

УЧЕТ ФОРМЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ ЧАСТОТЫ ОДИНОЧНЫХ СБОЕВ В ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЕ

А. Е. Здарьев, С. А. Лазарев

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

Интегральные схемы (ИС), расположенные на борту космического аппарата (КА), подвергаются воздействию ионизирующего излучения космического пространства: тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), электронов, протонов. Результатом этого воздействия может являться неправильное функционирование схем или их полная потеря работоспособности.

Наиболее распространенным эффектом, возникающим при прохождении ТЗЧ через ИС, являются одиночные сбои (ОС), точная оценка частоты которых является на сегодня актуальной проблемой, поскольку при заниженной оценке числа сбоев возможно некорректное функционирование аппаратуры, а в случае завышенной – возникает необходимость разрабатывать и применять радиационно-стойкую ИС, которая является дорогостоящей.

С уменьшением проектных норм ИС появилась необходимость рассматривать множественные сбои. Они возникают в случае, когда один ион проходит через несколько чувствительных областей, расположенных поблизости, либо, если сбор заряда неравновесных носителей происходит сразу в нескольких таких областях. Учет многократных сбоев необходим для оценки корректного функционирования радиоэлектронной аппаратуры.

Различные устройства КА окружены защитой, которая, как правило, представляет собой алюминиевый корпус определенной геометрии. Из-за наличия такого корпуса вокруг ИС наблюдается анизотропия поля ионов солнечных космических лучей и галактических космических лучей в чувствительной области (ЧО), что также может повлиять на прогноз частоты сбоев.

Существуют несколько моделей ЧО для проведения расчета ожидаемого числа ОС. Среди них имеются: модель эффективного потока, тонкой области, интегральная модель прямоугольного параллелепипеда (IRPP-модель) [1]. В настоящее время эта модель применяется наиболее широко, и оценка частоты сбоев ν в ней сводится к вычислению интеграла [2, стр. 101]:

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

где S_0 – полная площадь поверхности ЧО (прямоугольного параллелепипеда); S_{\max} – максимальное значение длины хорды в ЧО; L – ЛПЭ иона в кри-

сталле кремния; L_{\max} – максимальное значение ЛПЭ в спектре ТЗЧ; L_{\min} – минимальное значение ЛПЭ в спектре ТЗЧ; $\varphi(L)$ – дифференциальный ЛПЭ-спектр ТЗЧ; $f(s)$ – дифференциальное распределение длин пробегов ТЗЧ (распределение хорд) в чувствительной области; m – количество чувствительных областей в ИС; ν – количество ОС в ИС в единицу времени; $w(L, s)$ – относительное распределение Вейбулла. Оно имеет вид:

$$w(E, s) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{E - E_0}{\beta}\right)^\alpha\right], \quad (2)$$

где α, β – параметры; E – энергия, оставленная ТЗЧ в ЧО. Она вычисляется из выражения: $E = \rho sL$, где ρ – плотность кремния; E_0 – пороговое значение энергии ЧО.

IRPP-модель имеет свои недостатки. Во-первых, необходимый для расчета частоты ОС параметр (глубина ЧО) не оценивают, а задают на основе данных о технологии изготовления, что приводит, на наш взгляд, к неопределенности результата. Во-вторых, в данной модели постулируется изотропность потока ТЗЧ в ЧО. В-третьих, для согласования с экспериментальными результатами в рамках IRPP-модели вводится функция чувствительности ИС. Для устранения предположения о необходимости ввода данной функции при оценке числа сбоев выбрана модель ЧО, форма которой основана на экспериментальной зависимости сечения сбоя от ЛПЭ ТЗЧ [3]. В дальнейшем она будет называться моделью ЧО произвольной формы (ЧОПФ). В ней используются те же допущения, что и в интегральной модели прямоугольного параллелепипеда. Расчет частоты одиночных сбоев в ИС при изотропном потоке ионов в данной модели проводился по формуле:

$$\nu = \frac{mS_0}{4} \int_0^{S_{\max}} \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} f(s) H(E, s) \varphi(L) dL ds. \quad (3)$$

Здесь $H(E, s)$ – ступенчатая функция чувствительности ИС (принимает значение 1, если энергия, поглощенная в ЧО превышает пороговую; 0 в остальных случаях).

Для задания формы ЧО использовались выражения (4) и (5) [3] и распределение (6):

$$\sigma = \pi r^2, \quad (4)$$

$$\frac{E}{E_0} = \frac{k}{h}, \quad (5)$$

$$\sigma = \sigma_0 \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{E - E_0}{\beta} \right)^\alpha \right) \right], \quad (6)$$

где σ – сечение ОС; σ_0 – сечение насыщения ОС; k – глубина ЧО; r и h – координаты точки на поверхности ЧОПФ (радиус и ордината соответственно),

На основе (4), (5), (6) получим:

$$r = \sqrt{\frac{\sigma_0}{\pi} \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{E_0}{\beta} \left(\frac{k}{h} - 1 \right) \right)^\alpha \right) \right]}. \quad (7)$$

Из формулы (7) видно, что ЧО представляет собой аксиально симметричную фигуру, так как радиус r зависит только от ординаты h .

Для оценки влияния поперечных сторон ЧО на частоту ОС в IRPP-модели проведен ее расчет для разных соотношений размеров прямоугольного параллелепипеда при фиксированном значении сечения насыщения и одинаковых значениях параметров относительного распределения (6). В работе использовались следующие значения параметров IRPP-модели:

- сечение насыщения: 9 км^2 ;
- глубина ЧО (высота прямоугольного параллелепипеда) варьировалась от 0,1 до 2 мкм с шагом 0,1 мкм.
- безразмерный коэффициент α принимал значения: 0,5, 3, 10, 20;
- коэффициент β : 1 МэВ, 3 МэВ;
- пороговое значение энергии E_0 изменялось от 5 до 25 МэВ с шагом 5 МэВ.

Дифференциальные ЛПЭ-спектры ионов ГКЛ, полученные с использованием программы OMERE [4] для разных толщин защитного корпуса, приведены на рис. 1.

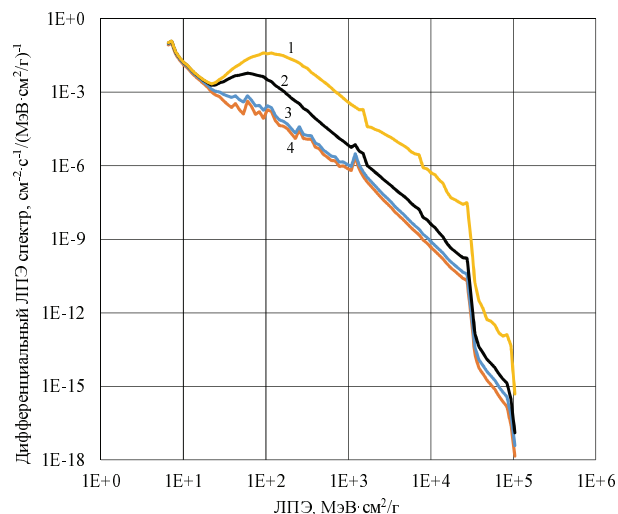


Рис. 1. Дифференциальные ЛПЭ-спектры при разной толщине алюминиевого корпуса: 1 – 0,1 г/см², 2 – 1 г/см², 3 – 5 г/см², 4 – 10 г/см²

Сравнение полученных результатов частоты сбоев проводилось по формуле:

$$\delta = \frac{(v_2 - \gamma v_1)}{v_2}, \quad (8)$$

Здесь δ – разница в оценке числа ОС; v_2 – частота ОС, рассчитанная по IRPP-модели при поперечных размерах ЧО: $a = 2 \text{ мкм}$ и $b = 4,5 \text{ мкм}$; v_1 – частота ОС, рассчитанная по IRPP-модели при поперечных размерах ЧО: $a = b = 3 \text{ мкм}$; γ – безразмерный коэффициент (оценивался по методу наименьших квадратов). Его значение указано на рис. 2 и равно 0,9535. Для идеального случая ($\gamma = 1$) значение частоты v_1 всегда равно v_2 , и тогда $\delta = 0$.

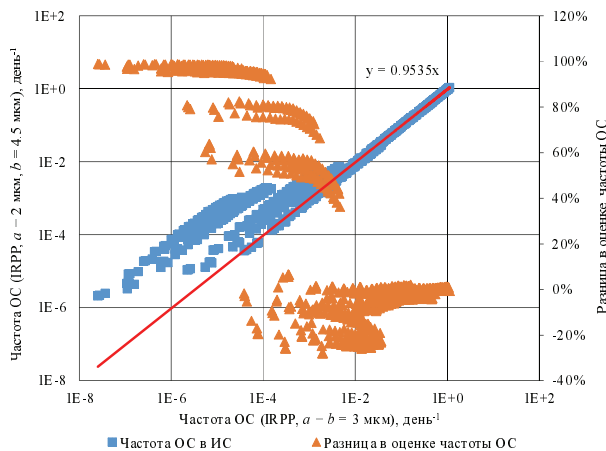


Рис. 2. Частота ОС в ИС. Толщина алюминиевой защиты: 0,1 г/см²

Результаты расчетов, представленные на рис. 2, показывают, что оценки частоты ОС в ИС могут отличаться в два раза при изменении соотношений сторон. Такая разница наблюдается при достаточно редких событиях (частота ОС $\leq 10^{-2}$ день⁻¹). При частых событиях (частота ОС $\geq 10^{-2}$ день⁻¹) результаты приблизительно совпадают (разница в оценке не превышает 30 %).

Если пороговое значение ЛПЭ больше $30 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ (высокое пороговое ЛПЭ), то модели [5] прогнозируют частоту ОС, отличающуюся на несколько порядков. Для оценки частоты ОС при больших пороговых ЛПЭ в ИС выбраны следующие значения параметров ЧО:

- сечение насыщения: 9 км^2 ;
- поперечные размеры прямоугольного параллелепипеда: $3 \times 3 \text{ км}^2$;
- высота ячейки варьировалась от 0,1 до 2 мкм с шагом 0,1 мкм;
- безразмерный коэффициент α принимал значения: 0,5, 1, 3, 5, 10, 15, 20.
- коэффициент β : 1 МэВ, 3 МэВ.
- пороговая энергия E_0 изменялась от 5 до 25 МэВ с шагом 5 МэВ;

Результаты расчета частоты ОС для этого случая приведены на диаграмме рассеяния на рис. 3. Они

показывают, что расхождение частоты ОС может достигать одного порядка (частота ОС $\leq 10^{-4}$ день $^{-1}$).

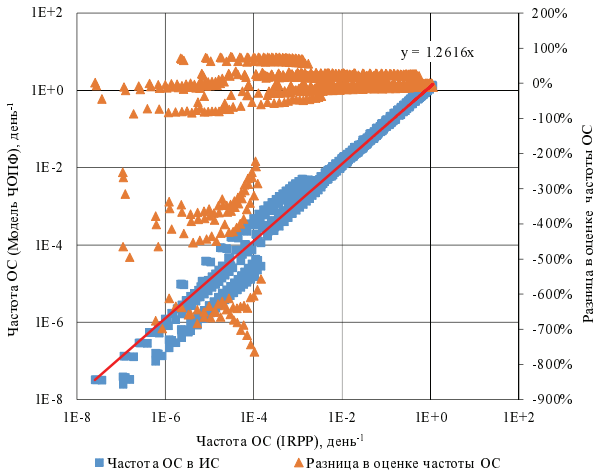


Рис. 3. Частота ОС в ИС при пороговом ЛПЭ ≥ 30 МэВ·см 2 /мг. Толщина алюминиевой защиты: 0,1 г/см 2

Если ИС окружена защитным корпусом, например, в виде прямоугольного параллелепипеда, то в чувствительных областях будет наблюдаться анизотропия поля ТЗЧ. На рис. 4 представлена геометрия расчетов при использовании защитного корпуса. Также на нем приведены: угол падения α иона, радиус-векторы \vec{R} и \vec{r} , элемент поверхности сферы dS , а также вектор \vec{T} , вдоль которого движется ТЗЧ. Данный вектор может пересекать одну или несколько чувствительных объемов, поэтому в ИС могут наблюдаться сразу несколько сбоев от воздействия одного иона (множественные сбои).

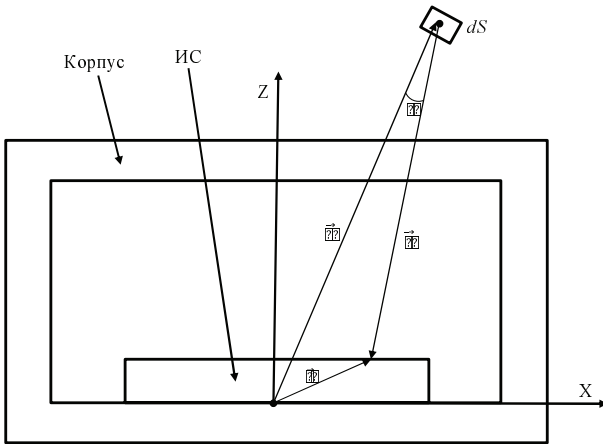


Рис. 4. ИС, окруженная алюминиевым корпусом

На рис. 5 представлено схематичное расположение ЧО в ИС (вид сбоку), которая представляет собой кристалл кремния высотой $H = 0,03$ см и поперечными размерами $W: 1 \times 1$ см 2 . Горизонтальные размеры области, в которой находится один чувствительный объем, одинаковы и равны $l = 4,88$ мкм, а ее высота принимала значения $k = 1, 2, 5, 10$ мкм. Предполагалось, что в каждой ячейке памяти содержится

только одна ЧО. Общее количество ячеек памяти в ИС составляло 2048×2048 .

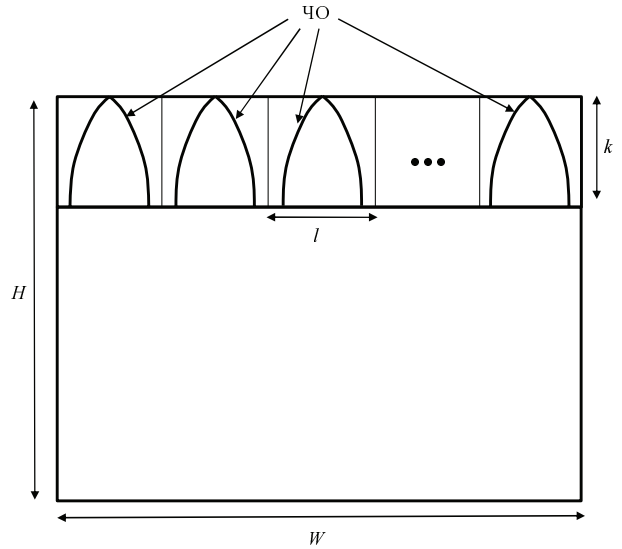


Рис. 5. Расположение чувствительных областей в ИС

Для оценки количества множественных сбоев использовались следующие характеристики алюминиевой защиты: поперечные размеры корпуса одинаковы и равны 1,6 см, высота 0,3 см, толщина 0,1 см. Параметры ЧО принимали значения: $\alpha = 0,3$, $\beta = 3$ МэВ, $E_0 = 2$ МэВ, $\sigma_0 = 9$ мкм 2 . Результаты расчетов приведены на рис. 6.

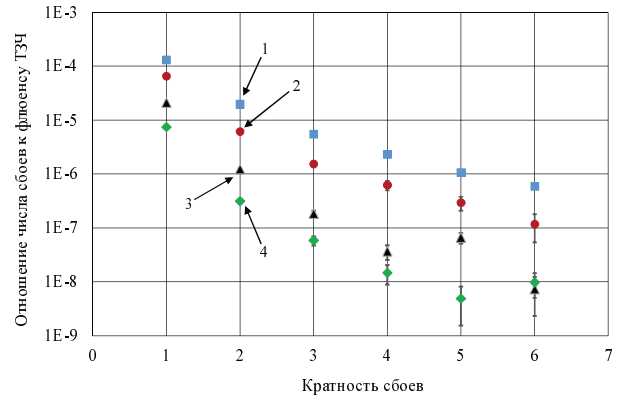


Рис. 6. Кратные сбои в ИС при разных значениях глубины ЧО: 1 – 10 мкм, 2 – 5 мкм, 3 – 2 мкм, 4 – 1 мкм

Результаты расчетов показывают, что при облучении микросхемы тяжелыми заряженными частицами наблюдается заметное количество кратных сбоев (в особенности двойных и тройных) по сравнению с одиночными. Причем при увеличении глубины ЧО количество кратных сбоев возрастает. Пороговое значение ЛПЭ варьировалось в диапазоне от 1 до 10 МэВ·см 2 /мг.

Известно, что для оценки числа сбоев используется глубина ЧО, которая в рамках IRPP-модели обычно варьируется от нескольких долей до единиц микрометров. Данные, приведенные на рис. 7, гово-

рят о возможности экспериментальной оценки глубины ЧО. Исходя из того, что зависимость отношения множественных сбоев к однократным от глубины ЧО близка к линейной, то каждому значению функции (отношение, например, двукратных сбоев к однократным) соответствует одно значение аргумента (глубина ЧО).

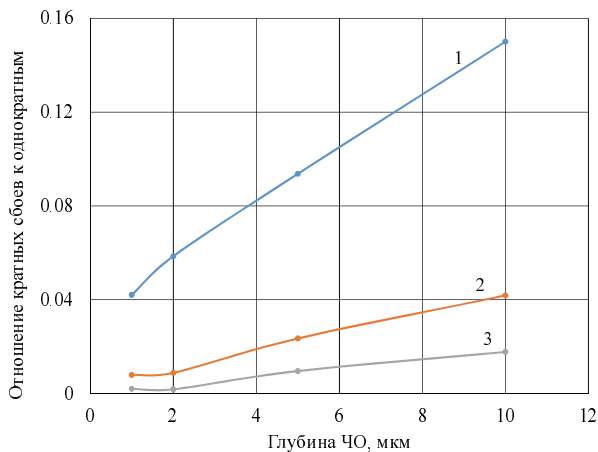


Рис. 7. Зависимость отношения кратных сбоев к многократным от глубины ЧО: 1 – отношение двукратных сбоев к однократным, 2 – отношение трехкратных сбоев к однократным, 3 – отношение четырехкратных сбоев к однократным

На основе представленных выше результатов численного моделирования проведен расчет многократных сбоев в ИС за алюминиевым корпусом толщиной 1 мм для формы ЧО, предложенной в статье [3]. Пороговое значение ЛПЭ L_0 составляло $3,88 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$; глубина k ЧО: 0,4, 1, 2, 4 мкм.

Результаты расчета числа событий с учетом их множественности приведены на рис. 8 и 9, на которых видно, что количество кратных сбоев по-прежнему составляет заметную долю от их общего числа. В таблице приведены оценки частоты сбоев для двух типов защит: сферической оболочки и прямоугольного параллелепипеда.

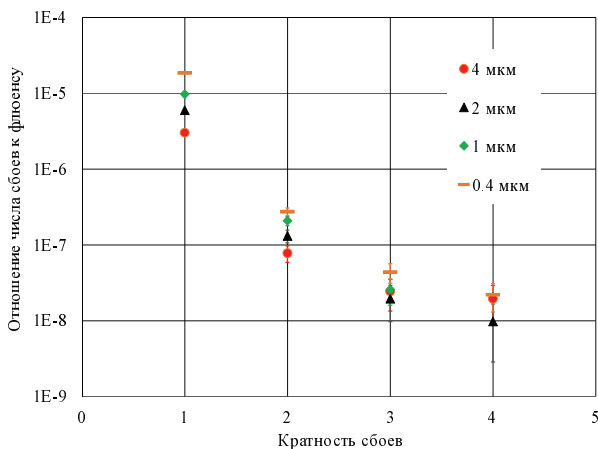


Рис. 8. Кратные сбои в ИС при различных значениях глубины ЧОФ

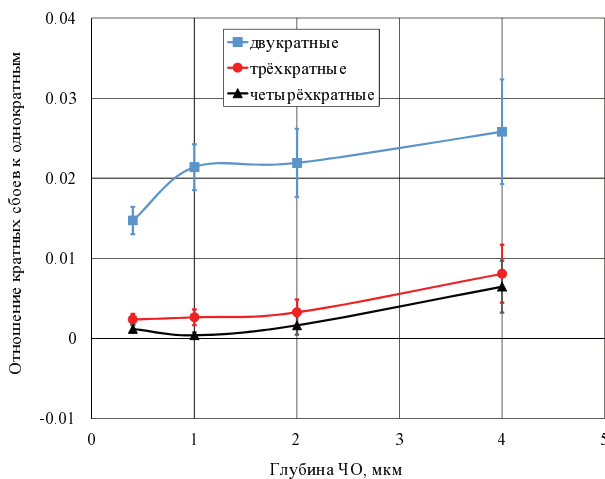


Рис. 9. Кратные сбои в ИС при различных значениях глубины ЧОФ. Пороговое ЛПЭ = $3,88 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$

Частота сбоев в ИС для двух типов защит

Глубина ЧО, мкм	Прямоугольный параллелепипед	Сферическая оболочка
0,4	0,599854	63,3554
1	0,318125	12,5276
2	0,199352	1,97123
4	0,104544	0,309387

Из представленных в таблице данных следует, что с уменьшением глубины ЧО возрастает отличие между приведенными оценками частоты ОС. При значении глубины 0,4 мкм данное расхождение составляет приблизительно 2 порядка.

Из результатов проведенных расчетов частоты ОС сделаны следующие выводы:

- оценка числа ОС является модельно зависимой, то есть она зависит от значений параметров модели при одной и той же экспериментальной зависимости сечения от ЛПЭ;
- результаты расчета числа сбоев показывают, что доля кратных сбоев составляет заметную долю от общего числа событий, поэтому ее следует учитывать при оценке сбоеустойчивости ИС;
- зависимость отношения кратных сбоев к однократным от глубины ЧО можно использовать для экспериментальной оценки глубины ЧО.

Литература

1. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы // Радио и связь. 2004. С. 320.
2. Зебрев Г. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции // 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 // Труды II российско-белорусской научно-технической конференции «элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение» им. О. В. Лосева. 2015. С. 119–125.

4. www://trad.fr/ru/космос/по-omere/

5. Чумаков А. И., Согоян А. В., Смолин А. А. Прогнозирование частоты одиночных эффектов в диффузионном приближении // НИЯУ МИФИ. 2017.