

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

УДК 681.382.323

DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-5-447-459

Обзор

Схемотехническое моделирование одиночных эффектов при воздействии тяжелых заряженных частиц в КМОП СБИС с суб-100-нм проектными нормами

*А.А. Смолин^{1,2}, А.Б. Боруздина¹, А.В. Уланова², А.В. Яненко¹, А.В. Согоян²,
А.Ю. Никифоров², В.А. Телец², А.И. Чумаков², Н.А. Шелепин³*

¹АО «ЭНПО СПЭЛС», г. Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия

³АО «НИИМЭ», г. Москва, Россия

avulan@spels.ru

Традиционные подходы к схемотехническому моделированию одиночных эффектов при воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) в КМОП СБИС, основанные на использовании двухэкспоненциальной модели импульса тока ионизационной реакции, оказываются не всегда применимыми при переходе к суб-100-нм проектным нормам.

Представлен обзор основных подходов к решению двух главных задач, возникающих при схемотехническом моделировании одиночных эффектов в суб-100-нм СБИС: учет влияния электрического режима на процесс формирования импульса ионизационного отклика и учет собирания заряда с трека ТЗЧ несколькими чувствительными элементами. В качестве решения первой задачи предложены подходы, основанные на использовании кусочно-линейного задания импульса тока на основе TCAD-расчетов, сдвоенного двухэкспоненциального источника тока и источника тока, учитывающего электрический режим транзистора. Рассмотрены способы моделирования ионизационного отклика нескольких элементов от одной ТЗЧ на основе использования lookup-таблиц и аналитических моделей зависимости ионизационного отклика от места попадания частицы.

Проведенный анализ современных подходов к моделированию эффектов сбоев и импульсов ионизационной помехи в КМОП-микросхемах позволяет заключить, что наиболее гибким и физически точным является подход, основанный на использовании источника тока, учитывающего электрический режим транзистора и встраиваемого в Verilog-A код исходной модели.

Ключевые слова: КМОП; одиночные радиационные эффекты; одиночные сбои; моделирование одиночных эффектов; тяжелые заряженные частицы.

Для цитирования: Смолин А.А., Боруздина А.Б., Уланова А.В., Яненко А.В., Согоян А.В., Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И., Шелепин А.Н. Схематехническое моделирование одиночных эффектов при воздействии тяжелых заряженных частиц в КМОП СБИС с суб-100-нм проектными нормами. Обзор // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22. – № 5. – С. 447–459. – DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-5-447-459

Review

Circuit Engineering Modeling of Single Event Effects under Impact of Heavy-Charged Particles in SUB-100 NM CMOS ICs

**A.A. Smolin^{1,2}, A.B. Boruzdina¹, A.V. Ulanova², A.V. Yanenko¹, A.V. Sogoyan²,
A.Y. Nikiforof², V.A. Telets², A.I. Chumakov², N.A. Shelepin³**

¹*JSC «ENGOS SPELS», Moscow, Russia*

²*National Research Nuclear University, Moscow, Russia*

³*JSC «NIIME», Moscow, Russia*

The traditional approaches to the circuit simulation of the single-event effects in CMOS ICs are based on the use of the double-exponential model of ionization current pulse, which is not always applicable to devices with the sub-100 nm feature sizes.

An overview of the main approaches to solving two main problems, arising in the circuit simulation of the single-event effects in sub-100 nm CMOS ICs: the dynamic interaction between the charge collection process and the fast circuit response and the impact of the charge collection by multiple sensitive nodes- has been presented. As a solution of the first problem, three main approaches have been considered, based on the use of, respectively, a piecewise linear current pulse shape based on TCAD simulation results, a dual double-exponential current source and a bias-dependent current source. The methods for circuit simulation of the ionization response of several elements from single HCP based on using the look-up tables and analytical models of the ionization response dependence on the particle hit place have been considered.

The performed analysis of the up-to-date approaches to simulation of the failure effects and ionization noise pulses in CMOS microcircuits permits to conclude that the most flexible and physically precise approach is that one based on using the current source, taking into account the electric mode of the transistor and being built to the Verilog-A code of the initial model.

Keywords: CMOS; single event effects; single event upsets; simulation heavy ions.

For citation: Smolin A.A., Boruzdina A.B., Ulanova A.V., Yanenko A.V., Sogoyan A.V., Nikiforov A.Y., Telets V.A., Chumakov A.I., Shelepin N.A. Circuit Engineering Modeling of Single Event Effects under Impact of Heavy-Charged Particles in SUB-100 NM CMOS ICs. Review // Proc. of Universities. Electronics. – 2017. – Vol. 22. – № 5. – P. 447–459. – DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-5-447-459.

Введение. Одной из важных составляющих процесса разработки микросхем для космических комплексов является оценка показателей радиационной стойкости [1–3].

В последние годы с уменьшением проектных норм на первый план выходит задача оценки стойкости к воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) [4–10]. Эта задача имеет комплексный характер и в общем случае требует решений на различных уровнях – от анализа физических принципов взаимодействия ионизирующих частиц с материалами изделия [11, 12] до анализа функционирования всей системы, в которой планируется применять данное изделие. При этом для разработчиков особое значение имеют методы оценки стойкости на схемотехническом уровне, интегрированные непосредственно в используемые ими средства проектирования.

Стандартным подходом к решению задачи оценки уязвимости микросхем к эффектам, вызванным воздействием ТЗЧ на схемотехническом уровне, в течение многих лет является включение в исходную схему дополнительных источников тока ионизационного отклика. Для описания формы импульса тока ионизационного отклика, как правило, используется двухэкспоненциальная модель [13]. Этот подход позволяет с приемлемой точностью моделировать радиационный отклик микросхем с проектными нормами 180 нм и более. Данная задача осложнилась с переходом к глубоко-субмикронным технологиям. Переход к суб-100-нм проектным нормам сопровождается существенным изменением в процессах формирования ионизационной реакции КМОП СБИС при воздействии ТЗЧ. Как следствие, изменились и методы оценки стойкости СБИС к воздействию ТЗЧ на одиночные эффекты.

Основная проблема связана с повышением быстродействия СБИС, т.е. уменьшением времени переключения базовых элементов. Когда время, необходимое для изменения состояния элемента, оказывается меньше характерных времен формирования ионизационного отклика, «зарядовый» подход к оценке ионизационной реакции становится неприменимым. Для СОЗУ с проектными нормами 90 нм в зависимости от выбранной модели импульса ионизационного тока величина критического заряда может изменяться более чем в четыре раза [14]. В связи с этим на первый план выходит как динамика процесса собирания заряда, т.е. форма импульса тока ионизационного отклика, так и возможность практически одновременного появления импульсов ионизационного тока в смежных элементах СБИС. Корректное задание формы импульса ионизационной реакции в глубоко-субмикронных технологиях не всегда осуществимо на основе двухэкспоненциальной модели [15–17]. Более того, при попадании ТЗЧ на некотором удалении от p - n -перехода, где имеет место временная задержка при формировании ионизационного тока, крайне затруднительно описать его форму подобной функцией. Напряжения на выводах транзистора не могут более рассматриваться как фиксированные в течение всего времени собирания заряда. Поэтому необходимо использование модели, учитывающей влияние потенциала на выводах транзистора, которые, в свою очередь, зависят от параметров нагрузки, подключенной к данным выводам. Двухэкспоненциальный импульс тока, зависящий только от параметров технологии и линейной передачи энергии (ЛПЭ) частицы, может привести к установке невозможных в реальности потенциалов в узлах схемы при SPICE-моделировании.

В настоящей работе рассматриваются основные современные подходы схемотехнического моделирования эффектов сбоев и импульсов ионизационных откликов в КМОП СБИС с суб-100-нм проектными нормами.

Стандартная двухэкспоненциальная модель. Формы импульсов тока и напряжения ионизационного отклика инвертора, рассчитанные с использованием пакета приборно-технологического моделирования TCAD и SPICE-симулятора для технологии IBM CMOS 9SF при нормальном прохождении частиц с ЛПЭ $30 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ через сток

закрытого n -канального транзистора, представлены на рис.1 [18]. Использование внешнего источника тока, подключенного к стоку транзистора в SPICE-симуляторе, приводит к падению потенциала на стоке до отрицательного значения, соответствующего напряжению открытия диода сток – подложка. Таким образом, необходимо использовать более сложные модели, учитывающие влияние изменения состояния схемы в процессе формирования ионизационного отклика. Помимо обязательного учета формы импульса тока при схемотехническом моделировании воздействия ТЗЧ в схемах с глубоко-субмикронными проектными нормами, необходимо также учитывать еще один важный эффект – собирание заряда несколькими элементами.

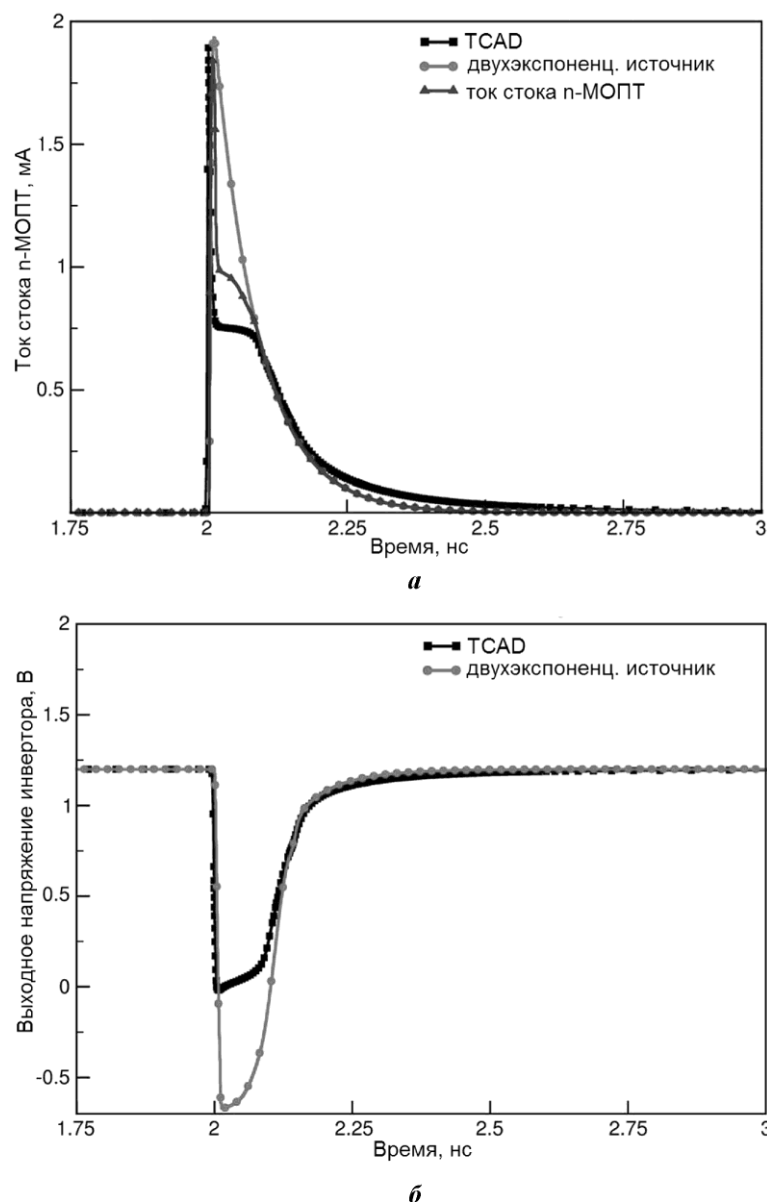


Рис.1. Сравнение форм импульсов тока (а) и напряжения (б) ионизационного отклика, полученных с помощью TCAD-моделирования с учетом нагрузки и SPICE-моделирования с использованием двухэкспоненциальной модели [18]

Fig.1. Comparison of mixed-mode TCAD and SPICE simulated nMOS drain current of an inverter (a) and inverter output voltages (NMOS drain voltages) (b). The SPICE simulation used an independent double exponential current source [18]

Современные модели. Кусочно-линейная аппроксимация. Рост вычислительных мощностей потенциально позволяет использовать приборно-технологическое моделирование для характеристики ионизационного отклика при воздействии ТЗЧ на базовые для каждой технологии полупроводниковые структуры с глубоко-субмикронными проектными нормами с учетом эффектов формы импульса тока и собирания заряда несколькими элементами [19]. При этом для описания формы импульса при схемотехническом моделировании используется независимая кусочно-линейная функция [20]. Хотя такой подход позволяет с высокой точностью задать ионизационную реакцию схемы в заданном режиме, он не может распространяться на другие режимы, значения ЛПЭ или включения схемы. Данный подход имеет тот же недостаток, что и двухэкспоненциальная модель, – полученная форма импульса тока ионизационной реакции может привести к нереалистичным напряжениям в узлах схемы при SPICE-моделировании, если нагрузка данных узлов отличается от нагрузки, использованной при TCAD-расчете.

Двойная двухэкспоненциальная модель. В работе [21] предложен другой способ задания тока ионизационного отклика. Для учета ограничения ионизационного тока на уровне тока насыщения открытого комплементарного транзистора применяется сведенный двухэкспоненциальный источник тока. Два источника тока соединяются параллельно, при этом первый источник используется для задания компоненты тока с малой длительностью и большой амплитудой, а второй – для задания тока большой длительности с амплитудой, ограниченной током насыщения комплементарного транзистора. Рассчитанные таким образом типовые импульсы тока и напряжения ионизационной реакции показаны на рис.2.

Как видно из рис.2,а, такой способ задания импульса тока предотвращает падение напряжения на выходе схемы до отрицательных значений, так же как при использовании одного двухэкспоненциального импульса (рис.1,б). Недостаток данного способа – проведение TCAD-расчетов для определения параметров импульсов. Однако в отличие от кусочно-линейной аппроксимации, в данном случае возможно достаточно простое масштабирование величины собранного заряда, так как постоянные времени, определяющие форму импульса тока, можно считать параметрами технологии. Это позволяет уменьшить число TCAD-расчетов за счет более простых методов расчета собранного заряда, например с использованием аналитических или полуэмпирических моделей.

Модель, учитывающая смещение транзистора. В более сложной модели учета влияния потенциалов на выводах транзистора на процесс формирования импульса ионизационного отклика [18] источник тока ионизационного отклика встроен непосредственно в виде Verilog-A кода в код исходной модели. Схемный эквивалент модифицированной модели BSIM4 показан на рис.3,а. Источник тока включен между цепями, описывающими сопротивление контакта стока и сопротивление подложки транзистора. Это позволяет заместить исходную модель в составе PDK, избавляет от необходимости использовать дополнительные цепи для учета эффектов от воздействия ТЗЧ и, таким образом, позволяет следовать стандартному маршруту проектирования. Для иллюстрации расчетной части модели на рис.3,б показано ее схемотехническое представление в виде стандартных SPICE-элементов. Независимый источник тока I_{SRC} задает базовый импульс тока ионизации, который создает в устройстве заряд, суммарная величина которого определяется энергией, переданной частицей. Для данного тока используется двухэкспоненциальная модель, легко реализуемая и обеспечивающая хорошую сходимость при схемотехническом моделировании и по-прежнему достаточно

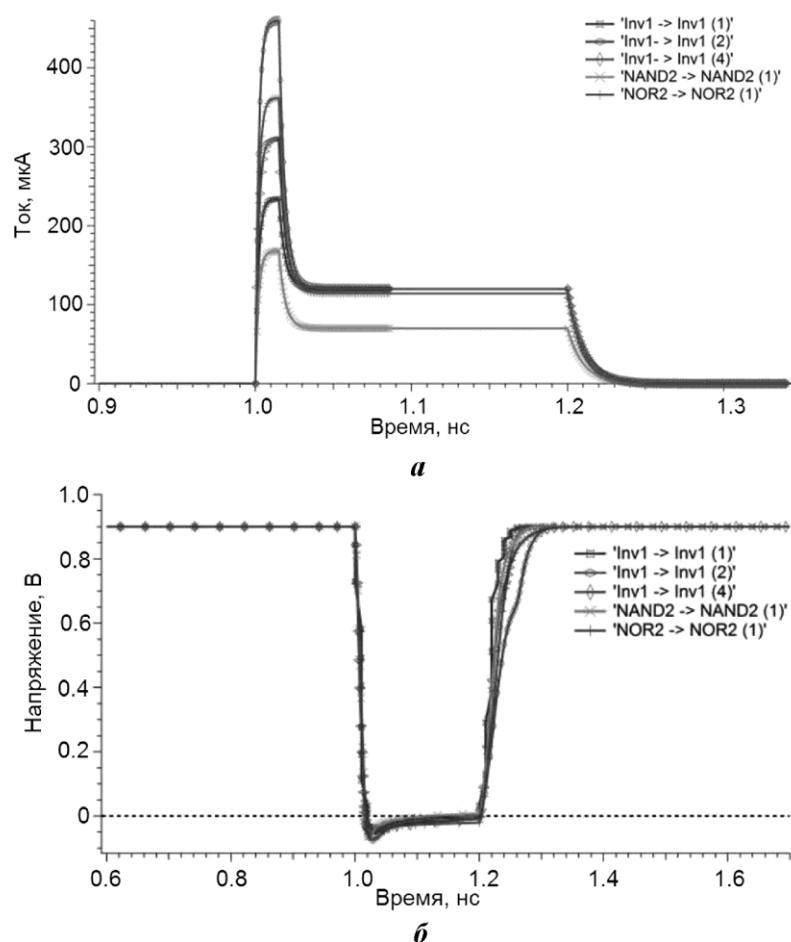
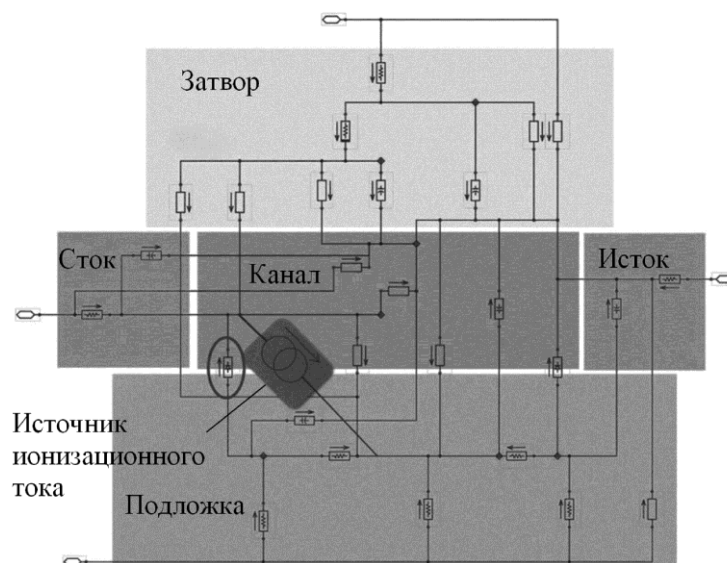


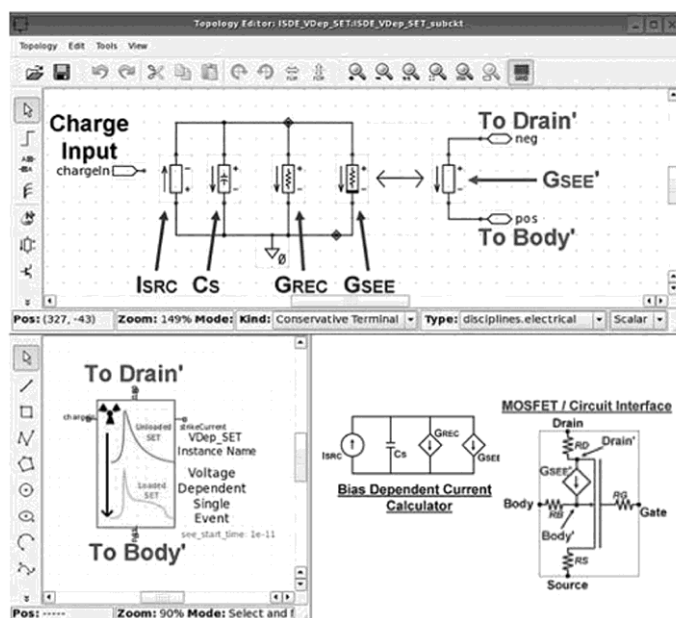
Рис.2. Сравнение форм импульсов тока (а) и напряжения (б) ионизационного отклика, рассчитанных для емкости выходного узла и тока насыщения транзисторов с использованием сдвоенного двухэкспоненциального источника тока [21]

Fig.2. Comparison of injected dual double-exponential current waveforms (a) and the resulting SET voltage waveforms (b) for circuit configurations with different loads (load capacitance and transistor saturation currents) [21]

хорошо описывающая базовые принципы собирания заряда в устройстве в отсутствие влияния внешних цепей [22]. Конденсатор C_S обеспечивает сохранение заряда и не представляет какую-либо физическую емкость. Напряжение на конденсаторе пропорционально заряду, который не был «собран» двумя зависимыми источниками тока. Источник тока G_{REC} применяется для учета токов рекомбинации в устройстве и является параметром технологии, определяющим ширину и постоянную времени спада «плато» ионизационного тока (см. рис.1). Источник G_{SEE} и его «зеркало» G'_{SEE} определяют форму ионизационного тока $p-n$ -перехода. При этом G_{SEE} перезаряжает конденсатор C_S , а G'_{SEE} встроен непосредственно в модель BSIM4 и имеет доступ к внутренним напряжениям устройства. До тех пор пока внутренний переход сток – подложка (между узлами, к которым подключен источник на рис.3,а) смещен обратно, ток G_{SEE} повторяет форму импульса тока независимого источника I_{SRC} . Однако по мере падения напряжения на переходе ток G_{SEE} также уменьшается до достижения «плато», уровень которого определяется нагрузочной способностью комплементарного транзистора. Источник G_{SEE} не включается непосредственно в транзистор для изоляции схемы расчета тока от нежелательных внешних воздействий, таких как внешние токи, перезаряжающие емкость C_S .



a



b

Рис.3. Эквивалентная схема модифицированной модели BSIM4 (а) и схематехническое представление модели расчета тока ионизационного отклика (б) [18]
 Fig.3. BSIM4 compact model topology, with the addition of a current pulse model included (a) and the schematic representation of the bias dependent single-event model (b) [18]

Подход, при котором используется управляемое напряжение источника тока, рассмотрен и в других работах [23–25]. Хотя аналитические выражения, описывающие макромодель для задания тока, и способы реализации модели в этих работах различны, в них применяется общий принцип задания ионизационного тока, аналогичный предложенному в работе [18].

Отметим, что не всегда оказывается достаточным использование одного лишь источника ионизационного тока. В ряде случаев необходимо учитывать влияние дополнительных паразитных структур, например паразитной биполярной структуры

исток – тело – подложка, активация которой возможна при протекании ионизационного тока карман – подложка [17].

Учет собирания заряда несколькими узлами. *Lookup-таблица.* Задача моделирования эффекта собирания заряда несколькими элементами схемы требует дополнительной параметризации источников тока в каждом элементе для учета зависимости величины импульса тока от места попадания частицы и топологии схемы. Одним из способов данной параметризации может быть создание lookup-таблицы, задающей форму импульса тока для каждого элемента в зависимости от его геометрии и расстояния до точки попадания частицы [26]. Для моделирования ионизационной реакции каждого элемента используется модель [18], интегрированная в BSIM4. Структура модели показана на рис.4.

Величина генерируемого в устройстве заряда определяется двумя группами параметров: Radiation instance data – параметры события, включающие суммарную величину сгенерированного заряда, угол падения и точку попадания частицы; Radiation process data – параметры технологии, представленные в виде таблицы нормированных значений собранного заряда как функции расстояния, суммарного заряда и угла. Соответственно, параметры события используются для выбора значений из данной таблицы и определения заряда собираемого каждым элементом с помощью интерполяции.

Аналитическое описание. Альтернативный подход, предложенный в [27], предполагает использование эмпирических функций, определяющих величину заряда, собранного в каждом узле, постоянных времени фронта и спада импульса и задержки импульса в зависимости от ЛПЭ частицы, а также расстояния до точки попадания. Данные функции – результат аппроксимации полученных с помощью TCAD-моделирования результатов для различных значений ЛПЭ и точек попадания относительно карманов и сток-истоковых переходов. Задача может быть существенно упрощена при использовании замкнутых аналитических выражений для задания амплитудно-временных характеристик импульса ионизационного тока [28]. Параметры импульса ионизационного отклика, определяемые данными функциями, применяются для задания импульса тока в расширенной BSIM4 модели [18]. Как показано в [27], данная модель позволяет идентифицировать наиболее чувствительные к сбоям от одиночных ядерных частиц фрагменты схемы без ресурсоемких TCAD-расчетов, сокращая время такого анализа на несколько порядков. Очевидно, что ценой является точность анализа. Однако для исследованной в [27] технологии с проектными нормами 40 нм рассматриваемый подход обеспечивает удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных зависимостей сечений сбоев от ЛПЭ.

Следует отметить, что существенным минусом как аналитического описания, так и lookup-таблицы является их недостаточная гибкость: применение эмпирических зависимостей (в табличном или аналитическом виде) ограничивает возможности модели набором входных данных, использованных при их параметризации. При этом сам процесс параметризации весьма трудоемок. Кроме того, данные модели служат, прежде всего, для оценки эффективности схемотехнических решений при разработке СБИС, что значительно облегчается их интеграцией в стандартный маршрут проектирования. Однако для полной характеристики стойкости изделия к воздействию ТЗЧ требуется дополнительный функционал, не реализуемый на схемотехническом уровне. Поэтому для полноценного моделирования эффектов в СБИС при воздействии ТЗЧ следует применять многоуровневые программные комплексы совместно со средствами экспериментального моделирования эффектов с использованием тестовых структур и типовых оценочных схем.

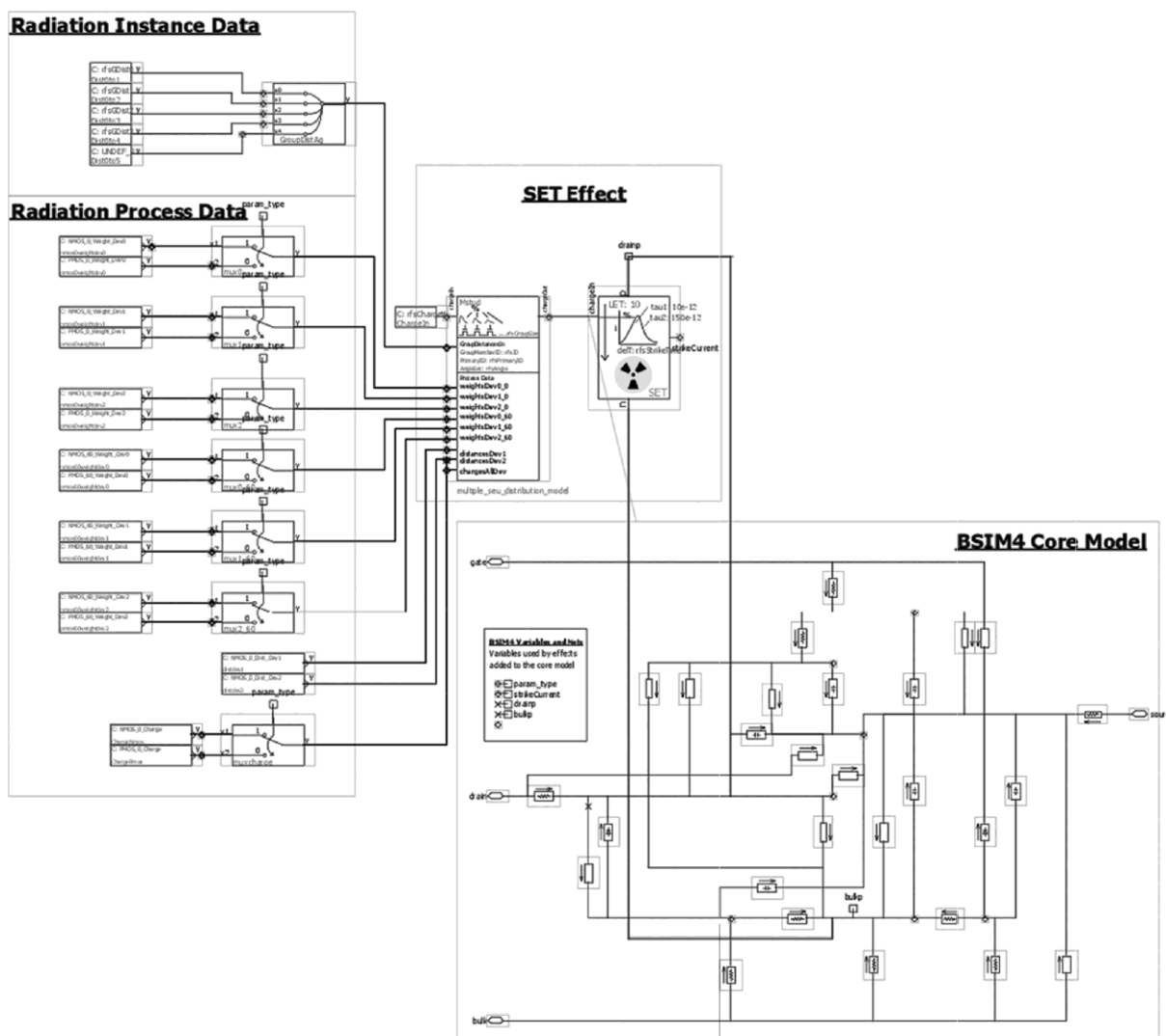


Fig.4. Complete charge-sharing SET model embedded in BSIM4 model [26]

Заключение. Анализ основных современных подходов к моделированию эффектов сбоев и импульсов ионизационной помехи в КМОП-микросхемах показал следующее. Использование классической модели совместно с независимой двухэкспоненциальной моделью ионизационного тока для современных КМОП-микросхем может приводить к нереалистичному поведению схемы при SPICE-моделировании. Развитие методов моделирования связано с необходимостью учета изменения электрического режима схемы в процессе формирования ионизационного отклика при воздействии ТЗЧ и эффектов воздействия ТЗЧ на несколько соседних структур. Оптимальным с точки зрения удобства применения и физической корректности является подход, основанный на использовании источника тока, учитывающего электрический режим транзистора и встраиваемого непосредственно в Verilog-A код исходной модели. Недостатком данного подхода является относительно высокая сложность его первоначальной реализации по сравнению с другими подходами.

Существующие способы схемотехнического моделирования ионизационного отклика нескольких элементов от одной ТЗЧ имеют достаточно ограниченные возможности по учету зависимости ионизационной реакции от точки попадания ТЗЧ и требуют

экстенсивной параметризации используемых эмпирических моделей. Реализация физически корректного решения данной проблемы не представляется возможной исключительно на схемотехническом уровне и требует использования более сложных многоуровневых программных комплексов для прогнозирования показателей стойкости.

Литература

1. **Чумаков А.И.** Действие космической радиации на электронные схемы. – М.: Радио и связь, 2004. – 320 с.
2. Радиационная стойкость изделий ЭКБ: Научное издание / Под ред. д-ра техн. наук, проф. А.И. Чумакова. – М.: НИЯУ МИФИ, 2015. – 512 с.
3. Single-event-effect prediction for ICs in a space environment / **A.I. Chumakov, A.L. Vasil'ev, A.A. Kozlov et al.** // Russian Microelectronics. – 2010. – Vol. 39. – N. 2. – P. 74–78.
4. SEE testing results for RF and microwave ICs / **G.V. Chukov, V.V. Elesin, G.N. Nazarova et al.** // 2014 IEEE Radiation Effects Data Workshop, REDW 2014 (Paris, France, Jul. 14–18, 2014). – 2014. – P. 233–235. – Article number 7004589.
5. **Chumakov A.I.** Evaluation of multibit upsets in integrated circuits under heavy charged particles // Russian Microelectronics. – 2014. – Vol. 43. – N. 2. – P. 91–95.
6. **Chumakov A.I.** An evaluation of the sensitivity of integrated circuits to single event effects for the point charge collection area // Russian Microelectronics. – 2015. – Vol. 44. – N. 1. – P. 27–32.
7. **Gorbunov M.S., Boruzdina A.B., Dolotov P.S.** Semi-empirical method for estimation of single-event upset cross section for SRAM DICE sells // IEEE Transactions Nuclear Science. – 2016. – Vol. 64. – N. 4. – P. 2250–2256.
8. **Boruzdina A.B., Ulanova A.I., Chumakov A.V., Yanenko A.V.** A method for registration of multiple cell upsets in high capacity memory cells induced by single nuclear particles // Russian Microelectronics. – 2016. – Vol. 45. – N. 4. – P. 292–297.
9. Compendium of SEE comparative results under ion and laser irradiation / **A.I. Chumakov, A.A. Pechenkin, D.V. Savchenkov et al.** // Proc. 14 th European Conf. on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS-2013 (Oxford; United Kingdom, Sept. 23–27). – 2013. – Article number 6937390.
10. SEE testing results for RF and microwave ICs / **G.V. Chukov, V.V. Elesin, G.N. Nazarova et al.** // 2014 IEEE Radiation Effects Data Workshop, REDW 2014, (Paris, France, Jul. 14–18, 2014). – 2014. – P. 233–235. – Article number 7004589.
11. The effectiveness of specialized IC packages: Experimental and monte-carlo simulation for basic orbits and spacecraft shielding / **A.O. Akhmetov, G.S. Sorokoumov, D.V. Bobrovskiy et al.** // Proc. 14th European Conf. on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS-2015 (Moscow, Russian Federation, Sept. 14–18, 2015). 2015. – Article number 7365674.
12. Multiple cell upset mechanisms in SRAMs / **A.I. Chumakov, A.V. Sogoyan, A.B. Boruzdina et al.** // Proc. 14 th European Conf. on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS-2015 (Moscow, Russian Federation, Sept. 14–18, 2015). – 2015. – Article number 7365638.
13. **Dodd P., Massengill L.** Basic mechanisms and modeling of single-event upset in digital microelectronics // IEEE Transaction Nuclear Science. – 2003. – Vol. 50. – P. 583–602.
14. Critical Charge Characterization for Soft Error Rate Modeling in 90nm SRAM / **R. Naseer, Y. Boulghassoul, J. Draper et al.** // 2007 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. – 2007. – P. 1879–1882.
15. Effect of well and substrate potential modulation on single event pulse shape in deep submicron CMOS / **S. DasGupta, A.F. Witulski, B.L. Bhuvu et al.** // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2007. – Vol. 54. – N. 6. – P. 2407–2412.
16. **Turowski M., Raman A., Jablonski G.** Mixed-mode simulation and analysis of digital single event transients in fast CMOS ICs // Proc. 14th Int. Conf. MIXDES 2007. – 2007. – P. 433–439.
17. Temperature Dependence of MCU Sensitivity in 65 nm CMOS SRAM / **A.B. Boruzdina, A.V. Sogoyan, A.A. Smolin et al.** // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2015. – Vol. 62. – N. 6. – P. 2860–2866.
18. **S. DasGupta.** Trends in Single Event Pulse Widths and Pulse Shapes in Deep Submicron CMOS. – M. S. thesis, Dept. Elect. Eng. and Comp. Science, Vanderbilt University, 2007.
19. A bias-dependent single-event compact model implemented into BSIM4 and a 90 nm CMOS process design kit / **J.S. Kaupilla, A.L. Sternberg, M.L. Alles et al.** // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2009. – Vol. 56(6). – P. 3152–3157.

20. **Francis A.M., Turowski M., Holmes J.A., Mantooth H.A.** Efficient modeling of single event transients directly in compact device models // 2007 IEEE International Behavioral Modeling and Simulation Workshop. – 2007. – P. 73–77.
21. Modeling of Single Event Transients With Dual Double-Exponential Current Sources: Implications for Logic Cell Characterization / **D.A. Black, W.H. Robinson, I.Z. Wilcox et al.** // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2015. – Vol. 62. – N. 4. – P. 1540–1549.
22. **Mavis D.G., Eaton P.H.** SEU and SET modeling and mitigation in deep submicron technologies // Proc. 45th IEEE IRPS. – 2007. – P. 293–305.
23. **Privat A., Clark L.T.** Simple and accurate single event charge collection macro modeling for circuit simulation // 2015 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). – 2015. – P. 1858–1861.
24. **Saremi M., Privat A., Barnaby H.J., Clark L.T.** Physically Based Predictive Model for Single Event Transients in CMOS Gates // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2016. – Vol. 63. – N. 6. – P. 2248–2254.
25. **García-Redondo F., López-Vallejo M., Royer P., Agustín J.** A tool for the automatic analysis of single events effects on electronic circuits // 2014 5th European Workshop on CMOS Variability (VARI). – 2014. – P. 1–6.
26. Significance of strike model in circuit-level prediction of charge sharing upsets / **A.M. Francis, D. Dimitrov, J. Kauppila et al.** // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2009. – Vol. 56. – N. 6. – P. 3109–3114.
27. Circuit-level layout-aware single-event sensitive-area analysis of 40-nm bulk CMOS flip-flops using compact modeling / **J.S. Kauppila, T.D. Haeffner, D.R. Ball et al.** // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2011. – Vol. 58. – N. 6. – P. 2680–2686.
28. **Согоян А.В., Чумаков А.Т.** Оценка ионизационной реакции полупроводниковых элементов в диффузионном приближении при воздействии тяжелых заряженных частиц // Электронная техника. Сер.2. Полупроводниковые приборы. – 2016. – Вып. 1 (240). – С. 46–56.

Поступил 17.03.2017 г.; принят к публикации 13.06.2017 г.

Смолин Анатолий Александрович – младший научный сотрудник АО «ЭНПО СПЭЛС» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31), аспирант кафедры электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31), aasmol@spels.ru

Боруздина Анна Борисовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник АО «ЭНПО СПЭЛС» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д.31.), abbor@spels.ru

Уланова Анастасия Владиславовна – кандидат технических наук, доцент кафедры электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31), avulan@spels.ru

Яненко Андрей Викторович – кандидат технических наук, технический директор АО «ЭНПО СПЭЛС» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д.31.), avyan@spels.ru

Согоян Армен Вагоевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31), avsog@spels.ru

Никифоров Александр Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31), aynik@spels.ru

Телец Виталий Арсеньевич – доктор технических наук, профессор, директор Института экстремальной прикладной электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31), 1355t@rambler.ru

Чумаков Александр Иннокентьевич – доктор технических наук, профессор кафедры электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31), aichum@spels.ru

Шелепин Николай Алексеевич – доктор технических наук, профессор, первый заместитель генерального директора АО «НИИМЭ» (124460, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1), n.shelepin@list.ru

References

1. Chumakov A.I. *Deystviye kosmicheskoy radiatsii na elektronnyye skhemy* [Effect of space radiation on electronic circuits]. Moscow, Radio i svyaz, 2004. 320 p. (in Russian).
2. *Radiatsionnaya stoykost' izdeliy EKB* [Radiation hardness of electronic components: Scientific publication. Ed. A.I. Chumakov]. Moscow, NIYaU MIFI, 2015. 512 p. (in Russian).
3. Chumakov A.I., Vasil'ev A.L., Kozlov A.A., Kol'tov D.O., Krinitskii A.V., Pechenkin A.A., Tararaksin A.S., Yanenko A.V. Single-event-effect prediction for ICs in a space environment. *Russian Microelectronics*, 2010, vol. 39, no. 2, pp. 74–78.
4. Chukov G.V., Elesin V.V., Nazarova G.N., Nikiforov A.Y., Boychenko D.V., Telets V.A., Kuznetsov A.G., Amburkin K.M. SEE testing results for RF and microwave ICs. *2014 IEEE Radiation Effects Data Workshop, REDW 2014 (Paris, France. Jul. 14–18, 2014)*. 2014, pp. 233–235, article number 7004589.
5. Chumakov A.I. Evaluation of multibit upsets in integrated circuits under heavy charged particles. *Russian Microelectronics*, 2014, vol. 43, no. 2, pp. 91–95.
6. Chumakov A.I. An evaluation of the sensitivity of integrated circuits to single event effects for the point charge collection area. *Russian Microelectronics*, 2015, vol. 44, no. 1, pp. 27–32.
7. Gorbunov M.S., Boruzdina A.B., Dolotov P.S. Semi-empirical method for estimation of single-event upset cross section for SRAM DICE cells. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2016, vol. 64, no. 4, pp. 2250–2256.
8. Boruzdina A.B., Ulanova A.V., Chumakov A.I., Yanenko A.V. A method for registration of multiple cell upsets in high capacity memory cells induced by single nuclear particles. *Russian Microelectronics*, 2016, vol. 45, no. 4, pp. 292–297.
9. Chumakov A.I., Pechenkin A.A., Savchenkov D.V., Yanenko A.V., Kessarinskiy L.N., Nekrasov P.V., Sogoyan A.V., Tararaksin A.I., Vasil'ev A.L., Anashin V.S., Chubunov P. A. Compendium of SEE comparative results under ion and laser irradiation. *Proc. 14 th European Conf. on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS-2013. (Oxford, United Kingdom. Sept. 23–27, 2013)*. 2013, article number 6937390.
10. Chukov G.V., Elesin V.V., Nazarova G.N., Nikiforov A.Y., Boychenko D.V., Telets V.A., Kuznetsov A.G., Amburkin K.M. SEE testing results for RF and microwave ICs. *2014 IEEE Radiation Effects Data Workshop, REDW 2014 (Paris, France. Jul. 14–18, 2014)*. 2014, pp. 233–235, article number 7004589.
11. Akhmetov A.O., Sorokoumov G.S., Bobrovskiy D.V., Boychenko D.V., Nikiforov A.Y., Chumakov A.I., Thomas J.C., Maksimov A.U., Vasilenkov N.A. The effectiveness of specialized IC packages: Experimental and monte-carlo simulation for basic orbits and spacecraft shielding. *Proc. 14 th European Conf. on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS-2015 (Moscow, Russian Federation, Sept. 14–18, 2015)*. 2015, article number 7365674.
12. Chumakov A.I., Sogoyan A.V., Boruzdina A.B., Smolin A.A., Pechenkin A.A., Multiple cell upset mechanisms in SRAMs. *Proc. 14 th European Conf. on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS-2015 (Moscow, Russian Federation, Sept. 14–18, 2015)*. 2015, article number 7365638.
13. Dodd P., Massengill L. Basic mechanisms and modeling of single-event upset in digital microelectronics. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2003, vol. 50, pp. 583–602.
14. Naseer R., Boulghassoul Y., Draper J., DasGupta S., Witulski A. Critical Charge Characterization for Soft Error Rate Modeling in 90 nm SRAM. *2007 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2007, pp. 1879–1882.
15. DasGupta S., Witulski A.F., Bhuva B.L., Alles M.L., Reed R.A., Amusan O.A., Ahlbin J.R., Schrimpf R.D., Massengill L.W. Effect of well and substrate potential modulation on single event pulse shape in deep submicron CMOS. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2007, vol. 54, no. 6, pp. 2407–2412.
16. Turowski M., Raman A., Jablonski G. Mixed-mode simulation and analysis of digital single event transients in fast CMOS ICs. *Proc. 14th Int. Conf. MIXDES 2007*, Jun. 2007, pp. 433–439.
17. Boruzdina A.B., Sogoyan A.V., Smolin A.A., Ulanova A.V., Gorbunov M.S., Chumakov A.I., Boychenko D.V. Temperature Dependence of MCU Sensitivity in 65 nm CMOS SRAM. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2015, vol. 62, no. 6, pp. 2860–2866.
18. DasGupta S. Trends in Single Event Pulse Widths and Pulse Shapes in Deep Submicron CMOS. *M. S. thesis, Dept. Elect. Eng. and Comp. Science*, Vanderbilt University, 2007.
19. Kauppila J.S., Sternberg A.L., Alles M.L., Francis A.M., Holmes J., Amusan O.A., Massengill L.W. A bias-dependent single-event compact model implemented into BSIM4 and a 90 nm CMOS process design kit. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 3152–3157.

20. Francis A.M., Turowski M., Holmes J.A., Mantooth H.A. Efficient modeling of single event transients directly in compact device models. *2007 IEEE International Behavioral Modeling and Simulation Workshop*, 2007, pp. 73–77.
21. Black D.A., Robinson W.H., Wilcox I.Z., Limbrick D.B., Black J.D. Modeling of Single Event Transients With Dual Double-Exponential Current Sources: Implications for Logic Cell Characterization. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2015, vol. 62, no. 4, pp. 1540–1549.
22. D.G. Mavis, Eaton P.H. SEU and SET modeling and mitigation in deep submicron technologies. *Proc. 45th IEEE IRPS*, 2007, pp. 293–305.
23. Privat A., Clark L. T. Simple and accurate single event charge collection macro modeling for circuit simulation. *2015 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2015, pp. 1858–1861.
24. Saremi M., Privat A., Barnaby H. J., Clark L. T. Physically Based Predictive Model for Single Event Transients in CMOS Gates. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2016, vol. 63, no.6, pp. 2248–2254.
25. García-Redondo F., López-Vallejo M., Royer P., Agustín J. A tool for the automatic analysis of single events effects on electronic circuits. *2014 5th European Workshop on CMOS Variability (VARI)*, 2014, pp. 1–6.
26. Francis A.M., Dimitrov D., Kauppila J., Sternberg A., Alles M., Holmes J., Mantooth H.A. Significance of strike model in circuit-level prediction of charge sharing upsets. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 3109–3114.
27. Kauppila J.S., Haeffner T.D., Ball D.R., Kauppila A.V., Loveless T.D. Jagannathan S., Sternberg A.L., Bhuvu B.L., Massengill L.W. Circuit-level layout-aware single-event sensitive-area analysis of 40-nm bulk CMOS flip-flops using compact modeling. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2011, vol. 58, no. 6, pp. 2680–2686.
28. Sogoyan A.V., Chumakov A.T. Ocenka ionizacionnoj reakcii poluprovodnikovyh ehlementov v diffuzionnom priblizhenii pri vozdejstvii tyazhelyh zaryazhennyh chastic [Evaluation of ionization response of semiconductor elements in the diffusion approximation under the influence of heavy charged particles]. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory – Electronic engineering. Series 2. Semiconductor devices*, 2016, iss. 1 (240), pp. 46–56.

Submitted 17.03.2017; accepted 13.06.2017.

Smolin Anatoly A. – research assistant, JSC «ENGOS SPELS» (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31), PhD student, Department of Electronics, National Research Nuclear University (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31), aasmol@spels.ru

Boruzdina Anna B. – PhD of technical sciences, senior research officer, JSC «ENGOS SPELS» (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31), abbor@spels.ru

Ulanova Anastasia V. – PhD of technical sciences, associate professor, Department of Electronics, National Research Nuclear University (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31), avulan@spels.ru

Yanenko Andrei V. – PhD of technical sciences, chief technology officer, JSC «ENGOS SPELS» (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31), avyan@spels.ru

Sogoyan Armen V. – PhD of technical sciences, docent, associate professor, Department of Electronics, National Research Nuclear University (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31), avsog@spels.ru

Nikiforov Alexander Y. – Doctor of technical sciences, professor, Department of Electronics, National Research Nuclear University (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31), aynik@spels.ru

Telets Vitaliy A. – Doctor of technical sciences, professor, director of IAEE, National Research Nuclear University (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31), 1355t@rambler.ru

Chumakov Alexander I. – Doctor of technical sciences, professor, Department of Electronics, National Research Nuclear University (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31), aichum@spels.ru

Shelepin Nikolai A. – Doctor of technical sciences, professor, first deputy CEO, JSC «NIIME» (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, 1-y Zapadnyy pr-d, 12/1), n.shelepin@list.ru