

*A.A. Smolin*

*National Research Nuclear University MEPhI, 115409, Moscow,  
Kashirskoe sh., 31, e-mail: aasmol@spels.ru*

## **Overview of software tools for modeling single event upsets in microelectronic devices**

*Key words: single event upset, ionizing particles, simulation tools*

The paper presents the results of the analysis of existing simulation tools for evaluation of single event upset susceptibility of microelectronic devices with deep sub-micron feature sizes. This simulation tools are meant to replace obsolete approach to single event rate estimation based on integral rectangular parallelepiped model. Three main approaches implemented in simulation tools are considered: combined use of particle transport codes and rectangular parallelepiped model, combined use of particle transport codes and analytical models of charge collection and circuit simulators, and combined use of particle transport codes and TCAD simulators.

*A.A. Смолин*

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, г. Москва,  
Каширское ш., 31, e-mail: aasmol@spels.ru*

## **АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭФФЕКТОВ СБОЕВ В ИЗДЕЛИЯХ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОТДЕЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ**

*Ключевые слова: одиночные сбои, многократные сбои, отдельные ядерные частицы, моделирование*

В статье представлены результаты анализа основных существующих программных средств для моделирования эффектов сбоев в микросхемах с глубоко-субмикронными проектными нормами. Данные программные средства призваны заменить устаревший подход к оценке интенсивности сбоев, основанный на модели интегральной прямоугольной чувствительной области. Выделены три основных подхода применяемых в средствах моделирования эффектов сбоев: использование инструментов для моделирования взаимодействия частиц с веществом совместно с моделью прямоугольной чувствительной области, использование инструментов для моделирования взаимодействия частиц с веществом совместно с аналитическими моделями собирания заряда и средствами схемотехнического моделирования, и использование инструментов для моделирования взаимодействия частиц с веществом совместно со средствами приборно-технологического моделирования.

### **Введение**

Эффекты сбоев возникающие в изделиях микроэлектроники при воздействии отдельных ядерных частиц (ОЯЧ) уже несколько десятилетий являются одной из важных проблем решаемых при разработке устройств предназначенных для космических и специальных применений. Однако с ростом степени интеграции эффекты сбоев стали одним из важных типов естественных источников угроз информационной безопасности и для многих наземных применений, представляющих повышенные требования к надежности. К числу таких применений относятся электроника транспортных средств, медицинские электронные приборы, а также высокопроизводительные системы с большим объемом памяти, такие как суперкомпьютеры и банковские и коммуникационные серверы[1].

В связи с этим одной из важной составляющих процесса разработки микросхем для таких применений стала оценка их чувствительности к эффектам сбоев и оценка эффективности методов повышения стойкости к данным эффектам. Использование специализированных программных средств позволяет решать эту задачу, производя минимальное количество дорогостоящих тестовых схем, необходимых в этом случае только для настройки применяемых моделей вместо проверки каждого технологического или топологического решения [2-3].

## АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭФФЕКТОВ СБОЕВ В ИЗДЕЛИЯХ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОТДЕЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ

В течение многих лет общепринятым подходом к решению данной проблемы было использование средств для расчета интенсивности сбоев в заданной радиационной обстановке, основанных на модели интегральной прямоугольной чувствительной области (IRPP – integral rectangular parallelepiped). Однако для современных микросхем с суб-100 нм проектными нормами данный подход не всегда применим. К основным факторам, обусловившим его устаревание, относятся невозможность учета эффектов многократных сбоев, невозможность учета формы импульса ионизационной реакции, имеющей принципиальное значение при моделировании отклика современных быстродействующих ИС, а также невозможность учета более одного типа взаимодействия частиц ионизирующего излучения с веществом [4-6].

Использование инструментов моделирования, основанных на физических моделях, позволяет полностью или частично преодолеть многие из ограничений модели IRPP. Подобные инструменты формируют поток частиц и проводят реалистичное моделирование процесса прохождения данных частиц через заданную геометрию устройства, учитывая передачу энергии за счет всех известных процессов от всех падающих частиц. Процессы передачи энергии при взаимодействии с ансамблем частиц носят вероятностный характер, который необходимо учитывать при проведении моделирования. Естественным подходом к решению данной проблемы является использование метода Монте-Карло в инструментах для физического моделирования. Наиболее широко используемым инструментом для моделирования прохождения частиц через вещество методом Монте-Карло является Geant4.

### Концепция многоуровневого моделирования

Решение задачи моделирования прохождения частицы через устройство является только одной из составляющих многоуровневого подхода к оценке параметров чувствительности к эффектам сбоев, реализованного в программных средствах рассматриваемых в настоящей работе. В общем случае подобные программные средства включают следующие пять составляющих:

- модуль для расчета спектра воздействующих частиц с учетом параметров окружения и защиты;
- модуль для расчета энерговыделения при взаимодействии частиц с веществом;
- модуль для расчета ионизационной реакции отдельных чувствительных областей при сборе заряда с трека частицы;
- модуль для расчета ионизационной реакции схемы;
- модуль постобработки результатов моделирования для расчета параметров чувствительности схемы (сечение и интенсивность сбоев, карты чувствительности).

В каждом программном средстве данные составляющие реализованы по-разному и могут полностью отсутствовать, требуя использования дополнительных сторонних средств, или быть представлены только в качестве интерфейсов для совместного использования со сторонними средствами. Однако основные отличия между рассматриваемыми программными средствами связаны с различными подходами к расчету ионизационной реакции отдельных чувствительных областей и схемы в целом.

### Основные подходы

Наиболее простым подходом является использование инструментов физического моделирования взаимодействия частиц с веществом для уточнения модели RPP, за счет получения более реалистичного спектра энерговыделения при учете большего числа физических процессов. При этом по-прежнему используются концепции чувствительной области и критического заряда, однако передача энергии может рассчитываться для любого числа чувствительных областей и любого расположения относительно них трека

## АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭФФЕКТОВ СБОЕВ В ИЗДЕЛИЯХ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОТДЕЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ

первичной частицы. В рамках данного подхода для расчета интенсивности сбоев могут использоваться коды общего назначения для моделирования взаимодействия частиц с веществом, такие как MCNPX[7] и FLUKA[8].

Более продвинутым подходом является использование инструментов для моделирования прохождения частиц совместно с аналитическими моделями собирания заряда и средствами схемотехнического моделирования. Такие средства, например инструменты для SPICE-моделирования, позволяют определить, возникнет ли сбой в рассматриваемой цепи из-за импульса ионизационного тока, образующегося при прохождении частицы, и не требуют априорного знания о критическом заряде и механизмах возникновения сбоя в цепи. Для определения параметров импульса тока, образующихся в элементах цепи, может использоваться простая двухэкспоненциальная модель импульса тока и концепция множественных чувствительных областей, выделение энергии в которых рассчитывается инструментами для физического моделирования, или расчет может проводиться на основе концепции диффузионного собирания заряда[9-10].

Первый вариант используется в таких программах как MRED[11] и SEMM-2[12], в этом случае объем устройства разбивается на набор малых чувствительных областей, каждой из которых присваивается весовой коэффициент, который выражает вероятность того что заряд в данном объеме будет собран определенным электродом. Значения этих коэффициентов на практике определяются с помощью эксперимента, TCAD моделирования или их совместного использования. Во многих случаях удобным является использование вложенных или пересекающихся чувствительных областей, как показано на рисунке 1. Например, в случае, когда неизвестна реальная геометрия устройства, но механизм сбоев достаточно простой (как в SRAM), целесообразным является использование вложенных прямоугольных чувствительных областей.

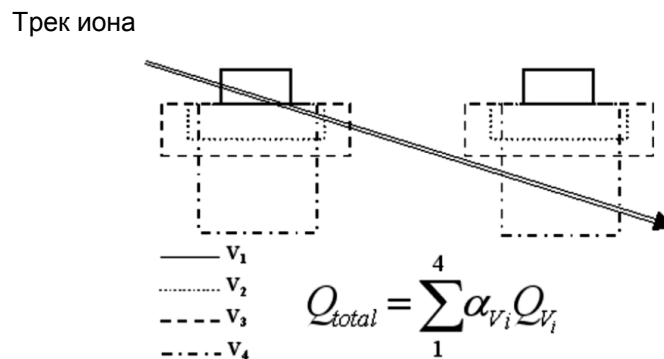


Рис. 1. Концептуальное изображение расчета собранного заряда при попадании иона для двух наборов чувствительных объемов

Модели основанные на решении уравнения диффузии для образованного при прохождении ОЯЧ заряда используются в программах MUSCA SEP3 [13], MC-Oracle [14], TIARA-G4 [15]. Одним из наиболее простых вариантов реализации является дискретизация заряда образованного в треке частицы и использование решений уравнения диффузии для простого случая точечного источника заряда в качестве коэффициентов эффективности собирания заряда, как показано на рис.2. При этом, так как в этом случае результатом является не только собранный заряд, но и амплитудно-временные характеристики импульса тока, этот подход позволяет также моделировать эффекты от импульсов помех (SET - Single Event Transients), в том числе и при собирании заряда несколькими узлами схемы.

# АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭФФЕКТОВ СБОЕВ В ИЗДЕЛИЯХ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОТДЕЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ

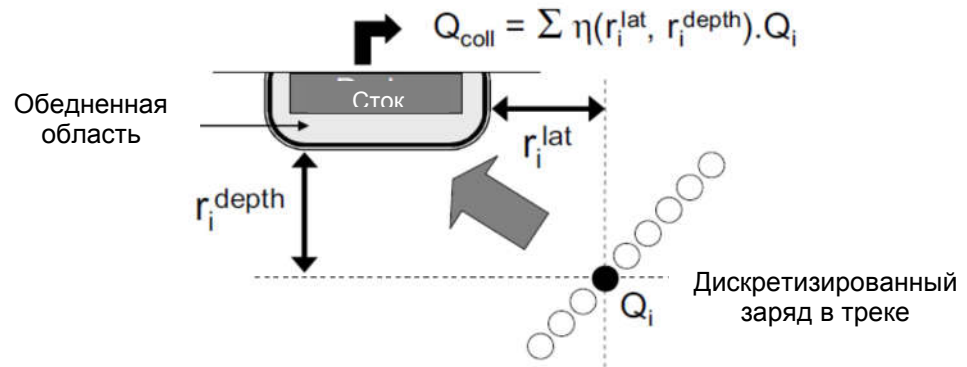


Рис. 2. Иллюстрация модели, основанной на концепции эффективности сбора заряда

Подходом, позволяющим провести наиболее точное моделирование процесса возникновения сбоя в устройстве, является использование инструментов для моделирования прохождения частиц совместно со средствами приборно-технологического моделирования (TCAD). Данный подход позволяет использовать детальную геометрию устройства при моделировании процессов передачи энергии с помощью метода Монте-Карло, а затем использовать полученные данные о выделении энергии в объеме устройства для задания распределения заряда, сгенерированного при прохождении частицы, и моделирования переноса этого заряда и формирования реакции схемы с использованием инструмента приборного моделирования, входящего в пакет TCAD. Хотя данный подход обеспечивает максимальную степень физической достоверности моделирования, недостатком данного метода являются крайне высокие требования к вычислительным мощностям. Примером реализации данного подхода является интегрированный пакет программ CRad компании Cogenda [16].

## Заключение

В данной работе были рассмотрены основные подходы к моделированию одиночных сбоев, пришедшие на смену модели IRPP. Общей чертой современных программных средств для оценки чувствительности к эффектам сбоев является использование многоуровневой методики расчета, при которой различные программы используются для моделирования передачи энергии, сбора заряда и формирования реакции схемы. Области применения рассмотренных программных средств определяются особенностями лежащих в их основе подходов и моделей: так, например, MCNPX используется преимущественно для изучения физических эффектов в устройствах при воздействии широкого спектра частиц, а CRad – при анализе эффективности технологических и топологических методов повышения сбоеустойчивости. Программные средства, использующие аналитические модели сбора заряда являются наиболее распространенными и широко применяемыми, так как в большинстве случаев они обеспечивают оптимальное соотношение точности и ресурсоемкости используемых моделей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Mavis D. G., Eaton P. H., Sibley M. D. SEE characterization and mitigation in ultra-deep submicron technologies // 2009 IEEE International Conference on IC Design and Technology – Austin, USA, 2009. – С. 105-112.
2. Gasiot G., Giot D., Roche P. Multiple Cell Upsets as the Key Contribution to the Total SER of 65 nm CMOS SRAMs and Its Dependence on Well Engineering // Nuclear Science, IEEE Transactions on. – 2007. – Т. 54, № 6. – С. 2468-2473.

## АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭФФЕКТОВ СБОЕВ В ИЗДЕЛИЯХ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОТДЕЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ

3. Boruzdina A. B., Grigor'ev N. G., Ulanova A. V. Effect of topological placement of memory cells in memory chips on multiplicity of cell upsets from heavy charged particles // *Russian Microelectronics*. – 2014. – Т. 43, № 2. – С. 96-101.
4. Dodds N. A., Reed R. A., Mendenhall M. H., Weller R. A., Clemens M. A., Dodd P. E., Shaneyfelt M. R., Vizkelethy G., Schwank J. R., Ferlet-Cavrois V., Adams J. H., Schrimpf R. D., King M. P. Charge Generation by Secondary Particles From Nuclear Reactions in BEOL Materials // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 2009. – Т. 56, № 6. – С. 3172-3179.
5. Chumakov A. I., Sogoyan A. V., Boruzdina A. B., Smolin A. A., Pechenkin A. A. Multiple Cell Upset Mechanisms in SRAMs // 2015 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS) – Moscow, Russia, 2015. – С. 1-5.
6. 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 65nm CMOS SRAM // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 2015. – Т. 62, № 6. – С. 2860-2866.
7. MCNPX User's Manual, Version 2.7.0 / Los Alamos National Laboratory. – Los Alamos, USA, 2011. – 645 с.
8. Battistoni G., Cerutti F., Fassò A., Ferrari A., Muraro S., Ranft J., Roesler S., Sala P. R. The FLUKA code: description and benchmarking // *AIP Conference Proceedings*. – 2007. – Т. 896, № 1. – С. 31-49.
9. Edmonds L. D. A Proposed Transient Version of the ADC Charge-Collection Model Tested Against TCAD // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 2011. – Т. 58, № 1. – С. 296-304.
10. Chumakov A. I. Modified Charge Collection Model by Point Node for SEE Sensitivity Estimation // 2015 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS) – Moscow, Russia, 2015. – С. 1-5.
11. Warren K. M., Sternberg A. L., Weller R. A., Baze M. P., Massengill L. W., Reed R. A., Mendenhall M. H., Schrimpf R. D. Integrating Circuit Level Simulation and Monte-Carlo Radiation Transport Code for Single Event Upset Analysis in SEU Hardened Circuitry // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 2008. – Т. 55, № 6. – С. 2886-2894.
12. Tang H. H. K. SEMM-2: A new generation of single-event-effect modeling tools // *IBM Journal of Research and Development*. – 2008. – Т. 52, № 3. – С. 233-244.
13. Hubert G., Duzellier S., Inguibert C., Boatella-Polo C., Bezerra F., Ecoffet R. Operational SER Calculations on the SAC-C Orbit Using the Multi-Scales Single Event Phenomena Predictive Platform (MUSCA SEP3) // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 2009. – Т. 56, № 6. – С. 3032-3042.
14. Wrobel F., Saigné F. MC-ORACLE: A tool for predicting Soft Error Rate // *Computer Physics Communications*. – 2011. – Т. 182, № 2. – С. 317-321.
15. Autran J.-L., Semikh S., Munteanu D., Serre S., Gasiot G., Roche P. Soft-Error Rate of Advanced SRAM Memories: Modeling and Monte Carlo Simulation // *Numerical Simulation - From Theory to Industry / Andriychuk M., InTech*, 2012. – С. 309-336.
16. Gong D., Shen C. Full-TCAD Device Simulation of CMOS Circuits with a Novel Half-Implicit Solver // 2012 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices – Denver, USA, 2012. – С. 272-275.

### REFERENCES:

1. D. G. Mavis, P. H. Eaton, and M. D. Sibley, "SEE characterization and mitigation in ultra-deep submicron technologies," in *2009 IEEE International Conference on IC Design and Technology*, Austin, USA, 2009, pp. 105-112.
2. G. Gasiot, D. Giot, and P. Roche, "Multiple Cell Upsets as the Key Contribution to the Total SER of 65 nm CMOS SRAMs and Its Dependence on Well Engineering," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 54, no. 6, pp. 2468-2473, 2007.
3. A. B. Boruzdina, N. G. Grigor'ev, and A. V. Ulanova, "Effect of topological placement of memory cells in memory chips on multiplicity of cell upsets from heavy charged particles," *Russian Microelectronics*, vol. 43, no. 2, pp. 96-101, 2014.
4. N. A. Dodds, R. A. Reed, M. H. Mendenhall, R. A. Weller, M. A. Clemens, P. E. Dodd, M. R. Shaneyfelt, G. Vizkelethy, J. R. Schwank, V. Ferlet-Cavrois, J. H. Adams, R. D. Schrimpf, and M. P. King, "Charge Generation by Secondary Particles From Nuclear Reactions in BEOL Materials," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 56, no. 6, pp. 3172-3179, 2009.
5. A. I. Chumakov, A. V. Sogoyan, A. B. Boruzdina, A. A. Smolin, and A. A. Pechenkin, "Multiple Cell Upset Mechanisms in SRAMs," in *2015 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS)*, Moscow, Russia, 2015, pp. 1-5.
6. A. B. Boruzdina et al., "Temperature Dependence of MCU Sensitivity in 65nm CMOS SRAM," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 62, no. 6, pp. 2860-2866, 2015.
7. D. B. Pelowitz, "MCNPX User's Manual, Version 2.7.0," Los Alamos National Laboratory, 2011.

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭФФЕКТОВ СБОЕВ  
В ИЗДЕЛИЯХ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОТДЕЛЬНЫХ  
ЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ

8. G. Battistoni *et al.*, "The FLUKA code: description and benchmarking," *AIP Conference Proceedings*, vol. 896, no. 1, pp. 31-49, 2007.
9. L. D. Edmonds, "A Proposed Transient Version of the ADC Charge-Collection Model Tested Against TCAD," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 58, no. 1, pp. 296-304, 2011.
10. A. I. Chumakov, "Modified Charge Collection Model by Point Node for SEE Sensitivity Estimation," in *2015 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS)*, Moscow, Russia, 2015, pp. 1-5.
11. K. M. Warren *et al.*, "Integrating Circuit Level Simulation and Monte-Carlo Radiation Transport Code for Single Event Upset Analysis in SEU Hardened Circuitry," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 55, no. 6, pp. 2886-2894, 2008.
12. H. H. K. Tang, "SEMM-2: A new generation of single-event-effect modeling tools," *IBM Journal of Research and Development*, vol. 52, no. 3, pp. 233-244, 2008.
13. G. Hubert, S. Duzellier, C. Inguibert, C. Boatella-Polo, F. Bezerra, and R. Ecoffet, "Operational SER Calculations on the SAC-C Orbit Using the Multi-Scales Single Event Phenomena Predictive Platform (MUSCA SEP3)," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 56, no. 6, pp. 3032-3042, 2009.
14. F. Wrobel and F. Saigné, "MC-ORACLE: A tool for predicting Soft Error Rate," *Computer Physics Communications*, vol. 182, no. 2, pp. 317-321, 2011.
15. J.-L. Autran, S. Semikh, D. Munteanu, S. Serre, G. Gasiot, and P. Roche, "Soft-Error Rate of Advanced SRAM Memories: Modeling and Monte Carlo Simulation," in *Numerical Simulation - From Theory to Industry*, M. Andriychuk, Ed.: InTech, 2012, pp. 309-336.
16. D. Gong and C. Shen, "Full-TCAD Device Simulation of CMOS Circuits with a Novel Half-Implicit Solver," in *2012 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices*, Denver, CO, USA, 2012, pp. 272-275.