

Методы идентификации параметров моделей интегральных транзисторов

Часть 1. Расчёт Spice-параметров биполярных транзисторов с использованием конструктивно-технологических и электрофизических параметров

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

Рассмотрена модель Гуммеля–Пуна биполярного транзистора, приведены математические соотношения для расчёта параметров модели на основе конструктивно-технологических и электрофизических параметров.

ВВЕДЕНИЕ

Точность результатов схемотехнического моделирования непосредственно зависит от адекватности и точности моделей элементов и методов идентификации их параметров [1]. Идентификация параметров электрических моделей, как правило, основана на сопоставлении экспериментально полученных характеристик с численными значениями, найденными с помощью модели. При этом параметры модели подбираются таким образом, чтобы достичь требуемого совпадения экспериментальной и расчётной характеристик.

Существуют объективные причины, по которым невозможно однозначное определение всех параметров модели на основе измерений, поскольку все модели только прибли-

жённо описывают поведение элементов. В сложившейся ситуации допускается оценивать точность модели по зависимостям в ограниченной области переменных, с указанием погрешности и критерия, по которому она определена [1, 2].

На основе анализа известных подходов и опыта проектирования аналоговых ИС разработан метод идентификации параметров Spice-моделей [3], в котором:

- предусмотрена целесообразная последовательность измерений биполярных транзисторов (БТ), учитывающая возможность идентификации ряда параметров с помощью программ Parts, Pspice Model Editor и др.;
- приведены критерии качества моделей, ориентированные на применение БТ в аналоговых ИС;

- выделены особенности измерений, влияющие на точность идентификации.

Идентификация некоторых параметров модели БТ с помощью электрических измерений и физико-топологического моделирования рассмотрена в [4–6], а подробные методики экстракции параметров модели типа Mextran приведены в [7]. К сожалению, использование указанных методов для идентификации параметров модели БТ, применяемой в Spice-подобных программах, затруднено вследствие отсутствия их адаптации к модели Гуммеля–Пуна.

Целью данного цикла статей является разработка математических соотношений, связывающих параметры модели с конструктивно-технологическими, электрофизическими параметрами или результатами измерений; создание подробных методик, позволяющих рассчитать параметры модели на основе результатов измерений и полученных математических соотношений; экспериментальная апробация предложенных методов идентификации и выработка рекомендаций по их применению.

Модель Гуммеля–Пуна

Для машинного моделирования БТ обычно применяют электрическую модель Гуммеля–Пуна (Gummel Н.К., Poon Н.С.) [8–10]. Упрощённая модель Гуммеля–Пуна в виде эквивалентной электрической схемы приведена на рисунке 1, а малосигнальная электрическая схема (для изменения на-

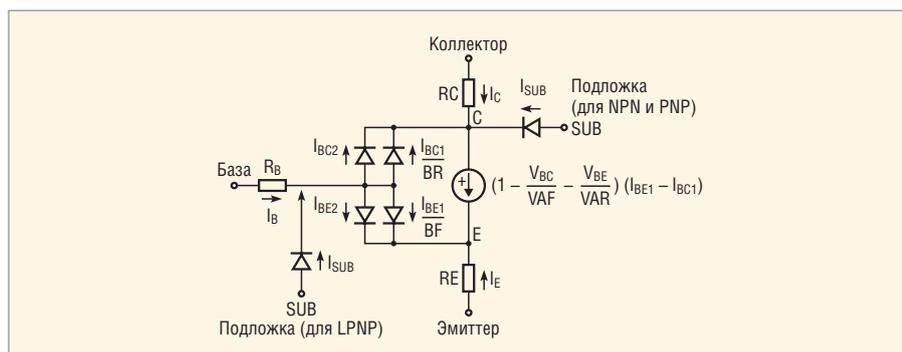


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема БТ

пряжения на р-п-переходах менее jT) с источниками шума – на рисунке 2. Знаки указаны для п-р-п-транзистора, а положительным считается ток, втекающий в транзистор. Для интегральных вертикальных транзисторов, обозначенных на рисунках как NPN и PNP, и горизонтально-го р-п-р-транзистора (LPNP) показано подключение р-п-перехода между транзистором и подложкой (SUB – substrate). В соответствии с моделью, для «внутреннего» транзистора не учитывается падение напряжения на полупроводниковых областях и справедливы упрощённые выражения [10]:

$$I_B = \frac{I_{BE1}}{BF} + I_{BE2} + \frac{I_{BC1}}{BR} + I_{BC2}, \quad (1)$$

$$I_C = \left(1 - \frac{V_{BC}}{VAF} - \frac{V_{BE}}{VAR}\right) (I_{BE1} - I_{BC1}) - \frac{I_{BC1}}{BR} - I_{BC2}, \quad (2)$$

$$I_E = -\left(1 - \frac{V_{BC}}{VAF} - \frac{V_{BE}}{VAR}\right) (I_{BE1} - I_{BC1}) - \frac{I_{BE1}}{BF} - I_{BE2}, \quad (3)$$

$$I_{BE1} = IS \left(\exp \frac{V_{BE}}{NF\phi_T} - 1 \right), \quad (4)$$

$$I_{BE2} = ISE \left(\exp \frac{V_{BE}}{NE\phi_T} - 1 \right), \quad (5)$$

$$I_{BC1} = IS \left(\exp \frac{V_{BC}}{NR\phi_T} - 1 \right), \quad (6)$$

$$I_{BC2} = ISC \left(\exp \frac{V_{BC}}{NC\phi_T} - 1 \right), \quad (7)$$

$$I_{SUB} = ISS \left(\exp \frac{V_{SUB}}{NS\phi_T} - 1 \right), \quad (8)$$

$$C_{BE} = C_{TBE} + C_{JBE}, \quad (9)$$

$$C_{TBE} = g_{BE1}TF, \quad (10)$$

$$C_{BC} = C_{TBC} + C_{JBC}, \quad (11)$$

$$C_{TBC} = g_{BC1}TR, \quad (12)$$

$$C_{JBE} = \frac{CJE}{\left(1 - \frac{V_{BE}}{VJE}\right)^{MJE}}$$

$$\text{при } V_{BE} < FCVJE, \quad (13)$$

$$C_{JBC} = \frac{CJC}{\left(1 - \frac{V_{BC}}{VJC}\right)^{MJC}}$$

$$\text{при } V_{BC} < FCVJC, \quad (14)$$

$$C_{JSUB} = \frac{CJS}{\left(1 - \frac{V_{SUB}}{VJS}\right)^{MJS}}$$

$$\text{при } V_{SUB} < 0, \quad (15)$$

$$g_{BE1} = \frac{dI_{BE1}}{dV_{BE}}, \quad (16)$$

$$g_{BE2} = \frac{dI_{BE2}}{dV_{BE}}, \quad (17)$$

$$g_{BC1} = \frac{dI_{BC1}}{dV_{BC}}, \quad (18)$$

$$g_{BC2} = \frac{dI_{BC2}}{dV_{BC}}, \quad (19)$$

$$S_{NRB}^2 \equiv \frac{dI_{NRB}^2}{df} = \frac{4kT}{RB}, \quad (20)$$

$$S_{NRC}^2 \equiv \frac{dI_{NRC}^2}{df} = \frac{4kT}{RC}, \quad (21)$$

$$S_{NRE}^2 \equiv \frac{dI_{NRE}^2}{df} = \frac{4kT}{RE}, \quad (22)$$

$$S_{NB}^2 \equiv \frac{dI_{NB}^2}{df} = 2qI_B + \frac{I_B^{AF}KF}{f}, \quad (23)$$

$$S_{NC}^2 \equiv \frac{dI_{NC}^2}{df} = 2qI_C, \quad (24)$$

$$I_N = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} S_N^2 df}, \quad (25)$$

где: $I_C, I_B, I_E, I_{SUB}, I_{BE1}, I_{BE2}, I_{BC1}, I_{BC2}$ – ток коллектора, базы, эмиттера, подложки и протекающий через диоды эквивалентной схемы; V_{BE}, V_{BC}, V_{SUB} – напряжение на р-п-переходах база-эмиттер, база-коллектор, подложки (подложка-коллектор V_{SUBC} для вертикальных п-р-п-БТ, подложка-база V_{SUBB} для горизонтальных р-п-р-транзисторов), $V_{XY} = V_X - V_Y$; $\phi_T = = kT/q$ – температурный потенциал; q – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; C^*, C_T^*, C_J^* – суммарная, диффузионная и барьерная ёмкости соответствующего (**) р-п-перехода в рабочем режиме; g_{BE1}, g_{BC1} – проводимости i -х диодов эквивалентной схемы в режиме малого сигнала; g_{OUTB} – малосигнальная выходная проводимость; $S_{NRB}, S_{NRC}, S_{NRE}, S_{NB}, S_{NC}$ – спектральные плотности теплового шума сопротивлений RB, RC, RE , дробового шума базового и коллекторного тока; f – частота; I_N – с.к.з. тока шума в полосе частот $f_1 - f_2$ при известной спектральной плотности шума S_N .

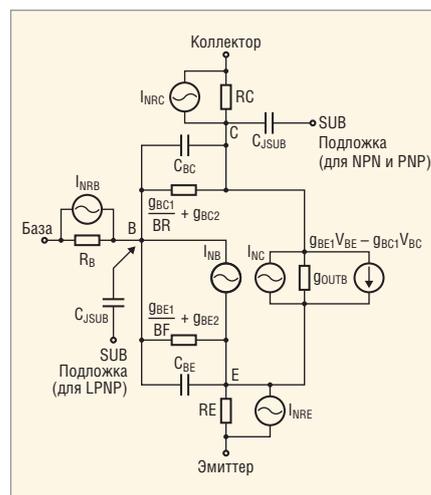


Рис. 2. Малосигнальная эквивалентная электрическая схема БТ с источниками шума

Для определения величины источников тока $I_{NRB}, I_{NRC}, I_{NRE}, I_{NB}, I_{NC}$ малосигнальной эквивалентной электрической схемы необходимо использовать спектральные плотности $S_{NRB}, S_{NRC}, S_{NRE}, S_{NB}, S_{NC}$ соответственно. Источник тока между коллектором и эмиттером управляется напряжением на внутренних р-п-переходах, которое при учёте влияния сопротивлений RB, RC, RE составляет часть напряжения, приложенного к выводам «внешнего» транзистора.

Несмотря на кажущуюся сложность, для идентификации большинства параметров рекомендуется применять соотношения (1) – (25), а не полную модель Гуммеля–Пуна [9], которая включает большое количество математических соотношений, записанных в виде, удобном для последовательного машинного расчёта.

Модель Гуммеля–Пуна (см. рисунок 3), применяемая в Spice-подобных программах, дополнительно учитывает следующие основные факторы [9]:

1. Спад коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером (β) в области больших коллекторных токов, который описывается с помощью параметров IKF, IKR, NK и соотношения:

$$I_C = \frac{2 \left(1 - \frac{V_{BC}}{VAF} - \frac{V_{BE}}{VAR}\right)}{1 + \left(1 + \frac{4I_{BE1}}{IKF} + \frac{4I_{BC1}}{IKR}\right)^{NK}} (I_{BE1} - I_{BC1}) - \frac{I_{BC1}}{BR} - I_{BC2}, \quad (26)$$

2. Влияние эффектов высокого уровня инжекции на время пролёта TF

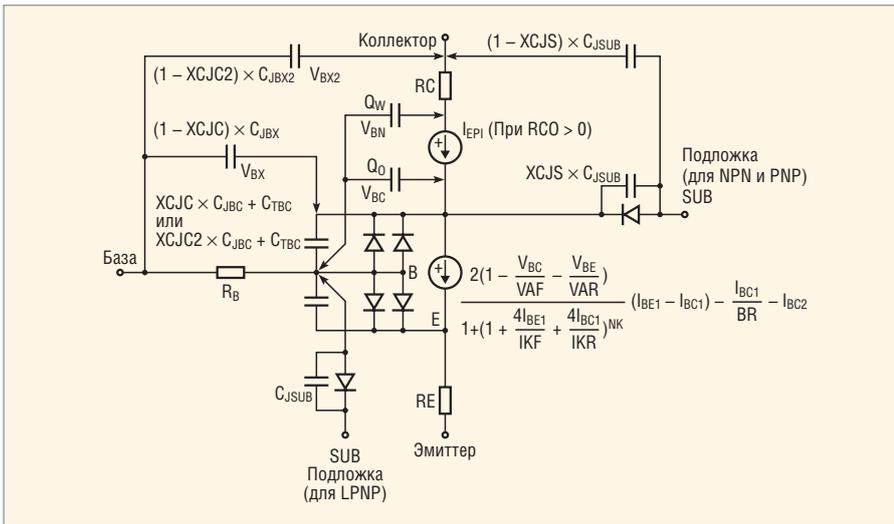


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема БТ, применяемая в Spice-подобных программах

неосновных носителей заряда через базу БТ с использованием параметров ITF, VTF, XTF :

$$TF = TFL \left[1 + XTF \left(\frac{I_{BE1}}{I_{BE1} + ITF} \right)^2 \exp \frac{V_{BC}}{1,44VTF} \right], \quad (27)$$

где TFL – величина параметра TF , рассчитанная при малом коллекторном токе.

3. Представление барьерной ёмкости коллекторного перехода в виде двух составляющих: ёмкости под эмиттером $C_{JBC}XCJC$ и ёмкости вне эмиттера $(1 - XCJC)C_{JBX}$, где $XCJC$ – коэффициент «расщепления» барьерной ёмкости коллекторного перехода. Составляющую $C_{JBC}XCJC$ следует применять в выражении (11) вместо C_{JBC} , а конденсатор с ёмкостью $(1 - XCJC)C_{JBX}$ подсоединяется между внутренним узлом коллектора и внешним выводом базы:

$$C_{JBX} = \frac{CJC}{\left(1 - \frac{V_{BX}}{VJC}\right)^{MJC}} \quad \text{при } V_{BX} < FCVJC, \quad (28)$$

где V_{BX} – напряжение между внутренним узлом коллектора и внешним выводом базы.

Иногда применяют параметр $XCJC2$, отличие которого от $XCJC$ поясняет рисунок 3 и таблица 1. Составляющую C_{JBX2} на рисунке 3 допустимо рассчитать по (28) при замене V_{BX} на V_{BX2} .

4. Представление барьерной ёмкости перехода коллектор–подложка в виде двух составляющих. Параметр $XCJS$, величина которого устанавливается в диапазоне $0 < XCJS < 1,0$, характеризует величину ёмкости CJS между внешним узлом подложки и внутренним узлом коллектора. При $XCJS = 1$ ёмкость CJS полностью подключена между внешним узлом подложки и внутренним узлом коллектора; при $XCJS = 0$ ёмкость CJS полностью подключена между внешним узлом подложки и внешним узлом коллектора.
5. Зависимость сопротивления базы от тока (параметры RB, RBM, IBM):

$$R_B = RBM + \frac{2 \left(1 - \frac{V_{BC}}{VAF} - \frac{V_{BE}}{VAR}\right)}{1 + \left(1 + \frac{4I_{BE1}}{IKF} + \frac{4I_{BC1}}{IKR}\right)^{NK}} (RB - RBM) \quad \text{при } IRB = \infty, \quad (29)$$

$$R_B = RBM + 3(RB - RBM) \frac{\text{tg}X - X}{X(\text{tg}X)^2} \quad \text{при } IRB > 0, \quad (30)$$

Таблица 1. Параметры, характеризующие «расщепление» барьерной ёмкости коллекторного перехода

Область подключения ёмкости	Величина ёмкости при заданном параметре модели	
	XCJC	XCJC2
Внутренняя база – внутренний коллектор	$XCJC4CJC$	$XCJC24CJC$
Внешняя база – внутренний коллектор	$(1,0 - XCJC)CJC$	Не определена
Внешняя база – внешний коллектор	Не определена	$(1,0 - XCJC2)CJC$

$$X = \frac{\sqrt{1 + 14,59025 \frac{I_B}{IRB}} - 1}{2,4317 \sqrt{\frac{I_B}{IRB}}}, \quad (31)$$

где RB – сопротивление базы при заданном базовом токе I_B .

6. Эффект квазинасыщения с помощью источника тока I_{EP1} (см. рис. 3) и нелинейных конденсаторов с зарядом Q_0 и Q_W , на которых соответственно падает напряжение V_{BC} и V_{BN} . Дополнительные элементы рассчитываются только при заданном параметре модели RCO [11].

7. Зависимость барьерных ёмкостей от величины прямого смещения р–n-переходов с помощью параметра FC :

$$C_{JBE} = \frac{CJE}{(1 - FC)^{1+MJE}} \left(1 - FC(1 + MJE) + \frac{V_{BE}MJE}{VJE}\right) \quad \text{при } V_{BE} > FCVJE, \quad (32)$$

$$C_{JBC} = \frac{CJC}{(1 - FC)^{1+MJC}} \left(1 - FC(1 + MJC) + \frac{V_{BC}MJC}{VJC}\right) \quad \text{при } V_{BC} > FCVJC, \quad (33)$$

$$C_{JBX} = \frac{CJC}{(1 - FC)^{1+MJC}} \left(1 - FC(1 + MJC) + \frac{V_{BX}MJC}{VJC}\right) \quad \text{при } V_{BX} > FCVJC, \quad (34)$$

$$C_{JSUB} = CJS \left(1 + \frac{V_{SUB}MJS}{VJS}\right) \quad \text{при } V_{SUB} > 0. \quad (35)$$

8. Температурные зависимости $IS(T), ISE(T), ISC(T), ISS(T), BF(T), BR(T), RE(T), RB(T), RBM(T), RC(T), VJE(T), VJC(T), VJS(T), EG(T), CJE(T), CJC(T), CJS(T), KF(T), AF(T), RCO(T), VO(T), GAMMA(T)$ [9].

Параметры Spice-модели БТ и их величины, принятые по умолчанию, приведены в таблице 2.

РАСЧЁТ SPICE-ПАРАМЕТРОВ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Обычно параметры моделей интегральных элементов определяют либо экспериментально, либо с по-

Таблица 2. Параметры Spice-модели БТ

Обозначение	Описание	Единица измерения	Значение по умолчанию
AF	Показатель степени избыточного низкочастотного шума (фликер-шума)	–	1
BF	Статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером (β) в активном режиме работы БТ при прямом включении в том случае, когда допустимо пренебречь зависимостью β от тока и напряжения на коллекторном переходе	–	100
BR	β в активном режиме работы БТ при инверсном включении в том случае, когда допустимо пренебречь его зависимостью от тока и напряжения на эмиттерном переходе	–	1
CN	Показатель степени в температурной зависимости параметра RCO	–	2,43 для п–р–п 2,20 для р–п–р
D	Показатель степени в температурной зависимости параметра VO	–	0,52 для п–р–п 0,87 для р–п–р
CJE, CJC, CJS	Барьерные ёмкости эмиттерного, коллекторного перехода и перехода подложки при отсутствии внешнего напряжения на р–п–переходе	Ф	0
EG	Ширина запрещённой зоны	эВ	1,11
FC	Коэффициент, характеризующий диапазон напряжения, в котором определена величина барьерной ёмкости прямо смещённого перехода	–	0,5
GAMMA	Коэффициент, характеризующий степень легирования эпитаксиальной плёнки коллектора	–	10...11
IKF	Ток «излома» зависимости $I_C(V_{BE})$ для прямого включения	А	∞
IKR	Ток «излома» зависимости $I_E(V_{BC})$ для инверсного включения	А	∞
IRB	Базовый ток, при котором сопротивление базы составляет $0,5(RB + RBM)$	А	∞
IS	Ток, описывающий перенос неосновных носителей заряда в базе	А	10...16
ISE (ISC)	Обратный ток насыщения, обусловленный процессами генерации–рекомбинации в области пространственного заряда (ОПЗ) эмиттерного (коллекторного) р–п–перехода	А	0
ISS	Обратный ток насыщения р–п–перехода подложки	А	0
ITF	Ток, описывающий зависимость времени пролёта через базу TF от тока коллектора	А	0
KF	Коэффициент избыточного низкочастотного шума	–	0
MJE, MJC	Показатель степени в зависимости барьерной ёмкости эмиттерного и коллекторного перехода от обратного напряжения	–	0,33
MJS	Показатель степени в зависимости барьерной ёмкости перехода подложки от обратного напряжения	–	0,5
NC	Коэффициент неидеальности для ISC	–	2,0
NE	Коэффициент неидеальности для ISE	–	1,5
NF	Коэффициент неидеальности для прямого включения	–	1,0
NK	Показатель степени в зависимости коллекторного тока от токов «излома» (IKF, IKR)	–	0,5
NR	Коэффициент неидеальности для инверсного включения	–	1,0
NS	Коэффициент неидеальности для р–п–перехода коллектор–подложка	–	1,0
QCO	Множитель, характеризующий заряд в эпитаксиальном слое коллектора	Кл	0
QUASIMOD	При $QUASIMOD = 0$ не учитываются, а при $QUASIMOD = 1$ – учитываются температурные зависимости параметров $GAMMA, RCO, VO$	–	0
RB	Сопротивление базы (максимальное) при отсутствии внешнего напряжения на р–п–переходах	Ом	0
RBM	Сопротивление базы (минимальное) при максимальном базовом токе	Ом	RB
RC	Сопротивление полупроводниковой области коллектора	Ом	0
RCO	Сопротивление эпитаксиального слоя коллектора при отсутствии внешнего напряжения на р–п–переходах	Ом	0
RE	Сопротивление полупроводниковой области эмиттера	Ом	0
TF, TR	Время пролёта неосновных носителей заряда через квазинейтральную базу в активном режиме работы при прямом и инверсном включении	с	0
TRB1	Коэффициент, характеризующий линейную температурную зависимость RB	$^{\circ}C^{-1}$	0
TRB2	Коэффициент, характеризующий квадратичную температурную зависимость RB	$^{\circ}C^{-2}$	0
TRC1	Коэффициент, характеризующий линейную температурную зависимость RC	$^{\circ}C^{-1}$	0
TRC2	Коэффициент, характеризующий квадратичную температурную зависимость RC	$^{\circ}C^{-2}$	0
TRE1	Коэффициент, характеризующий линейную температурную зависимость RE	$^{\circ}C^{-1}$	0
TRE2	Коэффициент, характеризующий квадратичную температурную зависимость RE	$^{\circ}C^{-2}$	0
TRM1	Коэффициент, характеризующий линейную температурную зависимость RBM	$^{\circ}C^{-1}$	0
TRM2	Коэффициент, характеризующий квадратичную температурную зависимость RBM	$^{\circ}C^{-2}$	0
VAf, VAR	Напряжение Эрли при прямом и инверсном включении	В	∞
VJE, VJC, VJS	Контактная разность потенциалов эмиттерного, коллекторного и перехода подложки	В	0,75
VO	Падение напряжения на эпитаксиальном слое коллектора, при котором эффективная подвижность основных носителей заряда уменьшается в два раза по сравнению со значением в слабых электрических полях	В	10,0
VTF	Напряжение, описывающее зависимость времени пролёта через базу TF от напряжения на коллекторном переходе	В	∞
XCJC	Коэффициент «расщепления» ёмкости коллектор–база (см. таблицу 1)	–	1,0
XCJC2	Коэффициент «расщепления» ёмкости коллектор–база (см. таблицу 1)	–	1,0
XCJS	Коэффициент «расщепления» ёмкости коллектор–подложка	–	1,0
XTB	Температурный коэффициент параметров BF и BR	$^{\circ}C^{-1}$	0
XTF	Коэффициент, определяющий зависимость времени пролёта через базу TF от величины смещения (I_E, V_{BC})	–	0
XTI	Температурный коэффициент параметра IS	$^{\circ}C^{-1}$	3,0

мощью физико-топологического моделирования. При идентификации моделей с сосредоточенными параметрами используются прямые электрические измерения и/или применяются оптимизационные процедуры. Идентификация же параметров распределённых электрических моделей чаще всего проводится с привлечением результатов физико-топологического моделирования [12].

Модель Гуммеля–Пуна является моделью БТ с сосредоточенными параметрами, идентификацию которых рекомендуется осуществлять с помощью электрических измерений. Однако в том случае, когда отсутствует возможность выполнения измерений или физико-топологического моделирования БТ, целесообразно предварительно рассчитать основные параметры модели на основе конструктивно-технологических и электрофизических параметров по приведённым ниже упрощённым соотношениям, а в дальнейшем уточнить рассчитанные значения параметров с использованием результатов измерений [8, 10, 11]:

$$I_{SDIF} = qn_1^2 S_{PN} \left(\frac{D_P}{N_D L_P} + \frac{D_N}{N_A L_N} \right), \quad (36)$$

$$I_{SDIF} = qn_1^2 S_{PN} \left(\frac{D_P}{N_D x_N} + \frac{D_N}{N_A x_P} \right) \text{ при } x_N \ll L_P = \sqrt{D_P \tau_P}, x_P \ll L_N = \sqrt{D_N \tau_N}, \quad (37)$$

$$I_{SGR} = qn_1 \frac{d_{OP3}}{2\tau_0} S_{PN}, \quad (38)$$

$$C_{JPN} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S_{PN}}{d_{OP3}}, \quad (39)$$

$$d_{OP3} = \left[\frac{2\varepsilon \varepsilon_0}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (VJ - V_{PN}) \right]^{1/2}, \quad (40)$$

$$VJ = \varphi_T \ln \frac{N_A N_D}{n_1^2}, \quad (41)$$

$$IS = \frac{q^2 D_{NB} n_1^2 S_E}{Q_{BO}} \approx \frac{q D_{NB} n_1^2 S_E}{N_{AB} W_{BA}}, \quad (42)$$

$$BF = \frac{\mu_{NB} \mu_{PB} R_{SBA}}{\mu_{NE} \mu_{PE} R_{SE}}, \quad (43)$$

$$VO = \frac{v_s W_{EPI}}{\mu_0}, \quad (44)$$

$$RCO \approx \frac{W_{EPI}}{q \mu_0 N_{EPI} S_E}, \quad (45)$$

$$GAMMA = \left(\frac{2n_1}{N_{EPI}} \right)^2, \quad (46)$$

$$QCO \approx \frac{q N_{EPI} S_E W_{EPI}}{4}, \quad (47)$$

$$IKF \approx \frac{Q_{BO} S_E}{TF} \approx \frac{q N_{AB} W_{BA} S_E}{TF}, \quad (48)$$

$$TF \approx \frac{W_{BA}^2}{2D_{NB}}, \quad (49)$$

$$XCJC \approx \frac{S_E}{S_C}, \quad (50)$$

где I_{SDIF} – обратный ток насыщения р–п-перехода, обусловленный диффузионными процессами; I_{SGR} – обратный ток насыщения р–п-перехода, обусловленный процессами генерации-рекомбинации в ОПЗ; C_{JPN} – барьерная ёмкость р–п-перехода; d_{OP3} – ширина ОПЗ; VJ – контактная разность потенциалов р–п-перехода; n_1 – собственная концентрация; S_{PN} – площадь р–п-перехода; N_D, N_A – концентрации ионизированных доноров и акцепторов; D_P, D_N – коэффициенты диффузии неосновных носителей заряда в областях n- и p-типа; L_P, L_N – диффузионные длины неосновных носителей заряда в областях n- и p-типа; τ_P, τ_N – время жизни неосновных носителей заряда в областях n- и p-типа; x_P, x_N – протяжённость квазинейтральной области p- и n-типа; τ_0 – эффективное время жизни носителей заряда в ОПЗ; ε – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; V_{PN} – напряжение на р–п-переходе (положительное при прямом смещении и отрицательное при обратном); D_{NB} – коэффициент диффузии электронов в базе n–р–п БТ; $S_E (S_C)$ – донная площадь эмиттерного (коллекторного) перехода n–р–п БТ; Q_{BO} – удельная плотность «встроенного» заряда в базе (на единицу площади); W_{BA} – толщина активной базы; N_{AB} – концентрация ионизированных акцепторов в базе n–р–п-БТ; R_{SBA}, R_{SE} – поверхностные сопротивления слоёв активной базы (база под эмиттером) и эмиттера n–р–п-транзистора (Ом/квадрат), которые обычно контролируются в технологическом процессе изготовления ИС и поэтому хорошо известны; μ_0 – эффективная подвиж-

ность основных носителей заряда в слабых электрических полях; W_{EPI} – толщина слаболегированной эпитаксиальной плёнки, по которой протекает коллекторный ток вертикальных БТ; v_s – предельная скорость носителей заряда в сильных полях; N_{EPI} – концентрации ионизированной примеси в слаболегированной эпитаксиальной плёнке коллектора.

Выражение (42) справедливо для n–р–п-транзистора, но его допустимо применять для вертикального р–п–р-транзистора при замене N_{AB} на N_{DB} и D_{NB} на D_{PB} . По соотношению (36) или (37) возможно найти величину ISS , по (38) – ISE, ISC , по (39) – CJE, CJC, CJS , по (41) – VJE, VJC, VJS .

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамов И.И.* Тенденции и проблемы проектирования прецизионных аналоговых интерфейсов. Нано- и микросистемная техника. 2005. №10. С. 23–35.
2. *McAndrew C.C.* Practical modeling for circuit simulation. IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1998. Vol. 33. № 3. PP. 439–448.
3. *Абрамов И.И.* Инженерный метод идентификации параметров Spice-моделей. Информационные технологии. 2007. № 5. С. 17–21.
4. *Кремлев В.Я.* Физико-топологическое моделирование структур элементов БИС. Высшая школа, 1990.
5. *Бубенищев А.Н.* Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем. Высшая школа, 1989.
6. *Бубенищев А.Н.* Физико-технологическое проектирование биполярных элементов кремниевых БИС. Радио и связь, 1991.
7. *Paasschens J.C.J.* Parameter extraction for the bipolar transistor model Mextran, level 504. Unclassified Report NL-UR 2001/801. Philips Nat. Lab, 2001.
8. *Маллер Р.* Элементы интегральных схем. Мир, 1989.
9. *Разевиг В.Д.* Система проектирования OrCAD 9.2. Солон-Р, 2003.
10. *Абрамов И.И.* Проектирование аналоговых микросхем для прецизионных измерительных систем. Минск: Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь, 2006.
11. *Kull G.M.* A Unified circuit model for bipolar transistors including quasi-saturation effects. IEEE Transactions on Electron Devices. 1985. Vol. 32. № 6. PP. 1103–1113.
12. *Абрамов И.И.* Моделирование элементов интегральных схем» систем. Курс лекций. Минск: БГУ, 1999.

