



УДК 621.382.323

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.278.281

## ОЦЕНКА ЧАСТОТЫ ОДИНОЧНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

### ESTIMATING SINGLE EVENT RATE USING TWO-PARAMETER MODEL

УЛАНОВА АНАСТАСИЯ ВЛАДИСЛАВОВНА

ULANOVA ANASTASIA V.

ЧУМАКОВ АЛЕКСАНДР ИННОКЕНТЬЕВИЧ

CHUMAKOV ALEXANDER I.

СОГОЯН АРМЕН ВАГОЕВИЧ

SOGOYAN ARMEN V.

СМОЛИН АНАТОЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

SMOLIN ANATOLY A.

aasmol@spels.ru

aasmol@spels.ru

АХМЕТОВ АЛЕКСЕЙ ОЛЕГОВИЧ

AHMETOV ALEXEY O.

Национальный исследовательский  
ядерный университет «МИФИ»

115409, Россия, г. Москва, Каширское ш., 31

National Research Nuclear University MEPhI,  
31 Kashirskoe Highway, Moscow, 115409, Russia

В настоящей работе рассмотрены основные существующие подходы к оценке частоты одиночных радиационных эффектов при воздействии тяжелых заряженных частиц и проанализированы их основные ограничения. Предложен альтернативный подход к оценке частоты одиночных радиационных эффектов и описаны его преимущества по сравнению с существующими подходами.

*Ключевые слова:* одиночные радиационные эффекты; расчет частоты эффектов; модель чувствительной области.

The paper discusses existing approaches to single event rate estimation and describes their main limitations when applied to modern devices. A new alternative approach has been proposed and comparison to existing methods of single event rate estimation has been made.

*Keywords:* single event effects; single event rate; sensitive volume.

В настоящее время наиболее часто используемой формой представления результатов испытаний и задания требований для изделий электронной компонентной базы (ЭКБ) является использование пары значений для пороговых линейных потерь энергии (ЛПЭ) и сечения насыщения. Однако важно помнить, что конечной целью испытаний и задания требований к изделию является обеспечение вероятности безотказной или бесбойной работы аппаратуры, в которой используется изделие, в заданных пределах. При этом значения пороговых ЛПЭ и сечения насыщения являются лишь входными данными для наиболее часто используемой в настоящее время методики расчета частоты одиночных радиационных эффектов (ОРЭ). Таким образом, задача оценки показателей стойкости к воздействию ТЗЧ помимо собственно испытаний включает второй ключевой компонент — методику расчета частоты ОРЭ. Эти два компонента — испытания и расчет частоты, тесно связаны. Это означает, что выбор подхода к оценке частоты ОРЭ может потенциально позволить сократить объем испытаний при сохранении достоверности оценок.

В настоящее время для оценки частоты ОРЭ в изделиях ЭКБ в реальных условиях эксплуатации при воздействии изотропного поля ТЗЧ используется несколько подходов, основанных на следующих приближениях:

- нормального падения ТЗЧ со ступенчатой функцией чувствительности;

- нормального падения ТЗЧ с плавно изменяющейся функцией чувствительности;
- эффективного потока или тонкой чувствительной области;
- чувствительной области в виде прямоугольного параллелепипеда (RPP);
- чувствительной области в виде прямоугольного параллелепипеда с плавно изменяющейся функцией чувствительности (IRPP);
- использования сечения ОРЭ в изотропном поле рассчитанного на основе моделей переноса и собирания заряда с трека ТЗЧ.

Действующими документами допускается проводить оценку показателей стойкости изделий ЭКБ к воздействию ТЗЧ, принимая во внимание только нормальное падение, т. е. без учета изотропного характера излучения. При этом могут использоваться различные функции чувствительности, включая в простейшем случае ступенчатую, а также экспоненциальную, обратную экспоненциальную и функцию Вейбулла. Однако точность прогнозирования при воздействии ТЗЧ космического пространства остается крайне низкой для всех рассмотренных аппроксимаций, так как не учитывается возможность падения частиц под углами, отличными от нормального. Поэтому наиболее распространенные модели принимают во внимание угловые зависимости.

Самым простым способом учета изотропного характера излучения является использование концепции тонкой

чувствительной области. В этом случае предполагается, что толщина чувствительной области существенно меньше ее поперечных размеров, что позволяет считать, что при угле падения ТЗЧ на поверхность кристалла, равном  $\theta$ , эффективное значение ЛПЭ  $L_{эф}$  равно  $L_z/\cos\theta$ . К сожалению, для большинства современных устройств условие тонкой области не выполняется и требуется учет реальных геометрических размеров чувствительных областей.

Наиболее распространенные в настоящее время подходы к оценке частоты ОРЭ основаны на модели чувствительной области в виде прямоугольного параллелепипеда (RPP) и являющейся ее развитием интегральной модели IRPP [1–3]. В рамках данных моделей предполагается, что в формировании ОРЭ участвует заряд, образовавшийся на части трека проходящей через чувствительную область, аппроксимируемую прямоугольным параллелепипедом. Однако такая аппроксимация ведет к ступенчатому виду зависимости сечения от ЛПЭ, поэтому в модели IRPP дополнительно вводится вариативность чувствительности элементов, описываемая распределением Вейбулла. Таким образом, зная размеры ЧО и параметры функции Вейбулла, можно рассчитать частоту ОРЭ в изотропном поле излучения с использованием распределения длин хорд для ЧО.

Все рассмотренные выше подходы основаны на допущениях 80-х годов прошлого века, сформулированных для устройств того периода. Ряд этих допущений не имеет под собой физического обоснования, не может быть распространен на современные устройства и, как следствие, не позволяет описывать некоторые эффекты, например многократные сбои. Одним из таких допущений является полный сбор заряда из неизменной чувствительной области и вариативность критического заряда в широких пределах, описываемых распределением Вейбулла. В последние несколько лет были предприняты попытки актуализировать IRPP-подход путем введения множественных ЧО для одного элемента, но этот путь только усугубляет вторую проблему IRPP-модели. Эта проблема связана с большим числом параметров модели IRPP, необходимых для описания ЧО и распределения Вейбулла. Одного набора экспериментальных точек зависимости сечения эффекта от ЛПЭ недостаточно для однозначного определения параметров модели. Различные наборы параметров кривой Вейбулла могут примерно одинаково хорошо описывать один и тот же набор экспериментальных данных. Кроме того, такой параметр, как глубина ЧО, выбирается фактически произвольно.

В действительности ситуация прямо противоположная: площадь ЧО увеличивается по мере увеличения ЛПЭ ТЗЧ, а величина критического заряда меняется в очень небольших пределах вследствие технологического разброса и во многих случаях может считаться постоянной. То есть чем дальше расположен трек частицы от чувствительного элемента, тем большее значение ЛПЭ необходимо для возникновения эффекта. Именно это обстоятельство и определяет плавный рост сечения ОРЭ с увеличением ЛПЭ.

Для корректного описания такого приближения необходимо использование модели сбора заряда с трека ТЗЧ. В последние годы было предложено несколько моделей, решающих данную задачу [4–6]. Сечение эффекта при этом определяется как площадь области, в которой рассчитанная на основе такой модели критериальная величина (собранный заряд или величина тока ионизационной реакции) оказывается больше некоего порогового уровня. Принципиальное значение при

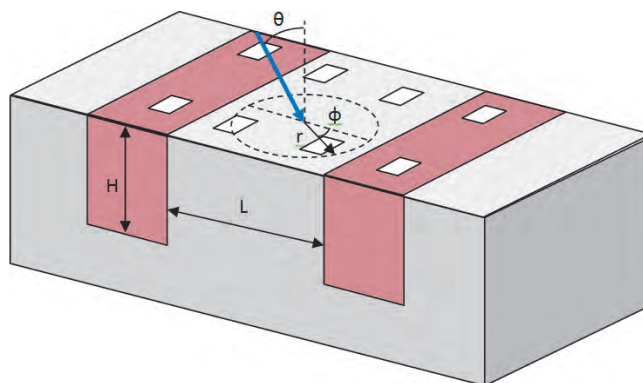


Рис. 1. Модельная геометрия для решения задачи сбора заряда и формирования ионизационной реакции

этом имеет включение в данные модели зависимости сечения эффекта от угла падения частиц. Располагая такой зависимостью, можно оценить сечение эффекта в изотропном поле излучения, что, в свою очередь, позволяет оценить частоту ОРЭ для заданной орбиты как простой интеграл:

$$v_z = \int_0^{\infty} \sigma_{is}(L_z) \cdot \Phi(L_z) \cdot dL_z. \quad (1)$$

Недостатком существующих моделей диффузионного сбора заряда является сложность определения параметров модели. В большинстве случаев необходимо использование приборно-технологического моделирования, что сопряжено с высокими трудозатратами и требует наличия детальной информации о технологическом процессе, которая, как правило, известна только производителю. В связи с этим целью данной работы стала разработка простой модели для расчета частоты ОРЭ, основанной на физических принципах и включающей минимальное число параметров, однозначно определяемых из результатов экспериментальных исследований.

Основа разработанного подхода — модель формирования импульса ионизационного тока, основанная на диффузионном приближении сбора заряда. Задача диффузии последовательно решалась для нескольких модельных геометрий и верифицировалась с использованием средств приборно-технологического моделирования. Как показали результаты численного моделирования, учет влияния переходов карман – подложка является принципиально важным для корректного описания ионизационной реакции [7]. Поэтому итоговые выражения для ионизационного тока были получены для модельной геометрии на рис. 1, включающей области карманов, показанные красным цветом.

Приближенное выражение для диффузионного тока перехода с центром в точке  $\mathbf{r} = (x, y, 0)$  при сборе заряда с трека заряженной частицы может быть представлено в виде [8]

$$I(\mathbf{r}, t) \approx q \frac{1}{\epsilon_i} L_z \frac{D_m R}{\pi D t + \pi R^2 / 2} \left( 1 + \frac{2\sqrt{4\pi D t}}{L} \right) \times \exp \left( -\frac{r^2(1-b^2)}{4 D t} - \frac{\pi^2}{L^2} D t \right) \left( 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{b r}{2\sqrt{D t}} \right) \right), \quad (2)$$

где  $L_z$  — ЛПЭ частицы,  $\theta$  и  $\phi$  — зенитный и азимутальный углы трека соответственно (рис. 1),  $\phi_0$  — азимутальный угол вектора  $\mathbf{r}$ ,  $\epsilon_i$  — средняя энергия образования электрон-дырочной пары,  $b = \sin\theta \cos\phi$ .

С учетом наличия функции, описывающей зависимость ионизационной реакции от угла и точки попадания частицы,

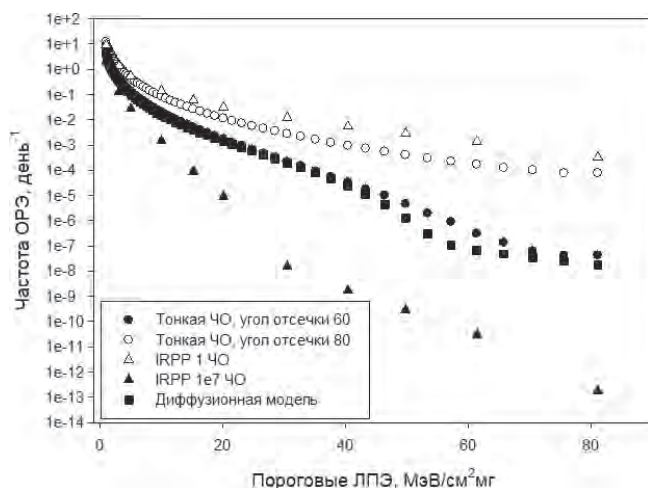


Рис. 2. Сравнение результатов оценки частоты ОРЭ как функции порогового значения ЛПЭ на геостационарной орбите для различных моделей

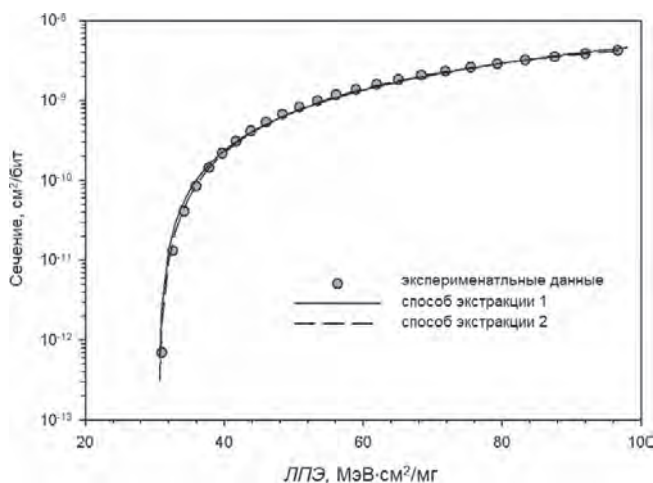


Рис. 3. Произвольная зависимость сечения ОРЭ от ЛПЭ (эксперимент и разные способы экстракции функции Вейбулла)

Таблица 1. Различные параметры функции Вейбулла и полученные согласно им параметры чувствительности и показателей стойкости, полученные в одном программном пакете

Параметр функции Вейбулла	Способ экстракции			
	1		2	
W	225		75	
s	1,55		1,7	
$\sigma_{max}$ , см <sup>2</sup>	$3,2 \cdot 10^{-8}$		$7,5 \cdot 10^{-9}$	
LET <sub>th</sub> , МэВ·см <sup>2</sup> /мг	30,5		30,5	
c, мкм	0,5	1,0	0,5	1,0
R, день <sup>-1</sup> бит <sup>-1</sup>	$3,2 \cdot 10^{-11}$	$5,8 \cdot 10^{-12}$	$4,9 \cdot 10^{-12}$	$5,4 \cdot 10^{-14}$

можно найти сечение эффекта как площадь области, в которой величина ионизационной реакции оказывается достаточной для возникновения ОРЭ. При использовании в качестве критерия сбой амплитуды напряжения импульсной помехи, вызванной ТЗЧ, уравнение, описывающее границу критической области, может быть приближенно представлено в виде

$$\frac{L_{z0}}{L_z} \approx \exp\left(-\frac{\pi r \sqrt{1-b^2}}{L}\right) \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{b}{\sqrt{2(1-b^2)^{1/4}} \sqrt{\frac{\pi r}{L}}}\right)\right). \quad (3)$$

Это выражение принимает наиболее простую форму в случае нормального падения частицы ( $\theta = 0$ ). Полученное при этом аналитическое выражение для зависимости сечения от ЛПЭ и угла падения частицы принимает вид

$$\sqrt{\sigma(L_z, 0)} = \frac{L}{\sqrt{\pi}} \cdot \ln\left(\frac{L_z}{L_{z0}}\right). \quad (4)$$

Выражение для произвольного угла падения имеет более сложную форму и может быть представлено в виде интеграла:

$$\sigma(L_z, \theta) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \Theta[L_z g(r, \theta, \phi) - L_{z0}] r dr d\phi, \quad (5)$$

где  $\Theta(x)$  — функция Хэвисайда, а  $g(r, \theta, \phi)$  задается правой частью уравнения (3).

Выражения (4, 5) содержат всего два параметра ( $L$  и  $L_{z0}$ ) и носят универсальный характер. В координатах  $(\sqrt{\sigma}, \ln(L_z))$  эти параметры описывают прямую линию, что делает определение параметров значительно более простым и однозначным в отличие от параметров кривой Вейбулла. Эти два параметра, определяемые из экспериментальных данных для нормального падения, также однозначно задают зависимость сечения от ЛПЭ при произвольном угле падения частиц. Тогда сечение для изотропного потока вычисляется как простой интеграл:

$$\sigma_{is}(L_z) = \int_0^{\pi/2} \sigma(L_z, \theta) \sin(\theta) \cos(\theta) d\theta. \quad (6)$$

На рис. 2 показаны оценки частоты ОРЭ, полученные с использованием разных методов для одного набора исходных данных, имитирующих экспериментальные зависимости сечения от ЛПЭ с различными порогами. Для обеспечения консервативности оценки использовались сечения насыщения на уровне  $0,1 \text{ см}^2$ . Все оценки проводились для ЛПЭ спектра частиц ГКЛ и СКЛ за защитой  $1 \text{ г/см}^2$  на геостационарной орбите.

Как видно из графика, выбор метода расчета может оказывать крайне сильное влияние на итоговый результат. Для приближения тонкой чувствительной области большую роль играет выбор угла отсечки. Для метода IRPP значительное влияние на результат оказывает число чувствительных областей, используемое при расчете, а выбор его значения не всегда очевиден, особенно для эффектов отказов. Помимо этого, не учитываются другие источники неопределенностей, такие как невозможность однозначного определения всех параметров IRPP-метода из-за большого числа степеней свободы данной задачи.

Необходимо отметить, что практически все расчетные методы верифицировались для ИС с малыми пороговыми значениями ЛПЭ, что позволяло сравнивать их с данными натурального эксперимента. Вместе с тем, как видно из полученных результатов, расхождения оценок для различных методов достигают нескольких порядков при высоких пороговых ЛПЭ. К тому же при установлении требований к ИС по отказоустойчивости



большой интерес представляют области больших пороговых значений ЛПЭ. Здесь прямое сравнение фактически невозможно из-за крайне редких событий, которые могут происходить с частотой одно событие за несколько лет. Поэтому важно выбрать такой метод расчета, который с запасом гарантирует требуемую отказоустойчивость.

Помимо разброса оценок, полученных различными методами, существует также значительный разброс и в рамках одного метода. В целях демонстрации последствий данной проблемы возьмем идеализированный набор экспериментальных точек, показанный на рис. 3 (в реальности доступно существенно меньше значений ЛПЭ). И по этому набору данных определим параметры функции Вейбулла двумя способами подгонки параметров. Получаем две очень близко совпадающих кривых и два существенно различающихся набора параметров, представленных в табл. 1. Для этих двух наборов параметров и двух произвольно выбранных значений глубины ЧО были рассчитаны значения частоты ОРЭ, представленные в последней строке табл. 1. Как видно из представленных значений, различие полученных оценок составляет более трех порядков.

Предложенный в данной работе подход к оценке частоты ОРЭ не имеет данной проблемы с неопределенностью в экстракции параметров. Соотношения (4, 5) содержат только два неизвестных параметра ( $L$ ,  $L_{20}$ ), подлежащих определению из эксперимента при нормальном падении ионов. Сечение эффектов в изотропном поле определяется выражением (6), после чего частота событий оценивается из соотношения (1). При этом экстракция параметров может проводиться в рамках линейной модели, что минимизирует ошибку.

Таким образом, в работе предложен новый подход к расчету частоты ОРЭ, основанный на физической модели собирания заряда. В корне меняется подход: ЧО переменная, порог переключения постоянен. Лежащая в основе модель содержит всего два калибровочных параметра, однозначно определяемых из экспериментальных данных для нормального падения. На основе предложенного подхода определяются угловые

зависимости и сечение для изотропного поля. Использование предложенного подхода потенциально позволяет сократить объем испытаний и обоснованно вести нормы испытаний при квалификационных испытаниях.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Petersen E. L. *et al.* Rate prediction for single event effects — a critique // IEEE Transactions on Nuclear Science. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 1992. Vol. 39. № 6. P. 1577–1599.
2. Letaw J. R. *Single event effects rate predictions in space* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 1991. Vol. 56. P. 1260–1262.
3. Bradford J. N. *Geometric Analysis of Soft Errors and Oxide Damage Produced by Heavy Cosmic Rays and Alpha Particles* // IEEE Transactions on Nuclear Science. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 1980. Vol. 27. № 1. P. 941–947.
4. Artola L. *et al.* Collected Charge Analysis for a New Transient Model by TCAD Simulation in 90 nm Technology // IEEE Transactions on Nuclear Science. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2010. Vol. 57. № 4. P. 1869–1875.
5. Edmonds L. D. *A Theoretical Analysis of Steady-State Charge Collection in Simple Diodes Under High-Injection Conditions* // IEEE Transactions on Nuclear Science. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2010. Vol. 57. № 2. P. 818–830.
6. Weller R. A. *et al.* Monte Carlo simulation of radiation effects in microelectronics // IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference. IEEE, 2010.
7. Sogoyan A. V. *et al.* A simple analytical model of single-event upsets in bulk CMOS // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2017. Vol. 400.
8. Sogoyan A. V., Chumakov A. I., Smolin A. A. *SEE rate estimation based on diffusion approximation of charge collection* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2018. Vol. 418.

### КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



## СЛУЧАЙНЫЕ ДАННЫЕ: СТРУКТУРА И АНАЛИЗ

В. И. Хименко

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. — 424 с.  
ISBN 978-5-94836-497-1

Цена 1188 руб.

Книга посвящена одной из наиболее общих проблем физики и техники, биологии и естествознания — проблеме извлечения информации из случайных данных (наблюдений, измерений, экспериментальных исследований).

Эта проблема включает в себя этапы сбора данных, построения моделей реальных процессов и систем, анализ и интерпретацию получающихся результатов.

В книге даются описание и детальный анализ структуры наиболее важных с точки зрения приложений моделей временных рядов, непрерывных случайных процессов, случайных потоков событий, случайных полей и изображений. Представлено большое количество новых результатов по вероятностному анализу неоднородных данных, отображениям случайных процессов на фазовой плоскости, характеристикам выбросов и характеристикам превышений заданных уровней. Показывается широкое разнообразие практических задач, которые решаются (или могут решаться) на основе рассмотренных моделей случайных функций.

#### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 (495) 234-0110; 📠 +7 (495) 956-3346; ✉ knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru