

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОКРАТНЫХ И МНОЖЕСТВЕННЫХ СБОЕВ В МИКРОСХЕМЕ ПАМЯТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИБЛИОТЕКИ GEANT4

*А. Е. Здарьев, С. А. Лазарев*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

При воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) на электронную компонентную базу, установленную на космических аппаратах, возможно неправильное функционирование интегральных схем (ИС) или полная потеря их работоспособности, поскольку ионы могут вызывать одиночные радиационные эффекты (ОРЭ) при прохождении через кристалл ИС.

С уменьшением проектных норм возможна ситуация, когда в микросхеме происходят множественные (кратные) сбои [1, стр. 205]. Они возникают при пролете одного иона через несколько чувствительных областей (ЧО), расположенных поблизости, либо если сбор заряда неравновесных носителей происходит сразу в нескольких таких областях. Учет кратных сбоев необходим для корректной оценки сбоеустойчивости микросхемы памяти.

Существует ряд моделей ЧО для проведения расчета частоты одиночных сбоев (ОС) [1]:

- модель тонкой области. В данной модели для расчета числа ОС используются только два параметра: пороговое значение линейных потерь энергии (ЛПЭ) и сечение насыщения. Это позволяет относительно просто выполнить прогноз частоты эффектов, однако пренебрежение геометрией чувствительной области приводит к большим погрешностям при падении ионов под углом, отличным от нормального;

- модель прямоугольного параллелепипеда (RPP). Здесь в отличие от предыдущей модели учитываются геометрические факторы (чувствительный объем представляет собой прямоугольный параллелепипед), что позволяет провести более корректную оценку частоты ОС. При этом считается, что при выделении в ЧО энергии больше пороговой возникает ОРЭ;

- интегральная модель прямоугольного параллелепипеда (IRPP). В настоящее время она применяется наиболее широко, и оценка частоты ОС в ней сводится к вычислению интеграла [2, стр. 101]:

$$v = \frac{mS_0}{4} \int_0^{S_{\max}} \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} f(s)w(E)\varphi(L)dLds, \quad (1)$$

где  $S_0$  – полная площадь поверхности ЧО (прямоугольного параллелепипеда);  $S_{\max}$  – максимальное значение длины хорды в ЧО;  $L$  – ЛПЭ иона в кристалле кремния;  $L_{\max}$  – максимальное значение ЛПЭ в спектре ТЗЧ;  $L_{\min}$  – минимальное значение ЛПЭ в спектре ТЗЧ;  $\varphi(L)$  – дифференциальный ЛПЭ-спектр ТЗЧ;  $s$  – длина пробега иона в ЧО;  $f(s)$  – дифференциальное распределение длин пробегов ТЗЧ

(распределение хорд) в чувствительной области;  $m$  – количество чувствительных областей в ИС;  $v$  – количество ОС в ИС в единицу времени;  $E$  – энергия, поглощенная в чувствительной области;  $w(E)$  – функция чувствительности. Очень часто в качестве  $w(E)$  применяется относительное распределение Вейбулла:

$$w = \frac{\sigma}{\sigma_0} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{E - E_0}{W}\right)^\alpha\right). \quad (2)$$

Здесь  $\sigma$  – сечение ОС;  $\sigma_0$  – сечение насыщения ОС;  $W$  и  $\alpha$  – параметры;  $E_0$  – пороговое значение энергии ЧО, равно  $E_0 = \rho k L_0$ ; где  $L_0$  – пороговое значение ЛПЭ ТЗЧ в ИС;  $k$  – глубина ЧО;  $\rho$  – плотность кремния.

IRPP-модель имеет некоторые недостатки. Во-первых, необходимый для расчета частоты ОС параметр (глубина ЧО) не оценивают, а задают на основе данных о технологии изготовления ИС, что приводит к неопределенности результата. Во-вторых, в данной модели постулируется изотропность потока ТЗЧ в ЧО. В-третьих, значение ЛПЭ остается постоянной величиной в пределах чувствительного объема и не зависит от пройденного расстояния. Энергия, потерянная частицей внутри ЧО, полностью в ней (в ЧО) поглощается.

- модель ЧО, форма которой основана на экспериментальной зависимости сечения сбоя от ЛПЭ ТЗЧ [3]. В дальнейшем она будет называться моделью ЧО произвольной формы (ЧОПФ).

Для оценки вклада числа кратных сбоев в общее количество ОС проводился их расчет методом Монте-Карло с помощью программы, разработанной на основе библиотеки GEANT4. При проведении расчетов использовались следующие модели ЧО: IRPP, MC-IRPP (memory cell IRPP), а также модель ЧОПФ. Для задания геометрии ЧОПФ применялись выражения (3), (4) [3] и зависимость сечения от ЛПЭ при нормальном падении ТЗЧ, имеющая в данной работе вид (5):

$$\sigma = \pi r^2, \quad (3)$$

$$\frac{L}{L_0} = \frac{k}{h}, \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_0 \left[ 1 - \exp\left(-\left(\frac{L - L_0}{\beta}\right)^\alpha\right) \right], \quad (5)$$

где  $r$  и  $h$  – координаты точки на поверхности ЧОПФ (радиус и высота соответственно);  $\alpha$  и  $\beta$  – параметры.

Из (3–5) следует зависимость:

$$r = \sqrt{\frac{\sigma_0}{\pi} \left[ 1 - \exp \left( - \left( \frac{L_0}{\beta} \left( \frac{k}{h} - 1 \right) \right)^\alpha \right) \right]} \quad (6)$$

В модели ЧОПФ сбои рассматривались как детерминированные. То есть вероятность сбоя всегда равна единице, если энерговыделение в ЧО превысило пороговое значение.

В IRPP-модели чувствительным объемом является прямоугольный параллелепипед, размещенный внутри каждой ячейки памяти ИС. Сбои в ней рассматривались как случайные. Это означает, что при выделении в ЧО энергии больше пороговой обязательно наступит ОС. Вероятность его возникновения оценивалась по формуле (2).

В MC-IRPP ЧО представляет собой ячейку памяти, имеющую форму прямоугольного параллелепипеда с площадью основания  $S$ , равной площади ячейки. Вероятность  $p$  возникновения ОС, принимая во внимание (5), рассчитывалась по формуле:

$$p = \frac{\sigma}{S} \quad (7)$$

Моделирование одиночных радиационных эффектов в ИС объемом 4 Мбит проводилось при наличии алюминиевого корпуса, параметры которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики алюминиевого корпуса

Поперечные размеры, см <sup>2</sup>	1,6×1,6
Высота, см	0,3
Толщина стенок, см	0,1

Положение ИС относительно стенок защитного корпуса представлено на рис.1.

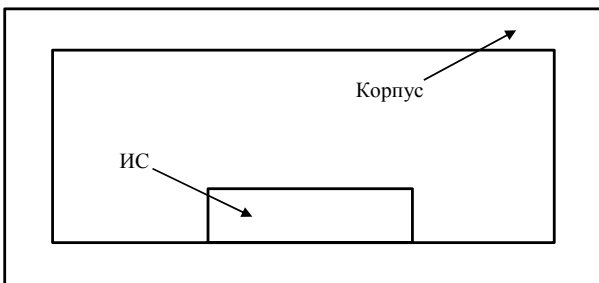


Рис. 1. Размещение ИС

На рис. 2 показано схематичное расположение чувствительных областей в микросхеме, которая представляет собой кристалл кремния с параметрами, приведенными в табл. 2.

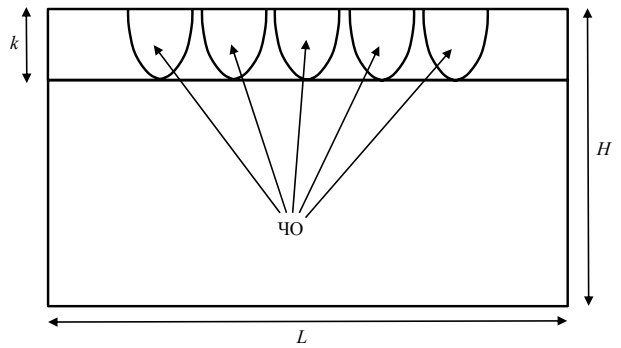


Рис. 2. Расположение чувствительных областей в ИС

Таблица 2

Параметры ИС

Поперечные размеры $L \times W$ , см <sup>2</sup>	1×1
Высота $H$ , см	0,03
Количество ячеек памяти в ИС	2048×2048
Площадь основания ячейки памяти $S$ , мкм <sup>2</sup>	4,04×4

Высота ячейки памяти численно равна глубине  $k$  чувствительной области независимо от типа выбранной модели.

Использовавшиеся в расчетах значения параметров распределения (5) указаны в табл. 3.

Таблица 3

Параметры распределения Вейбулла

Сечение насыщения $\sigma_0$ , мкм <sup>2</sup>	9
$\alpha$	0,5
$\beta$ , МэВ·см <sup>2</sup> /мг	43
Пороговое значение ЛПЭ $L_0$ , МэВ·см <sup>2</sup> /мг	4

Поперечные размеры ЧО в виде прямоугольного параллелепипеда (IRPP-модель) одинаковы и равны:  $a = b = \sqrt{\sigma_0} = 3$  мкм.

Расчет числа многократных сбоев проводился для значений глубин ЧО, равных 1 мкм (при этом пороговое значение энерговыделения в ЧО составляло  $E_0 = 0,932$  МэВ) и 2 мкм ( $E_0 = 1,864$  МэВ), с использованием упомянутых выше моделей: ЧОПФ, IRPP, MC-IRPP – при изотропном и направленном потоках тяжелых заряженных ионов.

Расчеты проводились с использованием энергетических спектров ионов галактического космического излучения (от гелия до урана включительно) для изотропного потока ТЗЧ, полученного с использованием программы OMERE [4] для геостационарной орбиты.

Кроме изотропного случая рассматривался также направленный поток ионов. В этом случае для подсчета множественности сбоев использовались ионы с энергиями, указанными в табл. 4. В ней значения энергии тяжелых заряженных частиц обеспечивают при нормальном падении ( $0^\circ$ ) значения ЛПЭ

в диапазоне от 5 до 120 МэВ·см<sup>2</sup>/мг вблизи поверхности микросхемы памяти и пробег ТЗЧ в кремнии более 30 мкм [3]. При падении ТЗЧ под углом 90° на ИС значения энергии выбирались таким образом, чтобы длина трека иона в ИС превышала поперечные размеры микросхемы. Отметим, что при направленном потоке ионов алюминиевый защитный корпус исключался из расчетов.

Для сравнения выше рассмотренных моделей ЧО, а также определения корректности функционирования разработанной на основе библиотеки GEANT4 программы моделирования ОРЭ в ИС, проводился расчет сечения ОС при нормальном падении ионов с характеристиками, приведенными в табл. 4. Результаты данного расчета для глубины ЧО, равной 1 мкм, продемонстрированы на рис. 3. На нем приведено распределение Вейбулла (5) и значения сечений, оцененных с применением метода Монте-Карло. Очевидно, что полученные оценки сечений немного занижены (расхождение между расчетными и оцененными значениями сечения ОС не превосходит 5 %). Возможное объяснение такому эффекту заключается в том, что выдвигавшейся в ИС энергии от одной ТЗЧ, движущейся в непосредственной близости от границы чувствительного объема, не достаточно для возникновения ОС, поскольку только часть этой энергии поглощается в ЧО, а другая – за ее пределами.

Таблица 4

Характеристики тяжелых ионов

Тип иона	Энергия иона, МэВ	
	Угол падения на ИС: 0°	Угол падения на ИС: 90°
Ne	75	2750
Ar	155	6500
Kr	280	20000
Xe	390	39000
U	1300	80000

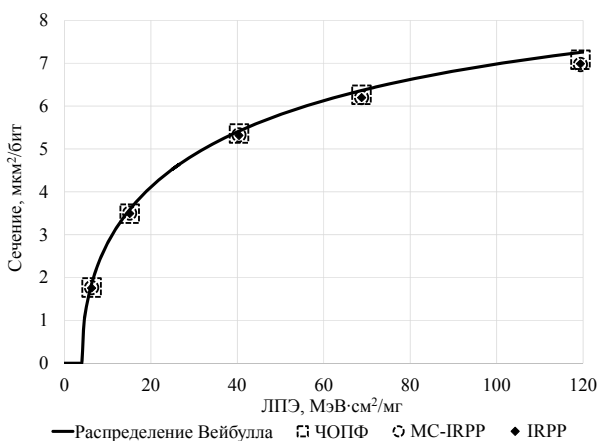


Рис. 3. Зависимость сечения сбоев от ЛПЭ. Глубина ЧО: 1 мкм. Для глубины ЧО, равной 2 мкм, зависимость сечения сбоев от ЛПЭ является аналогичной

Из данных, представленных на рис. 3, следует еще один важный вывод: все модели чувствительной области предсказывают одинаковые значения сечения (следовательно, и идентичное число сбоев). Это значит, что экспериментально определить корректность рассмотренных моделей при нормальном падении ионов на интегральную схему не представляется возможным.

При падении ионов под углом 90° (параллельное падение) к верхней поверхности ИС возникает значительное количество кратных сбоев (десятки и даже сотни сбоев от одного иона), хотя количество однократных сбоев все же превалирует. Такой вывод следует из результатов, представленных на рис. 4.

Если оценка сечения сбоя при нормальном падении ТЗЧ приблизительно одинакова по всем моделям ЧО, то при распространении ионов параллельно поверхности ИС могут наблюдаться отличия (особенно для ионов Kr, Xe, U). На рис. 5 приведены оцененные сечения для случая 90°.

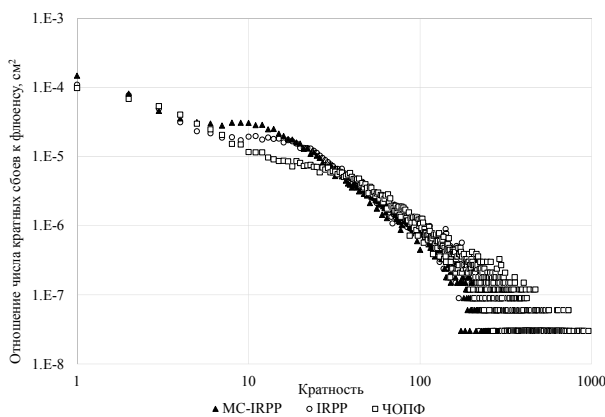


Рис. 4. Отношение числа кратных сбоев от иона Kr к флюенсу. Глубина ЧО = 1 мкм. Угол падения: 90°. Энергия Kr: 20000 МэВ

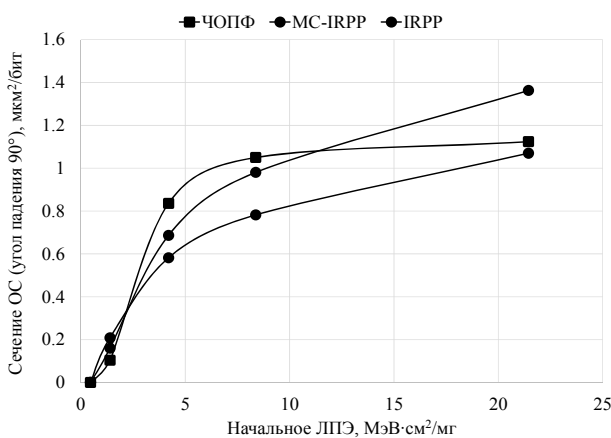


Рис. 5. Оценка сечения ОС по разным моделям ЧО. Угол падения: 90°. Глубина ЧО: 1 мкм

При изотропном потоке ТЗЧ описанные в данной работе модели ЧО прогнозируют заметный вклад кратных сбоев по сравнению с числом однократных ОС, который составляет приблизительно

10–15 % при  $k=1$  и 2 мкм в зависимости от типа модели. Такой вывод сделан на основе данных, приведенных на рис. 6, на котором представлены оценки частоты кратных сбоев в ИС.

Общая частота ОС, оцененных по этим моделям с использованием GEANT4 и OMERE, отображена в табл. 5. Очевидно, что оценка частоты событий по модели MC-IRPP в 1,5–1,7 раз превышает прогнозы остальных моделей.

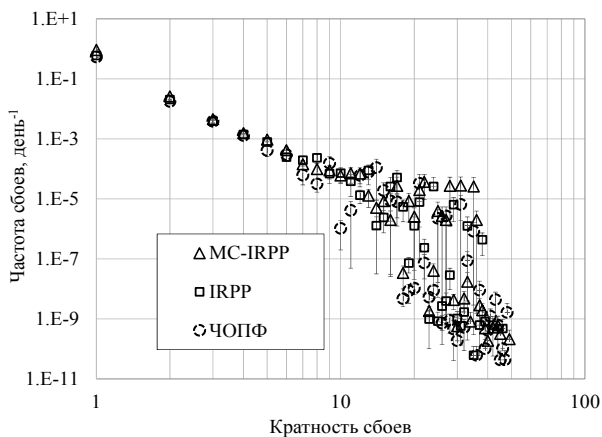


Рис. 6. Частота сбоев в ИС в зависимости от кратности. Глубина ЧО: 1 мкм

Таблица 5

Общая частота сбоев в микросхеме памяти, день<sup>-1</sup>

Глубина ЧО, мкм	1		2	
	OMERE	GEANT4	OMERE	GEANT4
Модель / Программное средство				
MC-IRPP		1,01		0,67
IRPP	0,62	0,67	0,36	0,39
ЧОПФ		0,60		0,40

## Заключение

Из результатов проведенных расчетов частоты ОС сделаны следующие выводы:

- оценка частоты ОС является модельно зависимой. При одной и той же экспериментальной зависимости сечения от ЛПЭ данная оценка зависит от типа модели ЧО и от значений ее параметров (глубины ЧО);

- при падении ионов под углом 90° к поверхности ИС все без исключения модели предсказывают значительное число кратных сбоев (несколько десятков и сотен от отдельной ТЗЧ);

- для случая изотропного потока ионов наблюдался заметный вклад кратных сбоев (10–15 % от числа однократных событий) в микросхеме памяти.

## Литература

1. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. – М.: Радио и связь, 2004. С. 320.

2. Зебрев Г. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. С. 148.

3. Гаганов В. В., Грунин А. В., Дроздов И. Ю., Игнатов К. А., Киселев Ф.К., Крылевский Е. Н., Кудрявцев Ю. Г., Лазарев С. А., Музюкин К. М., Силаев А. В., Цыганков Б. В., Петрикович Я. Я., Гусев В. В., Мироненко Л. П. Методические особенности обработки результатов испытаний микросхемы памяти на воздействие отдельных тяжелых заряженных частиц / II российско-белорусская научно-техническая конференция им. О. В. Лосева «Элементарная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение» // Труды, 2015. С. 119 – 125.

4. [www/trad.fr/ru/космос/по-omere/](http://www/trad.fr/ru/космос/по-omere/)