



УДК 004.942

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.337.341

# МЕТОДИКА СОПРЯЖЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА И ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОДИНОЧНЫХ СБОЕВ

## COMBINING RADIATION TRANSPORT SIMULATIONS WITH TCAD MODELING TO ADDRESS SINGLE EVENT EFFECTS

ГЛУШКО АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ<sup>1,2</sup>*К.т.н., заведующий сектором**andrei19386@mail.ru*GLUSHKO ANDREY A.<sup>1,2</sup>*Ph.D, sector head**andrei19386@mail.ru*ЧИСТИЯКОВ МИХАИЛ ГЕННАДЬЕВИЧ<sup>1,2</sup>*Научный сотрудник**Mikhail\_Chistyakov@srisa.ru*CHISTYAKOV MIKHAIL G.<sup>1,2</sup>*Researcher**Mikhail\_Chistyakov@srisa.ru*КУДИНОВ ИЛЬЯ ВЛАДИМИРОВИЧ<sup>3</sup>*К.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник**ikudinov@vniiia.ru*KUDINOV ILYA V.<sup>3</sup>*Ph.D, leading researcher**ikudinov@vniiia.ru*МОРОЗОВ СЕРГЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ<sup>1</sup>*Заведующий отделом**Sergey\_Morozov@srisa.ru*MOROZOV SERGEY A.<sup>1</sup>*Department head**Sergey\_Morozov@srisa.ru*ЯШИН ГЕОРГИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ<sup>1,2</sup>*Научный сотрудник**georgtree@gmail.com*YASHIN GEORGE A.<sup>1,2</sup>*Researcher**georgtree@gmail.com*АМИРХАНОВ АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ<sup>1</sup>*К.ф.-м.н., руководитель группы**aav@srisa.ru*AMIRKHANOV ALEXEY V.<sup>1</sup>*Ph.D, group head**aav@srisa.ru*МАКАРЧУК ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ<sup>2</sup>*К.т.н., доцент**vvmakarchuk@gmail.com*MAKARCHUK VLADIMIR V.<sup>2</sup>*Ph.D, docent**vvmakarchuk@gmail.com*ЗИНЧЕНКО ЛЮДМИЛА АНАТОЛЬЕВНА<sup>2</sup>*Д.т.н., профессор**lzinchenko@bmstu.ru*ZINCHENKO LYUDMILA A.<sup>2</sup>*Ph.D, professor**lzinchenko@bmstu.ru*<sup>1</sup>*ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН**117218, Москва, Нахимовский просп., 36, к. 1**Тел.: +7 (495) 737-06-06*<sup>2</sup>*МГТУ им. Н. Э. Баумана**105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1**Тел.: +7 (499) 263-62-26*<sup>3</sup>*ФГУП «ВНИИА»**101000, Москва, Моспочтамт, а/я 918*<sup>1</sup>*SRISA RAS**bld. 1, 36 Nakhimovskiy Ave., Moscow, 117218**Tel.: +7 (495) 737-06-06*<sup>2</sup>*Bauman MSTU**bld. 1, 5 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005**Tel.: +7 (499) 263-62-26*<sup>3</sup>*Dukhov Research Institute of Automatics**PO box 918, Moscow Post Office, 101000*

Предложена методика, позволяющая сквозным образом описывать цепочку физических процессов, протекающих в микроэлектронных устройствах под действием ионизирующих излучений. Она включает в себя расчет первичных актов взаимодействия падающих высокоэнергетических частиц с веществом, трехмерное моделирование кинетики образовавшихся носителей заряда в пораженном элементе цепи и схемотехнический расчет отклика всей системы в целом. В докладе рассмотрены вопросы практической реализации данной методики. Приводятся примеры, относящиеся к случаю одиночных сбоев в ячейках памяти СОЗУ при облучении нейтронами с энергией 14 МэВ.

**Ключевые слова:** технологическая САПР; нейтроны; ядерные реакции; тяжелые заряженные частицы; КМОП КНИ; СБИС.



The paper presents a procedure that allows multi-stage description of different physical processes taking place inside irradiated microelectronic devices. It incorporates modeling of initial interactions of bombarding energetic particles with matter, 3D simulation of charge carriers generated in the affected region and circuit-level computations that provide whole-system response. Here we discuss issues related to practical implementation of the procedure. Examples concerning SEU in SRAM cells irradiated with 14 MeV neutrons have been presented.

*Keywords:* technology computer-aided design; neutrons; nuclear reactions; heavy ions; CMOS SOI; VLSI.

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение радиационных эффектов в микросхемах посредством компьютерного моделирования является актуальной задачей, так как позволяет интерпретировать результаты натурных испытаний, сократить их объем, прогнозировать характеристики на этапе проектирования и обосновывать новые решения, направленные на повышение радиационной стойкости.

В настоящее время основным инструментом для детального расчета физических процессов внутри электронных устройств служат технологические САПР, в частности программный комплекс TCAD [1]. Он содержит большой набор моделей, описывающих поведение системы в различных условиях, при различных внешних воздействиях. Однако влияние ионизирующих излучений рассматривается в нем упрощенно и многие практически важные случаи не охвачены. Например, нельзя промоделировать облучение прибора нейтронами, которые не ионизируют среду напрямую, но участвуют в ядерных реакциях с образованием вторичных заряженных частиц. Кроме того, когда моделируется воздействие ионов, предполагается, что их траектории прямолинейны. В действительности они могут быть искривлены, особенно вблизи точки остановки иона.

Эти и другие ограничения указывают на необходимость совмещения технологических САПР с программами, основанными на методе Монте-Карло, которые дают более достоверное описание прохождения высокозенергетических частиц через вещество. С другой стороны, на практике часто невозможно или нерационально выполнять полное трехмерное моделирование всей микросхемы, то есть возникает потребность в сопряжении технологических САПР с программами для расчетов электрических цепей. В связи с этим представляется целесообразным разработать интегрированную методику моделирования радиационного воздействия на СБИС.

В настоящей работе рассматривается первая часть указанной методики: объединение моделирования Монте-Карло радиационного транспорта с приборно-технологическим моделированием в TCAD. В качестве объекта исследования были выбраны битовые ячейки памяти СОЗУ под действием нейтронов с энергией 14 МэВ. Известно, что современные блоки оперативной памяти подвержены так называемым одиночным сбоям, каждый из которых вызывается попаданием одной высокозенергетической частицы. Среди одиночных сбоев наиболее распространены самопроизвольные переключения ячеек, в результате которых записанные двоичные значения заменяются на противоположные, см., например, [2]. Подобные явления затрагивают широкий класс оборудования от авиационной электроники до медицинской техники [3], поэтому их всестороннее изучение представляется важной задачей. Данная статья посвящена случаю воздействия единичных нейтронов, которые также могут приводить к появлению ложных битов.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На рис. 1 и 2 показана ячейка СОЗУ, которая задавалась в представленных далее численных экспериментах. Она состоит из шести транзисторов, выполненных по технологии КМОП КНИ с минимальным проектным размером 0,35 мкм. Для моделирования взаимодействия падающего излучения с материалами, из которых состоит ячейка, использовался программный комплекс Geant4 [4] и модуль TPT [5], являющийся его расширением. TPT разрабатывается в Центре фундаментальных и прикладных исследований ФГУП «ВНИИА» с 2012 года. Он ориентирован на прецизионное описание нейтронной физики, поэтому в расчете ядерные реакции с участием нейтронов воспроизводились с помощью TPT, а распространение частиц-продуктов (ионов, гамма-квантов)

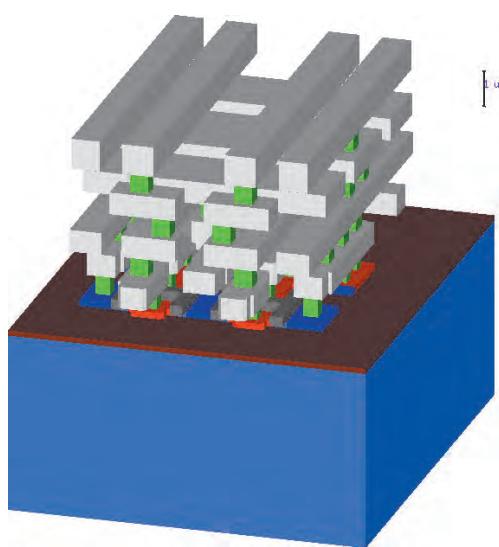


Рис. 1. Исследуемая ячейка СОЗУ на базе шести транзисторов

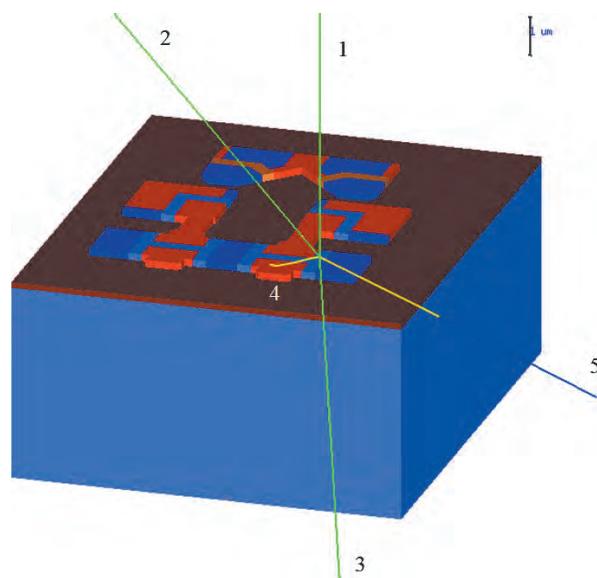


Рис. 2. Событие с большим энерговыделением в активном кремниевом слое



моделировалось с помощью Geant4. Построение геометрии в формате Geant4 выполнялось автоматически на основе файлов с топологическими схемами слоев, а также сопроводительной информации об их толщинах и свойствах материалов.

На рис. 1 подложка из кремния *p*-типа показана голубым, легированные области в активном слое кремния — оттенками синего (бор) и красного (фосфор), заглубленный оксидный слой — коричневым, поликремниевые затворы и шины — темно-серым, дорожки металлизации — светло-серым (четыре слоя), контакты между слоями — зеленым. Для наглядности боковая и межслойная изоляция сделана прозрачной.

На рис. 2 представлено одно из событий, полученных в расчете с использованием Geant4/TPT. Траектории нейтральных частиц показаны зеленым (1 — нейтрон, 2 и 3 — гамма-кванты), траектории вторичных ионов — синим (4 —  $^{25}\text{Mg}$ , 5 — альфа-частица). Желтым обозначены точки взаимодействия или пересечения границ объемов. Для ионов внутри ячейки устанавливалось ограничение на длину шага в 10 нм, поэтому их траектории на данном масштабе выглядят желтыми. Ради наглядности вышележащие слои не показаны.

В численных экспериментах задавался плоскопараллельный однородный поток нейтронов, направленный нормально к поверхности микросхемы. Частицы налетали на ячейку с лицевой стороны, их начальные положения равномерно распределялись по площади  $10 \times 12 \text{ мкм}^2$ . Было промоделировано  $10^{10}$  событий (одно событие соответствует одному падающему нейтрону).

Для дальнейшего анализа наведенных сигналов с помощью TCAD отбирались события с максимальным энерговыделением в чувствительных областях, так как они с наибольшей вероятностью приводят к сбоям. Из принципов функционирования полевых транзисторов и ячейки СОЗУ в целом следует, что с точки зрения самопроизвольных переключений чувствительными к ионизационному воздействию являются стоковые *p-n*-переходы закрытых транзисторов, находящиеся под обратным смещением.

Пример события, представляющего интерес, приведен на рис. 2. В данном случае вблизи поверхности *n*-канального транзистора Н-типа произошла реакция  $^{28}\text{Si}(n,a)^{25}\text{Mg}$  с рождением следующих вторичных частиц: ядра магния-25 с энергией 1,17 МэВ, ядра гелия-4 (альфа-частицы) с энергией 7,44 МэВ, гамма-кванта с энергией 1,77 МэВ (траектория 3), гамма-кванта с энергией 0,977 МэВ (траектория 2). Далее ион магния пересек заглубленный оксидный слой и остановился в подложке, альфа-частица также прошла через изолятор и подложку, но в другом направлении и вылетела из расчетной области. Гамма-кванты покинули объем ячейки без взаимодействия. Полная энергия, оставленная ионами в активном слое кремния, составила 558 кэВ, из них около 515 кэВ пришлось на область стокового *p-n*-перехода. В этом событии одновременно два иона оказали воздействие на транзистор: воспроизвести подобную ситуацию встроенными средствами TCAD не представляется возможным.

Как известно, вдоль треков заряженных частиц в полупроводнике образуются электрон-дырочные пары с фиксированным расходом энергии на пару. Чтобы задать в TCAD источники свободных носителей заряда, соответствующие ионным трекам, последние проецировали на трехмерную ортогональную сетку. Траектории, которые строятся Geant4/TPT, представляют собой ломаные линии с энерговыделением, определенным для

каждого сегмента. После наложения сетки они преобразуются в трехмерный массив, описывающий пространственное распределение осажденной энергии. Данный массив записывался в файл, чтобы затем его можно было загрузить в TCAD.

### МЕТОДИКА ВСТРАИВАНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО С ПОМОЩЬЮ GEANT4/TPT, В СИСТЕМУ ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Распределение свободных носителей задавалось с помощью интерфейса PMI (PhysicalModelInterface), предоставленного разработчиками TCAD для встраивания внешних моделей генерации-рекомбинации носителей заряда. Поскольку для сходимости численных методов необходимо, чтобы в нулевой момент времени не было никаких воздействий (для успешного получения начального приближения), изменение скорости генерации носителей во времени задавалось в соответствии с временным законом (по аналогии с тяжелыми ионами в [1]):

$$F(t) = \frac{2 \cdot \exp\left(-\left(\frac{t - \text{time}}{t_0}\right)^2\right)}{t_0 \sqrt{\pi} \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\text{time}}{t_0}\right)\right)}. \quad (1)$$

В указанном выражении *time* — момент времени, в который произошло взаимодействие с частицей, *t<sub>0</sub>* — константа, задаваемая на уровне  $2 \cdot 10^{-12}$  с, *t* — текущий момент времени, *F(t)* — функция распределения выделения энергии во времени.

Пространственное распределение (результат моделирования Geant4/TPT) задавалось с помощью файла, в котором представлено выделение энергии по малым объемам транзистора в виде трехмерного массива. При этом использовалась равномерная сетка, что упростило передачу информации в TCAD. Программа на языке C++ открывает файл, имя которого задается пользователем через интерфейс модуля Sentaurus Device системы TCAD, считывает распределение в некоторый одномерный массив, хранящийся в оперативной памяти. При расчете скорости генерации программой оценивается принадлежность вершины сетки конечных элементов определенному объему с целочисленными координатами *i, j, k*, после чего из одномерного массива, хранящегося в оперативной памяти, считывается значение с индексом *I*, рассчитываемым по формуле

$$I = k \cdot i_{\max} \cdot j_{\max} + j \cdot i_{\max} + i. \quad (2)$$

Здесь *i<sub>max</sub>* и *j<sub>max</sub>* — максимальные целочисленные координаты во фрагменте топологии. Выражение (2) показывает, как были упорядочены данные при записи файла.

Целочисленные координаты получаются из вещественных координат *x, y, z* делением разности текущей координаты и минимальной координаты по данной оси на величину шага разбиения. От результата деления затем берут целую часть:

$$\begin{cases} i = \left[ \frac{x - x_{\min}}{h_x} \right], \\ j = \left[ \frac{y - y_{\min}}{h_y} \right], \\ k = \left[ \frac{z - z_{\min}}{h_z} \right]. \end{cases} \quad (3)$$

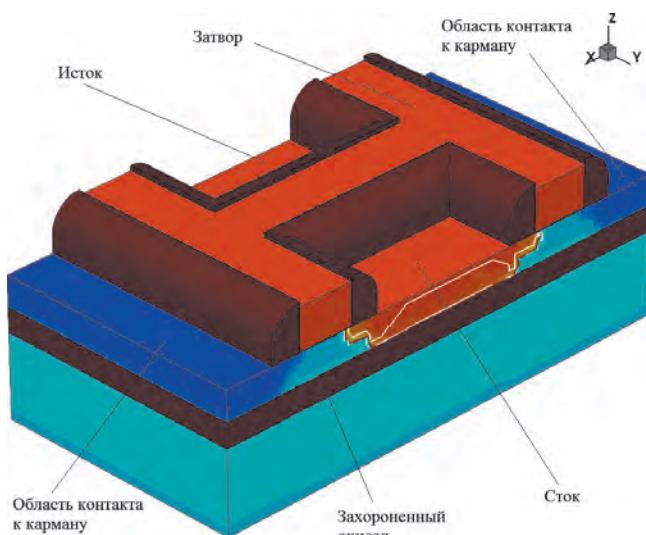


Рис. 3. Конструкция исследуемого транзистора

В указанных выражениях (3)  $x_{\min}, y_{\min}, z_{\min}$  — минимальные значения координат,  $h_x, h_y, h_z$  — шаг равномерного разбиения области на элементы.

За пределами области генерации, которым соответствуют координаты  $x_{\min}, y_{\min}, z_{\min}$  и  $x_{\max}, y_{\max}, z_{\max}$ , электрон-дырочные пары не образуются.

Плотность возникших в результате ионизации электрон-дырочных пар находится как отношение энергии  $W_I$ , выделившейся в рассматриваемой области, к ее объему и к энергии  $E_0$ , необходимой для рождения одной пары:

$$G(i, j, k) = \frac{W_I}{E_0 \cdot h_x \cdot h_y \cdot h_z}. \quad (4)$$

Известно, что энергия  $E_0$  при температуре  $T = 300$  К для кремния равна 3,62 эВ. Чтобы описать эффект в расширенном диапазоне температур, необходимо учесть зависимость  $E_0(T)$ .

Полученное в соответствии с (4) значение умножается затем на выражение (1) и дает скорость генерации носителей заряда в единице объема в зависимости от  $t$ . В дальнейшем модель можно усложнить, записывая по результатам моделирования Монте-Карло не трехмерный, а четырехмерный массив, в котором четвертой координатой будет время.

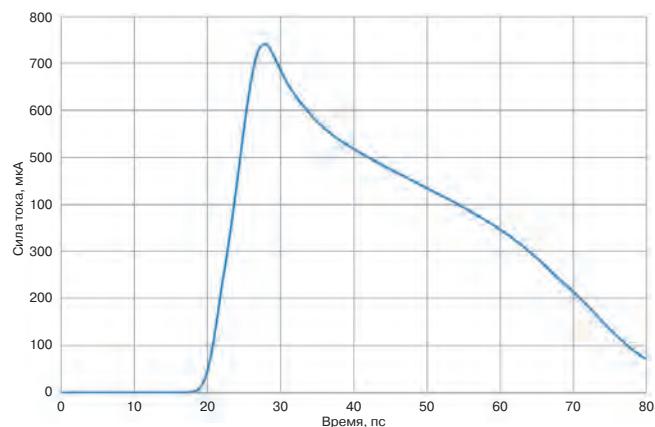


Рис. 4. Временная зависимость тока на стоке

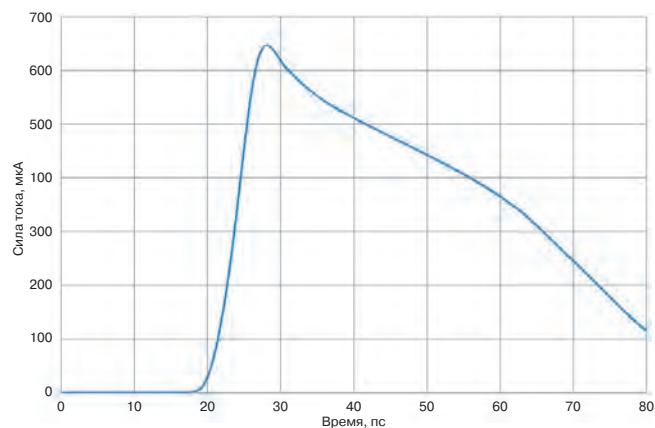


Рис. 5. Временная зависимость тока через контакт к карману

В конечном счете распределенный источник носителей заряда, отражающий пролет вторичных ионов, имплементировался в TCAD с помощью секции PMI\_Recombination.

Тестирование разработанной методики проводилось на транзисторе Н-типа, который подвергался воздействию заряженных частиц в рассмотренном выше событии (рис. 2). Его трехмерная модель в TCAD представлена на рис. 3. В расчетах параметр *time* в выражении (1) задавался равным 25 пс. На всех электродах выставлялись нулевые напряжения.

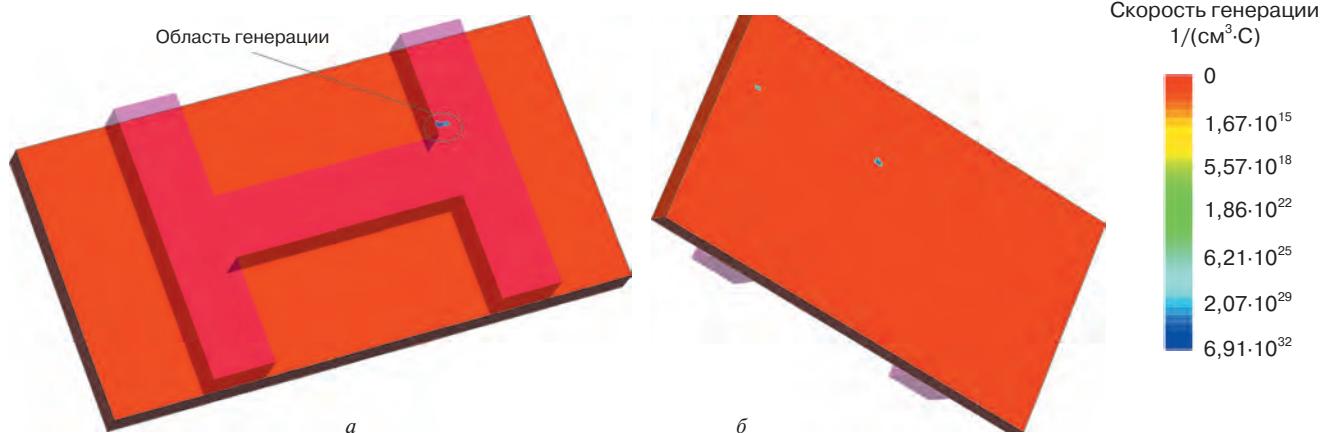


Рис. 6. Распределение скорости генерации носителей заряда в момент воздействия ионов ( $t = time$ ): а) вид сверху, б) вид со стороны оксидного слоя



Ниже приведены результаты моделирования наведенных токовых импульсов для события, показанного на рис. 2.

Как следует из представленных графиков, в результате встраивания описанной модели произошла генерация электронно-дырочных пар в заданной области транзистора. Это привело к процессам перетекания носителей и возникновению токовых всплесков на всех электродах. Результаты моделирования хорошо соотносятся с опубликованными данными [6, 7].

Рис. 6 также наглядно демонстрирует, что генерация пар происходит вдоль двух ионных треков, расходящихся из общей вершины, которая расположена в приповерхностном слое вблизи границы затвора, — в полном согласии с рис. 2.

Кроме того, временного интервала в 80 пс оказалось недостаточно для завершения переходных процессов в транзисторе: токи через сток и контакт к карману хоть и убывают, но не достигают нулевого значения, соответствующего стационарному режиму.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было реализовано совмещение радиационного моделирования Монте-Карло с приборно-технологическим моделированием на основе TCAD путем передачи энерговыделения вдоль треков заряженных частиц в виде трехмерного массива, который затем использовался для задания областей генерации свободных носителей заряда. Указанное совмещение позволило детально описать процессы, развивающиеся в транзисторах КМОП КНИИ при облучении их нейтронами с энергией 14 МэВ.

Результаты проведенных численных экспериментов соответствуют изложенным в литературе представлениям о радиационно-наведенных токовых импульсах, что свидетельствует в пользу корректности разработанной методики.

Отметим, что разбиение расчетной области в TCAD выполнялось неавтоматизированным способом, что привело к возникновению избыточного количества вершин и, как следствие, уменьшению скорости счета. В связи с этим планируется разработать модуль, позволяющий генерировать управляющую

информацию для оптимального построения расчетной сетки, с учетом данных о пространственном распределении выделившейся энергии.

В работе представлена часть интегрированной методики моделирования радиационного воздействия на СБИС. Для ее воплощения в полном объеме необходимо также сопряжение приборно-технологического и схемотехнического моделирования.

*Расчеты с использованием Geant4 и TPT выполнены во ФГУП «ВНИИА». Разработка топологии ячейки памяти и технологического маршрута изготовления проведена в ФГУФНЦ НИИСИ РАН. Расчеты в системе приборно-технологического моделирования со встраиванием моделей генерации носителей выполнены в МГТУ им. Н. Э. Баумана.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Synopsys TCAD, <https://www.synopsys.com/silicon/tcad.html>.
2. Peronnard P., Velazco R. and Hubert G. *Real-Life SEU Experiments on 90 nm SRAMs in Atmospheric Environment: Measures Versus Predictions Done by Means of MUSCA SEP3 Platform* // IEEE Transactions on nuclear science. Vol. 56. № 6. Dec. 2009. P. 3450–3455.
3. Neutrons for radiation hardness studies: Neutron-induced Single Event Effects, <http://www.lnl.infn.it/~lnldir/Seminario%20sorgenti/PDF/Wyss.pdf>.
4. Geant4 collaboration, <http://geant4.web.cern.ch/geant4/index.shtml>.
5. Kosov M., Savin D. *New exclusive CHIPS-TPT algorithms for simulation of neutron-nuclear reactions* // J. Phys. Conf. Ser. Vol. 608. № 1, 012050 (2015).
6. Glushko A.A., Zinchenko L.A., Shakhnov V.A. *Simulation of the impact of heavy charged particles on the characteristics of field-effect silicon-on-insulator transistors* // Journal of communications technology and electronics. Т. 60. № 10. 2015. P. 1134–1140.
7. 3-D Simulation of Heavy-Ion Induced Charge Collection in SiGe HBTs on SOI // radhome.gsfc.nasa.gov. [https://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/tns04\\_Mutu.pdf](https://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/tns04_Mutu.pdf).

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



### ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

А. И. Белоус, С. А. Ефименко,  
А. С. Турцевич

В книге представлена информация о принципах работы, составе и основных технических характеристиках базовых элементов силовой электроники. На практических примерах рассмотрены основные аспекты проектирования и изготовления элементов силовой электроники, этапы расчета и конструирования основных типов энергосберегающих приборов и устройств для автоэлектроники, осветительной техники, управления электродвигателями и источниками питания.

Книга ориентирована на широкий круг читателей – ученых, инженерно-технических работников, студентов, инженеров – разработчиков радиоэлектронной аппаратуры.

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 216 с.

+ 12 с. цв. вкл.

ISBN 978-5-94836-367-7

Цена 517 руб.

## КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 (495) 234-0110; ☎ +7 (495) 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru