

ЭКСПРЕСС-МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ СВЕРХБОЛЬШИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИМПУЛЬСНОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С. В. Редько, В. А. Петрович, В. П. Бондаренко

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, 220013 Минск, Беларусь, e-mail: sv.redko@bsuir.by*

Традиционные методы оценки стойкости интегральных схем к воздействию импульсного ионизирующего излучения путем проведения имитирующих и моделирующих испытаний обладают недостаточной оперативностью при обеспечении требуемого уровня охвата тестовых сценариев отказов в случае современных сложных цифровых интегральных схем большой и сверхбольшой степени интеграции. В данной работе рассматриваются основные принципы выработки новых экспресс-методик оценки устойчивости интегральных схем к воздействию импульсного ионизирующего излучения на основе широкого применения систем численного моделирования и компьютерного проектирования.

Ключевые слова: импульсное ионизирующее излучение; радиационная стойкость; интегральные схемы.

METHODOLOGY FOR RAPID RADIATION-HARDNESS ASSURANCE TESTING FOR ULTRA-LARGE SCALE INTEGRATED CIRCUITS

S. V. Redko, V. A. Petrovich, V. P. Bondarenko

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P. Brovki str. 6, 220013 Minsk, Belarus
Corresponding author: S. V. Redko (sv.redko@bsuir.by)*

Common methods for radiation-hardness assurance testing for integrated circuits to the single-event effects by conducting imitation and simulation tests have insufficient efficiency while meeting the required level of test coverage for modern complex digital integrated circuits of large and ultra-large scale of integration. This paper discusses the strategy of developing a new rapid testing methodology based on the widespread use of numerical simulation and computer aided design systems for assessing radiation-hardness assurance of integrated circuits.

Key words: pulsed ionizing radiation; radiation hardness; integrated circuits.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день перечень радиационно-стойких изделий микроэлектроники, применяемых в гражданских и военных целях, содержит тысячи видов интегральных схем (ИС) различной степени интеграции. Необходимость обновления номенклатуры ИС с повышенной радиационной стойкостью также требует от их производителя постоянно совершенствовать методы проведения испытаний новых изделий [1–7]. В данной работе мы предлагаем основные принципы выработки методики оперативной

оценки устойчивости сложных цифровых ИС к воздействию импульсного ионизирующего излучения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основным критерием оценки устойчивости цифровых ИС служит не столько радиационно-стимулированная деградация элементов, сколько интенсивность программных сбоев для заданного профиля воздействия ионизирующего излучения. Ранее было установлено, что доминирующий вклад в частоту возникновения системных ошибок в цифровых ИС высокой степени интеграции вносят переходные процессы, индуцированные одиночными радиационными эффектами [8, 9]. Таким образом методика прогнозирования устойчивости цифровых ИС к воздействию импульсного ионизирующего излучения должна включать три этапа:

1. исследование распространения и поглощения излучения, а также генерации и рекомбинации избыточного заряда в элементах ИС;

2. моделирование сбоя на уровне электрической принципиальной схемы топологии ИС;

3. высокоуровневое моделирование ошибки в логике ИС.

Каждый этап может быть реализован различными инструментами и способами, но полноценная реализация обсуждаемой методики оценки устойчивости сложных цифровых ИС к воздействию импульсного ионизирующего излучения возможна только в случае их (инструментов) совместного применения в связке между собой. Далее будет предложен наиболее эффективный, с точки зрения авторов работы, вариант.

На первом этапе используется имитация импульсного ионизирующего воздействия при помощи лазерного имитатора и компьютерная симуляция аналогичного воздействия при помощи метода Монте-Карло в программе численного моделирования (например, TCAD Sentaurus). Такая комбинация исследований позволяет обеспечить высокую степень достоверности оценки профиля генерации избыточного заряда вследствие импульсного ионизирующего воздействия. Взаимодополняемость упомянутых методов базируется на том, что результаты компьютерной симуляции позволяют точнее подобрать режим облучения на лазерном имитаторе, а результаты имитационных испытаний позволяют, в свою очередь, верифицировать численную модель с учетом особенностей реального изделия.

Второй этап включает несколько подэтапов, которые моделируются при помощи программного пакета SPICE. Сначала профиль генерации избыточного заряда, полученный на первом этапе, преобразуется в импульс тока. Затем рассчитывается соответствующий переходной процесс в эквивалентной электрической схеме элемента ИС. Если полученный в результате расчета бросок напряжения превышает заданное пороговое значение, то формируется изменение логического состояния («0» или «1») соответствующего элемента ИС. На следующем подэтапе проверяется влияние изменения логического состояния рассматриваемого элемента на соседние ячейки. Если будет установлено, что случившийся в результате радиационного воздействия сбой распространяется на соседние элементы (для этого он должен иметь достаточную продолжительность), то из полученных данных формируется задание для третьего этапа.

На третьем этапе производится расчет изменения логического состояния выводов цифровой ИС в результате возникновения ошибок в исследованных на предыдущих

этапах элементах. Для этого можно использовать любой симулятор логики ИС, который, тем не менее, должен учитывать задержки и конечную скорость распространения сигналов в логической схеме ИС. Примером такого симулятора является программный пакет ModelSim. Предполагается, что по результатам этого анализа можно выбрать подходящие алгоритмы коррекции логических ошибок и степень резервирования основных логических блоков ИС. Но детальное обсуждение этого вопроса выходит за рамки темы данной работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

К преимуществам предложенной стратегии выработки методики оценки устойчивости сложных цифровых ИС к воздействию импульсного ионизирующего излучения можно отнести широкий охват возможных сценариев отказов. Действительно, в качестве входных параметров мы можем выбирать: количество, энергию, вид и траекторию ионизирующих частиц, объем восприимчивой области и эффективность генерации избыточного заряда в исследуемых элементах ИС, место попадания ионизирующего излучения относительно топологии ИС и любое исходное состояние логики ИС. Вторым важным преимуществом является существенное снижение ресурсоемкости последовательной реализации всех трех этапов оценки устойчивости ИС к радиационно-стимулированным программным сбоям благодаря двум «отсеивающим» критериям между этапами: на второй этап попадают только те события, которые сгенерировали достаточный для переключения элемента заряд, а на третий этап попадают только те события, где время индуцированного радиационными эффектами переключения состояния достаточно для распространения этого переключения на соседние элементы ИС. Это позволяет существенно увеличить охват проверяемых сценариев радиационного воздействия при том же объеме вычислительной нагрузки.

Основным недостатком предложенной стратегии является все еще высокая ресурсоемкость вычислений на всех этапах в случае применения выработанной методики прогнозирования стойкости к действительно сложным ИС сверхбольшой степени интеграции, которые содержат миллионы логических элементов. В этом случае потребуется подобрать статистически релевантную выборку из общего количества рассматриваемых исходных состояний и выполнять исследования стойкости цифровой ИС к эффектам радиационного воздействия в рамках этой выборки. Тем не менее, данное ограничение не носит принципиальный характер и является лишь вопросом доступных вычислительных ресурсов для разработчика ИС. В любом случае, широкое применение численного моделирования на всех этапах разработки и тестирования ИС позволяет охватить гораздо большее количество вариантов воздействия внешних факторов на сложные цифровые ИС, чем это возможно при использовании только лишь имитационных и моделирующих испытаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение стоит отметить, что реализация методики оценки устойчивости сложных цифровых ИС к воздействию импульсного ионизирующего излучения по предложенной в настоящей работе стратегии может оказаться очень полезным инструментом в арсенале разработчиков радиационно-стойкой электроники, который дополнит традиционные подходы и методы, а также поможет ускорить выпуск новой, более совершенной качественной продукции для космических и других применений.

Работа выполнена в рамках задания 3.1.03 ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника», подпрограммы «Микро- и наноэлектроника».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Limbrick D. B. et al. Impact of synthesis constraints on error propagation probability of digital circuits //2011 IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI and Nanotechnology Systems. – IEEE, 2011. – С. 103–111.
2. Seifert N. et al. Historical trend in alpha-particle induced soft error rates of the Alpha/sup TM/microprocessor //2001 IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings. 39th Annual (Cat. No. 00CH37167). – IEEE, 2001. – С. 259–265.
3. Основы радиационной стойкости изделий электронной техники: радиационные эффекты в изделиях электронной техники: учеб. пособие / К.И. Таперо, С.И. Диденко. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2013. – 349 с.
4. Quinn H. et al. Radiation-induced multi-bit upsets in SRAM-based FPGAs //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2005. – Т. 52. – №. 6. – С. 2455–2461.
5. Benedetto J. et al. Heavy ion-induced digital single-event transients in deep submicron processes //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2004. – Т. 51. – №. 6. – С. 3480–3485.
6. Dodd P. E. et al. Production and propagation of single-event transients in high-speed digital logic ICs //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2004. – Т. 51. – №. 6. – С. 3278–3284.
7. Seifert N. et al. Multi-cell upset probabilities of 45nm high-k+ metal gate SRAM devices in terrestrial and space environments //2008 IEEE International Reliability Physics Symposium. – IEEE, 2008. – С. 181–186.
8. Ahlbin J. R. et al. C-CREST technique for combinational logic SET testing //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2008. – Т. 55. – №. 6. – С. 3347–3351.
9. Benedetto J. M. et al. Variation of digital SET pulse widths and the implications for single event hardening of advanced CMOS processes //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2005. – Т. 52. – №. 6. – С. 2114–2119.

ВЛИЯНИЕ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА КРЕМНИЯ НА ЛОКАЛЬНЫЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ МОДЫ КОМПЛЕКСА ВАКАНСИЯ-КИСЛОРОД ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Е. А. Толкачева¹, В. П. Маркевич², Л. И. Мурин¹

¹) ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению»,
ул. П. Бровки, 19, 220072 Минск, Беларусь

²) Университет г. Манчестер, M13 9PL Манчестер, Англия
e-mail: talkachova@physics.by

Изотопный состав природного кремния (^{28}Si (92,23 %), ^{29}Si (4,68 %) и ^{30}Si (3,09 %)) оказывает заметное влияние на форму полос ИК поглощения, обусловленных примесными атомами кислорода. В настоящей работе предпринята попытка определить положение локальных колебательных мод ЛКМ, обусловленных квази-молекулами $^{28}\text{Si}-^{16}\text{O}_\text{S}-^{29}\text{Si}$ и $^{28}\text{Si}-^{16}\text{O}_\text{S}-^{30}\text{Si}$ (O_S – атом кислорода в узле решетки), для спектров поглощения, измеренных при комнатной температуре. Проведена оценка изотопических сдвигов соответствующих мод путем подгонки формы полосы поглощения для комплекса вакансия-кислород (А-центр) в облученных кристаллах Si. Изотопические сдвиги ЛКМ равны $2,2\pm 0,25 \text{ см}^{-1}$ для $^{28}\text{Si}-^{16}\text{O}_\text{S}-^{29}\text{Si}$ и $4,3\pm 0,9 \text{ см}^{-1}$ для