

МЕТОДОЛОГИЯ СКВОЗНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ RADIATION-HARDENED МИКРОСХЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ PDK И МОДЕЛЕЙ

С.С. Тарлыков¹, А.М. Тюнина¹

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

Аннотация. В статье представлена методология сквозного проектирования радиационно-стойких микросхем, на основе специализированных PDK и радиационных моделей. Подход обеспечивает учет TID и SEU/SET, согласование технологических и схемотехнических решений и повышение предсказуемости стойкости.

Ключевые слова: radiation-hardened микросхемы, космическая электроника, Total Ionizing Dose, Single Event Upset, специализированный PDK, радиационные модели, сквозное проектирование, многоуровневая верификация, надежность микроэлектроники, моделирование радиационных эффектов.

METHODOLOGY OF END-TO-END DESIGN OF RADIATION-HARDENED INTEGRATED CIRCUITS USING SPECIALIZED PDKs AND MODELS

S.S. Tarlykov¹, A.M. Tyunina¹

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

Abstract. The article presents a methodology for end-to-end design of radiation-hardened integrated circuits based on specialized PDKs and radiation-oriented models. The approach ensures proper consideration of TID and SEU/SET effects, alignment of technological and circuit-level decisions, and improved predictability of radiation robustness.

Keywords: radiation-hardened integrated circuits, space electronics, Total Ionizing Dose, Single Event Upset, specialized PDK, radiation models, end-to-end design, multi-level verification, microelectronics reliability, radiation effects modeling.

Интегральные микросхемы, предназначенные для эксплуатации в космическом пространстве, подвергаются воздействию ионизирующего излучения, которое оказывает существенное влияние на их электрические и функциональные характеристики. К основным факторам относятся суммарная ионизирующая доза (Total Ionizing Dose, TID), одиночные эффекты, вызываемые высокоэнергетичными частицами (Single Event Effects, SEE), включая одиночные сбои (SEU) и переходные процессы (SET) [1].

На практике существенной проблемой остается разрыв между технологическим уровнем (формирование PDK, моделей устройств) и схемотехническим проектированием. Недостаточная согласованность допущений и моделей приводит к расхождению результатов симуляций и экспериментальных испытаний, увеличению числа итераций и росту сроков разработки [2].

В последние годы рост степени интеграции и переход к субмикронным и нанометровым технологиям усилили чувствительность микросхем к радиационным воздействиям. При этом традиционные маршруты проектирования, ориентированные на коммерческие приложения, не обеспечивают адекватного учета радиационных эффектов. В литературе широко представлены работы, посвященные отдельным аспектам радиационной стойкости – технологическим методам защиты, схемотехническим приемам повышения устойчивости, а также моделированию одиночных событий. Однако данные подходы зачастую применяются изолированно.

Целью данной статьи является разработка и описание методологии сквозного проектирования радиационно-стойких микросхем, обеспечивающей интеграцию специализированных PDK, радиационно-ориентированных моделей и процедур верификации в единый проектный маршрут.

Объектом исследования является процесс проектирования радиационно-стойкой интегральной микросхемы, реализуемый в рамках заданной технологии микроэлектроники с использованием специализированного PDK.

Входными параметрами задачи являются:

технологические параметры элементов (толщина оксидов, пороговое напряжение, подвижность носителей);

параметры радиационного воздействия (уровень TID, линейная передача энергии частиц);

требования миссии (длительность эксплуатации, допустимый уровень функциональных отказов).

Выходными параметрами являются деградированные электрические характеристики микросхемы и показатели функциональной надежности, включая вероятность одиночных ошибок и параметры временных задержек.

Воздействие суммарной ионизирующей дозы приводит к накоплению заряда в диэлектрических слоях и деградации параметров MOS-транзисторов. Изменение порогового напряжения моделируется зависимостью вида:

$$\Delta V_{th}(D) = k_1 * D + k_2 * D^n \quad (1)$$

где D – накопленная доза, k_1 , k_2 , n – коэффициенты, определяемые технологией.

Данные зависимости включаются в SPICE-модели элементов PDK, что позволяет проводить параметрические симуляции с учетом деградации характеристик.

SEU и SET моделируются с использованием вероятностного подхода, основанного на сечении чувствительности элементов:

$$P_{SEU} = 1 - e^{-\sigma * \Phi}, \quad (2)$$

где σ – эффективное сечение SEU, Φ – поток частиц.

Методология предполагает интеграцию данных моделей в библиотечные ячейки, а также применение инъекции отказов на уровне логических и функциональных симуляций.

Анализ результатов демонстрирует, что ранний учет радиационных эффектов позволяет существенно сократить расхождение между расчетными и экспериментальными данными, что согласуется с результатами, представленными в [3]. Наибольшую чувствительность проявляют параметры порогового напряжения и временные характеристики логических ячеек.

Сравнение с подходами, в которых радиационная стойкость обеспечивается на поздних этапах, показывает преимущество сквозной методологии с точки зрения трудоемкости и предсказуемости результата.

В статье предложена методология сквозного проектирования радиационно-стойких микросхем, основанная на интеграции специализированных PDK, моделей TID и SEU и многоуровневой верификации. Показано, что данный подход позволяет преодолеть разрыв между технологами и схемотехниками и повысить надежность проектируемых микросхем для космического применения. Представленная методология может быть использована при разработке микросхем для спутниковых и других радиационно-напряженных систем.

Список литературы

1. Специализированное программное обеспечение для автоматизированного тестирования и верификации PDK / О. Р. Загидуллина, А. С. Надин, И. Е. Трифанихина, Д. С. Шипицин // Труды научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук. – 2019. – Т. 9, № 4. – С. 80-84. – DOI 10.25682/NIISI.2019.4.0011. – EDN TYGPQW.
2. Radiation-Hardened CMOS VLSI SRAM in Bulk Technology / Yu. M. Gerasimov, N. G. Grigoryev, V. V. Goussev [et al.] // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2015. – № 3. – Р. 45. – EDN UMQZVF.
3. Методология сквозного параметрического проектирования узлов машин как основа формирования цифрового документооборота / Н. А. Солодилова, Д. С. Ситкин, А. Ю. Скрябнев, Т. В. Маркова // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2026. – № 20. – С. 59-63. – DOI 10.26160/2309-8864-2026-20-59-63. – EDN CMCGIQ.
4. Математическая модель индуктивного делителя напряжения с электронной компенсацией / А. И. Заревич, С. В. Муравьев // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317, № 4. – С. 129–133.
5. Approximation of the absorption spectrum of indium phosphide in the context of simulation of the process of sensation / Ph. V. Makarenko, V. K. Zolnikov, A. I. Zarevich [et al.] // Russian Microelectronics. – 2024. – Vol. 53, № 4. – Р. 329–338. – DOI 10.1134/S1063739724040041.
6. Формирование ИКТ-компетентности студентов специальности «Информатика» / А. В. Полуэктов // Информационно-коммуникационные технологии в педагогическом образовании. – 2009. – № 3 (3). – С. 8–11. – EDN SAXGJX.
7. Автоматизированный комплекс для диагностики импульсов релятивистского СВЧ-генератора / А. И. Заревич, Е. В. Вегнер, И. И. Винтизенко // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 3. – С. 78–82.

References

1. Specialized software for automated testing and verification of PDK / O. R. Zagidullina, A. S. Nadin, I. E. Trifanikhina, D. S. Shipitsin // Proceedings of the Scientific Research Institute of System Research of the Russian Academy of Sciences. – 2019. – Vol. 9, No. 4. – Pp. 80-84. – DOI 10.25682/NIISI.2019.4.0011. – EDN TYGPQW.

2. Radiation-Hardened CMOS VLSI SRAM in Bulk Technology / Yu. M. Gerasimov, N. G. Grigoryev, V. V. Goussev [et al.] // Problems of developing promising micro- and nanoelectronic systems (MES). – 2015. – No. 3. – P. 45. – EDN UM-QZVF.

3. Methodology of end-to-end parametric design of machine components as the basis for the formation of digital document management / N. A. Solodilova, D. S. Sitkin, A. Yu. Scriabnev, T. V. Markova // Computer-aided design in mechanical engineering. – 2026. - № 20. - Pp. 59-63. - DOI 10.26160/2309-8864-2026-20-59-63. – EDN CMCGIQ.

4. Mathematical model of an inductive voltage divider with electronic compensation / A. I. Zarevich, S. V. Muravyev // Proceedings of Tomsk Polytechnic University. – 2010. – Vol. 317, No. 4. – Pp. 129-133.

5. Approximation of the absorption spectrum of indium phosphide in the context of simulation of the process of sensation / Ph. V. Makarenko, V. K. Zolnikov, A. I. Zarevich [et al.] // Russian Microelectronics. – 2024. – Vol. 53, No. 4. – P. 329-338. – DOI 10.1134/S1063739724040041.

6. Formation of ICT competence of students of the specialty "Informatics" / A.V. Poluektov // Information and communication technologies in teacher education. – 2009. – № 3 (3). – Pp. 8-11. – EDN SAXGJX.

7. Automated complex for diagnostics of pulses of a relativistic microwave generator / A. I. Zarevich, E. V. Wegner, I. I. Vintizenko // Instruments and techniques of experiment. - 2004. – No. 3. – Pp. 78-82.