

Двухпараметрическая модель для оценки чувствительности СБИС к воздействию тяжелых заряженных частиц

А.И. Чумаков

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» -
АО «ЭНПО СПЭЛС», aichum@spels.ru

Аннотация — Предложена двухпараметрическая модель для оценки параметров чувствительности – сечений одиночных радиационных эффектов в функции линейных потерь (ЛПЭ) на основе модели собирания заряда точечной чувствительной областью. Представленная модель учитывает конечные размеры чувствительной области и более корректно описывает угловые зависимости по изменению пороговых значений ЛПЭ по сравнению с точечной моделью.

Ключевые слова — тяжелые заряженные частицы, одиночные радиационные эффекты, сечение одиночных радиационных эффектов, СБИС.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одиночные радиационные эффекты (ОРЭ), возникающие в изделиях микро- и нанoeлектроники при воздействии отдельных ядерных частиц (ОЯЧ), в значительной степени влияют на нормальное функционирование радиоэлектронной аппаратуры даже в наземных условиях эксплуатации [1-3]. Наиболее остро эта проблема стоит для электронной аппаратуры космических аппаратов в условиях воздействия тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) и высокоэнергетичных протонов космического пространства.

Показатели радиационной стойкости (частота сбоев и/или вероятность отказа) в СБИС определяется при известных уровнях воздействия ТЗЧ с помощью зависимости сечений ОРЭ от линейных потерь энергии (ЛПЭ). Существующие подходы для расчетной оценки показателей стойкости базируются на модели чувствительной области в виде прямоугольного параллелепипеда [1,2,4], в которой предполагается полное собирание заряда при нахождении трека только внутри этой чувствительной области. Однако для современных СБИС данная модель является некорректной, в частности, с помощью нее невозможно объяснить возникновение многократных сбоев.

Физически более корректно брать прямо противоположные предположения. Чувствительная область (область собирания заряда) увеличивается по мере роста ЛПЭ, а пороговая энергия (заряд) является постоянной величиной. В частности, в работе [5] предложен подход для оценки параметров чувствительности – сечений ОРЭ в функции ЛПЭ при

использовании модели собирания заряда точечной чувствительной областью (рис. 1).

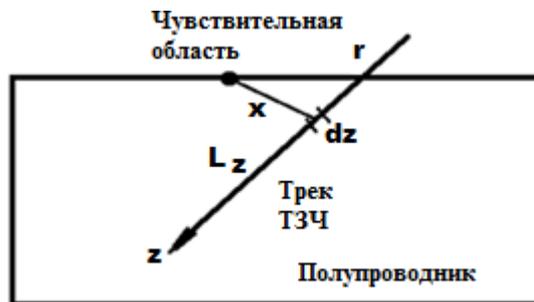


Рис. 1. Модель точечной чувствительной области

Основное допущение для этой модели базируется на предположении, что величина собранного заряда ΔQ (амплитуда ионизационной реакции) определяется из соотношения:

$$\Delta Q = k_q \cdot \exp\left(-\frac{x}{l_c}\right) \cdot dz \cdot L_z \quad , \quad (1)$$

где x – расстояние между областью собирания и точкой трека; l_c – эффективная длина собирания; dz – небольшой участок трека, L_z – ЛПЭ, k_q - коэффициент пропорциональности между зарядом (амплитудой напряжения) и энергией.

В случае если частица нормально попала на поверхность кристалла СБИС на расстоянии r от центра чувствительной области, то значение ЛПЭ, необходимое для возникновения ОРЭ, будет определяться интегрированием по длине трека, а сечение $\sigma(L_z)$ при данном значении ЛПЭ L_z будет определяться площадью круга радиуса r :

$$\frac{L_z(r)}{L_{z0}} = \frac{l_c}{\int_0^\infty \exp\left(-\frac{\sqrt{r^2 + z^2}}{l_c}\right) dz} \quad , \quad (2)$$

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

где L_{z0} – пороговое значение ЛПЭ, которое определяется из уравнения (2) при условии попадания ТЗЧ в центр чувствительной области.

Точечная модель достаточно удовлетворительно описывает экспериментальные результаты по практически всем видам ОРЭ: одиночные сбои (SEU), одиночные тиристорные эффекты (SEL), одиночные переходные эффекты (SET) и т.п. [5,6]. Однако она дает заметные отличия при оценках пороговых значений ЛПЭ при изменении угла падения ТЗЧ. Например, при падении ТЗЧ под углом до $\theta \leq 60^\circ$ к поверхности кристалла экспериментальные результаты показывают изменения эффективных значений по закону обратного косинуса $1/\cos\theta$, тогда как точечная модель дает увеличение пороговых значений ЛПЭ при $\theta=60^\circ$ только в 1.3 раза. Поэтому необходима некоторая корректировка модели, позволяющая более точно описывать угловые зависимости.

Отличительной особенностью предлагаемого подхода от существующих моделей является возможность оценки параметров чувствительности для многократных сбоев, вызванных процессами диффузии [7-9]. К сожалению, другие механизмы многократных сбоев, обусловленные просадкой питания, генерацией вторичных ядерных частиц в материалах СБИС и появлением ложных сигналов в схемах управления, требуют анализа конкретных схемотехнических и топологических решений, реализованных в конкретной СБИС [9-11].

II. КОНЕЧНЫЕ РАЗМЕРЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ОБЛАСТИ

Несмотря на существенное уменьшение размеров элементов СБИС, все-таки считать каждую отдельную чувствительную область в виде точечного узла сбора заряда не всегда представляется корректным. Учет конечных размеров в рамках предполагаемого подхода может быть приведен в предположении, что приближение (1) справедливо для ближайшей точки, принадлежащей ограниченной чувствительной области. Другими словами, если трек ТЗЧ находится под чувствительной областью, то параметры чувствительности не меняются. В случае нахождения трека за пределами чувствительной области отчет интегрирования будет происходить от ближайшей к треку точки периметра чувствительной области. Очевидно, что в общем случае пороговые значения ЛПЭ внутри чувствительной области могут отличаться, но оценки показывают, что эти изменения не превышают 20%.

При сделанных предположениях соотношение (2) не изменится, а сечение должно включать площадь чувствительной области. Например, для чувствительной области в виде круга сечение может быть записано в виде:

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

где r_s – радиус конечной чувствительной области.

На рис. 2 представлены нормированные зависимости по изменению сечений ОРЭ от значений ЛПЭ. Значения сечений проинормированы в точке $L_z/L_{z0}=10$, которая для большинства случаев

соответствует условиям "насыщения" этой зависимости.

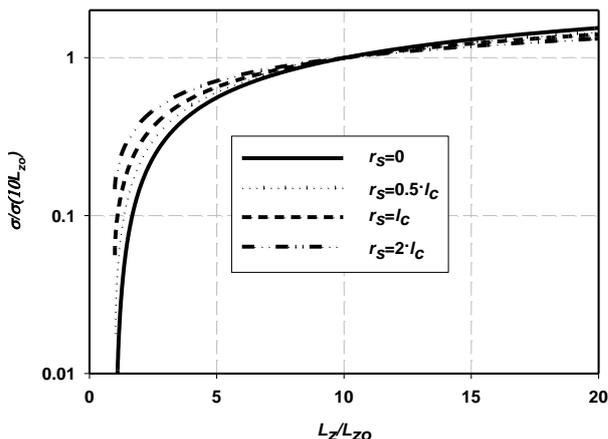


Рис. 2. Нормированные зависимости сечений ОРЭ от ЛПЭ для круговой чувствительной области с разными радиусами

Нетрудно заметить, что эти зависимости фактически не сильно изменяются между собой вплоть до значений $r_s/l_c \leq 1$, за исключением конечных размеров сечений при пороговых значениях ЛПЭ (надпороговая область). На практике измерить значения сечений в надпороговой области крайне затруднительно из-за малой статистики регистрируемых эффектов. К тому же эта область оказывает не очень сильное влияние при оценках показателей стойкости, что позволяет пренебречь несущественными отличиями и пользоваться при $r_s/l_c \leq 1$ более простыми зависимостями вида (2) и (3). Эффект конечных размеров чувствительных областей необходимо принимать во внимание при анализе угловых зависимостей сечений ОРЭ от ЛПЭ.

Представленная модель достаточно хорошо соответствует экспериментальным результатам по эффектам сбоев, одиночным тиристорным и переходным эффектам. На рис. 3 в качестве примера представлены результаты сравнения расчетных и экспериментальных зависимостей по эффектам одиночных сбоев для СБИС различного функционального назначения, выполненных по различным проектным нормам. Следует отметить, что при больших значениях ЛПЭ в глубоко субмикронных СБИС начинают доминировать многократные сбои, что фактически приводит к большим значениям сечений одиночных сбоев (в расчетных оценках они не учитывались). При расчетах использовались следующие параметры модели:

точечная модель ($r_s=0$):

ПЛИС Kintex-7: $l_c=65$ нм; $L_{z0}=1$ МэВ·см²/мг;

Maestro микропроцессор: $l_c=0.28$ мкм;

$L_{z0}=1.4$ МэВ·см²/мг;

RAM 1635RU1: $l_c=1.2$ мкм; $L_{z0}=7.1$ МэВ·см²/мг.

круговая модель:

ПЛИС Kintex-7: $l_c=r_s=57$ нм; $L_{z0}=1$ МэВ·см²/мг;

Maestro микропроцессор: $l_c=r_s=0.25$ мкм;
 $L_{zo}=1.4$ МэВ·см²/мг;
 RAM 1635RU1: $l_c=r_s=1$ мкм; $L_{zo}=7.1$ МэВ·см²/мг.

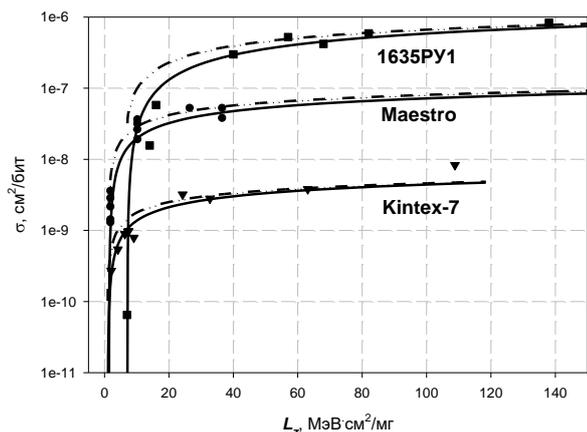


Рис. 3. Зависимости сечений ОС от ЛПЭ для ИС с разными проектными нормами: 1635PU1 – 0.6 мкм [7], Maestro – 90 нм (RHBD) [12], Kintex-7- 28 нм [13]. Сплошные кривые соответствуют точечной модели, пунктирные кривые – круговой чувствительной области

Из представленных на рис. 3 результатов следуют два интересных вывода. Во-первых, эффективная длина сбора l_c фактически пропорциональна проектным нормам, и, во-вторых, значение эффективной длины корректируется с учетом размеров чувствительной области r_s . Если $r_s \leq 0.5l_c$, то величина эффективной длины практически не меняется. В представленных примерах было выбрано $r_s=l_c$, так как при этом условии более удовлетворительными получаются угловые зависимости.

Пропорциональность l_c и r_s проектным нормам является следствием того, что минимальные размеры элементов СБИС (чувствительной области) определяются проектными нормами, а l_c при диффузионном механизме сбора заряда пропорциональна корню квадратному из площади элемента. Действительно, как следует даже из простейших моделей сбора заряда за счет процессов диффузии с трека ТЗЧ [3,8], полный собранный заряд пропорционален линейным размерам чувствительной области.

III. УГЛОВЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

В рамках точечной модели сбора заряда аналитически может быть оценено изменение пороговых значений ЛПЭ от угла падения ТЗЧ [6]:

$$\frac{L_z(r, \theta)}{L_{zo}} = \frac{l_c}{\int_{-\infty}^{x_0} \exp\left(-\frac{\sqrt{y_0^2+x^2+(x_0-x)^2 \cdot ctg^2 \theta}}{l_c}\right) \cdot dx}{\sin \theta}, \quad (5)$$

где x_0 и y_0 – координаты места попадания ТЗЧ на поверхность кристалла ИС ($x_0=y_0=0$ центр чувствительной области), θ - угол падения ТЗЧ к поверхности кристалла СБИС.

Оценки с помощью этого соотношения показывают, что изменение пороговых значений ЛПЭ происходит, например, при угле равным 60°, только в 1.3 раза. В эксперименте, как правило, эти изменения равны почти двум. С другой стороны, как и в эксперименте, наблюдается увеличение значений сечений (рис. 4) при падении ТЗЧ под углом.

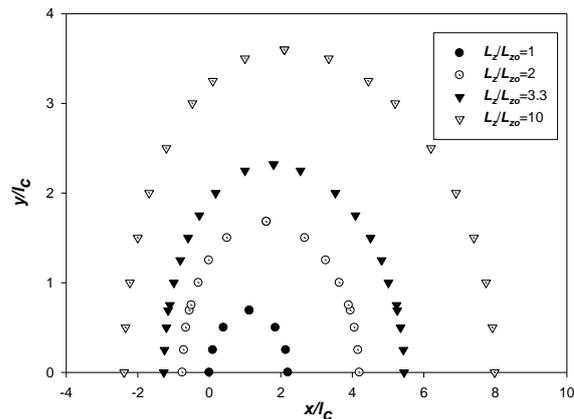


Рис. 4. Области сбора заряда для точечной области при различных значениях ЛПЭ для ТЗЧ, падающей на поверхность кристалла под углом $\theta=60^\circ$

Наличие слабых изменений в зависимости сечений ОРЭ от ЛПЭ при выполнении условия $r_s/l_c \leq 1$ и нормальном падении ТЗЧ позволяет фактически использовать любую функцию $\sigma(L_z)$ для круговой области с радиусом не превышающим l_c . Поэтому вполне очевидным становится предположение об использовании в качестве параметра по умолчанию такого значения линейных размеров чувствительной области, которое будет лучше соответствовать изменению пороговых значений ЛПЭ от угла падения ТЗЧ. Примем в качестве реперного значения изменение пороговых значений ЛПЭ почти в 2 раза при падении ТЗЧ на поверхность кристалла СБИС под углом $\theta=60^\circ$. Это фактически предельный угол, при котором возможно проведение экспериментальных исследований.

Из представленных на рис. 5 результатов следует, что такое соответствие для $\theta=60^\circ$ имеет место уже при $r_s/l_c > 0.5$, поэтому примем в качестве параметра по умолчанию $r_s=l_c$. Таким образом, в рамках предлагаемого подхода используются только два параметра модели: L_{zo} - пороговые значения ЛПЭ и l_c - эффективная длина сбора, которая определяет также радиус чувствительной области.

На рис. 3 именно при этих условиях и построены расчетные зависимости с учетом конечных размеров чувствительной области. В целом наблюдается удовлетворительное соответствие между расчетом и экспериментом. Нетрудно заметить заметные отличия только для 1635PU1 в области малых значений ЛПЭ, которые могут быть скорректированы выбором другого значения ЛПЭ. Получение более малых значений сечений в надпороговой области также

возможно, если принять во внимание неоднородную чувствительность внутри чувствительной области. В этом случае достаточно ввести некую плавную функцию, описывающую уменьшения порога от центра к периферии чувствительной области.

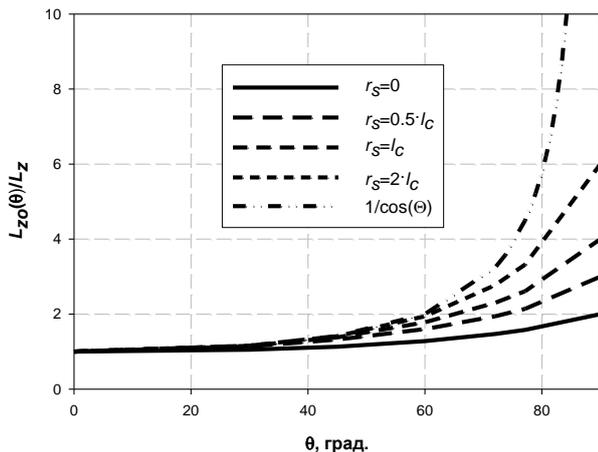


Рис. 5. Изменения пороговых значений ЛПЭ от угла падения ТЗЧ при различных радиусах круговой чувствительной области

Важно отметить, что в общем случае модель базируется только на процессах сбора заряда с трека ТЗЧ. Это означает, что она фактически применима для описания любого одиночного радиационного эффекта, который определяется процессами сбора заряда с трека ТЗЧ в объеме полупроводниковой структуры. Другими словами, предлагаемый подход может быть использован при описании тиристорных эффектов (SEL), функциональных (SEFI), однократных (SEU) и многократных сбоев (MCU), одиночных переходных эффектов («иглолок», SET) в цифровых и аналоговых микросхемах.

Однако при оценках тиристорных эффектов в СБИС при воздействии ТЗЧ приходится сталкиваться с двумя неопределенностями, а именно, с количеством чувствительных областей и возможным разбросом в параметрах их чувствительности. Действительно, тиристорные эффекты обусловлены срабатыванием паразитных п-р-п-р структур, при этом наиболее чувствительная область находится около р-п перехода карман-подложка, как правило, в торце кармана. С учетом многообразия карманов в реальных СБИС, в которых параметры чувствительности к тиристорному эффекту могут сильно отличаться, не всегда можно использовать единую для всех паразитных структур модель. Во многих СБИС приходится описывать экспериментальные зависимости с использованием нескольких зависимостей $\sigma(L_z)$ с разными параметрами чувствительности.

На рис. 6 в качестве примера представлены сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей по изменению сечений тиристорного эффекта от ЛПЭ для двух СБИС. В случае ПЛИС

Kintex-7 можно выделить не менее двух типов чувствительных структур, поэтому расчетные зависимости строились в предположении, что сбор заряда карманом происходит однотипно, а структуры отличаются пороговыми значениями ЛПЭ и их количеством.

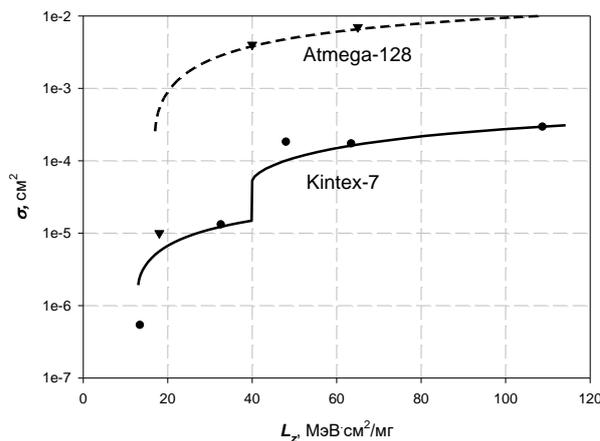


Рис. 6. Зависимости сечений тиристорных эффектов от ЛПЭ: Kintex-7- 28 нм [12] и Atmega-128 [14]

В данном случае для наиболее чувствительных структур пороговое значение ЛПЭ было выбрано равным $L_{z0}=12$ МэВ·см²/мг, а для наименее чувствительной - $L_{z0}=40$ МэВ·см²/мг, и при этом количество менее чувствительных структур было в 20 раз больше, чем чувствительных.

Зависимости же для микроконтроллера Atmega-128 построены в предположении, что все тиристорные структуры имеют одинаковые параметры чувствительности.

В целом наблюдается удовлетворительное соответствие между расчетными и экспериментальными данными. Тем не менее, из представленных зависимостей видно, что наблюдаются заметные отличия в области надпороговых значений ЛПЭ. Как было отмечено выше, подобное поведение объясняется предположением о неизменности пороговых значений ЛПЭ при попадании ТЗЧ в любую точку чувствительной области. Это различие можно устранить, введя монотонно спадающую зависимость пороговых значений ЛПЭ при удалении от центра чувствительной области к ее периферии. Но принимая во внимание, что эти различия дают несущественный вклад при оценке показателей стойкости, а получаемые значения показателей стойкости будут носить консервативный характер, этим вкладом можно пренебречь.

Важно отметить, что в рамках предлагаемого подхода достаточно просто провести оценку многократных сбоев при диффузионном механизме их возникновения. В этом случае сечение многократных сбоев определяется площадью пересечений кругов радиуса r при определенном значении ЛПЭ в

соответствии с соотношениями (2) и (3) [5]. Пороговое значение возникновения многократных сбоев оценивается из условия касания двух соседних областей собирания для ближайших чувствительных элементов.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена двухпараметрическая модель для оценки параметров чувствительности – сечений одиночных радиационных эффектов в функции ЛПЭ на основе модели собирания заряда точечной чувствительной областью. Предлагаемая модель для оценки параметров чувствительности СБИС по одиночным радиационным эффектам базируется только на двух параметрах: пороговых значениях ЛПЭ и эффективной длине собирания, которая, к тому же, определяет радиус области собирания заряда с трека ТЗЧ. Представленная модель учитывает конечные размеры чувствительной области и более корректно описывает угловые зависимости по изменению пороговых значений ЛПЭ.

ПОДДЕРЖКА

Работа частично выполнена в рамках государственного задания № 8.826.2014/К Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Radiation Effects on Embedded Systems / Ed. by R. Velazco, P. Fouillat and R. Reis. Dordrech: Springer, 2007. 269 p.
- [2] Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004. 320 с.
- [3] Радиационная стойкость изделий ЭКБ: Научное издание / Под ред. Чумакова А.И. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. 512 с.
- [4] Tylka A.J., Adams J.H., Boberg P.R., Brownstein B., Dietrich W.F., Flueckiger E.O., Petersen E.L., Shea M.A., Smart D.F., Smith E.C. CREME96: A Revision of the Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics Code // IEEE Trans. on Nuclear Science. 1997. V. NS-44. No.6. P.2150-2160.
- [5] Чумаков А.И. Оценка чувствительности интегральных схем к одиночным радиационным эффектам для точечной области собирания заряда // Микроэлектроника. 2015. Т.44. №1. С.34-40.
- [6] Chumakov A. I. Modified Charge Collection Model by Point Node for SEE Sensitivity Estimation // Proceedings of 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). 2015. Moscow. P. 511-515.
- [7] Боруздина А.Б., Григорьев Н.Г., Уланова А.В. Влияние топологического размещения ячеек в микросхемах памяти на кратность сбоев от ТЗЧ // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. № 2. С. 88–93.
- [8] Чумаков А.И. Оценка многократных сбоев в интегральных схемах от воздействия тяжелых заряженных частиц // Микроэлектроника. 2014, Т.43. . - №2. С.83-87.
- [9] Chumakov A. I., Sogoyan A.V., Boruzdina A.B., Smolin A.A., Pechenkin A.A. Multiple Cell Upset Mechanisms in SRAMs // Proceedings of 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). 2015. Moscow. P. 170-174.
- [10] Boruzdina A.B., Ulanova A.V.; Petrov A.G.; Telets V.A. Verification of SRAM MCUs calculation technique for experiment time optimization // Proceedings of 13th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). 2013. Oxford. P.1-4.
- [11] Boruzdina A.B., Sogoyan A.V., Smolin A.A., Ulanova A.V., Gorbunov M.S., Chumakov A.I. Temperature Dependence of MCU Sensitivity in 65 nm CMOS SRAM // IEEE Trans. on Nuclear Science. 2015. V. NS-63. No.1. P.2860-2866.
- [12] Guertin S.M., Walling L.S., Wie B., Plante M., Berkley A Walling L.S., Manuel Cabanas-Holmen M. SEE Test Results for Maestro Microprocessor // Radecs Workshop. 2012. DW-24L.
- [13] Lee D.S., Wirthlin M., Swift G., Le A. Single-Event Characterization of the 28 nm Xilinx Kintex-7 Field-Programmable Gate Array under Heavy-Ion Irradiation // 2014 IEEE Radiation Effects Data Workshop. 2014. P. 10-14.
- [14] Chumakov A.I., et al. Compendium of SEE Comparative Results under Ion and Laser Irradiation // 2013 RADECS Workshop. 2013. Oxford.

Two-Parameter Model for Estimation of SEE Sensitivity of VLSI Circuits under Ion Irradiation

A.I. Chumakov

National Research Nuclear University “MEPhI”

Specialized Electronic Systems, aichum@spels.ru

Keywords– ion irradiation, single event effects (SEE), SEE cross section, VLSI.

ABSTRACT

Two-parameter model for estimation SEE sensitivity of VLSI circuits under ion irradiation is discussed. An approach to IC SEE sensitivity parameters estimation

based on charge collection by a point node is considered. The improved model takes into account finite sizes of sensitive volume and allows more correct estimation of an angle dependence of threshold LET.

The standard approach for estimation of single event effect (SEE) sensitivity assumes that the area of charge

collection from the charged particle track is fixed, while sensitivity of IC elements has a spread reflecting experimental dependency of SEE cross section change on linear energy transfer (LET). It is clear, that it is vice versa in practice. Sensitive volume may vary, but the critical charge is constant for the same type of VLSI elements.

The point node model of charge collection allows overcoming this contradiction. The value of collection charge (ionizing response) decreases as exponential function of the distance between points of sensitive node and charge generation. In case of incidence of ion particle at a distance from the center of the point sensitive area, LET needed for SEE is determined by integrating along the track length. Two parameters are needed to describe the dependence of SEE cross section as a function of LET: the effective collection length (l_c) and the threshold LET (L_{zo}).

Unfortunately, this model gives changes in threshold LET dependencies on an angle of incidence that are smaller than the experimental results. The effect of finite sizes of the sensitive area allows overcoming this obstacle. SEE cross section at the corresponding value of LET increases.

One can see a satisfactory correlation between experimental results and simulation results for different SEEs: SEUs, SEFIs, SELs and SETs for various VLSI, but the extra parameter, namely radius of sensitive area (r_s) is added. Moreover, the effective collection length l_c is correlated with design rules, thus the diffusion processes of charge collection predominate on drift processes.

The analysis showed that acceptable accuracy can be obtained within the two-parameter model if it is assumed that $r_s=l_c$. We can observe change of LET threshold depending on the angle of incidence practically as $1/\cos\theta$ until $\theta\leq 60^\circ$. In this case it is not always possible to obtain satisfactory agreement with experimental data in subthreshold area. However, the error in this area does not lead to noticeable errors in the estimates of the SEE rate under the cosmic ion irradiation.

This work was supported by Russian Science and Education Ministry within project 8/826/2014/K.

REFERENCES

- [1] Radiation Effects on Embedded Systems. Ed. by R. Velazco, P. Fouillat and R. Reis. Dordrech. Springer, 2007. 269 p.
- [2] Chumakov A.I., Space Radiation Effects in ICs. Moscow, Radio I Svyaz. 2004. 320 p. (in Russian).
- [3] Radiation Hardness of electronic components. Ed. by Chumakov A. M. NRNU MEPhI, 2015. 512 p. (in Russian).
- [4] Tylka A.J., Adams J.H., Boberg P.R., Brownstein B., Dietrich W.F., Flueckiger E.O., Petersen E.L., Shea M.A., Smart D.F., Smith E.C. CREME96. A Revision of the Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics Code. IEEE Trans. on Nuclear Science. 1997. V. 44. No.6. pp.2150-2160.
- [5] Chumakov A.I. Evaluation of Multiple Upsets in Integrated Circuits under the Effect of Heavy Charged Particles. Rus. Microelectronics. 2014. V. 43, No. 2. pp. 91–95. (in Russian).
- [6] Chumakov A. I. Modified Charge Collection Model by Point Node for SEE Sensitivity Estimation. Proceedings of 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). Moscow. 2015. pp. 511-515.
- [7] Boruzdina A.B., et.al. Effect of Topological Placement of Memory Cells in Memory Chips on Multiplicity of Cell Upsets from Heavy Charged Particles. Russian Microelectronics. 2014. V. 43. No.2. pp. 96–101. (in Russian).
- [8] Chumakov A.I. Evaluation of Multiple Upsets in Integrated Circuits under the Effect of Heavy Charged Particles. Rus. Microelectronics. 2014. V. 43. No. 2. pp. 91–95.
- [9] Chumakov A. I., Sogoyan A.V., Boruzdina A.B., Smolin A.A., Pechenkin A.A. Multiple Cell Upset Mechanisms in SRAMs. Proceedings of 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). 2015. Moscow. pp. 170-174.
- [10] Boruzdina A.B., Ulanova A.V.; Petrov A.G.; Telets V.A. Verification of SRAM MCUs calculation technique for experiment time optimization. Proceedings of 13th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). 2013. Oxford. pp.1-4.
- [11] Boruzdina A.B., Sogoyan A.V., Smolin A.A., Ulanova A.V., Gorbunov M.S., Chumakov A.I. Temperature Dependence of MCU Sensitivity in 65 nm CMOS SRAM. IEEE Trans. on Nuclear Science. 2015. V. NS-63. No.1. pp.2860-2866.
- [12] Guertin S.M., Walling L.S., Wie B., Plante M., Berkley A Walling L.S., Manuel Cabanas-Holmen M. SEE Test Results for Maestro Microprocessor. RadeCS Workshop. 2012. DW-24L.
- [13] Lee D.S., Wirthlin M., Swift G., Le A. Single-Event Characterization of the 28 nm Xilinx Kintex-7 Field-Programmable Gate Array under Heavy-Ion Irradiation. IEEE Radiation Effects Data Workshop. 2014. pp. 10-14.
- [14] Chumakov A.I., et al. Compendium of SEE Comparative Results under Ion and Laser Irradiation. 2013 RADECS Workshop. 2013. Oxford.