

## КОРРЕЛЯЦИЯ ОДИНОЧНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В ИС ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕЙТРОНОВ И ПРОТОНОВ

Афонин А.В.<sup>1</sup>, Васильев А.Л.<sup>2</sup>, Чумаков А.И.<sup>2</sup>, Яненко А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 5494 ВП МО РФ

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

*В работе представлены результаты расчетно-экспериментального моделирования в ИС одиночных радиационных эффектов от воздействия высокоэнергетических нейтронов. По результатам численного моделирования показана адекватность энерговыведения в микрообъемах при облучении нейтронами и протонами с энергиями выше (30...50) МэВ. Представлены результаты экспериментальных исследований ряда ИС на ускорителях ионов и источниках нейтронах.*

Современная тенденция уменьшения проектных норм элементов интегральных схем (ИС) объективно приводит к снижению пороговых энергий для переключений и возникновения отказов в элементах ИС при воздействии отдельных ядерных частиц (ОЯЧ). За последние 30 лет основное внимание уделялось вопросам моделирования и обеспечения требуемых уровней стойкости изделиям микроэлектроники, функционирующим в условиях действия космической радиации [1–4]. Вместе с тем, локальные радиационные эффекты возможны также и от других источников ионизирующего излучения, в частности, от воздействия высокоэнергетических нейтронов. Источниками их служат, например, атмосферные нейтроны или нейтроны от электрофизических и ядерноэнергетических установок [5–8]. Локальные радиационные эффекты от воздействия нейтронов возникают в ИС вследствие больших локальных потерь энергии в чувствительных объемах элементов ИС от вторичных ядерных частиц, продуктов рассеяния нейтронов в веществе. Аналогичные процессы имеют место и при воздействии протонов. Возникает вопрос о возможности распространения для нейтронного воздействия результатов, ранее полученных к воздействию тяжелых заряженных частиц и высокоэнергетических протонов (ВЭП).

Большинство моделей, используемых для моделирования эффектов от отдельных ядерных частиц в ИС, оперирует с величиной критического заряда  $\Delta Q_0$  или пороговой энергией возникновения эффекта  $E_0$ , необходимых для переключения отдельного элемента [4]. В первом

приближении, сечение возникновения локального радиационного эффекта  $\sigma_{SEE_n}$ , возникающего от воздействия нейтронов в ИС, можно записать в следующем виде:

$$\sigma_{SEE_n} \approx V_a \cdot N_o \sum_i \sigma_{n_i} \cdot f(\Delta E_i > E_o), \quad (1)$$

где  $\sigma_{n_i}$  – парциальное сечение по  $i$ -му механизму рассеяния нейтронов на атомах кремния;  $E_o$  – пороговая энергия возникновения эффекта (одиночного сбоя);  $f(\Delta E_i > E_o)$  – вероятность образования вторичной частицы с энергией большей пороговой;  $N_o$  - концентрация атомов в 1 см<sup>3</sup> ( $N_o = 5 \cdot 10^{22}$  см<sup>-3</sup> для кремния);  $V_a$  - величина чувствительного объема отдельного элемента ИС.

Аналогичная модель используется и при оценке стойкости ИС к воздействию ВЭП, тогда как при оценке показателей стойкости к воздействию ионов применяется подход на основе ЛПЭ-приближения. Вместе с тем существует определенная корреляция между параметрами чувствительности при воздействии ВЭП и ионов [4]. Поэтому несомненный интерес вызывает определение подобной корреляции при воздействии ВЭП и нейтронов.

### Численное моделирование

На первом этапе проводилось моделирование энерговыделения в отдельном микрообъеме в виде куба с разными размерами сторон (базовой был размер равный 3 мкм) при воздействии протонов и нейтронов различной энергии. Целью этих расчетов было выявление основных механизмов локального энерговыделения, получение типовых энергетических спектров и выявление энергетического диапазона нейтронного воздействия, эквивалентного протонному воздействию по эффектам локального энерговыделения. Численное моделирование проводилось при воздействии изотропного потока ядерных частиц. На рис. 1 в качестве примера показаны рассчитанные с помощью программы GEANT4 [9] дифференциальные спектры энерговыделения от воздействия протонов и нейтронов с энергиями 30 МэВ.

Как показывает анализ, заметные различия в спектрах имеет место только в области относительно небольших значениях энерговыделения ( $\Delta E \leq 1$  МэВ), которое практически исчезает уже при энергиях выше 50 МэВ (рис. 2).

Таким образом, представленные результаты свидетельствуют о том, что при энергиях выше 50 МэВ, а с некоторым оговорками при энергиях выше 30 МэВ, имеет место эквивалентность эффектов по критерию энерговыделения в микрообъемах. Следовательно, в этом случае будет иметь место эквивалентность локальных радиационных эффектов в СБИС, и мы можем проводить экспериментальные исследования как на источниках протонов, так и на

источниках нейтронов. Только при энергиях ниже 30 МэВ должны иметь место расхождения в наблюдаемых эффектах.

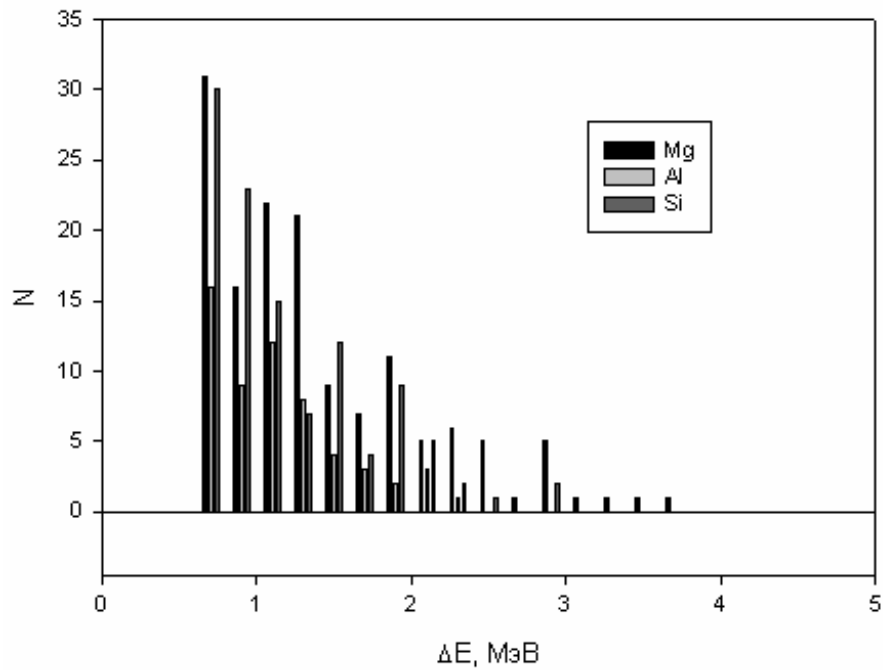


Рис. 1. Дифференциальные спектры тяжелых вторичных ядерных частиц при воздействии нейтронов с энергией 30 МэВ в кубе с размером стороны равным 3 мкм

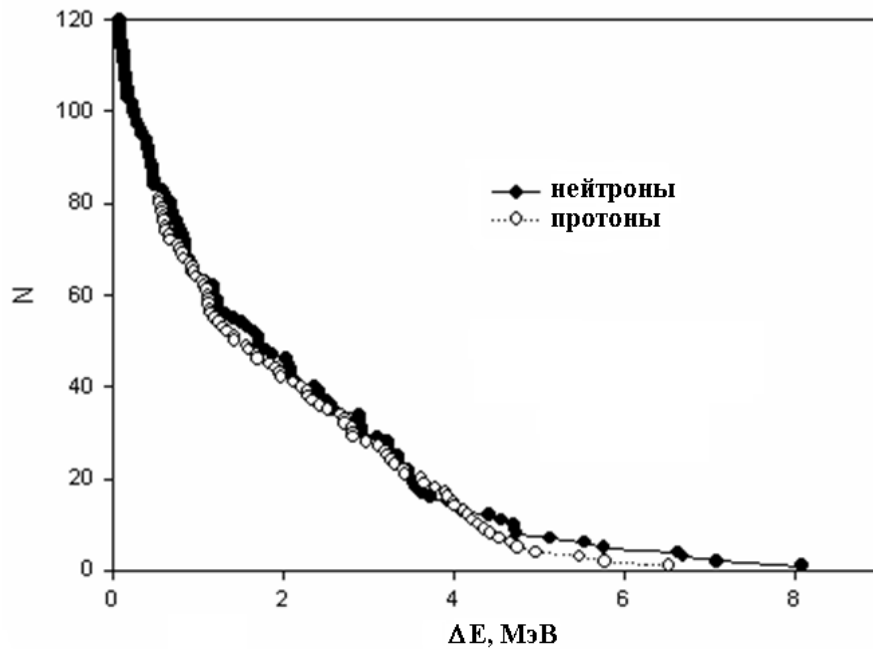


Рис. 2. Интегральные спектры при воздействии нейтронов и протонов с энергией 50 МэВ в кубе с размером стороны равным 3 мкм

Оценка влияния окружающих материалов производилась при расчетах микрообъема, находящегося внутри кремниевой подложки и отдельного микрообъема в вакууме. На рис. 3 в качестве примера представлены расчетные интегральные спектры энерговыведения в различных микрообъемах при воздействии 14 МэВ нейтронов. Анализ полученных результатов позволяет заметить, что в интересующем нас энергетическом диапазоне заметных различий в спектрах не наблюдается. Некоторые отличия обусловлены малой статистикой событий. По всей видимости, вклад окружающих материалов будет сказываться при меньших величинах микрообъемов. Проведенные численные расчеты выявили, что различия в спектрах энерговыведения для протонов и нейтронов для микрообъемов, расположенных внутри кремниевого материала, также имеют место при энергиях меньше 50 МэВ.

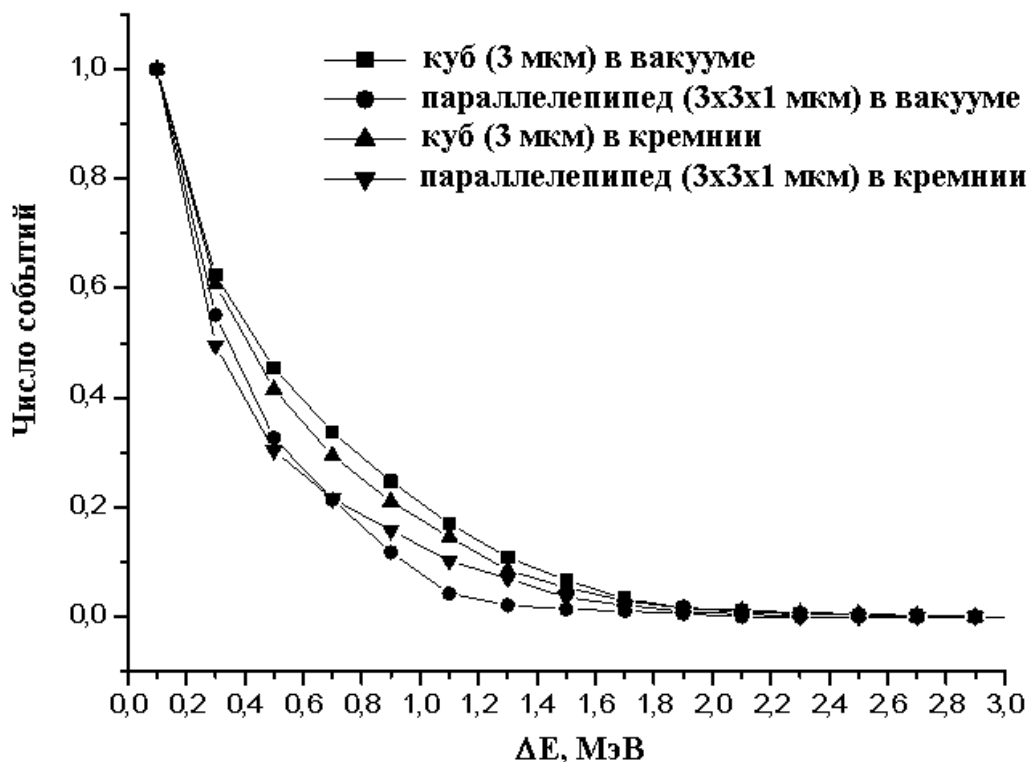


Рис. 3. Интегральные спектры энерговыведения при воздействии 14 МэВ нейтронов в прямоугольных параллелепипедах с различными размерами сторон, размещенных в вакууме и в кремнии

Как следует из результатов, представленных на рис. 3 при переходе к параллелепипеду с меньшим микрообъемом уменьшается жесткость спектра. Из этих же кривых следует слабое влияние и окружающей среды (за исключением общего количества событий).

Таким образом, представленные результаты численного моделирования свидетельствуют о практически полной идентичности результатов при воздействии протонов и нейтронов с энергиями выше 30...50 МэВ.

## Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились на ускорителях протонов с энергиями 1 ГэВ (ПИЯФ) и около 200 МэВ (ИТЭФ), генераторе 14 МэВ нейтронов (НИЯУ «МИФИ») и плутоний-берилловом изотопном источнике. Краткие сводные результаты экспериментальных исследований по локальным радиационным эффектам сбоев приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований по одиночным эффектам от протонов и нейтронов.

ИС	Нейтроны		Протоны	
	сечение ОС, см <sup>2</sup> /бит	сечение ТЭ, см <sup>2</sup>	сечение ОС, см <sup>2</sup> /бит	сечение ТЭ, см <sup>2</sup>
Кэш память микропроцессора, 0.5 мкм	4.7E-14	< 1.0E-10	4.7E-14	< 1.7E-10
Кэш память микропроцессора, 0.35 мкм	4.8E-14	< 1.0E-10	3.0E-14	< 1.8E-10
Am29LV256, 0.23 мкм	4.3E-19*	< 1.4E-12*	2.2E-17	< 2.0E-11
S29GL256N, 0.11 мкм	7.7E-18*	< 1.4E-12*	1.0E-16	< 1.0E-11
K9F5608U, 0.13 мкм	< 3.7E-20	< 3.0E-11	1.7E-19	< 2.4E-11
AS7C4096, 0.18 мкм	2.4E-14	< 2.3E-10	1.1E-14	8.0E-8
K6R4008V, 0.18 мкм	2.2E-14	< 2.5E-10	1.5E-14	1.6E-10
K6X1008C, 0.13 мкм	1.2E-14	< 1.3E-10	2.0E-13	< 3.3E-9
K7M321825M, 0.15 мкм	2.2E-14	< 2.5E-10	1.2E-14	3.1E-10
Кэш память КНИ микропроцессора, 0.5 мкм	1.8E-14	< 6.5E-11	3.8E-15	< 5.6E-11
ОЗУ 1Кx16, 0.35 мкм	2.5E-14	< 1.0E-10	3.2E-14	< 3.1E-11
ОЗУ 4Кx16, 0.18 мкм	5.5E-14	< 1.0E-10	1.6E-13	< 3.4E-11
ОЗУ 32Кx8, 0.35 мкм, с кодированием Хэмминга	< 2.6E-16	< 1.0E-10	< 6.0E-16	< 7.8E-11
ОЗУ 128Кx8, 0.35 мкм, с кодированием Хэмминга	< 9.8E-17	< 4.4E-11	< 4.8E-16	< 6.3E-11

Примечание: \* исследования проводились в поле PuBe источника

Результаты экспериментальных исследований показывают относительно удовлетворительную корреляцию по значениям сечений одиночных сбоев (ОС) при воздействии 14 МэВ нейтронов и протонов с энергиями выше 200 МэВ для большинства, что соответствуют модели BGR в случае, если значение пороговой энергии менее 3 МэВ [2,5]. Как следует из результатов численного моделирования, эта энергия максимально достижима при воздействии 14 МэВ нейтронов. Экспериментально, это подтверждается наличием тиристорных эффектов (ТЭ) при воздействии протонов их отсутствием при воздействии 14 МэВ нейтронов. Следует также отметить, что в случае относительно малых микрообъемов (КНИ ИС, БИС с проектными нормами менее 0.13 мкм) различия в сечениях ОС могут быть заметными.

Экспериментальные данные показывают, что частота сбоев уменьшается почти на 2 порядка при использовании КНИ СБИС, с подключением тела канала к фиксированному потенциалу. Снижение частоты сбоев еще на 2...4 порядка возможно за счет применения сбоеустойчивых ячеек памяти и применение помехоустойчивого кодирования по методу Хэмминга.

### Заключение

Результаты численного моделирования показали адекватность энерговыделения в микрообъемах при облучении нейтронами и протонами с энергиями выше (30...50) МэВ. Результаты расчетного моделирования и экспериментальных исследований свидетельствуют об удовлетворительной корреляции по значениям сечений одиночных сбоев при воздействии 14 МэВ нейтронов и протонов с энергиями выше 200 МэВ для большинства БИС, выполненных по объемной технологии.

### Список литературы

1. Messenger G.C., Ash M.S. Single Event Phenomena. N.Y.: Chapman&Hall, 1997. 368 p.
2. Normand E. Single-event effects in systems using commercial electronics in harsh environments// 1994 IEEE Nuclear and Space Radiation Effects // Short Course. Radiation effects in commercial electronics. - Tucson, Arizona. – 1994. - P. V-1 - V-77.
3. Pickel C. Single event effects rate prediction // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1996. V. 43. № 2. P. 483-495.
4. Чумаков А.И. Действие космической радиации на ИС. - М.: Радио и связь, 2004. - 320 с.
5. Normand E. Single-event effects in avionics // IEEE Trans. Nucl. Sci. -1996. - Vol. NS 43. - P. 461-474.
6. Баранов С.В., Васелегин Б.В., Осипенко П.Н., Чумаков А.И., Яненко А.В. Моделирование локальных радиационных эффектов при воздействии высокоэнергетичных нейтронов в тестовых образцах СБИС, изготовленных по различным технологиям // Микроэлектроника. - 2008. - Том 37. - № 1. - С. 52–59.
7. Normand E. Single event upset and charge collection measurements using high energy protons and neutrons. // IEEE Trans. Nucl. Sci. -1994. - Vol. NS 41. - P. 2203-2209.
8. Афонин А.В., Чумаков А.И., Яненко А.В. Эффекты одиночных сбоев в СБИС при воздействии 14 МэВ нейтронов // Радиационная стойкость электронных систем – СТОЙКОСТЬ-2011. –М.: МИФИ, 2011, с.67-68.
9. GEANT4. <http://geant4.web.cern.ch>.