



# СОСТОЯНИЕ РАБОТ В ОБЛАСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОМПОНЕНТОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ

## THE STATUS OF SEMICONDUCTOR COMPONENTS MODELING WITH RESPECT TO THERMAL AND RADIATION EFFECTS

УДК 621.382.3: 004.942

ПЕТРОСЯНЦ КОНСТАНТИН ОРЕСТОВИЧ<sup>1,2</sup>

*Д. т. н., профессор*  
kpetrosyants@hse.ru

PETROSYANTS KONSTANTIN O.<sup>1,2</sup>

*Sc.D., professor*  
kpetrosyants@hse.ru

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

<sup>2</sup> Институт проблем проектирования в микроэлектронике  
Российской академии наук  
124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3.

<sup>1</sup> National Research University “Higher School of Economics”  
(Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Department  
of Electronics Engineering)

34 Tallinskaya St., Moscow, 123458, Russia

<sup>2</sup> Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian  
Academy of Sciences (IPPM RAS)  
3 Sovetskaya St., Zelenograd, Moscow, 124365, Russia

Приведены результаты анализа отечественных и зарубежных работ в области TCAD- и SPICE-моделирования компонентов КМОП, КМОП КНИ, SiGe БиКМОП СБИС, предназначенных для работы в условиях воздействия радиации (нейтроны, электроны, протоны,  $\gamma$ - и X-лучи, ОЯЧ, импульсное воздействие), высоких (до +300 °C) и низких (до –200 °C) температур. Описаны TCAD и SPICE модели биполярных и МОП транзисторов, а также методы определения их параметров. Отмечены направления дальнейшего развития методов TCAD и SPICE моделирования компонентов п/п БИС.

*Ключевые слова:* биполярные; МОП; JFET компоненты БИС; радиационные эффекты; влияние высоких и низких температур; TCAD и SPICE модели; многоуровневое сквозное моделирование; экстракция параметров моделей.

The article highlights the status of TCAD and SPICE modeling of CMOS, SOI CMOS, SiGe BiCMOS VLSI components intended for operation under the influence of radiation (neutrons, electrons, protons,  $\gamma$ - and X-ray, single particle, pulsed radiation), high (up to +300 °C) and low (up to –200 °C) temperatures. TCAD and SPICE models of BJTs and MOSFETs, and methods for determining their parameters have been described. Further directions of TCAD and SPICE modeling of IC components have been considered.

*Keywords:* BJT; MOSFET; JFET IC components; radiation effects; low and high temperature effects; TCAD and SPICE models; multi-level modeling; model parameter extraction.

Моделирование полупроводниковых компонентов является обязательным этапом в цикле проектирования БИС, СнК, систем на печатных платах, электронных узлов и блоков, работающих в условиях воздействия ВВФ (различных видов радиации, а также высокой и низкой температуры). Проведение моделирования позволяет значительно сократить объем трудоемких и дорогостоящих натуральных испытаний, особенно на начальных этапах приборно-технологического и схемотехнического проектирования ЭКБ.

Количество заказчиков и производителей электроники для авиационно-космической, ядерной, научно-исследовательской, бортовой, телекоммуникационной и др. специальной аппаратуры в мире увеличивается, что в последнее время стимулировало заметный прогресс в области разработки САПР и систем моделирования ЭКБ с учетом ВВФ как у нас в стране, так и за рубежом, особенно в США, передовых странах ЕС, Китае.

В настоящей работе проведен анализ отечественных и зарубежных разработок в области TCAD- и SPICE-моделирования электронных компонентов, предназначенных для работы в условиях действия различных видов радиации, высоких и низких температур.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ С УЧЕТОМ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ

За рубежом особенно заметен прогресс в области 2D/3D TCAD-моделирования современных полупроводниковых структур с глубоко субмикронными и нанометровыми размерами. Помимо признанных симуляторов TCAD Sentaurus Synopsys и SILVACO Victory, на рынке появился ряд TCAD-симуляторов других фирм, в частности GTS (Global TCAD Solution) [1], COGENDA (Integrated Solutions for EDA/TCAD RadHard) [2], Synopsys GSS (Gold Standard Simulation) [3], которые начинают играть заметную роль в области RadHard-моделирования. В работе дается характеристика программных продуктов фирм — производителей TCAD-систем, их возможностей при расчете компонентов современных СБИС различных типов при воздействии радиации. Перечисленные TCAD-симуляторы отличаются друг от друга количеством и глубиной описания физических эффектов, индуцированных воздействием радиации, удобством эксплуатации и обработки результатов моделирования, что в конечном итоге определяет границы их применимости в практических расчетах радиационной стойкости конкретных приборов.



Следует отметить, что фирма SILVACO является партнером NASA, а также ряда ведущих компаний — производителей элементной базы БИС в части моделирования радиационной стойкости полупроводниковых компонентов, предполагаемых к использованию в ответственных применениях [4].

Отмечается роль отечественных специалистов — пользователей TCAD Sentaurus Synopsys на примерах разработок радиационно-стойкой элементной базы на основе КМОП-, КМОП КНИ-, SiGe БиКМОП-технологий [5], [6], [11–13]. Из отечественных работ следует выделить работы [5] и [6], в которых на базе TCAD-симулятора Sentaurus Synopsys впервые разработаны адекватные модели воздействия нейтронов и протонов на 2D/3D-структуры биполярных и МОП-приборов.

Другая ситуация наблюдается в области SPICE-RAD-моделей для биполярных и МОП-приборов, подвергнутых воздействию различных видов радиации. В последнее время за рубежом разработаны модели МОПТ и КНИ МОПТ, учитывающие воздействие суммарной дозы и ОЯЧ [7–10], предназначенные для использования в схемотехнических SPICE-подобных симуляторах. Наиболее интенсивно используются модели, учитывающие воздействие ОЯЧ на сбоеустойчивость ячеек памяти и цифровых схем. Как правило, для моделирования импульса радиационно-индуцированного тока (заряда) используется стандартная двухэкспоненциальная модель [14], реже используется более сложная модель [7], учитывающая дрейфо-диффузионный механизм растекания индуцированного заряда в направлении трека ОЯЧ. Из отечественных SPICE-моделей МОПТ-транзисторов следует отметить [15–20]. Универсальная модель [15], учитывающая одновременно стационарное дозовое воздействие, импульсивное воздействие и влияние ОЯЧ в МОПТ, изготовленных на основе объемной и КНИ-технологий, является наиболее современной из перечисленных выше отечественных и зарубежных моделей как в части учета радиационных эффектов, так и в части отработанной системы экстракции ее параметров.

Компактные модели биполярных транзисторов для расчета схем строятся на базе стандартных SPICE-моделей GP, VBIC, HICUM, MEXTRAM, в которые пользователем включаются дополнительные элементы или выражения, учитывающие конкретный вид радиационного воздействия [20–25]. Все эти модели в открытом доступе не реализуются в SPICE-подобных симуляторах, за исключением симулятора SmartSpice RadHard (SILVACO), в котором используется модифицированная модель БТ Мессенджера Г. [21]. Из всех перечисленных наиболее эффективной и пригодной для расчета схем на БТ, подвергнутых воздействию нейтронов, электронов,  $\gamma$ - и X-лучей, протонов, ОЯЧ, является, на наш взгляд, универсальная отечественная модель [24], которая одновременно с радиацией учитывает влияние высоких и низких температур. Все остальные отечественные и зарубежные модели учитывают только один конкретный вид радиации.

### ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

TCAD-симуляторы, как правило, используются для анализа электротепловых эффектов, возникающих в биполярных и МОП-структурах вследствие эффекта саморазогрева, обусловленного высокой плотностью рассеиваемой мощности [26] и [27]. Расчет средствами TCAD электрических характеристик МОПТ КНИ, работающих в условиях внешней повышенной температуры

до  $+225^\circ\text{C}$ , выполнен в отечественной работе [28]. Зарубежные работы посвящены в основном анализу характеристик компонентов на основе карбида кремния и других широкозонных материалов, являющихся перспективными кандидатами для реализации высокотемпературных ИС [29].

Заметно возрос интерес к компактным SPICE-моделям МОП- и биполярных транзисторов. Это обусловлено активизацией у нас в стране и за рубежом работ по созданию ИС высокотемпературной электроники с рабочими температурами до  $+300^\circ\text{C}$  и выше.

Наиболее перспективными для создания высокотемпературных ИС и БИС признаны КМОП-структуры на КНИ-подложках. Общий подход к созданию SPICE-моделей для высокотемпературных КМОП КНИ БИС заключается в следующем. В базовые модели МОПТ КНИ BSIM SOI v.3, BSIM SOI v.4, EKV-SOI включаются дополнительные выражения для основных температурно-зависимых параметров: порогового напряжения, подвижности, предпорогового наклона, токов утечки и др. Такой подход позволяет расширить границы применимости моделей от традиционных  $+150^\circ\text{C}$  до  $+300^\circ\text{C}$  и выше. Среди зарубежных работ, посвященных High-T SPICE-моделям МОПТ, следует выделить [30–31], среди отечественных — [32–34]. Все перечисленные модели демонстрируют примерно одинаковые результаты для приборов с минимальными размерами 0,5–0,18 мкм в диапазоне температур до  $300^\circ\text{C}$ .

### ВОЗДЕЙСТВИЕ СВЕРХНИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Очевидный интерес к приборам, работающим в сверхнизком (криогенном) диапазоне температур, проявляется со стороны космических агентств NASA и «Роскосмос». К сожалению, физика сверхнизких температур (жидкого азота 77 К и жидкого гелия 4 К) для полупроводниковых биполярных и МОП-компонентов ИС и БИС не отработана в достаточной степени, поэтому удовлетворительные модели TCAD Low-T за рубежом и у нас в стране отсутствуют.

В области создания моделей SPICE Low-T, параметры которых определяются не теоретически, а на основании измерений характеристик реальных приборов, работающих в диапазоне сверхнизких температур, наблюдается другая картина. Опубликован ряд зарубежных работ для биполярных SiGe ГБТ [35, 36] и МОПТ [37, 38].

Для SiGe ГБТ в [35] предложена Low-T-модификация стандартной SPICE-модели MEXTRAM 504. Однако, во-первых, работать с ней рядовому инженеру сложно и, во-вторых, процедура экстракции параметров Low-T версии модели не отработана в достаточной степени. В работе [36], наоборот, предложена формальная, простая для использования модель, базирующаяся на большом объеме измерений электрических ВАХ приборов. Однако модель справедлива только для ограниченного набора приборов, для которых имеются результаты измерений.

Эффективный подход к созданию Low-T SPICE-моделей SiGe ГБТ и JFET предложен в отечественных работах [39, 40]. Он основан на использовании базовых SPICE-моделей приборов, в которые включены дополнительные выражения для температурно-зависимых параметров модели. Это позволило расширить температурный диапазон моделей вплоть до температуры жидкого гелия (4 К,  $-270^\circ\text{C}$ ).

На основании проведенного анализа автором сделаны следующие выводы:



1. За рубежом и у нас в стране наблюдается прогресс в области САПР и моделирования полупроводниковых приборов и компонентов ИС с учетом ВВФ, что является следствием возрастающей роли разработок ЭКБ для экстремальных и ответственных применений.
2. Специализированные TCAD-симуляторы широко используются разработчиками радиационно- и температурно-стойких ИС и БИС:
  - они универсальны и пригодны для широкой гаммы полупроводниковых приборов, от мощных и силовых, до субмикронных и наноразмерных последних конструкций;
  - на физическом уровне учитывают основные эффекты, обусловленные как раздельным, так и совместным действием радиации и температуры;
  - позволяют обоснованно заменить часть информации, получаемой от трудоемких и дорогостоящих натуральных испытаний полупроводниковых приборов в условиях действия ВВФ, на виртуальные расчеты на ЭВМ, существенно сократив при этом временные, трудовые и стоимостные затраты;
  - передовому зарубежному уровню соответствует отечественная версия TCAD RadHard-симулятора с функционально полным набором радиационных электрофизических модулей, описанная в [6, 4].
3. Компактные SPICE-модели Si/SiGe БТ и МОПТ для расчета БИС с учетом ВВФ строятся на основе стандартных SPICE-моделей, в которые включаются дополнительные выражения и схемотехнические элементы, учитывающие радиационные и температурные эффекты. Основные тенденции при создании SPICE-моделей:
  - учет в рамках одной модели нескольких видов радиации;
  - расширенный диапазон температур: до +300 °С в области высоких и до -200 °С в области низких температур;
  - возможность учета в рамках одной модели совместного влияния радиации и температуры.
 Перечисленным требованиям в наибольшей степени удовлетворяют отечественные модели Si/SiGe БТ [24, 39] и МОПТ [15, 42].
4. Ближайшими перспективными задачами в области САПР компонентов ИС и БИС являются:
  - реализация двухэтапного сквозного маршрута TCAD-SPICE RAD-THERM-моделирования, исходными данными для которого являются: параметры ВВФ, описание технологического процесса изготовления и топологии полупроводникового прибора, а конечным результатом — набор SPICE-параметров модели полупроводникового прибора для схемотехнического проектирования с учетом ВВФ.
  - SPICE-модели межсоединений ИС и БИС в виде компактных пассивных  $R_{T/RAD}$ - $C_{T/RAD}$ -цепей с температурно- или радиационно-зависимыми параметрами.
6. Petrosyants K. O., Popov D. A., Kozhukhov M. V. General Approach to TCAD Simulation of BJT/HBT and MOSFET Structures after Proton Irradiation // Proc. of IWRMN-EDHE 2017, May 2017, Chengdu, China.
7. Kauppila J., Sternberg A., Alles M., Francis A., Holmes J., Amusan O., Massengill L., Bias-Dependent Single-Event Compact Model Implemented Into BSIM4 and a 90nm CMOS Process Design Kit, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, Vol. 56, № 6, December 2009, pp. 3152–3157.
8. Sanchez Esqueda I., Barnaby H. J., King M. P. (2015) Compact Modeling of Total Ionizing Dose and Aging Effects in MOS Technologies. IEEE T Nucl Sci 62(4):1501–1515.
9. Bu J., Bi J., Liu M., Han Z., A Total Dose Radiation Model for Deep Submicron PDSOI NMOS // Journal of Semiconductors, Vol. 32, Number 1: 014002-1–014002-3.
10. Alvarado J., Boufouss E., Kilchytka V., Flandre D. Compact Model for Single Event Transients and Total Dose Effects at High Temperatures for Partially Depleted SOI MOSFETs // Microelectronics Reliability, — 2010, Vol. 50, pp. 1852–1856.
11. Титов А. И., Шелепин Н. А., Селецкий А. В. Исследование и разработка структур для экстракции параметров моделей схемотехнического учета дозовых радиационных эффектов субмикронных СБИС // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем — 2014. Сборник трудов / Под общ. ред. академика РАН А. Л. Стемпковского. — М.: ИППМ РАН, 2014. — Часть III. — С. 149–154.
12. Селецкий А. В., Шелепин Н. А., Смолин А. А., Уланова А. В. Исследование влияния разброса технологических параметров СБИС на стойкость к эффектам накопленной дозы радиации с помощью средств приборно-технологического моделирования // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем — 2016. Сборник трудов / Под общ. ред. академика РАН А. Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2016. Часть IV. — С. 178–183.
13. Zebrev G. I., Gorbunov M. S., Shunkov V. E. Physical Modeling and Circuit Simulation of Hardness of SOI Transistors and Circuits for Space Applications. Proc. of RADECS 2006.
14. Wirth G. I., Vieira M. G., Kastensmidt F. G. L. (2007) Accurate and Computer Efficient Modelling of Single Event Transients in CMOS Circuits. IET Circ Device Syst 1(2):137–142.
15. Petrosyants K. O., Sambursky L. M., Kharitonov I. A., Lvov B. G. Radiation-Induced Fault Simulation of SOI/SOS CMOS LSI's Using Universal Rad-SPICE MOSFET Model // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications (JETTA), 2017, Vol. 33, № 1, pp. 37–51.
16. Zebrev G. I., Gorbunov M. S. (2009) Modeling of Radiation-Induced Leakage and Low Dose-Rate Effects in Thick Edge Isolation of Modern MOSFETs. IEEE T Nucl. Sci. 56(4): pp. 2230–2236.
17. Дворников О. В. Комплексный подход к проектированию радиационно-стойких аналоговых микросхем. Часть 2. Базовые схемотехнические решения АБМК 1–3 // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем — 2010. Сборник трудов / Под общ. ред. академика А. Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2010. — С. 283–288.
18. Дворников О. В., Гришков В. Н. Учет влияния проникающей радиации в Spice-подобных программах // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем — 2010. Сборник трудов / Под общ. ред. академика А. Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2010. — С. 301–306.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.globalcad.com/en/home.html>.
2. <https://www.cogenda.com>.
3. [www.goldstandardsimulations.com](http://www.goldstandardsimulations.com).
4. Turowski M. Physically Based Radiation Effects Analysis and Radiation Hardness // Proc. of IWRMN-EDHE 2017, May 2017, Chengdu, China.
5. Petrosyants K. O., Kozhukhov M. V. Physical TCAD Model for Proton Radiation Effects in SiGe HBTs // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2016, Vol. 63, № 4, pp. 2016–2021.



19. Адамов Д., Кокин С., Макаров С., Стешенко В., Перминов В. Российская система проектирования ИС АВОКАД // Современная электроника. — 2010. — № 9. — С. 56–59.
20. Петросянц К. О., Харитонов И. А. Модели МДП и биполярных транзисторов для схемотехнических расчетов БИС с учетом радиационного воздействия // Микроэлектроника РАН. — 1994. — Т. 23. — № 1. — С. 21–34.
21. Kleiner C. T., Messenger G. C. An Improved Bipolar Junction Transistor Model for Electrical and Radiation Effects, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. NS-29, № 6, December 1982, pp. 1569–1579.
22. Leroux P., De Cock W., Van Uffelen M., Steyaert M. Modeling, Design, Assessment of 0.4  $\mu\text{m}$  SiGe Bipolar VCSEL Driver IC Under  $\gamma$ -Radiation // *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2009, Vol. 56, № 4, pp. 1920–1925.
23. Deng Yanqing, Fjeldly T. A., Ytterdal T., Shur M. S. SPICE Modeling of Neutron Displacement Damage and Annealing Effects in Bipolar Junction Transistors // *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2003, Vol. 50, № 6, pp. 1873–1877.
24. Петросянц К. О., Кожухов М. В. SPICE-модели кремниевых БТ и кремний-германиевых ГБТ, учитывающие влияние радиационных факторов // Труды международной научно-практической конференции International Scientific-Practical Conference. INNOVATIVE INFORMATION TECHNOLOGIES, Prague, 2013, April 22–26 / Отв. ред.: Иванов И. А. / Под общ. ред.: С. У. Увайсов; науч. ред.: Увайсов С. У. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. — Т. 3. — С. 320–326.
25. Дворников О., Шульгевич Ю. Методы идентификации параметров моделей интегральных транзисторов Часть 1. Расчет Spice-параметров биполярных транзисторов с использованием конструктивно-технологических и электрофизических параметров // Современная электроника. — 2009, № 5. — С. 48–53.
26. Чаплыгин Ю. А., Крупкина Т. Ю., Красюков А. Ю., Артамонова Е. А. Исследование влияния конструктивно-технологических параметров мощных КНИ МОП-транзисторов на границы области безопасной работы приборов // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем — 2010. Сборник трудов / Под общ. ред. академика А. Л. Стемповского. М.: ИППМ РАН, 2010. — С. 654–657.
27. Petrosyants K. O., Torgovnikov R. Electro-Thermal Modeling of Trench-Isolated SiGe HBTs Using TCAD, in: 31th Semiconductor Thermal Measurement, Modeling and Management Symposium. San Jose: IEEE, 2015, pp. 172–174.
28. Чаплыгин Ю. А., Крупкина Т. Ю., Красюков А. Ю., Артамонова Е. А. Исследование электрических характеристик КМОП-КНИ-структур с проектными нормами 0,5  $\mu\text{m}$  для высокотемпературной электроники // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем — 2016. Сборник трудов / Под общ. ред. академика РАН А. Л. Стемповского. М.: ИППМ РАН, 2016. Часть IV. — С. 10–15.
29. Chan C. W., Li F., Sanchez A., Mawby P. A. and Gammon P. M. Comparative Study of RESURF Si/SiC LDMOSFETs for High-Temperature Applications Using TCAD Modeling, *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES*, Vol. 99, pp. 1–6.
30. Mohamed A. Osman, Ashraf A. Osman, High Temperature Spice Modeling of Partially Depleted SOI MOSFETs, *AIP Conference Proceedings* 361, (1996), pp. 1355–1360.
31. Jeon D.-S., Burk D. E. A Temperature-dependent SOI MOSFET Model for High-Temperature Applications (27 degrees C — 300 degrees C), *IEEE Transactions on Electron Devices* (Volume: 38, Issue: 9, Sep 1991), pp. 2101–2111.
32. Бабкин С. И., Волков С. И., Новосёлов А. С. Исследование возможности использования технологии 05КНИ с вольфрамовой металлизацией для создания высокотемпературных интегральных схем // Электроника, микро- и нанoeлектроника, МИФИ/НИИСИ РАН, 2017.
33. Бенедиктов А. С., Игнатов П. В., Горнев Е. С. Интегральные схемы и микроэлектронные модули — проектирование, производство и применение, «Микроэлектроника-2015», 28 сентября — 3 октября 2015, Крым, Алушта. — С. 265–266.
34. Petrosyants K. O., Lebedev S. V., Sambursky L. M., Stakhin V. G., Kharitonov I. A. Temperature Characterization of Small-Scale SOI MOSFETs in the Extended Range (to 300 °C), in: *Proceedings of the 22nd International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (Therminic 2016)*. IEEE, 2016, pp. 250–254.
35. Luo L., Xu Z., Niu G. *et al.* Wide Temperature Range Compact Modeling of SiGe HBTs for Space Applications // 2011 IEEE 43<sup>rd</sup> South-Eastern Symposium on System Theory, 2011, pp. 110–113.
36. Goryachev M., Galliou S., Abbe Ph. Cryogenic Transistor Measurement and Modeling for Engineering Applications // *Cryogenics*, 2010, Vol. 50, pp. 381–389.
37. Martin P., MOSFET Modeling and Parameter Extraction for Low Temperature Analog Circuit Design // *EKV 2.6 Users' Meeting*, EPFL, Lausanne, Nov. 2004.
38. Zhao H., Liu X. Modeling of a Standard 0.35  $\mu\text{m}$  CMOS Technology Operating from 77K to 300K // *Cryogenics*, 2014, Vol. 59, pp. 49–59.
39. Dvornikov O. V., Dziatlau V. L., Prokopenko N. N., Petrosyants K. O., Kozhukhov N. V., Tchekhovski V. A. The Accounting of the Simultaneous Exposure of the Low Temperatures and the Penetrating Radiation at the Circuit Simulation of the BiJFET Analog Interfaces of the Sensors // *Proc. of 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 29–30 June 2017, Astana, Kazakhstan.
40. Petrosyants K., Dvornikov O., Prokopenko N., Kozhukhov M. Extension of Standard SPICE SiGe HBT Models in the Cryogenic Temperature Range // *Proc. of THERMINIC 2017*, Sept. 2017, Amsterdam.
41. Петросянц К. О. Моделирование элементов БИС с учетом радиационных эффектов // Сб. трудов Международной конференции «Интегральные схемы и микроэлектронные модули — проектирование, производство и применение» (Микроэлектроника 2015). — М.: Техносфера, 2016. — С. 1–18.
42. Петросянц К. О., Харитонов И. А., Самбурский Л. М., Попов Д. А., Стахин В. Г., Лебедев С. В. Моделирование КНИ МОП-транзисторов для высокотемпературных КМОП интегральных схем (до 300 °C) // Сборник трудов «Микроэлектроника 2015». — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. — С. 470–474.