параметров в большой степени ограничена влиянием паразитных емкостей.

Чаще всего расчёт сопротивлений областей БТ осуществляется на основе измерений вольтамперных характеристик (ВАХ), таких как $V_{CE} = f(I_B)$ при $I_C = 0$ и $I_C = f(V_{BE})$ при $V_{CB} = 0$. По отклонению кривых $I_C = f(V_{BE})$, $I_B = f(V_{BE})$ от экспоненциальной зависимости определяют сопротивление эмиттера R_E и базы R_B , но пренебрегают при этом эффектом модуляции сопротивления базы и поэтому не идентифицируют параметры RBM, IBM. Если сопротивление эмиттера рассчитывают по наклону кривой $V_{CE} = f(I_B)$ при $I_C = 0$, то полученное значение в области малых токов эмиттера существенно выше, чем при больших токах, хотя при использовании полупроводниковых областей с высокой концентрацией примеси сопротивление эмиттера не должно зависеть от тока [14, 15].

Известен метод идентификации сопротивления базовой области на основе зависимости

$$\frac{\Phi_T}{I_C} \ln \frac{I_{B0}}{I_B} \text{ от } 1/\beta,$$

где I_{B0} – базовый ток при нулевом последовательном сопротивлении базы [14]. Недостатками этого метода являются: низкая точность при малом сопротивлении, а также в тех случаях, когда β сохраняет постоянное значение в широком диапазоне токов [15]; отсутствие учёта эффекта оттеснения тока к краю эмиттера, что ограничивает область применения метода транзисторами с узким эмиттером или малым удельным сопротивлением активной базы [16].

Вследствие существования ряда методов идентификации сопротивлений БТ и отсутствия среди них предпочтительного, в статье будут рассмотрены и экспериментально сравнены только наиболее распространённые из них.

В некоторых случаях параметры моделей определяются по характеристикам касательной, проведённой к какой-либо кривой ВАХ:

$$y = ax + b, \quad (51)$$

где y – функция, описывающая касательную; x – аргумент функции; $a = dy/dx$ – тангенс угла наклона; b – точка пересечения касательной с осью Y . Если известны две точки касательной (y_1, x_1) и (y_2, x_2) , то её характеристики определяются из соотношений:

$$a = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}, \quad (52)$$

$$b = y_1 - x_1 \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}, \quad (53)$$

$$x(y=0) = \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{y_1 - y_2} \approx [|y_1 - y_2| \ll |y_1|] \approx -y_1 \frac{x_1 - x_2}{y_1 - y_2}, \quad (54)$$

где $x(y=0)$ – координата точки пересечения прямой $y = ax + b$ с осью X .

При выполнении измерений на полупроводниковой пластине следует учитывать, что на точность идентификации параметров оказывает влияние сопротивление между зондом и контактной площадкой на кристалле, а также ток, протекающий между донной частью пластины и «заземлённым» металлическим столиком, на котором она расположена. В связи с вышеизложенным рекомендуется:

- изолировать полупроводниковую пластину от металлического столика;
- определить на пластине области, контактирующие с подложкой, установить на них зонды, проверить наличие контакта к подложке, например, с помощью регистрации диодной ВАХ между контактом к подложке и коллектором $n-p-n$ транзистора. Для уменьшения сопротивления подложки при измерениях целесообразно использовать контакт к подложке, расположенный максимально близко к исследуемой структуре либо объединять между собой несколько контактов к подложке. Обычно с подложкой p -типа соединены контактные площадки самого отрицательного напряжения питания микросхемы и технологического резистора, предназначенного для измерения сопротивления областей скрытого слоя $p+$ и/или изоляции $p+$;
- экспериментальным путём установить максимально возможное давление зонда на контактную площадку кристалла, при котором обеспечивается минимальное сопротивление контакта, но не повреждается сама контактная площадка. Для этого следует расположить два зонда на контактных площадках, закороченных между собой на пластине, и, оказывая разное давление зонда на площадку, достичь минимального сопротивления между зондами, а также визуально контролировать наличие механических повреждений контактной площадки. При отсутствии на кристалле закороченных контактных площадок целесообразно использовать тестовую структуру, пред-

назначенную для определения удельного сопротивления межсоединений и представляющую собой тонкоплёночный резистор с известным (обычно равным 100) числом квадратов [17].

Для идентификации параметров модели Гуммеля-Пуна рекомендуется измерение основных характеристик БТ в последовательности и режимах, приведённых в таблице 3. Направления токов и полярности напряжений соответствуют $n-p-n$ транзистору. В зависимости от наличия электроизмерительной ап-

паратуры и опыта выполнения измерений, при идентификации параметров модели некоторые из основных характеристик таблицы могут быть заменены на дополнительные.

Апробирование методов идентификации, приведённое в статье, было осуществлено для $n-p-n$ транзисторов базового матричного кристалла типа АБМК_1_3 [18]. Измерения выполнялись с помощью аналитической зондовой установки ЭМ-6040 и измерителя полупроводниковых приборов ИППП-1 [19, 20], а результаты обраба-

Таблица 3. Последовательность измерений БТ для идентификации параметров модели

Наименование характеристики	Режим измерения	Измеряемые величины	Определяемые параметры
Основные			
1. Входная характеристика в схеме с ОБ для прямого включения ¹⁾	$V_{CB} = 1 \text{ В}, V_{BE}$ от 0,4 до 1 В	I_E	$V_{E^*}^{(2)}$
2. Входная характеристика в схеме с ОБ для инверсного включения	$V_{EB} = 1 \text{ В}, V_{BC}$ от 0,4 до 1 В	I_C	$V_C^{*(2)}$
3. Характеристика Эрли для прямого включения	$V_{BE} = I_V^* I, V_{CB}$ от 0 до V_{CBMAX}	I_C, I_B	V_{CBMAX}, VAF
4. Характеристика Эрли для инверсного включения	$V_{BC} = I_V^* I, V_{EB}$ от 0 до V_{EBMAX}	I_E, I_B	V_{EBMAX}, VAR
5. Характеристика Гуммеля для прямого включения	$V_{CB} = 0, V_{BE}$ от 0,4 до 1,2 В	I_C, I_B	$NF, BF, ISE, NE, I_{BMAX}, \beta_{MAX}^{(3)}$
	$V_{CB} = RC\beta_{MAX}^R/V_{MAX}$ или $V_{CB} = 1 \text{ В}, V_{BE}$ от 0,4 до 1,2 В	I_C, I_B	IKF
6. Характеристика Гуммеля для инверсного включения	$V_{BE} = 0, V_{BC}$ от 0,4 до 1,2 В	I_E, I_B	$NR, BR, ISC, NC, I_{BMAX}^R, \beta_{MAX}^R^{(3)}$
	$V_{EB} = RE\beta_{MAX}^R/V_{MAX}^R$ или $V_{EB} = 1 \text{ В}, V_{BC}$ от 0,4 до 1,2 В	I_E, I_B	IKR
7. Выходная характеристика БТ с ОЭ и разомкнутым коллектором	$I_C = 1 \text{ мкА}, I_B$ от 0,1 мА до β_{MAX}^R/V_{MAX}	V_{CE}	RE
8. Выходная характеристика БТ с ОЭ в насыщении	I_C от 0,1 мА до $\beta_{MAX}^R/V_{MAX}, FB = I_C/I_B, FB = 5$ для $n-p-n, p-n-p, FB = 2$ для $L-p-n-p$	V_{CE}	RC
9. Диодная характеристика эмиттерного перехода	I_B от 0,1 мА до β_{MAX}^R/V_{MAX} при $I_C = 0$ и $V_{CB} = 0$	V_{BE}	RB, RBM, IRB
10. Зависимость ёмкости база–эмиттер от напряжения	V_{BE} от $-V_{EBMAX}$ до 0,4 В при $I_C = 0$	C_{BE}	CJE, VJE, MJE, FC
11. Зависимость ёмкости прямо смещённого перехода база–эмиттер от напряжения	V_{BE} от 0,4 В до 1,2 В при $V_{CB} = 0; 1 \text{ В}$	C_{BE}	TF, ITF, VTF, XTF
12. Зависимость ёмкости база–эмиттер от напряжения	V_{BC} от $-V_{CBMAX}$ до 0,4 В при $I_E = 0$	C_{BC}	CJC, VJC, MJC
13. Зависимость ёмкости прямо смещённого перехода база–коллектор от напряжения	V_{BC} от 0,4 В до 1,2 В при $V_{EB} = 0; 1 \text{ В}$	C_{BC}	TR
14. Зависимость ёмкости коллектор–подложка от напряжения	V_{SUB} от $-V_{SUBMAX}$ до 0,4 В	C_{SC}	CJS, VJS, MJS
Дополнительные			
15. Зависимость β от тока и напряжения для прямого включения	I_E от 1 мкА до $\beta_{MAX}^R/V_{MAX}, V_{CB} = 0; 1 \text{ В}; 3 \text{ В}$	I_C, I_B	BF, IKF, ISE, VAF
16. Зависимость β от тока и напряжения для инверсного включения	I_C от 1 мкА до β_{MAX}^R/V_{MAX}^R и $V_{EB} = 0; 1 \text{ В}$	I_E, I_B	BR, IKR, ISC, VAR
17. Выходная характеристика БТ с ОЭ для прямого включения	$I_B = 0,1/I_{BMAX}^R; 0,25/I_{BMAX}^R; 0,5/I_{BMAX}^R; I_{BMAX}^R; V_{CE}$ от 0 до $V_{CBMAX}^{(4)}$	I_C	$RC, RE, BF, IKF, ISE, VAF$
18. Выходная характеристика БТ с ОЭ для инверсного включения	$I_B = 0,1/I_{BMAX}^R; 0,25/I_{BMAX}^R; 0,5/I_{BMAX}^R; I_{BMAX}^R; V_{CE}$ от 0 до V_{EBMAX}	I_E	BR, IKR, ISC, VAR
19. Характеристика Гуммеля для прямого включения при максимальном коллекторном напряжении	$V_{CB} \approx V_{CBMAX}, V_{BE}$ от 0,4 до 1,2 В	I_C, I_B	RE
20. Зависимость $ \beta $ от тока и напряжения на высокой частоте для прямого включения	I_E от 1 мкА до $\beta_{MAX}^R/V_{MAX}, V_{CB} = 0; 1 \text{ В}; 3 \text{ В}, f = 100 \text{ МГц}$ или 300 МГц	$ \beta $	TF, ITF, VTF, XTF
21. Зависимость $ \beta $ от тока и напряжения на высокой частоте для инверсного включения	I_C от 1 мкА до $\beta_{MAX}^R/V_{MAX}^R, V_{EB} = 0; 1 \text{ В}, f = 100 \text{ МГц}$ или 300 МГц	$ \beta $	TR

¹⁾ ОБ (ОЭ) – общая база (общий эмиттер).

²⁾ $V_{E^*} (V_C^*)$ – напряжение на прямо смещённом эмиттерном (коллекторном) переходе БТ, при котором эмиттерный (коллекторный) ток соответствует номинальному рабочему режиму.

³⁾ I_{BMAX} – базовый ток, соответствующий условию $\beta = 0,5\beta_{MAX}$, где β_{MAX} – максимальное значение статического коэффициента передачи в схеме с ОЭ для нормального включения. I_{BMAX}^R – то же для инверсного включения.

⁴⁾ По указанию потребителей, допустимо измерение ВАХ и идентификация параметров для специальных режимов работы, например, микрорежима.

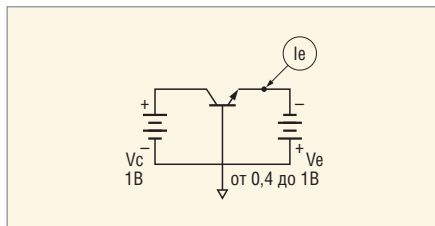


Рис. 4. Схема включения БТ с ОБ

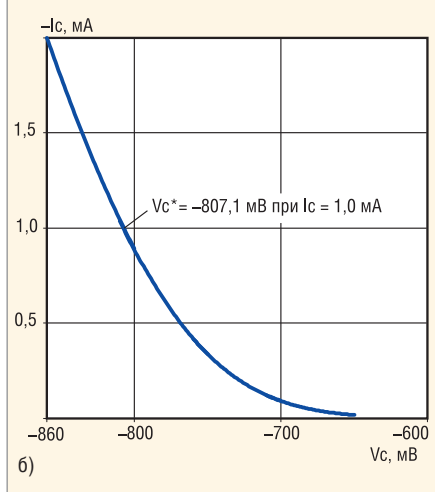
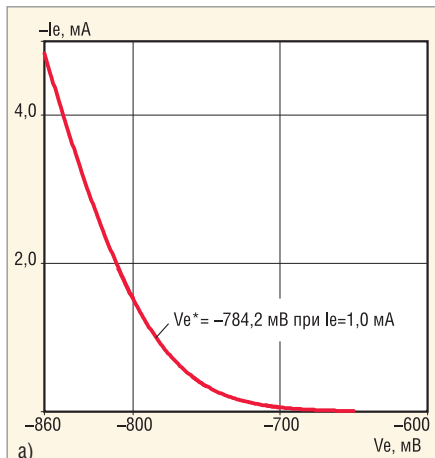


Рис. 5. Входная характеристика БТ с ОБ

а) При прямом включении, б) при инверсном включении

тывались графическим постпроцессором *PSpice simulator and Probe waveform viewer* системы *OrCad* [21].

ИЗМЕРЕНИЕ ВХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ В СХЕМЕ С ОБЩЕЙ БАЗОЙ (пп. 1, 2 таблицы 3)

Целью данных измерений является регистрация напряжений V_E^* , V_C^* , определяющих номинальный рабочий режим БТ, для чего необходимо:

- включить БТ по схеме с ОБ (см. рис. 4);
- измерить входную характеристику $I_E = f(V_{BE})$ при $V_{CB} = 1$ В (см. рис. 5а);
- определить напряжение на прямо смещённом р–п-переходе $|V_E^*|$, при котором эмиттерный ток соответству-

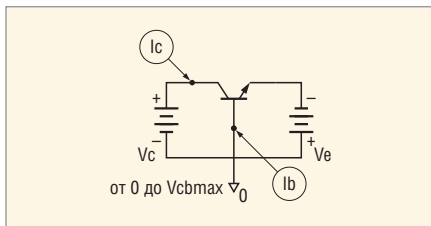


Рис. 6. Схема включения БТ для измерения характеристик Эрли

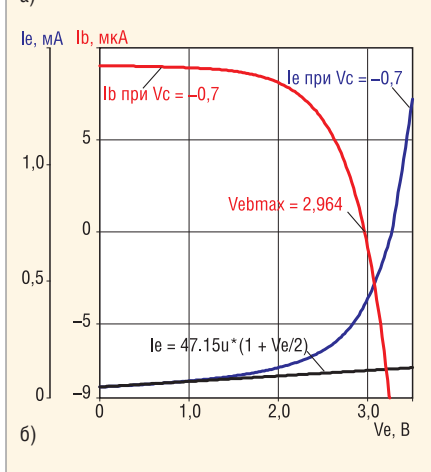
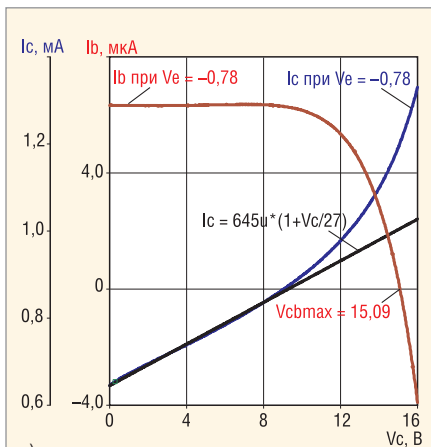


Рис. 7. Характеристики Эрли

а) При прямом включении БТ, б) при инверсном включении БТ

ет номинальному рабочему режиму. Так, для маломощных n–p–n-транзисторов обычно определяют $|V_E^*|$ при эмиттерном токе, находящемся в диапазоне от 100 мкА до 1 мА; для микромощных – от 1,0 до 10,0 мкА, для мощных – от 100 мА до 1 А;

- поменяв местами эмиттер и коллектор транзистора на рисунке 4, аналогичным образом определить $|V_C^*|$ (см. рис. 5б).

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭРЛИ (пп. 3, 4 таблицы 3)

Для определения максимальных напряжений V_{CBMAX} , V_{EBMAX} и напряжений Эрли V_{AF} , V_{AR} рекомендуется выполнить измерения по следующей методике:

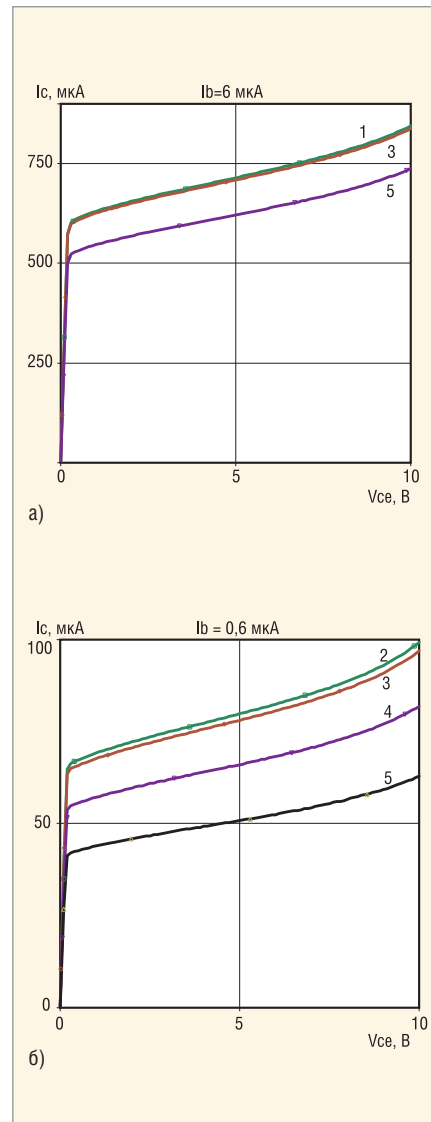


Рис. 8. Выходные характеристики БТ в схеме с ОБ

Графики 1, 2 соответствуют ВАХ до пробоя, 3 – после измерения V_{CBMAX} ; 4 – после пробоя эмиттерного перехода при токе пробоя 10 мкА; 5 – после пробоя эмиттерного перехода при токе пробоя 100 мкА. Базовый ток составляет: (а) 6 мкА, (б) 0,6 мкА

- включить БТ по схеме, показанной на рисунке 6, при напряжении на эмиттерном переходе, равном $|V_E^*|$;
- измерить зависимость коллекторного I_C и базового I_B тока от коллекторного напряжения V_C , возрастающего до тех пор, пока базовый ток не изменит своего направления;
- определить значение коллекторного напряжения V_{CBMAX} , вызывающего изменение направления базового тока (см. рис. 7а);
- поменяв местами эмиттер и коллектор транзистора на рисунке 6, аналогичным образом определить V_{EBMAX} (см. рис. 7б) при напряжении на прямо смещённом коллекторном переходе, равном $|V_C^*|$.

Для вертикальных транзисторов обычно выполняется условие $|V_{CBMAX}| \gg |V_{EBMAX}|$. В связи с тем, что величина V_{EBMAX} может быть очень мала (для интегральных транзисторов менее 0,5 В), для идентификации параметров моделей при обратном смещении р–п-перехода допускается использовать диапазон значений V_{BE} от 0,4 В (небольшое положительное смещение) до $-V_{EBMAX}$.

Определение величины максимально допустимых напряжений V_{CBMAX} , V_{EBMAX} по рассмотренной методике предпочтительно по сравнению с измерениями пробивных напряжений р–п-переходов и промежутка коллектор–эмиттер. Известно, что при пробое эмиттерного перехода происходит изменение свойств области раздела окисел–полупроводник и вследствие этого уменьшение коэффициента передачи тока β , увеличение обратных токов и шума. Экспериментальные исследования позволили установить, что даже кратковременный пробой эмиттерного перехода с ограниченным током вызывает существенное изменение ВАХ (см. рис. 8а), особенно при работе БТ в микрорежиме (см. рис. 8б). В

то же время выполнение измерений V_{CBMAX} , V_{EBMAX} по приведённой методике практически не влияет на характеристики БТ.

Из модели Гуммеля–Пуна для режимов работы БТ, приведённых в п. 3 таблицы 3 и температуры $T = 27^\circ\text{C}$, получим выражения:

$$\exp \frac{V_{BE}}{NF\phi_T} = \exp \frac{0,78 \text{ В}}{0,025 \text{ В}} \gg 1$$

при $NF \approx 1,0$ (см. табл. 2), (55)

$$\exp \frac{V_{BE}}{NF\phi_T} = \exp \frac{0,78 \text{ В}}{1,5 \cdot 0,025 \text{ В}} \gg 1$$

при $NE \approx 1,5$ (см. табл. 2), (56)

$$I_{BE1} = IS \exp \frac{V_{BE}}{NF\phi_T}, \quad (57)$$

$$I_{BE2} = ISE \exp \frac{V_{BE}}{NF\phi_T}, \quad (58)$$

$$I_{BE1} > I_{BE2} \gg I_{BC1}, I_{BC2}, \quad (59)$$

$$I_C = \left(1 - \frac{V_{BC}}{VAF} - \frac{V_{BE}}{VAR} \right) I_{BE1} =$$

$$= \left(1 + \frac{V_{CB}}{VAF} - \frac{V_{BE}}{VAR} \right) IS \exp \frac{V_{BE}}{NF\phi_T}, \quad (60)$$

$$g_{OUTV} = \frac{dI_C}{dV_{CB}} =$$

$$= \frac{I_C}{\left(1 + \frac{V_{CB}}{VAF} - \frac{V_{BE}}{VAR} \right) VAF} \approx \frac{I_C}{VAF}$$

при $V_{BE} = \text{const.}$ (61)

В (60) учтено, что для прямого включения п–р–п-транзистора $V_{BE} > 0$, $V_{CB} > 0$, $V_{BC} = -V_{CB}$.

Применение приближённого равенства в соотношении (61) допустимо при условии

$$V_{CB}/VAF - V_{BE}/VAR \ll 1. \quad (62)$$

Для обеспечения выполнения (62) целесообразно малосигнальную выходную проводимость БТ g_{OUTV} определять при напряжении на коллекторном переходе, равном $V_{CB} \approx V_{BE} VAF/VAR$. К сожалению, во многих случаях, вследствие $VAF \gg VAR$, коллекторное напряжение $V_{CB} \approx V_{BE} VAF/VAR$ соответствует предпробойной области ВАХ и измерения в ней некорректны. В связи с этим рекомендуется:

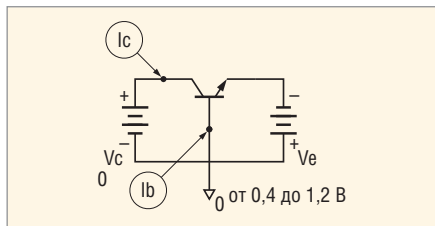


Рис. 9. Схема включения БТ для измерения характеристики Гуммеля

- определить параметр VAR с использованием выражения:

$$VAR \approx \frac{I_C}{\left(1 - \frac{|V_{E^*}|}{VAR}\right) g_{OUTB}}, \quad (63)$$

вблизи $V_{CB} = 0$ по кривой $I_C = f(V_{CB})$ рисунка 7а;

- используя возможности графического постпроцессора, построить кривую, описываемую соотношением

$$I_C = \frac{I_C(V_{CB} = 0)}{\left(1 - \frac{|V_{E^*}|}{VAR}\right)} \left(1 + \frac{V_{CB}}{VAR} - \frac{|V_{E^*}|}{VAR}\right); \quad (64)$$

- изменяя параметр VAR , обеспечить наилучшее совпадение рассчитанной по (64) кривой с результатами измерений;

- если величина параметра VAR неизвестна, то допустимо применять приближённые соотношения, полученные при $VAR = \infty$, а именно:

$$VAR \approx \frac{I_C}{g_{OUTB}},$$

$$I_C = I_C(V_{CB} = 0) \left(1 + \frac{V_{CB}}{VAR}\right). \quad (65)$$

Так, на рисунке 7а показана рассчитанная зависимость $I_C = f(V_{CB})$, которая в соответствии с правилами используемого постпроцессора системы OrCAD имеет вид $I_C = 645u^*(1+V_C/27)$;

- аналогичным образом определить параметр VAR для инверсного включения БТ.

Рассчитанные и измеренные кривые на рисунке 7 совпадают при $VAR = 27$ В, $VAR = 2$ В.

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГУММЕЛЯ ПРИ $V_{CB} = 0$ (п. 5.1 ТАБЛИЦЫ 3)

Для указанных в п. 5.1 таблицы 3 режимов работы БТ справедливы

условия и выражения (55)–(58), а также:

$$|V_{BC1}| = |-IS| \ll |V_{BE1}| \quad (66)$$

$$I_{BC2} = -ISC. \quad (67)$$

Окончательно

$$I_B \approx \frac{IS}{BF} \exp \frac{V_{BE}}{NF\phi_T} + IS \exp \frac{V_{BE}}{NF\phi_T} - ISC, \quad (68)$$

$$I_C \approx \left(1 - \frac{V_{BE}}{VAR}\right) IS \exp \frac{V_{BE}}{NF\phi_T} - ISC. \quad (69)$$

Исходя из соотношений (68), (69), сформулируем порядок идентификации параметров модели:

- определить температуру БТ и рассчитать величину температурного потенциала $\phi = kT/q$;
- включить БТ по схеме, показанной на рисунке 9;
- измерить зависимость коллекторного I_C и базового I_B тока от прямого падения напряжения на эмиттерном переходе V_{BE} (см. рис. 10а). Применяемые электроизмерительные приборы должны обеспечить регистрацию трёх областей разного наклона на кривой $I_C = f(V_{BE})$, построенной в линейном масштабе для V_{BE} и логарифмическом – для I_C ;
- поменяв местами эмиттер и коллектор транзистора на рисунке 9, измерить зависимость эмиттерного I_E и базового I_B тока от прямого падения напряжения на коллекторном переходе V_{BC} (см. рис. 10б);
- определить область напряжения V_{BE} , в которой зависимости $I_B = f(V_{BE})$ и $I_C = f(V_{BE})$ имеют приблизительно одинаковый наклон (см. рис. 11). Для этой области справедливо:

$$I_B \approx \frac{IS}{BF} \exp \frac{V_{BE}}{NF\phi_T}, \quad (70)$$

$$I_C \approx \left(1 - \frac{V_{BE}}{VAR}\right) IS \exp \frac{V_{BE}}{NF\phi_T}, \quad (71)$$

$$\ln I_C \approx \frac{V_{BE}}{NF\phi_T} + \ln \left[\left(1 - \frac{V_{BE}}{VAR}\right) IS \right]. \quad (72)$$

- рассчитать параметр BF как:

$$BF \approx \frac{I_C}{I_B \left(1 - \frac{V_{BE}}{VAR}\right)}. \quad (73)$$

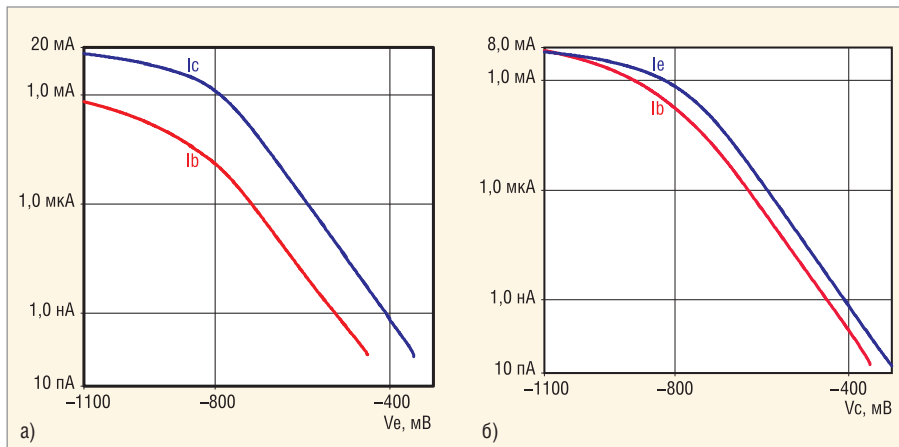


Рис. 10. Характеристики Гуммеля
а) для прямого включения БТ, б) для инверсного включения БТ

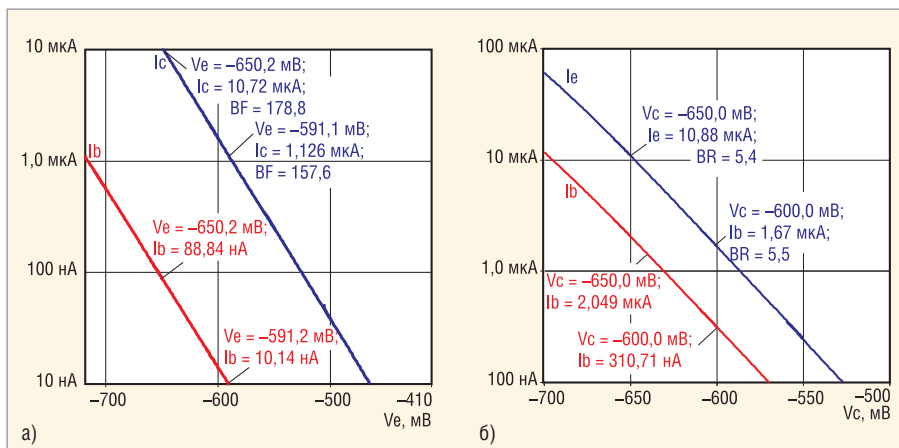


Рис. 11. Область характеристик Гуммеля с одинаковым наклоном кривых
а) для прямого включения БТ, б) для инверсного включения БТ

Если полученные значения отличаются для различных точек кривых $I_B = f(V_{BE})$ и $I_C = f(V_{BE})$, то в качестве параметра BF принимается максимальная величина;

- определить максимальное значение β_{MAX} статического коэффициента передачи в схеме с ОЭ для нормального включения ($\beta = I_C/I_B$). Обычно β_{MAX} и BF соответствуют одному и тому же напряжению V_{BE} и поэтому справедливо соотношение:

$$\beta_{MAX} \approx BF \left(1 - \frac{V_{BE}}{VAR} \right); \quad (74)$$

- по зависимостям в области больших токов определить I_{BMAX} – базовый ток, при котором $\beta = 0,5\beta_{MAX}$;
- по тангенсу угла наклона кривой $\ln I_C = f(V_{BE})$ (см. рис. 12а) и известной величине ϕ_T определить параметр NF , другими словами, рассчитать NF с помощью соотношения:

$$NF \approx \frac{V_{BE1} - V_{BE2}}{\phi_T (\ln I_{C1} - \ln I_{C2})}, \quad (75)$$

где $(\ln I_{C1}, V_{BE1}), (\ln I_{C2}, V_{BE2})$ – координаты точек на кривой $\ln I_C = f(V_{BE})$;

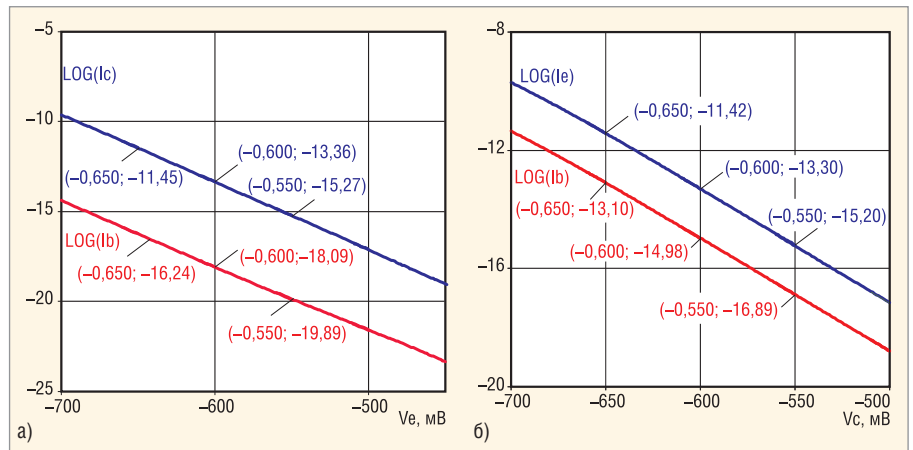


Рис. 12. Зависимости $\ln I_C, \ln I_B$ от напряжения на эмиттере V_E при $V_B = 0$ в области с одинаковым наклоном графиков

а) Для прямого включения БТ, б) для инверсного включения БТ

- по точке пересечения касательной к кривой $\ln I_C = f(V_{BE})$ с осью V_{BE} определить величину $\ln[IS(1 - V_{BE}/VAR)]$ и параметр IS или использовать соотношение:

$$IS \approx \frac{\exp \left(\ln I_{C1} - \frac{\ln I_{C1} - \ln I_{C2}}{V_{BE1} - V_{BE2}} V_{BE1} \right)}{1 - \frac{V_{BE1}}{VAR}} \quad (76)$$

при $|V_{BE1} - V_{BE2}| \ll |V_{BE1}|$;

- определить область малого значения $|V_{BE}|$, в которой зависимости $\ln I_B = f(V_{BE})$ и $\ln I_C = f(V_{BE})$ имеют значительно отличающийся наклон. Для нее выполняется:

$$I_{BE2} \gg \frac{I_{BE1}}{BF}, \ln I_B \approx \frac{V_{BE}}{NF\phi_T} + \ln ISE \quad (77)$$

Рассчитать NE, ISE с применением соотношений:

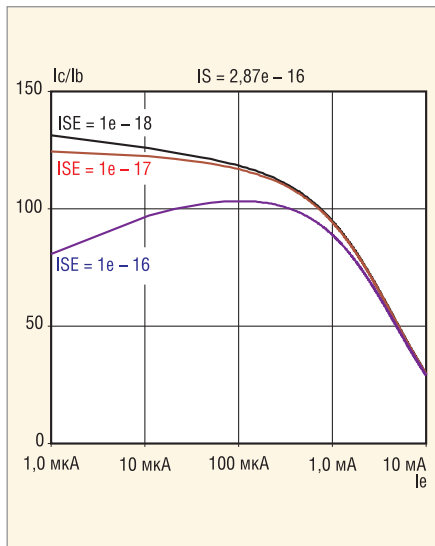


Рис. 13. Результаты моделирования зависимости $\beta = \beta(I_E)$ при разной величине ISE

$$NE \approx \frac{V_{BE1} - V_{BE2}}{\phi_T (\ln I_{B1} - \ln I_{B2})}, \quad (78)$$

$$ISE = \exp\left(\ln I_{B1} - \frac{\ln I_{B1} - \ln I_{B2}}{V_{BE1} - V_{BE2}} V_{BE1}\right)$$

при $|V_{BE1} - V_{BE2}| \ll |V_{BE1}|$ (79)

где $(\ln I_{B1}, V_{BE1}), (\ln I_{B2}, V_{BE2})$ – координаты точек на кривой $\ln I_B = f(V_{BE})$.

Выражение (79) выполняется при условии $I_B \gg ISC$; его справедливость рекомендуется проверить после определения параметра ISC и при необходимости изменить диапазон базовых токов, применяемых для идентификации NE, ISE .

Анализ рисунков 10 позволяет утверждать, что применяемый для исследования ВАХ электроизмерительный прибор ИППП-1 не обеспечивает регистрацию характеристик Гуммеля при предельно малых токах. Для кремниевых транзисторов малых размеров обратный ток насыщения, обусловленный процессами генерации-рекомбинации в ОПЗ эмиттерного и коллекторного р–n-перехода, обычно не превышает 10^{-12} А, и поэтому идентификация ISE по предложенной методике может вызывать затруднения. Однако параметр ISE (ISC) в основном влияет на спад β в области малых токов при прямом (инверсном) включении, причём влияние значительно, если $ISE \approx IS$ (см. рис. 13). В связи с этим рекомендуется подобрать параметр ISE для обеспечения наилучшего совпадения результатов измерений и моделирования зависимости $\beta = \beta(I_E)$;

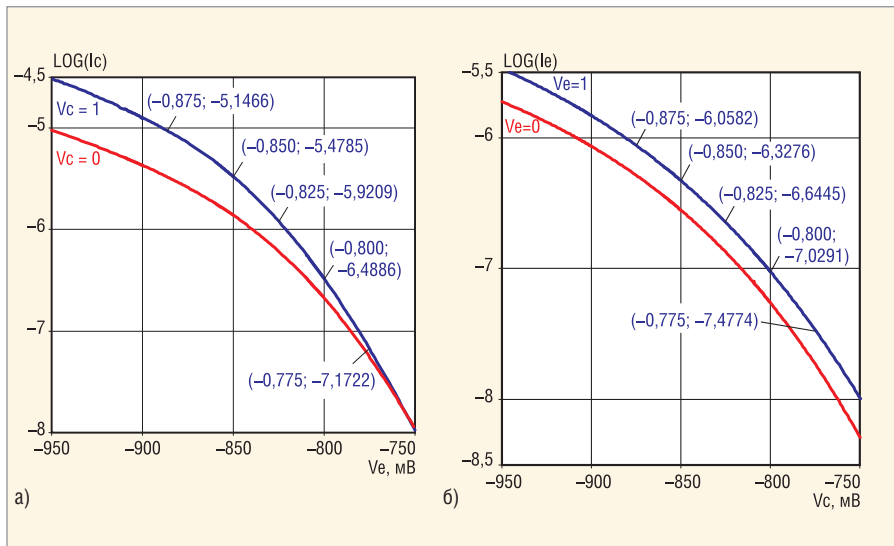


Рис. 14. Зависимость $\ln I_C$ от напряжения на эмиттере V_E при $V_B = 0$ в режиме высокого уровня инжекции а) для прямого включения БТ, б) для инверсного включения БТ

- для инверсного включения аналогичным образом определить параметры NR, BR, ISC, NC .

Для исследуемого БТ $BF = 179; BR = 5,5; I_{BMAX} = 98,0$ мкА; $I_{BMAXR} = 590$ мкА; $\phi = 25,27$ мВ; $NF = 1,036; NR = 1,042; IS = 2,87 \times 10^{-16}$ А.

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГУММЕЛЯ В РЕЖИМЕ ВЫСОКОГО УРОВНЯ ИНЖЕКЦИИ (п. 5.2 ТАБЛИЦЫ 3)

Для режимов работы, приведённых в п. 5.1 таблицы 3, и высокого уровня инжекции справедливо соотношение:

$$I_C = \frac{2\left(1 - \frac{V_{BE}}{VAR}\right)}{1 + \left(1 + \frac{4I_{BE1}}{IKF}\right)^{NK}} I_{BE1}. \quad (80)$$

Для типовой величины показателя степени $NK = 0,5$ и условия $I_{BE1} \gg IKF$ из (80) следует:

$$I_C \approx \left(1 - \frac{V_{BE}}{VAR}\right) \sqrt{I_{BE1} IKF}. \quad (81)$$

$$\ln I_C \approx \left(\frac{1}{2NF\phi_T} - \frac{1}{VAR}\right) V_{BE} + \frac{1}{2} \ln(IKF \cdot IS). \quad (82)$$

Исходя из соотношения (82), сформируем порядок идентификации параметра IKF :

- определить область значения VBE , в которой зависимость $\ln I_C = f(V_{BE})$ имеет наклон, приблизительно равный $2NF\phi_T$ (см. рис. 14);
- в этой области по точке пересечения касательной к кривой $\ln I_C = f(V_{BE})$ с осью V_{BE} определить вели-

чину $0,5 \ln(IKF IS)$ и параметр IKF или рассчитать его с применением соотношения:

$$IKF = \frac{\exp\left[2\left(\ln I_{C1} - \frac{\ln I_{C1} - \ln I_{C2}}{V_{BE1} - V_{BE2}} V_{BE1}\right)\right]}{IS}$$

при $|V_{BE1} - V_{BE2}| \ll |V_{BE1}|$ (83)

Вид кривых на рисунке 14 отличается для прямого и инверсного включения БТ. Графики для инверсного включения имеют практически одинаковую форму, но кривая при $V_E = 1$ сдвинута по оси ординат относительно кривой $V_E = 0$, что может быть объяснено с помощью модели Гуммеля–Пуна, а именно тем, что, аналогично (64), для инверсного включения справедливо соотношение:

$$\ln I_{E1} \approx \ln \left[\frac{I_{E0}}{\left(1 - \frac{|V_{C^*}|}{VAR}\right)} \left(1 + \frac{V_{EB}}{VAR} - \frac{|V_{C^*}|}{VAF}\right) \right] \approx \ln I_{E0} + 0,355, \quad (84)$$

где I_{E0}, I_{E1} – эмиттерный ток БТ при инверсном включении и обратном напряжении на эмиттерном переходе, равном 0.1 В.

Кривые $\ln I_C = f(V_{BE})$ при $V_{CB} = 0,1$ В для прямого включения практически совпадают в области малых и средних токов ($V_{BE} < 0,77$ В), т.к. для них $I_{C1} = I_{C0}(1 + V_{CB}/VAF) \approx 1,037I_{C0}$, но в

области больших токов отличаются, что может быть объяснено влиянием эффекта квазинасыщения БТ вследствие падения напряжения $I_C RC$ на сопротивлении коллектора. В связи с этим наклон кривой $\ln I_C = f(V_{BE})$ при $V_{CB} = 0$ при большом коллекторном токе значительно превышает $2NF\phi_T$, и идентификация по этой кривой параметра IKF приводит к большой погрешности. Эффект квазинасыщения для инверсного включения БТ практически не проявляется, т.к. падение напряжения на сопротивлении эмиттера $I_E RE$ мало в том же диапазоне токов благодаря выполнению условия $RE \ll RC$. Показанные на рисунке 14 зависимости типичны для интегральных транзисторов, хотя вид кривых может отличаться;

3) для уменьшения влияния эффекта квазинасыщения целесообразно за зависимости Гуммеля в режиме высокого уровня инжекции измерять при $V_{CB} = RC\beta_{MAX}I_{BMAX}$, а в тех случаях, когда сопротивление коллектора неизвестно, при $|V_{CB}| \approx 1$ В, и по этим результатам идентифицировать параметр IKF в соответствии с (83);

- для инверсного включения БТ аналогичным образом определить параметр IKR .

Для исследуемого БТ $IKF = 5,23$ мА, $IKR = 0,95$ мА.

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРА В СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ И РАЗОМКНУТЫМ КОЛЛЕКТОРОМ (п. 7 ТАБЛИЦЫ 3)

Для режимов работы, приведённых в п. 7 таблицы 3, справедливы условия и выражения:

$$I_{BE1} = I \text{Sexp} \frac{V_{BE}}{NR\phi_T} \gg I_{BE2}, \quad (85)$$

$$I_{BC1} = I \text{Sexp} \frac{V_{BC}}{NR\phi_T} \gg I_{BC2}, \quad (86)$$

$$I_E RE = V_{CEEXT} -$$

$$-\phi_T \ln \left[1 + \frac{1}{\left(1 - \frac{V_{BC}}{V_{AF}} - \frac{V_{BE}}{V_{AR}} \right) BR} \right]$$

при $NF = NR = 1$, (87)

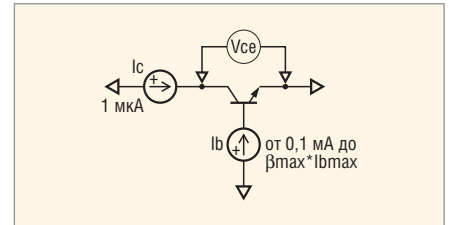


Рис. 15. Схема включения для измерения выходной характеристики БТ с разомкнутым коллектором

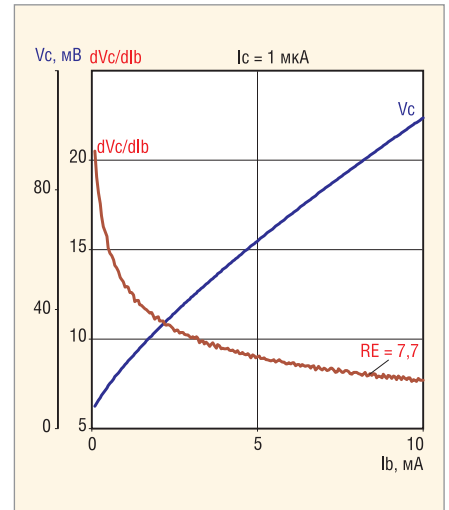


Рис. 16. Результаты измерений выходной характеристики БТ с разомкнутым коллектором

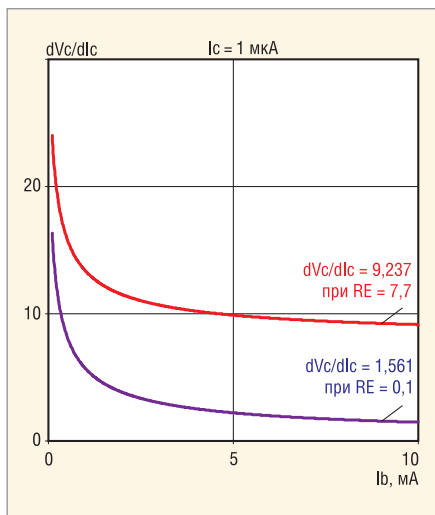


Рис. 17. Результаты моделирования выходной характеристики БТ с разомкнутым коллектором при различной величине параметра RE

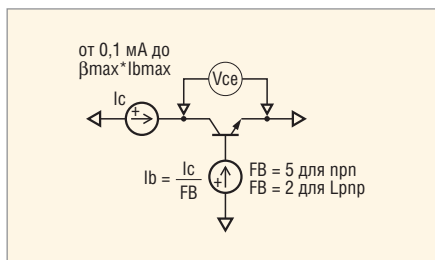


Рис. 18. Схема включения для измерения выходной характеристики БТ с ОЗ в насыщении

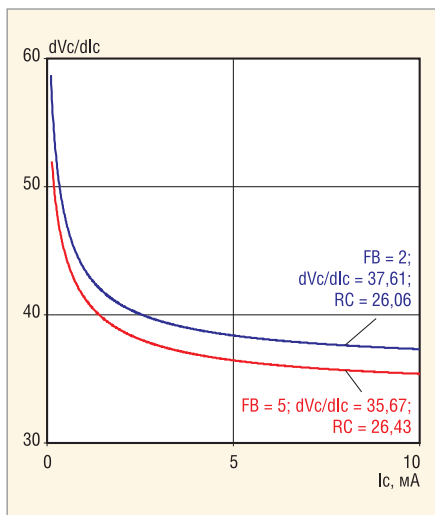


Рис. 19. Зависимость производной от коллекторного напряжения по коллекторному току от коллекторного тока для БТ с ОЗ в насыщении при FB = 2 и FB = 5

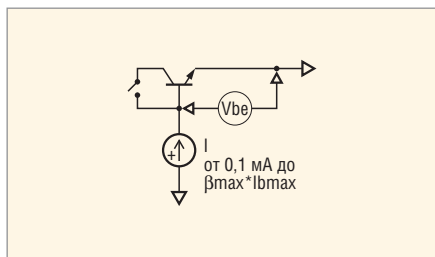


Рис. 20. Схема включения БТ для измерения диодной характеристики эмиттерного перехода

$$RE \approx \frac{dV_{CEEXT}}{dI_E}, \quad (88)$$

где V_{EXT} – напряжение между выводами (**) «внешнего» транзистора (здесь и далее), т.е. с учётом падения напряжения на полупроводниковых областях.

Таким образом, для идентификации параметра RE на основе соотношения (88) необходимо:

- включить БТ по схеме, показанной на рисунке 15;
- установить коллекторный ток, равный 1 мкА (<1% от минимального тока базы, используемого при измерениях в данном разделе), и измерить зависимость $V_{CEEXT} = f(I_B)$ при изменении тока базы от 100 мкА до $\beta_{MAX} I_{BMAX}$;
- по тангенсу угла наклона графика $V_{CEEXT} = f(I_B)$ определить параметр RE. На рисунке 16 для нахождения RE использована возможность вычисления производной от переменной, отображенной на оси Y, по переменной оси X, предоставляемая графическим постпроцессором.

Рассчитанная величина dV_C/dI_B не является постоянной (см. рис. 16), хотя, исходя из физических соображений, можно утверждать, что сопротивление сильно легированной полупроводниковой области эмиттера не должно зависеть от тока.

Высказано предположение о том [16], что причиной, вызывающей наличие зависимости $dV_C/dI_B = f(I_B)$ в п-р-п-транзисторе с разомкнутым коллектором, является протекание тока через прямо смещённый р-п-переход коллекторной области вне эмиттера, к открытию которого приводит падение напряжения на активной базовой области. Однако выполненное моделирование выходной характеристики БТ с разомкнутым коллектором при различной величине параметра RE (см. рис. 17) позволило установить, что зависимость $dV_C/dI_B = f(I_B)$ существует и при RE = 0 в транзисторе, описываемом моделью Гуммеля–Пуна без учёта влияния внешней коллекторной области на ВАХ.

Таким образом, целесообразно предварительно определить параметр RE по приведённой методике в области больших токов, ориентировочно равных $\beta_{MAX} I_{BMAX}$, а затем уточнить величину RE по совпадению результатов моделирования и измерений зависимости $dV_C/dI_B = f(I_B)$.

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРА В СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ И НАСЫЩЕНИЕМ (п. 8 ТАБЛ. 3) С ПОСТОЯННЫМ ОТНОШЕНИЕМ ТОКА КОЛЛЕКТОРА К ТОКУ БАЗЫ

Для режимов работы, приведённых в п. 8 таблицы 3, справедливы выражения (85), (86) и следующие соотношения:

$$V_{CEEXT} \approx I_C RE (1 + FB^{-1}) + I_C RC + \phi_T \ln \frac{BR \left(1 - \frac{V_{BC}}{V_{AF}} - \frac{V_{BE}}{V_{AR}} \right) + FB + 1}{BF \left(1 - \frac{V_{BC}}{V_{AF}} - \frac{V_{BE}}{V_{AR}} \right) - FB} + \phi_T \ln \frac{BF}{BR}, \quad (89)$$

$$\frac{dV_{CEEXT}}{dI_C} \approx RE (1 + FB^{-1}) + RC \quad \text{при } FB = \text{const}, \quad (90)$$

где FB (forced beta) – отношение коллекторного тока к базовому в насыщении (I_C/I_B).

Если при изменении коллекторного тока поддерживать постоянным его отношение к базовому току ($FB = \text{const}$) и регистрировать падение напряжения на промежутке коллектор–эмиттер V_{CEEXT} , то по тангенсу угла наклона кривой $V_{CEEXT} = f(I_C)$ и известным значениям FB и RE возможно рассчитать параметр RC. Таким образом, для идентификации RC рекомендуется:

- включить БТ по схеме, показанной на рисунке 18;
- установить $I_C = 100$ мкА и ток базы, равный I_C/FB , где $FB = 5$ для п-р-п-транзисторов и $FB = 2$ для горизонтальных п-р-п-транзисторов; измерить V_{CEEXT} ;
- изменяя ток коллектора в диапазоне от 100 мкА до $\beta_{MAX} I_{BMAX}$ и устанавливая для каждого значения коллекторного тока значение тока базы, равное $I_B = I_C/FB$, измерить зависимость $V_{CEEXT} = f(I_C)$ при $FB = \text{const}$ (см. рис. 19);
- рассчитать величину параметра RC с помощью соотношения (90).

Рекомендуется рассчитать параметр RC в области больших токов, ориентировочно равных $\beta_{MAX} I_{BMAX}$, а затем уточнить RC по совпадению результа-

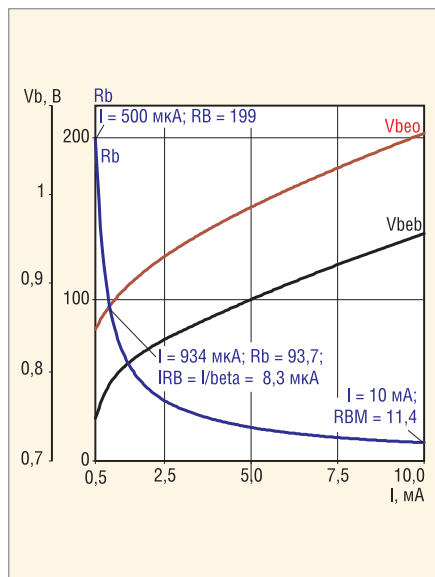


Рис. 21. Результаты измерений диодной характеристики эмиттерного перехода

тов моделирования и измерений зависимости $V_{CEEXT} = f(I_C)$.

ИЗМЕРЕНИЕ ДИОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭМИТТЕРНОГО ПЕРЕХОДА (п. 9 ТАБЛ. 3)

Обычно определить параметры, описывающие сопротивление базовой области R_B , затруднительно. Неоднозначность результатов идентификации обусловлена зависимостью R_B как от методики, так и от режима измерения вследствие распределённого характера сопротивления, влияния на R_B тока (модуляции сопротивления активной базы) и напряжения (эффект Эрли), различного пути протекания тока в базовой области при прямом и инверсном включении БТ. Для инженерных применений наиболее целесообразно приблизительно определить R_B и параметры R_B , R_{BM} , I_{RB} на основе измерений диодной характеристики эмиттерного перехода, а именно из токовой зависимости напряжения на прямо смещённом эмиттерном переходе в тех случаях, когда коллектор «оборван» и соединён с базой.

Заметим, что:

- если измерения выполнены некорректно, то величина R_B может принимать отрицательное значение;
- R_B для анализа шума рекомендуется определять из измерений шума транзисторов.

Для режимов работы, приведённых в п. 9 таблицы 3, и схемы включения БТ, показанной на рисунке 20, справедливы выражения:

$$V_{VBEEXT} - V_{BEEXT} \approx I_E R_B \left(1 - \frac{1}{1 + BF} \right) + \phi_T \ln \frac{(1 + BR)(1 + BF')}{1 + BR + BF}, \quad (91)$$

$$R_B(I_E) \approx \frac{V_{VBEEXT} - V_{BEEXT}}{I_E}, \quad (92)$$

где $R_B(I_E)$ – сопротивление базы БТ при эмиттерном токе I_E и замкнутом ключе, т.е. $V_{CEEXT} = 0$; V_{VBEEXT} , V_{BEEXT} – измеренное значение напряжения между выводами базы и эмиттера при разомкнутом ($I_C = 0$) и замкнутом ($V_{CEEXT} = 0$) ключе.

Таким образом, для идентификации параметров рекомендуется:

- включить БТ в соответствии с рисунком 20;
- измерить зависимость $V_{BE} = f(I)$ при замкнутом ($V_{CEEXT} = 0$) и разомкнутом ($I_C = 0$) положении ключа в диапазоне тока от 100 мкА до $\beta_{MAX} I_{BMAX}$;
- для каждого значения тока в соответствии с выражением (92) определить сопротивление базы R_B (см. рис. 21);
- в качестве параметра R_B рекомендуется выбрать максимальное значение R_B при минимально допустимом токе, R_{BM} – минимальное значение R_B при максимально допустимом токе, равно $\beta_{MAX} I_{BMAX}$. I_{RB} – ток базы, при котором сопротивление базы составляет $0,5(R_B + R_{BM})$.

ЛИТЕРАТУРА

13. Ibarra A. Strategy for DC parameter extraction in bipolar transistors. IEE Proceedings. 1990. Vol. 137. Pt.G. No. 1. PP. 5–11.
14. Ning T.H. Method for determining the emitter and base series resistances of bipolar transistors. IEEE Transactions on Electron Devices. 1984. Vol. ED-31. No. 4. PP. 409–412.
15. Wijburg R.C.M. New method for determining emitter resistance. Electronics Letters. 1992. Vol. 28. No. 8. PP. 733–734.
16. Morizuka K. Precise extraction of emitter resistance from an improved floating collector measurement. IEEE Transactions on Electron Devices. 1995. Vol. 42. No. 2. PP. 266–273.
17. Дворников О.В. Учебно-методический комплекс по дисциплине системы автоматизированного проектирования топологии интегральных схем. БГУИР. Минск, 2006.
18. Дворников О.В. Специализированный базовый матричный кристалл для проектирования малошумящих и широкополосных аналоговых ИС. Электроника, НТБ. 1999. № 4. С. 9–11.
19. Дворников О. Новые возможности анализа вольтамперных характеристик полупроводниковых приборов. Компоненты и технологии. 2007. № 9. С. 211–213.
20. Дворников О.В. Особенности измерений высокочастотных биполярных транзисторов на полупроводниковых пластинах. Минск, 2007.
21. Дворников О.В. Применение постпроцессора PROBE для анализа результатов измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-1. Минск, 2007. ©