

Повышение эффективности моделирования переходных процессов в КМОП-микросхемах с учетом одиночных радиационных эффектов

В.С. Кононов¹, Н.А. Шелепин²

¹АО «Специализированное конструкторско-технологическое бюро электронных систем», г. Воронеж, Россия

²АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», г. Москва, Россия

n.shelepin@list.ru

Стандартные программы позволяют моделировать КМОП-микросхемы с учетом воздействия радиации на активные элементы. Однако применение таких программ при моделировании микросхем с учетом одиночных радиационных эффектов (ОРЭ) не отличается эффективностью в основном из-за сложности эквивалентных схем, описывающих ОРЭ.

Предложена техника описания ОРЭ с применением П-образной аппроксимации реального вида ионизационных токов в $p-n$ -переходах, что позволяет задавать эти токи в виде исходных данных. Аппроксимированные значения токов отдельно вычисляются с помощью программы TCAD Sentaurus для набора типовых элементов и хранятся в виде библиотеки. При моделировании ОРЭ в КМОП-микросхемах с автоматически синтезированной топологией на основе функциональной библиотеки использованы метки двух типов, которыми снабжены библиотечные элементы. Метки первого типа присваиваются на постоянной основе всем библиотечным элементам при создании библиотеки, метки второго типа – на этапе функционального описания проектируемой микросхемы.

Рассмотренный подход упрощает работу наиболее распространенных синтезаторов, которые допускают манипулирование библиотечными элементами, что предпочтительнее. Субъективный фактор при выборе меток библиотечных элементов оправдан при выявлении слабых мест в конструкции микросхемы и при оценке реакции КМОП-микросхемы на ОРЭ в этих местах.

Ключевые слова: микросхема; КМОП; одиночные радиационные эффекты; моделирование; компонент; библиотека.

Для цитирования: Кононов В.С., Шелепин Н.А. Повышение эффективности моделирования переходных процессов в КМОП-микросхемах с учетом одиночных радиационных эффектов // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22. – № 4. – С. 361–368. DOI: 10.24151/1561-5405-2017-22-4-361-368

An Increase of Efficiency in Modeling Transient Processes in CMOS-Microchips Considering Single Radiation Effects

V.S. Kononov¹, N.A. Shelepin²

¹*Specialized engineering design bureau «Electronic Systems» joint-stock company, Moscow, Russia*

²*Joint Stock Company «Molecular Electronics Research Institute», Moscow, Russia*

n.shelepin@list.ru

The conventional programs permit to simulate the CMOS-microchips considering the influence of cosmic rays in active elements. However, the usage of such programs in simulation of the microchips considering the influence of the Single Event Effects (SEE) is ineffective mainly because of complexity of equivalent schemes, which describe SEE.

The description technique, offered by the authors, uses the Π -type approximation of real ionization currents in p/n-junctions. It enables to set these currents as the initial data. The approximated values of currents are computed using TCAD Sentaurus for a standard set of elements and are stored as a library. In simulation of SEE in CMOS-microchips with the automatically generated topology, based on the functional library, two types of labels are used, which are assigned to the library elements (LE). The labels of the first type are assigned permanently to all LE during creation of the library. The labels of the second type are used during the microchip functional description.

The approach, which has been considered, simplifies the work of the most frequently used synthesizers, which permits to manipulate the library elements. Such method simplifies the work of the most frequently used synthesizers, which permits to manipulate LE. The subjective factor in choosing the labels for LE is justified while searching for <<weak>> spots in the microchip structure and in evaluation of the CMOS-microchip reaction to SEE at those spots.

Keywords: microchip; CMOS; single event effects; simulation; component; library.

For citation: Kononov V.S., Shelepin N.A. An Increase of Efficiency in Modeling Transient Processes in CMOS-Microchips Considering Single Radiation Effects // Proc. of Universities. Electronics. – 2017. – Vol. 22. – No. 4. – P. 361–368. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-4-361-368

Введение. При проектировании КМОП-микросхем используются стандартные программы электрического моделирования переходных процессов. Описывать радиационные эффекты при воздействии одиночных ядерных частиц желательно в виде моделей, удобных для использования в таких программах. Например, ионизационные эффекты, вызванные воздействием импульсной радиации на активные элементы КМОП-микросхем [1–6], хорошо описываются генераторами тока, включенными параллельно обратному смещенным p – n -переходам в этих элементах. Программные средства на основе таких моделей уже существуют и успешно применяются.

В процессе моделирования переходных процессов в КМОП-микросхемах необходимо учитывать одиночные радиационные эффекты (ОРЭ). На качественном уровне большинство физических механизмов, лежащих в основе ОРЭ и определяющих чувст-

вительность к ним КМОП-микросхем, изучено достаточно хорошо [7–19]. Однако из-за вероятностного характера ОРЭ результаты качественного анализа не удастся привычным образом конвертировать в стандартные программы электрического моделирования микросхем на элементном уровне, что особенно важно при моделировании аналоговых блоков КМОП-микросхем. Эквивалентные схемы достаточно громоздки и неудобны при моделировании экстракта (электрической схемы с паразитными элементами) [12].

Подходы, основанные на использовании программы Verilog-A для модификации моделей элементов с учетом радиационных эффектов, существенно усложняют процесс моделирования и не совсем удобны в реальной практике проектирования КМОП-микросхем, особенно КМОП-АЦП. В результате проблема моделирования микросхем с учетом влияния ОРЭ остается актуальной и требует поиска приемлемого решения.

Цель настоящей работы – разработка способа моделирования переходных процессов в КМОП-микросхемах с учетом ОРЭ, проявляющихся в виде обратимых и необратимых функциональных сбоев.

Представляют интерес два случая моделирования переходных процессов с учетом ОРЭ, принимая во внимание особенности проектирования КМОП-микросхем. В первом случае КМОП-микросхемы проектируются на основе предварительно отобранных типовых элементов (транзисторов, резисторов, конденсаторов и т.д.) и некоторого набора библиотечных элементов (БЭ). При проектировании топологии таких микросхем допускается автоматический синтез отдельных блоков, но при моделировании экстракта все синтезированные блоки раскрываются до уровня элементов. Во втором случае микросхемы проектируются на основе библиотеки функциональных элементов и блоков или БЭ. Топология таких микросхем синтезируется автоматически, а моделирование переходных процессов на элементном уровне вообще не проводится. Вместо этого проводится так называемое логико-временное моделирование, которое позволяет оценить правильность функционирования микросхем.

Моделирование переходных процессов в КМОП-микросхемах на элементном уровне с учетом одиночных радиационных эффектов. Согласно очевидным представлениям моделирование переходных процессов в составе полной КМОП-микросхемы с учетом случайного попадания одиночных ядерных частиц в активные области тех или иных элементов является нереальной задачей. Практическая значимость такого подхода также неочевидна. Более приемлемым представляется подход, основанный на подборе конкретных элементов в тех или иных блоках КМОП-микросхемы исходя из приоритета чувствительности к одиночным ядерным частицам, попадание которых в активные области этих элементов может с большой вероятностью спровоцировать сбой микросхемы. Опыт проектирования микросхем показывает, что наибольший приоритет такого типа имеет базовый элемент конденсаторных КМОП-АЦП. Элемент состоит из МОП-транзистора и переключаемого этим транзистором конденсатора, так как импульс ионизационного тока в ключевом МОП-транзисторе будет приводить к изменению зарядового состояния конденсатора и, следовательно, к потере точности преобразования. Также в состав базового элемента входит токовое зеркало Уилсона со стартовой схемой включения [21], которая не обеспечивает автоматическое восстановление работы зеркала после попадания в активный элемент одиночных ядерных частиц.

При «ручном» проектировании, которому соответствует рассматриваемый случай, описываемый подход оправдан, так как никто кроме разработчика не сможет в полной мере оценить слабые места проектируемой микросхемы. Кроме того, возможные издержки, связанные с неточностью описания ОРЭ, будут нивелироваться инерционными

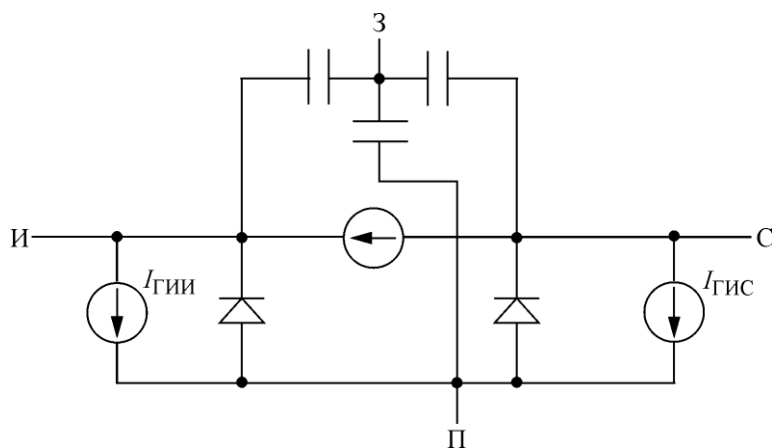


Рис.1. Эквивалентная схема n -канального МОП-транзистора для моделирования эффектов массовой ионизации ($I_{ГИИ}$, $I_{ГИС}$ – генераторы ионизационных токов в истоковом и стоковом p - n -переходах; И, 3, С, П – выводы истока, затвора, стока и подложки соответственно)

Fig.1. Equivalent scheme of n -channel MOS-transistor for simulation of mass ionization effects ($I_{ГИИ}$, $I_{ГИС}$ – generators of ionization currents in source and drain p - n -junctions; И, 3, С, П – markers for source, gate, drain and bulk pins)

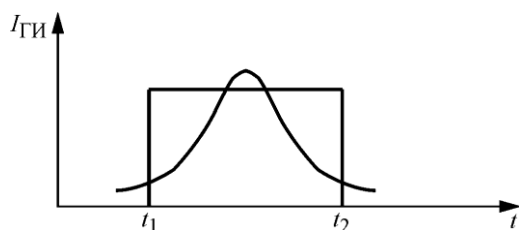


Рис.2. Аппроксимация (1) реального вида (2) генератора ионизационного тока $I_{ГИ}$ в интервале $t_1 \leq t \leq t_2$ эффективного воздействия ОЯЧ

Fig.2. Approximation (1) of real view (2) of ionization current $I_{ГИ}$ in range of $t_1 \leq t \leq t_2$ for effective impact of single particle

эффектами в процессе формирования отклика микросхемы на появление ОРЭ. Поэтому модельное представление ОРЭ, сопровождающихся образованием ионизационных токов в p - n -переходах, в существующих программах можно оставить на уровне представления эффекта воздействия импульсной радиации (рис.1) с достаточной для практики П-образной аппроксимацией реального вида генераторов ионизационных (ГИ) токов в истоковом (ГИИ) и стоковом (ГИС) p - n -переходах (рис.2). Такая аппроксимация позволяет задавать ионизационные токи при-

вычным способом в виде исходных данных.

В работе [20] получено подтверждение использования П-образной аппроксимации. Проведена аналитическая оценка влияния многоступенчатой П-образной аппроксимации реальной формы импульса ионизационного тока на время хранения промежуточной информации в конденсаторных КМОП-АЦП. Многократная оценка применимости П-образной аппроксимации в практике моделирования сложных КМОП-микросхем, состоящих из нескольких сотен и более элементов, по сравнению с другими более точными видами аппроксимации не привела к существенному расхождению конечных результатов моделирования. Можно говорить о факторе точности только при моделировании микросхем с малым количеством элементов (например, БЭ), когда реакция таких микросхем на ОРЭ формируется при прохождении сигнала через относительно небольшое количество вентилях. В рассматриваемом случае это не имеет практического значения. Последующее использование одноступенчатой П-образной аппроксимации ионизационных токов при моделировании реальных КМОП-АЦП и других микросхем с учетом ОРЭ позволило повысить эффективность разработки таких микросхем. Так, например, применение П-образной аппроксимации по сравнению с из-

вестным двухэкспоненциальным представлением существенно сокращает время моделирования сложных КМОП-микросхем. В частности, при моделировании 24-разрядного Δ - Σ -КМОП-АЦП время одного моделирования удалось сократить практически в 1,5 раза (с 3 недель до ~ 2 недель). Так как количество таких моделирований при учете разбросов по температуре, напряжению питания и технологии обычно составляет 16–20 итераций, то выигрыш по времени моделирования может достигать 4–5 месяцев. Подобный результат при сохранении приемлемой точности обеспечивается при моделировании сложных КМОП-микросхем различных типов, и его нельзя недооценивать.

Получение реальных характеристик ионизационных токов $I_{\text{гии}}$, $I_{\text{гис}}$ в результате ОРЭ проблематично. Поэтому используется приборно-технологическое моделирование реальных структур, предварительно откалиброванных на основании измерений отклика тестовых структур, с помощью программ, например TCAD Sentaurus. Полученные данные накапливаются и оформляются в виде отдельных библиотек для используемых базовых технологий. В зависимости от моделируемой ситуации аппроксимированные значения токов находятся в пределах 0,4–0,7 от пиковых значений, а интервал t_2-t_1 выбирается исходя из равенства площадей соответствующих импульсов.

Моделирование переходных процессов с учетом одиночных радиационных эффектов в КМОП-микросхемах с автоматически синтезированной топологией на основе функциональной библиотеки. Моделирование влияния ОРЭ на функционирование КМОП-микросхем с автоматически синтезированной топологией – сложная процедура. Автоматически синтезированная топология является своеобразным «черным ящиком», в котором трудно найти нужный БЭ, даже если имеется полная уверенность в том, что такой элемент использовался при синтезе топологии. Возможным решением этой проблемы может быть использование двух типов меток для маркировки БЭ с учетом приоритета чувствительности к воздействию ОРЭ.

Первый тип меток может присваиваться на постоянной основе всем БЭ, входящим в состав функциональной библиотеки. Число таких меток в общем случае должно равняться количеству БЭ. Однако на практике некоторые БЭ могут иметь одинаковый приоритет и, следовательно, они должны маркироваться одинаковыми метками. В результате при автоматическом синтезе топологии будут возникать множества БЭ с одинаковыми приоритетами, в которых трудно сепарировать конкретный элемент с определенным приоритетом для имитации ОРЭ. Для этого необходимы метки второго типа, которые должны присваиваться на этапе функционального описания проектируемой микросхемы согласно функциональной значимости блоков, содержащих данные БЭ. Такие метки должны иметь более высокий приоритет и не допускать повторяемости при маркировке разных БЭ. В результате проблема сепарирования нужных БЭ существенно упрощается (рис.3).

Использование меток второго типа возможно только при синтезе топологии на основе жесткого набора БЭ. Однако наиболее распространенные синтезаторы (Synopsis и другие) применяют алгоритмы, допускающие манипулирование БЭ при синтезе топологии, что предпочтительнее.

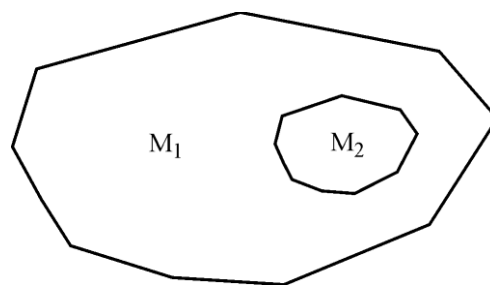


Рис.3. Иллюстрация техники сепарирования нужных БЭ (M_1 , M_2 – множества меток первого и второго типов)

Fig.3. Illustration of technique for separation of LE (M_1 , M_2 – sets of labels of first and second type)

С помощью процедуры анализа меток можно выявить БЭ с наибольшим приоритетом или при наличии нескольких равнозначных приоритетов выбрать БЭ по принципу «первый из списка». Предложенный подход в определенной степени является субъективным. В реальной КМОП-микросхеме любой тип ОРЭ в БЭ и в активном элементе может привести к отказу или сбою. Поэтому разработчику важно выявить по возможности все особенности формирования откликов микросхемы на ОРЭ в ее слабых местах, чтобы предотвратить или минимизировать их влияние уже на этапе проектирования микросхемы. Тогда субъективный подход вполне оправдан.

Рассмотрим технику имитации ОРЭ в составе БЭ. Для оптимального описания реакции БЭ на ОРЭ проводится дополнительная паспортизация всех БЭ в исходной функциональной библиотеке с использованием подходов, применяемых при моделировании переходных процессов в КМОП-микросхемах на элементном уровне с учетом ОРЭ. Основываясь на полученных паспортных данных, можно с помощью внешних генераторов на выводах локализованных БЭ симулировать реакцию этих БЭ на ОРЭ и в итоге получить прогнозируемый отклик КМОП-микросхемы. Техника использования таких генераторов является очевидной и не требует специальной модификации стандартных программ логико-временного анализа.

Закключение. Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

- учет влияния ОРЭ в процессе моделирования переходных процессов с использованием стандартных программ является вполне реальной задачей, а его описание зависит от способа проектирования топологии КМОП-микросхемы;
- при моделировании переходных процессов с учетом влияния ОРЭ в КМОП-микросхемах на элементном уровне использование П-образной аппроксимации реального вида ионизационных токов, адаптированной к модели импульсной ионизации, позволяет применять стандартные программы без дополнительной модификации;
- при моделировании переходных процессов с учетом влияния ОРЭ в КМОП-микросхемах с автоматически синтезированной топологией на основе функциональной библиотеки использование маркировки библиотечных элементов метками двух типов позволяет локализовать нужные элементы для имитации воздействия ОРЭ. При этом техника имитации основана на использовании внешних генераторов на выводах локализованных элементов, что не требует специальной модификации стандартных программ.

Литература

1. High-performance SPICE development including an analytical transient photocurrent BJT model / **L. Waters, C. Axness, W. Beezhold et al.** // Sandia National Laboratories, Albuquerque. – SAND2000 – 1999J.
2. **Schwank J.** Total dose effects in MOS devices // Radiation Effects – From Particles to Payloads. IEEE NSREC Short Course. – 2002. – P. 111–123.
3. **Holms C.R., Poindexter E.H.** The silicon-silicon-dioxide system: its microstructure and imperfections // Rep. Prog. Phys. – 1994. – №57. – P. 791–852.
4. Microscopic nature of border traps in MOS devices / **W.L. Warren, M.R. Shaneyfelt, D.M. Fleetwood et al.** // IEEE Trans.Nucl.Sci. – 1994. – Vol. 41. – N. 57. – P. 1817–1827.
5. **Fleetwood D.M.** Border traps in MOS devices // IEEE Trans.Nucl.Sci. – 1992. – Vol. 39. – N. 2. – P. 169–271.
6. **Dodd P.E., Massengill L.W.** Basic mechanisms and modeling of single-event upset in digital microelectronics // IEEE Trans.Nucl.Sci. – 2003. – Vol. 50. – P. 583–602.
7. **May T.C., Woods M.H.** Alpha-particle-induced soft errors in dynamic memories // IEEE Trans. Electron Devices. – 1979. – Vol. NS-26. – P. 2–9.
8. Impact of technology trends on SEU in CMOS SRAMs / **P.E. Dodd, F.W. Sexton, G.L. Hash et al.** // IEEE Trans.Nucl.Sci. – 1996. – V. NS-43. – N. 6. – P. 2797–2804.

9. **Sexton F.W.** Destructive single-event effects in semiconductor devices and ICs [Text] // IEEE Trans.Nucl.Sci. – 2003. – Vol. 50. – N. 3. – P. 603–621.
10. Evaluation of SEGR threshold in power MOSFETs / **M. Allenspach, J.R. Brews, I. Mouret et al.** // IEEE Trans.Nucl.Sci. – 1994. – Vol. 41. – P. 2160–2166.
11. Snap-back: a stable regenerative breakdown mode of MOS devices / **A. Ochoa, F.W. Sexton, T.F. Wrobel et al.** // IEEE Trans.Nucl.Sci. – 1983. – Vol. 30. – P. 4127–4130.
12. Моделирование влияния ТЗЧ на работу СВЧ СФБ, изготовленных по КМОП-КНИ-технологии / **Д.А. Атамась, Д.А. Концев, А. В. Селецкий и др.** // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. – 2015. – Вып. 3 (159). – С. 60–66.
13. **Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И.** Радиационные эффекты в КМОП ИС. – М.: Радио и связь. – 1994. – 164 с.
14. Simulation study on the effect of multiple node charge collection on error cross-section in CMOS sequential logic / **M.C. Casey, A.R. Duncan, B.L. Bhuvu et al.** // IEEE Trans.Nucl.Sci. – 2008. – Vol. 55. – N. 6. – P. 3136–3140.
15. Simultaneous single event charge sharing and parasitic bipolar conduction in a highly-scaled SRAM design / **B.D. Olson, D.R. Ball, K.M. Warren et al.** // IEEE Trans.Nucl.Sci. – 2005. – Vol. 52. – N. 6. – P. 2132–2136.
16. Significance of strike model in circuit level prediction of charge sharing upsets / **A.M. Francis, D. Dimitrov, J.S. Kauppila et al.** // IEEE Trans.Nucl.Sci. – 2009. – Vol. 56. – N. 6. – P. 3109–3114.
17. Geometry-aware single-event enabled compact models for sub-50nm partially depleted silicon-on-insulator technologies / **J.S. Kauppila, D.R. Ball, M.L. Alles et al.** // IEEE Trans.Nucl.Sci. – 2015. – Vol. 62. – N. 4. – P. 1589–1589.
18. Device-physics-based analytical model for single-event transients in SOI CMOS logic / **D. Kobayashi, K. Hirose, V. Ferlet-Cavrois et al.** // IEEE Trans.Nucl.Sci. – 2009. – Vol. 56. – N. 6. – P. 3043–3049.
19. Прогнозирование локальных радиационных эффектов в ИС при воздействии факторов космического пространства / **А.И. Чумаков, А.Л. Васильев, А.А. Козлов и др.** // Микроэлектроника. – 2010. – Т. 39. – №2. – С. 85–90.
20. **Рембеза С.И., Кононов В.С.** Влияние импульсных ионизирующих излучений на усилители выборки/хранения с КМОП-структурой и подложкой «кремний на изоляторе» // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7. – №3. – С. 47–49.
21. **Baker R.J.** CMOS: circuit design, layout and simulation // IEEE Press. – 2005. – 1039 p.

Поступила 30. 01.2017 г.; принята к публикации 25.04.2017 г.

Кононов Владимир Сергеевич – кандидат технических наук, инженер-конструктор АО «Специализированное конструкторско-технологическое бюро электронных систем» (394033, Россия, г. Воронеж, Ленинский пр-т, д. 160), casandra1983@mail.ru

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

References

1. Waters L., Axness C., Beezhold W. et al. *High-Performance SPICE development including an analytical transient photocurrent BJT model*. Sandia National Laboratories, Albuquerque. SAND2000, 1999J.
2. Schwank J. Total Dose Effects in MOS Devices. Radiation Effects – From Particles to Payloads. *IEEE NSREC Short Course*, 2002, pp. 111–123.
3. Holms C.R., Poindexter E.H. The Silicon-Silicon-Dioxide System: Its Microstructure and Imperfections. *Rep. Prog. Phys.*, 1994, no. 57, pp. 791–852.
4. Warren W.L., Shaneyfelt M.R., Fleetwood D.M. et al. Microscopic Nature of Border Traps in MOS Devices. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1994, vol. 41, no. 57, pp. 1817–1827.
5. Fleetwood D.M. Border Traps in MOS Devices. *IEEE Trans.Nucl.Sci.*, 1992, vol. 39, no.2, pp. 169–271.
6. Dodd P.E., Massengill L.W. Basic mechanisms and modeling of single-event upset in digital microelectronics. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2003, vol. 50, pp. 583–602.

7. May T.C., Woods M.H. Alpha-particle-induced soft errors in dynamic memories. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1979, vol. NS-26, pp. 2–9.
8. Dodd P.E., Sexton F.W., Hash G.L. et al. Impact of technology trends on SEU in CMOS SRAMs. *IEEE Trans.Nucl.Sci.*, 1996, vol. NS-43, no. 6, pp. 2797–2804.
9. Sexton F.W. Destructive single-event effects in semiconductor devices and ICs. *IEEE Trans.Nucl.Sci.*, 2003, vol. 50, no. 3, pp. 603–621.
10. Allenspach M., Brews J.R., Mouret I. et al. Evaluation of SEGR threshold in power MOSFETs. *IEEE Trans.Nucl.Sci.*, 1994, vol. 41, pp. 2160–2166.
11. Ochoa A., Sexton F.W., Wrobel T.F. et al. Snap-back: A stable regenerative breakdown mode of MOS devices. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1983, vol. 30, pp. 4127–4130.
12. Atamas' D.A., Koptsev D.A., Seletskij A.V. et al. Modelirovanie vliyaniya TZCH na rabotu SVCH SFB, izgotovlennykh po KMOP-KNI-tehnologii [Modeling heavy ion influence on SHF CFB operation made in CMOS SOI technology]. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 3. Mikroelektronika – Electronic engineering. Series 3. Microelectronics*, 2015, iss. 3(159), pp. 60–66. (In Russian).
13. Nikiforov A.YU., Telets V.A., Chumakov A.I. *Radiatsionnye ehffekty v KMOP IS*. Moscow, Radio i svyaz', 1994. 164 p. (In Russian).
14. Casey M.C., Duncan A.R., Bhuva B.L. et al. Simulation study on the effect of multiple node charge collection on error cross-section in CMOS sequential logic. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2008, vol. 55, no. 6, pp. 3136–3140.
15. Olson B.D., Ball D.R., Warren K.M. et al. Simultaneous single event charge sharing and parasitic bipolar conduction in a highly-scaled SRAM design. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2005, vol. 52, no. 6, pp. 2132–2136.
16. Francis A.M., Dimitrov D., Kauppila J.S. et al. Significance of strike model in circuit level prediction of charge sharing upsets. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 3109–3114.
17. Kauppila J.S., Ball D.R., Alles M.L. et al. Geometry-Aware Single-Event Enabled Compact Models for Sub-50nm Partially Depleted Silicon-on-Insulator Technologies. *IEEE Trans.Nucl.Sci.*, 2015, vol. 62, no. 4, pp. 1589–1589.
18. Kobayashi D., Hirose K., Ferlet-Cavrois V. et al. Device-physics-based analytical model for single-event transients in SOI CMOS logic. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 3043–3049.
19. Chumakov A.I., Vasil'ev A.L., Kozlov A.A. et al. Prognozirovanie lokal'nykh radiatsionnykh ehffektov v IS pri vozdeystvii faktorov kosmicheskogo prostranstva [Single-event-effect prediction for ICs in a space environment]. *Mikroelektronika – Russian Microelectronics*, 2010, vol. 39, no. 2, pp. 85–90. (In Russian).
20. Rembeza S.I., Kononov V.S. Vliyanie impul'snykh ioniziruyushhikh izluchenij na usiliteli vyborki/khraneniya s KMOP-struktur i podlozhkoj «kremnij na izo-lyatore» [The influence of pulse ionizing radiation on silicon-on-insulator CMOS track and hold amplifiers]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo univer-siteta – The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2011, vol. 7, no. 3, pp. 47–49. (In Russian).
21. Baker R.J. CMOS: Circuit Design, Layout and Simulation. *IEEE Press.*, 2005. 1039 p.

Submitted 30.01.2017; accepted 25.04.2017.

Kononov Vladimir S. – candidate of engineering sciences, design engineering, Specialized engineering design bureau «Electronic Systems» joint-stock company (394033, Russia, Voronezh, Leninskiy prospekt, 160), casandra1983@mail.ru

Shelepin Nikolay A. – doctor of science, first deputy general director, Joint Stock Company «Molecular Electronics Research Institute» (124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1 Zapadny proezd, 12/1), n.shelepin@list.ru