

УДК 621.382

Разработка SPICE-моделей комплементарных биполярных транзисторов с учетом дозового воздействия

Ю. Ю. Гулин¹, А. Н. Рябев, М. Е. Горчичко

¹к. т. н., АО «Российские космические системы»

e-mail: design-centre@spacecorp.ru

Аннотация. В статье освещаются текущие результаты разработки SPICE-моделей комплементарных биполярных транзисторов (КБТ) с учетом воздействия дозовых радиационных эффектов. В рамках работы проведены радиационные исследования транзисторов на источнике гамма-излучения, получены экспериментальные характеристики, отражающие деградацию параметров биполярных транзисторов под влиянием накопленной дозы радиационного излучения и экстрагированы параметры SPICE-модели. На основе экстрагированных параметров разработаны SPICE-модели комплементарных биполярных транзисторов, учитывающие радиационную деградацию при дозовом излучении в диапазоне поглощенных доз от 0 до 100 крад (Si).

Ключевые слова: SPICE-модель, биполярный транзистор, дозовые радиационные эффекты, коэффициент усиления, вольт-амперные характеристики, модель Гуммеля–Пуна

Development of SPICE-models of the Complementary Bipolar Transistors with Account for Dose Effect

Yu. Yu. Gulin¹, A. N. Ryabev, M. E. Gorchichko

¹candidate of engineering science, Joint Stock Company “Russian Space Systems”

e-mail: design-centre@spacecorp.ru

Abstract. This article discusses the ongoing development of SPICE-models of the complementary bipolar transistors (CBT) with account for dose radiation effects. The conducted research included exposing the transistors to the source of gamma rays. The experimental characteristics, reflecting the degradation parameters of the bipolar transistors under the influence of the accumulated dose of radiation are attained, as well as at the extracted parameters of the SPICE-model. Based on the extracted parameters, a SPICE-model of complementary bipolar transistors has been developed, with account for the radioactive degradation with the dosage absorbed ranging from 0 to 100 krad (Si).

Keywords: SPICE-model, bipolar transistor, dose radiation effects, gain, current-voltage characteristics, Gummel-Poon model

Введение

Среди многочисленных факторов, с которыми сталкиваются разработчики, особое значение имеет воздействие естественной радиации космического пространства (КП), оказывающее существенное влияние на работоспособность бортовой аппаратуры и элементной базы при их эксплуатации [1]. Влияние ионизирующего излучения (ИИ) космического пространства на полупроводниковые приборы (ПП) и интегральные схемы (ИС), входящие в состав бортовой аппаратуры, может привести к всевозможным нарушениям функционирования данных устройств.

Учет влияния ИИ на ранних этапах проектирования, прежде всего на схемотехническом уровне, существенно снижает стоимость и ускоряет процесс разработки ИС [2].

Для схемотехнического моделирования широко используется SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) — универсальный симулятор для различных видов анализа электрических цепей [3].

Одним из способов прогнозирования работоспособности интегральных схем в условиях космического пространства является создание SPICE-моделей их компонентов, учитывающих влияние дестабилизирующих факторов космического пространства (ДФКП), и использование их в процессе анализа и верификации разрабатываемого проекта.

SPICE-модель электронного компонента представляет собой программно-математическую (компьютерную) модель — систему уравнений с определенным набором SPICE-параметров, зависящих от типа компонента, геометрических и электрических параметров, свойств материалов. Одно из главных требований к модели элемента заключается в удобстве ее расчета при компьютерном моделировании. Кроме этого, должен быть соблюден баланс между уровнем достоверности модели, повышение которого ведет к усложнению модели, и скоростью моделирования.

В настоящее время для моделирования биполярных транзисторов широко используется модель Гуммеля–Пуна в виде эквивалентной электрической схемы, содержащей более пятидесяти параметров [4].

Целью данной работы является создание SPICE-моделей интегральных $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторов, учитывающих дозовое ионизационное воздействие низкоинтенсивного гамма-излучения. Результаты работы будут использоваться на этапе проектирования ИС на основе базового структурного кристалла (БСК) для исследования работоспособности ИС после радиационного облучения.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести экспериментальные радиационные исследования комплементарных биполярных транзисторов.
2. Получить экспериментальные характеристики, отражающие радиационную деградацию параметров транзисторов, и провести экстракцию параметров.
3. На основе экспериментальных данных оптимизировать SPICE-параметры исследуемого объекта.

Проведение экспериментальных радиационных исследований

Объектом исследования являются интегральные вертикальные $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторы, размеры окна эмиттера в которых составляют $1,5 \times 15 \text{ мкм}^2$. Данные транзисторы входят в состав экспериментального базового структурного кристалла (БСК).

В вертикальных транзисторных структурах, в соответствии с рис. 1, база располагается

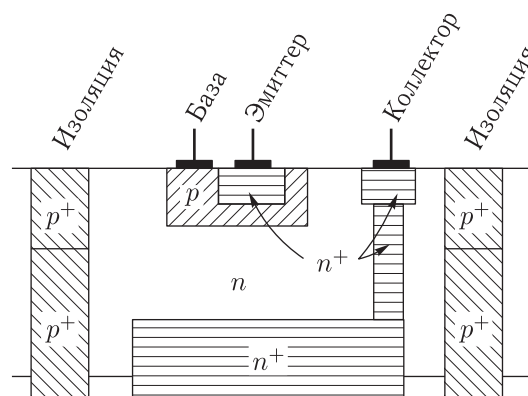


Рис. 1. Схематический разрез вертикального $n-p-n$ -транзистора

под эмиттером, перемещение носителей от эмиттера к коллектору происходит в направлении, перпендикулярном поверхности кристалла.

Ток коллектора биполярного транзистора описывается следующей формулой:

$$I_C = \frac{IS}{BF} \left(e^{\frac{U_{BE}}{NF \cdot \varphi_t}} \right). \quad (1)$$

В соответствии с формулой (1) базовый ток можно выразить следующим соотношением:

$$I_B = \frac{IS}{BF} \left(e^{\frac{U_{BE}}{NF \cdot \varphi_t}} \right) + ISE \left(e^{\frac{U_{BE}}{NE \cdot \varphi_t}} \right), \quad (2)$$

где I_C — ток коллектора, I_B — ток базы, U_{BE} — напряжение база–эмиттер, IS , BF , ISE , NE и NF — параметры модели Гуммеля–Пуна.

Поскольку радиационная деградация транзистора определяется увеличением базовой составляющей в постоянном токе коллектора, то можно предположить, что параметр IS не изменяется при воздействии излучения. Значение BF определяет предэкспоненциальный множитель идеальной составляющей базового тока. Этот компонент базового тока является суммой токов инжекции в эмиттер и рекомбинации в активной области базы. Так как в современных транзисторах размер активной области базы достаточно мал, ток рекомбинации в ней намного меньше, чем ток, инжектируемый в эмиттер. Ток инжекции определяется эмиттером в прямом смещении и не зависит от общей дозы. Таким образом, первое слагаемое в уравнении (2) после радиационного воздействия остается постоянным, а второе слагаемое в уравнении (2) является током поверхностной рекомбинации (рекомбинации на границе раздела), из чего следует, что радиационная деградация базового тока должна быть определена путем увеличения параметров ISE и NE [5].

Следовательно, проведя аппроксимацию параметров ISE и NE в зависимости от величины накопленной дозы радиационного излучения, можно получить модель биполярного транзистора с учетом исследуемых внешних воздействующих факторов.

Измерение электрических параметров КБТ проводилось на базе АО «РКС». Для аппаратного обеспечения экспериментальных исследований использовался следующий комплекс устройств:

– изотопный источник непрерывного гамма-излучения;

– технологическая оснастка для проведения экспериментальных исследований элементов экспериментального БСК;

– полуавтоматическая зондовая станция;

– анализатор параметров полупроводниковых приборов.

При разработке программы и методики исследований элементов экспериментального БСК был выбран тест №3 в РКТ по ОСТ 134-1034-2012, имитирующий длительное действие естественного ионизирующего излучения космического пространства. Данный тест рекомендован для изделий биполярной технологии и предоставляет консервативную оценку стойкости изделий к накопленной дозе радиационного излучения. В соответствии с ним проводится облучение в активном режиме при температуре 100 °С до требуемого уровня поглощенной дозы при мощности 10–100 рад(Si) · с⁻¹ [6]. После этого образцы следует охладить до комнатной температуры и провести контроль параметров. Если отказов не обнаружено, то изделия считаются удовлетворяющими заданным требованиям.

Перечень исследуемых параметров тестовых структур после радиационного облучения указан в таблице.

В процессе экспериментальных исследований образцов КБТ на воздействие ДФКП была сформирована обширная база экспериментальных характеристик, содержащая передаточные характеристики, входные ВАХ, выходные ВАХ, коэффициенты передачи по току для трех образцов транзисторов для поглощенных доз 20, 40, 60, 80 и 100 крад(Si). Мощность дозы облучения составила 40 рад(Si) · с⁻¹.

На рис. 2, 3 приведены результаты исследований образцов КБТ, демонстрирующие влияние дозы гамма-излучения на их электрические характеристики.

На характеристике Гуммеля, изображенной на рис. 3, при низких значениях U_{BE} проявляется значительное разделение кривых базового тока I_B в зависимости от накопленной дозы радиационного излучения. Данное наблюдение соответствует представлениям о базовом токе как наиболее чувствительном параметре биполярного транзистора

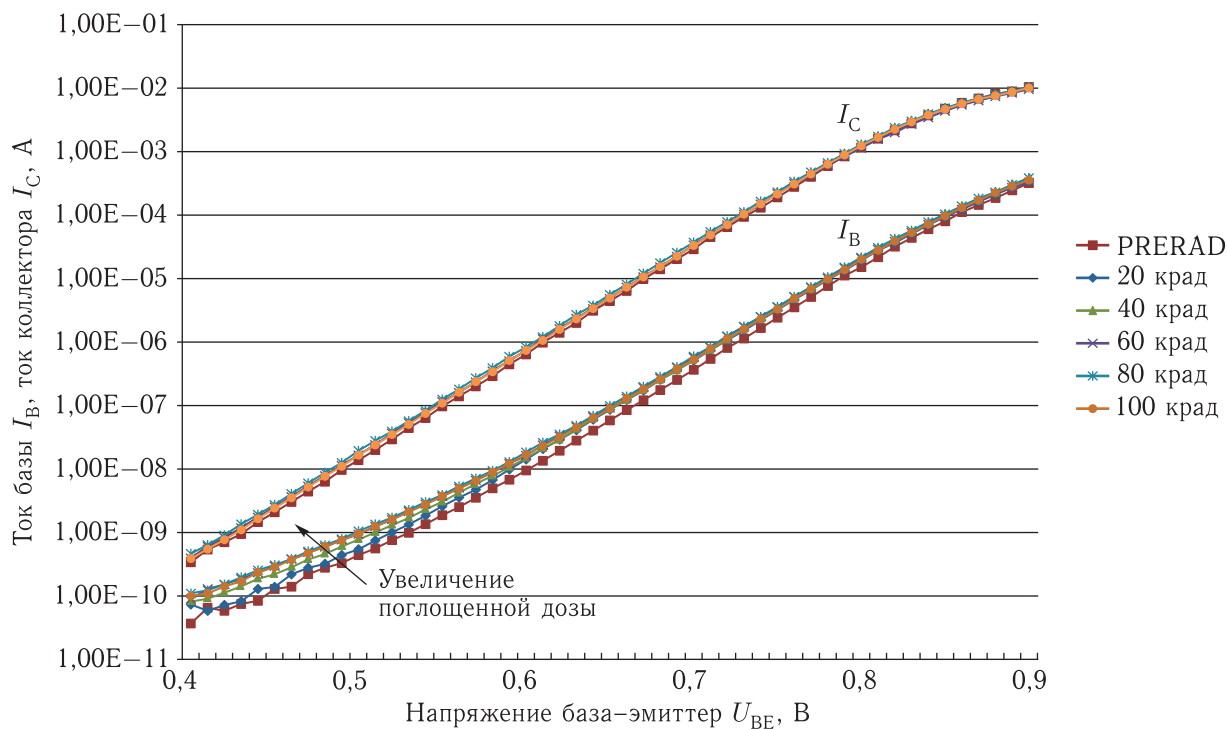


Рис. 2. Характеристика Гуммеля при $V_{CE} = 3$ В для величин поглощенной дозы 20 крад(Si), 40 крад(Si), 60 крад(Si), 80 крад(Si), 100 крад(Si)

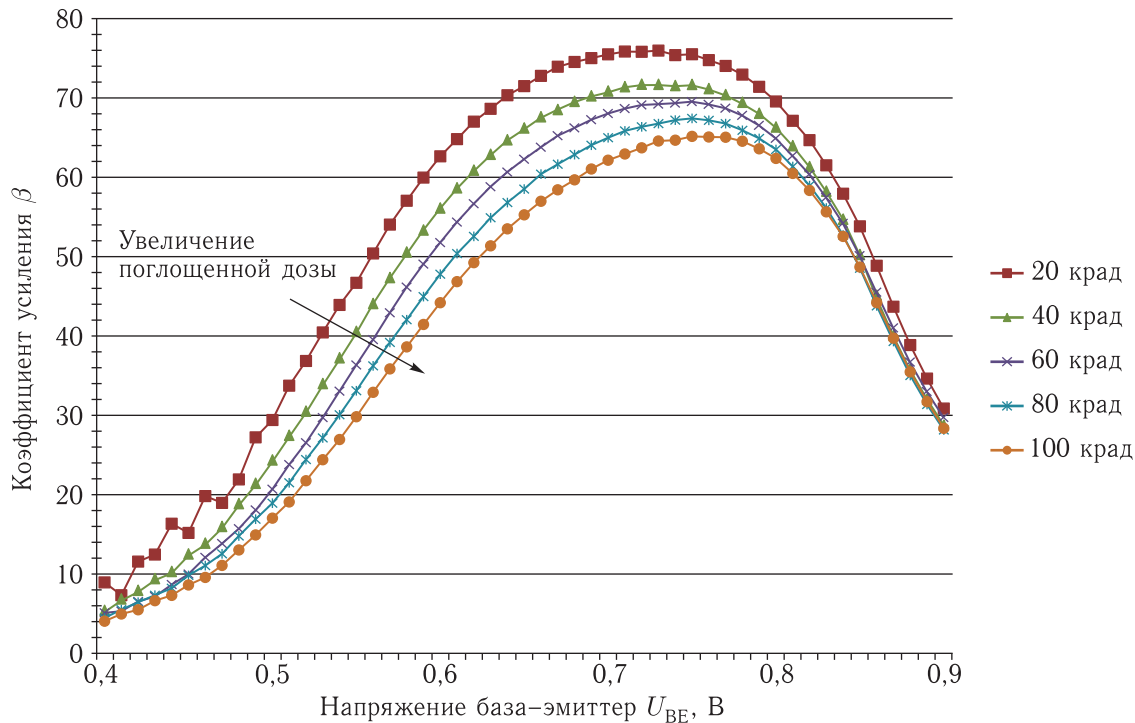


Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи по току β при $V_{CE} = 3$ В для величин поглощенной дозы 20 крад(Si), 40 крад(Si), 60 крад(Si), 80 крад(Si), 100 крад(Si)

Т а б л и ц а. Перечень исследуемых параметров транзисторов и режимы измерений

Тип КБТ	Наименование	Обозначение	Режим измерения
N115 (<i>n-p-n</i>)	Характеристика Гуммеля	$I_K(U_{BE}),$ $I_B(U_{BE})$	Общий эмиттер U_{BE} от 0,4 В до 1,2 В (шаг — 10 мВ) U_K = от 1,0 В до 8,0 В с шагом 1,0 В $T = +(25 \pm 10)^\circ\text{C}$
	Выходная ВАХ	$I_K(U_{CE})$	Общий эмиттер U_{CE} от 0 до 10 В с шагом 0,1 В I_B = от 10 мкА до 1 мА с шагом 10 мкА $T = +(25 \pm 10)^\circ\text{C}$
	Зависимость коэффициента передачи по току от напряжения база-эмиттер	$\beta(U_{BE})$	Общий эмиттер U_{BE} от 0,4 В до 1,2 В (шаг — 10 мВ) U_K = от 1,0 В до 8,0 В с шагом 1,0 В $T = +(25 \pm 10)^\circ\text{C}$
P115 (<i>p-n-p</i>)	Характеристика Гуммеля	$I_K(U_{BE}),$ $I_B(U_{BE})$	Общий эмиттер U_{BE} от -0,4 В до -0,9 В с шагом 10 мВ, U_K = от -1,0 В до -5,0 В с шагом 1,0 В $T = +(25 \pm 10)^\circ\text{C}$
	Выходная ВАХ	$I_K(U_{CE})$	Общий эмиттер U_{CE} от 0 до -5,0 В с шагом 0,2 В I_B = от -10 мкА до -1 мА с шагом 10 мкА $T = +(25 \pm 10)^\circ\text{C}$
	Зависимость коэффициента передачи по току от напряжения база-эмиттер	$\beta(U_{BE})$	Общий эмиттер U_{BE} от -0,4 В до -0,9 В с шагом 10 мВ, U_K = от -1,0 В до -5,0 В с шагом 1,0 В $T = +(25 \pm 10)^\circ\text{C}$

к указанному воздействию [7]. Изменение базового тока под действием радиационного излучения влияет на коэффициент передачи по току, что наглядно отражено на рис. 3.

В процессе радиационного облучения все образцы сохранили работоспособность, их параметры при нормальных условиях до и после исследований соответствуют заданным техническим требованиям. Полученные экспериментальные характеристики, отражающие изменения параметров КБТ при воздействии ДФКП, могут быть применены для разработки SPICE-моделей.

Моделирование вертикальных биполярных транзисторов проведено для поглощенных доз 20, 40, 60, 80 и 100 крад(Si). В ходе моделирования применялась модель биполярного транзистора Гуммеля-Пуна.

Одним из требований к адекватности модели объекта исследования является наличие физически объяснимого поведения модели при различных

сочетаниях физических или технологических параметров. Это становится возможным при синтезе модели на основе физических представлений о работе транзистора [3].

Процесс моделирования зависимостей электрических параметров КБТ включает в себя три стадии:

1. Симуляция характеристик с помощью программы-симулятора.
2. Оптимизация параметров с помощью встроенных алгоритмов в автоматическом режиме; для данного этапа использовался алгоритм Левенберга-Марквардта.
3. Оптимизация параметров в ручном режиме.

На рис. 4, 5, 6 приведены результаты моделирования образцов КБТ для максимальной поглощенной дозы 100 крад(Si).

Результаты исследований биполярных транзисторов, отраженные на рис. 2, 3, показывают, что при воздействии ионизирующего излучения

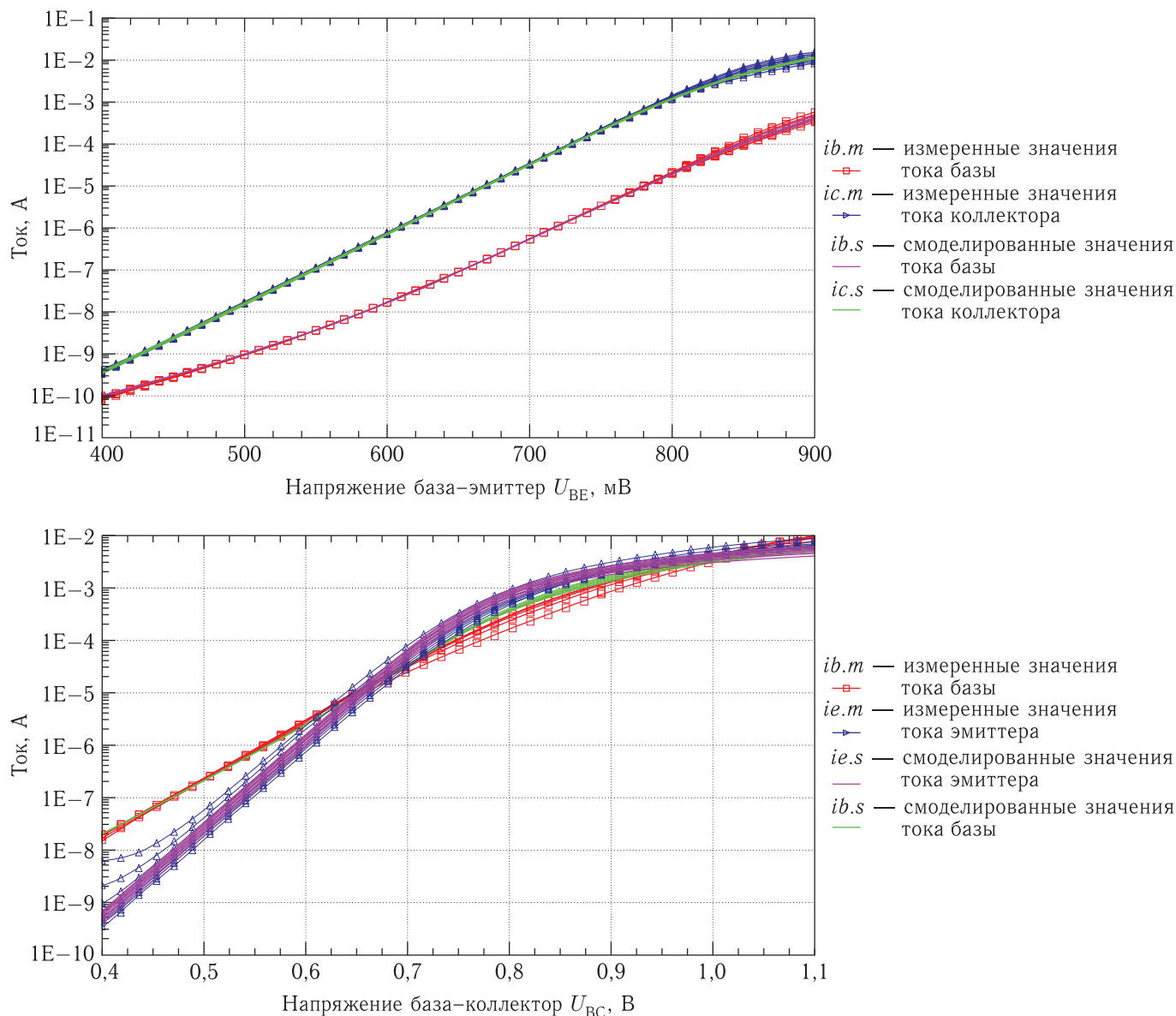


Рис. 4. Экспериментальная и синтезированная характеристики Гуммеля для поглощенной дозы 100 крад(Si) в прямом и обратном включениях

на биполярный транзистор возрастает ток базы. Это связано с ростом темпа рекомбинации, вызванного увеличением плотности поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO₂ и плотности заряда в оксиде, так как радиационно-индуцированные эффекты встраиваются как в слои оксида, так и на границе раздела оксид-полупроводник.

Исходя из вышесказанного радиационная деградация базового тока определяется увеличением параметров ISE и NE [5]. На рис. 7 приведены зависимости величин параметров ISE и NE от по-

глощенной дозы, позволяющие сделать вывод о соответствии SPICE-модели процессу радиационной деградации биполярного транзистора с точки зрения физики.

Заключение

Использование SPICE-моделей компонентов интегральных схем, учитывающих влияние ДФКП, в процессе анализа и верификации разрабатываемых

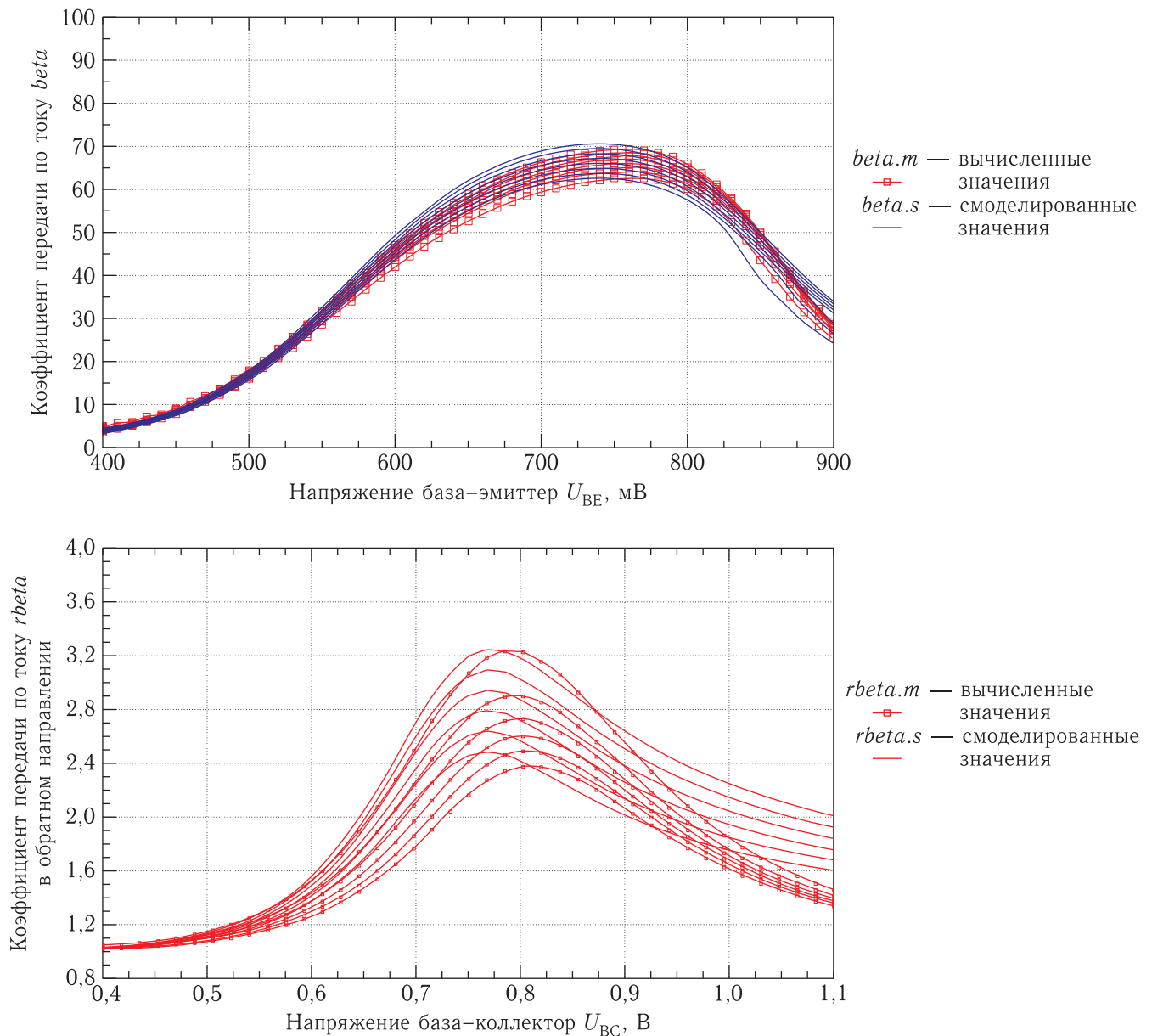


Рис. 5. Экспериментальная и синтезированная зависимости коэффициента передачи по току β для поглощенной дозы 100 крад(Si) в прямом и обратном включениях

мого проекта является одним из способов прогнозирования работоспособности ИС в условиях КП, оказывающих негативное влияние на ИС и ПП и приводящих к различным нарушениям их функционирования.

В работе представлены результаты разработки SPICE-моделей комплементарных биполярных транзисторов с учетом радиационной деградации под воздействием гамма-излучения.

В ходе работы были решены следующие задачи:

1. Проведены радиационные исследования транзисторов на источнике гамма-квантов ^{60}Co с энергией 1,25 МэВ. Измерены вольт-амперные характеристики приборов для накопленных доз из диапазона от 0 до 100 крад(Si).

2. По экспериментальным характеристикам проведена процедура экстракции SPICE-параметров для значений дозы 20, 40, 60, 80, 100 крад(Si).

3. Произведено моделирование параметров использованием модели Гуммеля–Пуна.

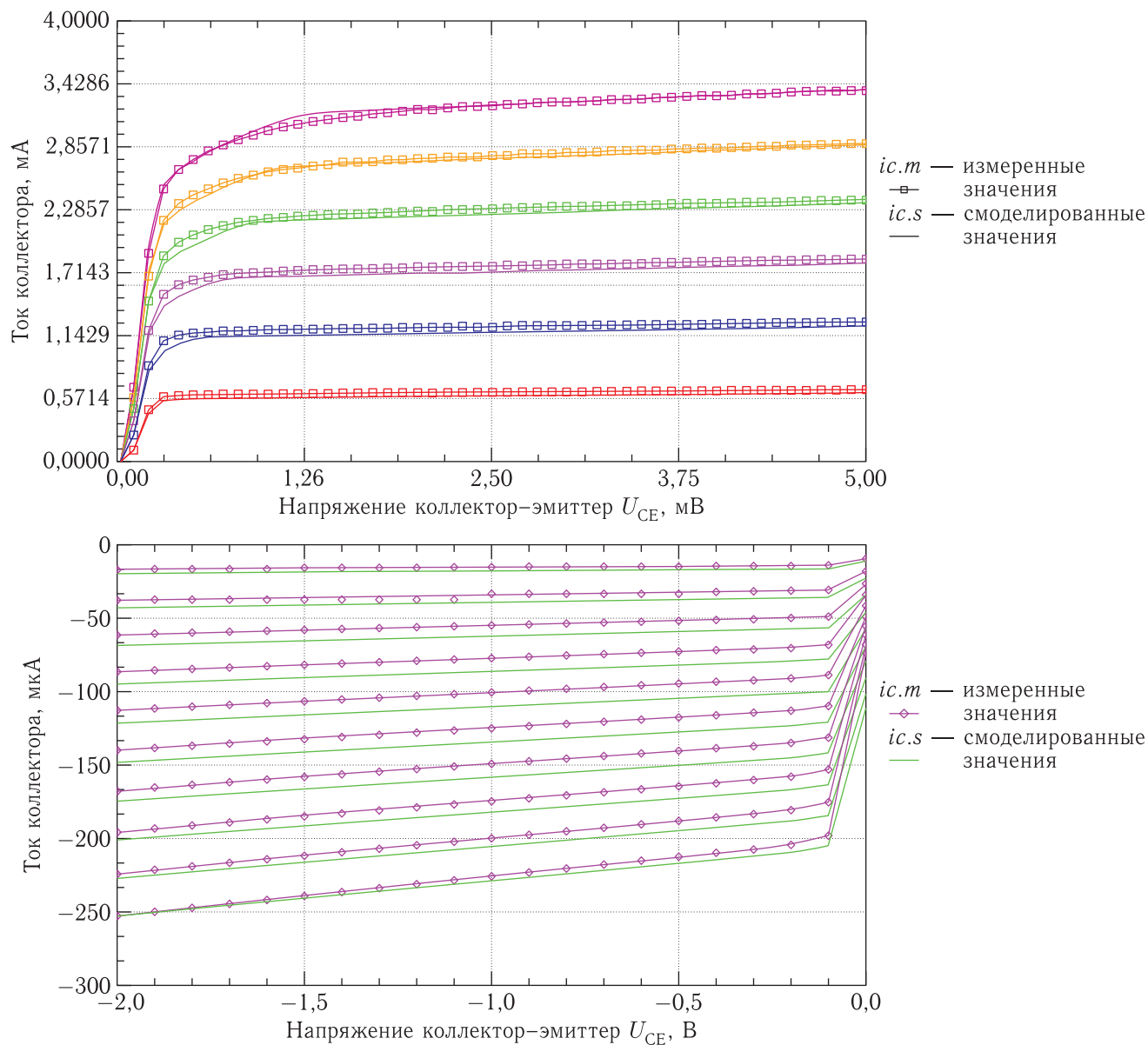


Рис. 6. Экспериментальная и синтезированная выходные вольт-амперные характеристики для поглощенной дозы 100 крад(Si) в прямом и обратном включениях

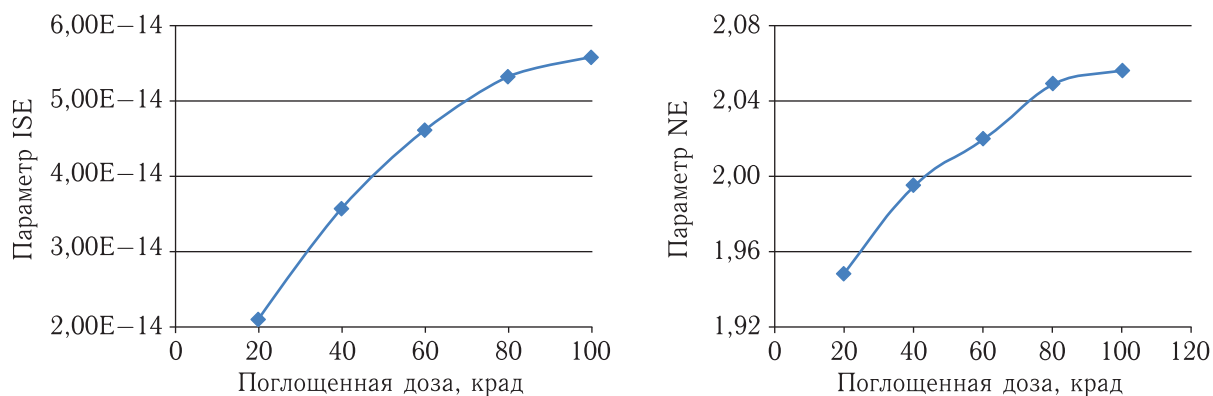


Рис. 7. Зависимость значения параметров SPICE-модели ISE и NE от поглощенной дозы

В результате моделирования получен набор значений радиационно-зависимых параметров, непосредственно экстрагированных для каждой дозы.

Достоинством данного подхода является обеспечение быстродействия и достоверности SPICE-модели.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о соответствии синтезированной модели физическому процессу радиационной деградации биполярного транзистора.

В дальнейшем планируется усовершенствовать данные модели аппроксимацией радиационно-зависимых параметров SPICE-модели математическими функциями от накопленной дозы с использованием языка описания аппаратуры Verilog-AMS.

Список литературы

1. *Таперо К.И., Улимов В.Н., Членов А.М.* Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 304 с.
2. *Дворников О.В., Гришков В.Н.* Комплексный подход к проектированию радиационно-стойких аналоговых микросхем. Часть 1. Учет влияния проникающей радиации в «SPICE-подобных программах // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем. Под общ. редакцией академика РАН А.Л.Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2010. С. 301–306.
3. *Денисенко В.В.* Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и наноэлектронике. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 408 с.
4. *Gummel H. K., Poon H. C.* An Integral Charge Control Model of Bipolar Transistors // Bell System Technical Journal, 1970, vol. 49, is. 5. P. 827–852.
5. *Bakerenkov A. S., Pershenkov V. S., Solomatin A. V., Belyakov V. V., Shurenkov V. V.* Radiation degradation modeling of bipolar operational amplifier input offset voltage in LTSpice IV // Applied Mechanics and Materials, 2014, vol. 565. P. 138–141.
6. ОСТ 134-1034-2012 Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам. 2012. 37 с.
7. *Barnaby H.J.* Total Dose Effects in Linear Bipolar Integrated Circuits // International Journal of High Speed Electronics and Systems, 2004, vol. 14, № 2. P. 519–541.