

Министерство промышленности и торговли РФ  
Межведомственный совет главных конструкторов  
по электронной компонентной базе  
Государственная корпорация «Ростех»  
ОООП «СоюзМаш России»  
Координационный совет разработчиков  
и производителей РЭА, ЭКБ и продукции машиностроения  
АО «Российская электроника»  
АО «НИИМА «Прогресс»  
НП «Глонасс»  
НИУ МИЭТ

Информационный партнер АО «ТЕХНОСФЕРА»

## Международный форум «Микроэлектроника-2016».

2-я научная конференция «Интегральные схемы  
и микроэлектронные модули»:

Республика Крым,  
г. Алушта, 26–30 сентября 2016 г.

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2016



УДК 621.3.049.77

ББК 38.844.1

М43

**Международный форум «Микроэлектроника-2016». 2-я научная конференция «Интегральные схемы и микроэлектронные модули». Республика Крым, г. Алушта, 26–30 сентября 2016 г. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 504 с.**

В сборник включены доклады конференции, освещающие актуальные вопросы разработки, производства и применения отечественных интегральных схем и высокоинтегрированных микроэлектронных модулей.

*Оргкомитет Форума выражает особую благодарность Шелепину Николаю Алексеевичу за активную и профессиональную помощь при подготовке программы конференции и тезисов докладов.*

© 2016, ООО «ПрофКонференции»

© 2016, АО «НИИМА «Прогресс»

© 2016, Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

© 2016, АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

Построение сетей на кристалле для многопроцессорных систем <i>Бандурин Н. С.</i> .....	271
<b>МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ САПР СБИС</b> .....	272
Проектирование интегральных схем на FinFET-транзисторах: вызовы и решения	
<i>Меликян В. Ш., д. т. н., профессор, член-корр. НАН Республики Армения</i> .....	272
Эволюция процесса разработки системы на кристалле <i>Попов И. А.</i> .....	278
Схемотехнические SPICE-модели элементов БИС, учитывающие радиационные эффекты <i>Петросяц К. О., д. т. н., профессор</i> .....	281
Разработка методов моделирования установившихся периодических режимов схем автогенераторов <i>Гурарий М. М., к. т. н., с. н. с., Жаров М. М., к. т. н., в. н. с., Русаков С. Г., чл-корр. РАН, д. т. н., г. н. с., профессор, Ульянов С. Л., д. т. н., г. н. с.</i> .....	283
Моделирование электрических характеристик схем на мемристорах средствами систем автоматизации схемотехнического проектирования <i>Ракитин В. В., Русаков С. Г., член-корр. РАН, д. т. н., профессор</i> .....	285
Моделирование электрических схем с учетом влияния ТЗЧ в отечественной САПР <i>Кокин С. А., Перминов В. Н., Волков С. И., Морозов С. А.</i> .....	287
Моделирование радиоэлектронной аппаратуры с применением автоматизированной системы комплексного моделирования АСКМ «Прогресс». Перспективы развития <i>Шалунов А. С., д. т. н., профессор, Урюпин И. С., к. т. н.</i> .....	288
Моделирование характеристик ФАПЧ на основе представления фазовой макромодели в виде эквивалентной электрической схемы <i>Гурарий М. М., Жаров М. М., Ионов Л. П., Мухин И. И., Русаков С. Г., член-корр. РАН, д. т. н., профессор, Ульянов С. Л.</i> .....	290
Программный комплекс для автоматизации процесса подготовки управляющей информации для изготовления фотошаблонов <i>Иванов В. В., Медведев К. А.</i> .....	292
Вопросы сопряжения системы приборно-технологического моделирования с библиотекой алгоритмов оптимизации <i>Амирханов А. В., к. ф.-м. н., Глушко А. А., к. т. н., доцент, Гладких А. А., к. т. н., доцент, Макаrchук В. В., к. т. н., доцент, Шахнов В. А., д. т. н., профессор</i> .....	294
Использование современных моделей искусственных нейронных сетей для анализа дефектов при изготовлении субмикронных СБИС <i>Амирханов А. В., к. ф.-м. н., Аристов Р. С., Власов А. И., к. т. н., доцент, Гладких А. А., к. т. н., доцент, Захарченко А. А., к. ф.-м. н., Макаrchук В. В., к. т. н., доцент</i> .....	296



моделирования, интеграции и верификации. А это в конечном итоге повышает вероятность успеха конечного продукта на сложном и динамичном рынке современных SoC.

УДК 621.382.3; 004.492

## Схемотехнические SPICE-модели элементов БИС, учитывающие радиационные эффекты

Петросянц К. О.<sup>1,2</sup>, д. т. н., профессор

<sup>1</sup> Научно-исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
(Московский институт электроники и математики)  
123458, г. Москва, ул. Таллинская, д. 34

<sup>2</sup> Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН  
124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, д. 3  
+7(495) 772-95-90, доб. 15208, kpetrosyants@hse.ru

**Ключевые слова:** БТ и МОП-транзисторы, SPICE-модели, радиационные эффекты, экстракция параметров моделей, схемотехнически САПР.

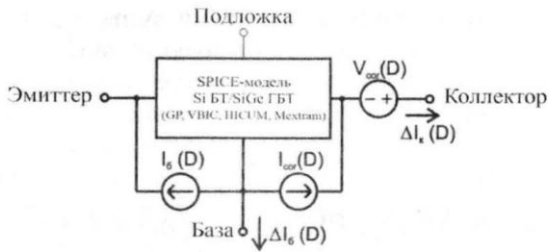
Для проектирования радиационно-стойких Би-КМОП БИС разработаны универсальные компактные SPICE-макромодели биполярных и МОП-транзисторов, учитывающие радиационные воздействия гамма-лучей, нейтронов, электронов, протонов, импульсного излучения и отдельных ядерных частиц. Радиационные эффекты учитываются путем:

- 1) подключения в стандартную эквивалентную схему прибора дополнительных схемных элементов, учитывающих эффекты, вызванные радиацией;
- 2) введения в стандартные уравнения, описывающие прибор, дополнительных выражений для радиационно-зависимых параметров.

По сравнению с традиционным набором частных моделей, каждая из которых учитывает отдельно только один вид радиационного воздействия, использование в схемотехнических САПР БИС универсальных моделей БТ и МОП-транзисторов, учитывающих одновременно все виды радиации, обеспечивает разработчику схем серьезные практические преимущества.

Универсальные макромодели БТ и МОП-транзисторов состоят из трех частей:

- 1) базового ядра, включающего в себя стандартные модели прибора, встроенные в коммерческие версии программы SPICE (или ее аналогии);
- 2) дополнительно подключаемой подсхемы, учитывающей влияние различных видов радиации;
- 3) набора специальных выражений, описывающих радиационно-зависимые параметры элементов ядра и подсхемы.



**Рис. 1.** Универсальная макромоделль БТ, учитывающая статические виды радиации (генераторы тока для импульсного воздействия и ОЯЧ на схеме не показаны)

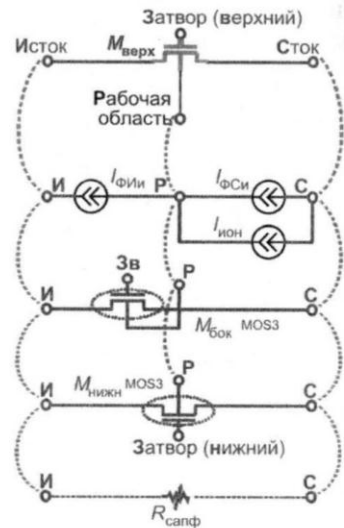
Для SiGe и SiGe ГБТ ядро включает в себя стандартные модели EM, VBC, HICUM и MEXTRAM. Подсхема состоит из генераторов тока, учитывающих радиационно-индуцированные токи базы и коллектора, обусловленные стационарным и импульсным излучением и ОЯЧ. Причем стационарные виды излучения (нейтроны, гамма-лучи, электроны, протоны) учитываются с помощью одного и того же набора генераторов тока. В зависимости от вида облучения меняются только параметры этих генераторов.

По сравнению с существующими аналогами в макромоделе учтены радиационные сдвиги таких важных для БТ параметров, как  $U_{кэнас}$ ,  $V_A$ ,  $U_{кэпроб}$  (см. рис. 1).

Для МОПТ на объемном кремнии ядро включает в себя стандартные модели BSIM и EKV.

Для МОПТ на КНИ/КНС используются их версии BSIM SOI и EKV SOI, в которых учитываются радиационно-индуцированные токи утечки по нижнему каналу и боковой STI-изоляции. Влияние различных видов радиации учитывается путем подключения дополнительной подсхемы (см. рис. 2).

Для определения параметров SPICE-RAD макромоделли БТ (рис. 1) и МОПТ (рис. 2) разработаны методики, использующие программу-экстрактор параметров моделей IC-CAP и/или полуавтоматические процедуры, исходными данными для которых являются результаты измерений необлученных и облученных транзисторов или результаты TCAD-RAD-моделирования.



**Рис. 2.** Макромоделль МОПТ, учитывающая различные виды радиационного воздействия



Макромодели включены в коммерческие пакеты программ SPECTRE, ELDO, HSPICE.

Погрешность моделей составляет 10—15% при описании статических характеристик и 20—25% — динамических.

Высокая эффективность от использования разработанных макромоделей продемонстрирована на примерах расчета цифровых и аналоговых фрагментов радиационно-стойких КМОП и Би-КМОП БИС, изготовленных по различным технологиям.

#### *Выводы*

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

1. Для биполярных и МОП-транзисторов разработаны универсальные SPICE-макромодели, учитывающие одновременно воздействия различных видов радиации (стационарного, импульсного излучения и ОЯЧ).

2. Разработаны процедуры экстракции параметров SPICE-RAD-макромоделей БТ и МОПТ, использующие специально подобранные наборы тестовых структур и универсальный экстрактор IC-CAP.

3. По своим функциональным возможностям и точности описания характеристик БТ и МОПТ, подвергнутых различным видам радиационного воздействия, разработанные SPICE-RAD-макромодели превышают возможности существующих отечественных и зарубежных аналогов.

***Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ  
(грант № 14-29-09145)***

УДК 004.021; 621.38

### **Разработка методов моделирования установившихся периодических режимов схем автогенераторов**

**Гурарий М. М.**, к. т. н., с. н. с.  
*gourary@ippm.ru*

**Жаров М. М.**, к. т. н., в. н. с.  
*zarov@ippm.ru*

**Русаков С. Г.**, чл.-корр. РАН, д. т. н., г. н. с., профессор  
*rusakov@ippm.ru*

**Ульянов С. Л.**, д. т. н., г. н. с.  
*ulyas@ippm.ru*

*Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (ИППМ РАН)  
124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, д. 3  
www.ippm.ru*

Производство книг на заказ  
Издательство «ТЕХНОСФЕРА»  
125319, Москва, а/я 91  
тел.: (495) 234-01-10  
e-mail: [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru)

Реклама в книгах:

- модульная
- статьи

Подробная информация о книгах на сайте  
<http://www.technosphera.ru>

**Международный форум «Микроэлектроника-2016».**  
**2-я научная конференция «Интегральные схемы**  
**и микроэлектронные модули».**

**Республика Крым,**  
**г. Алушта, 26–30 сентября 2016 г.**

Компьютерная верстка – С.С. Бегунов  
Корректор – Н.А. Шипиль  
Дизайн – М.А. Костарева  
Выпускающий редактор – С.Ю. Артемова  
Ответственный за выпуск – С.А. Орлов

---

Подписано в печать 05.09.2016  
Формат 60х90/16. Печать офсетная  
Гарнитура Ньютон  
Печ.л. 31,5. Тираж 350 экз. Зак. №7483  
Бумага офсет №1, плотность 80 г/м<sup>2</sup>

---

Издательство «ТЕХНОСФЕРА»  
Москва, ул. Краснопролетарская, д.16, стр.2

---

АО «НИИМА «Прогресс»  
125183, г. Москва, проезд Черепановых, д. 54  
Тел. (499) 153-0311, 153-0131  
Факс: (499) 153-0161  
[info@mri-progress.ru](mailto:info@mri-progress.ru)  
[niima@mri-progress.ru](mailto:niima@mri-progress.ru)

---

Отпечатано в цифровой типографии ООО «Буки Веди»  
на оборудовании Konica Minolta  
г. Москва, Партийный переулок, д.1, корп. 58, стр.1  
Тел.:(495)926-63-96, [www.bukivedi.com](http://www.bukivedi.com), [info@bukivedi.com](mailto:info@bukivedi.com)