

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОНАМИ НА ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТЬ МИКРОСХЕМЫ**

П.А. АЛЕКСАНДРОВ\*, С.С. ФАНЧЕНКО, Е.В. ЕФИМЕНКО

Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский институт»  
(НИЦ КИ), Москва, Россия

\*e-mail: alexandrov\_pa@nrcki.ru

(Поступила в редакцию 3 июня 2022 г.)

Уменьшение размеров транзисторов ведет к увеличению чувствительности к единичным событиям (SEU) для КМОП интегральных схем, предназначенных для работы в условиях облучения. На основании расчетных спектров первично выбитых атомов кремния рассчитаны ионизационные потери энергии для нейтронов в интервале 1–14 МэВ. Оценена восприимчивость к одиночным событиям в условиях радиации для различных топологических размеров микросхем CMOS SRAM.

### **1. Введение**

Радиационные эффекты в микроэлектронике представляют серьезную проблему для функционирования устройств, предназначенных для работы в условиях облучения.

В последние годы доминирующим радиационным эффектом в космических электронных системах стало семейство эффектов единичного события (Single Event Effects, SEE) [1]. SEE возникают в результате действия прямой ионизации – единственной ионизирующей частицей, а также непрямой ионизации – нейтронами и протонами, которые проникают в чувствительный объем электронного устройства.

Проблема неизбежна из-за сочетания случайности её природы, наличия спектра частиц высоких энергий в космосе и возрастающей чувствительности полупроводниковых устройств к SEE по мере миниатюризации.

В работе предложена простая аналитическая модель для достаточно быстрой оценки отказоустойчивости микросхем при воздействии быстрых нейтронов. Рассматриваются физические процессы, протекающие при попадании нейтрона. На основании расчетных спектров первично выбитых атомов кремния рассчитаны ионизационные потери энергии для нейтронов в интервале 1–14 МэВ. Представлено теоретическое прогнозирование вероятностей сбоев микросхем различных технологий.

## 2. Механизм воздействия нейтронов на работу транзистора

Радиационные эффекты в микроэлектронике в широком смысле характеризуются как совокупные эффекты общей ионизирующей дозы (Total Ionizing Dose, TID) и неионизирующего излучения (эффекты смещения). Кроме того, необходимо учитывать эффекты единичного события, вызванные тяжелыми заряженными частицами, главным образом, в результате прямой ионизации, а также нейтронами и протонами в результате ядерных столкновений.

Тяжелая заряженная частица (ТЗЧ) при прохождении через чувствительную область микросхемы образует локальную ионизацию вдоль трека, которая может привести к генерации заряда. Образованные локальные избыточные носители заряда вызывают импульс тока и напряжения, которые ведут к возникновению одиночных радиационных эффектов (ОРЭ) [2].

Нейтроны при воздействии на микросхему приводят к ионизации решетки путем косвенных процессов [3]. В отличие от ТЗЧ, нейтроны не создают дополнительные электронно-дырочные пары вдоль трека. Взаимодействие нейтрона с материалом полупроводникового устройства приводит к появлению дополнительных пар носителей заряда при упругой передаче энергии выбитыми атомами кремния, к генерации фононов и часть энергии расходуется на дефектообразование.

Сталкиваясь с атомными ядрами материала устройства, высокоэнергетические нейтроны ведут к ионизационным потерям первично выбитых атомов (ПВА) и возможно вторично выбитых атомов. При достаточной высокой энергии нейтрона выбитые атомы кремния создают дополнительные носители заряда, которые приводят к сбою устройства.

Вероятность сбоя при попадании нейтрона ниже, чем вероятность сбоя, вызванная прямой ионизацией более тяжелым ионом, из-за особенности сечения ядерного рассеяния [4]. Дифференциальное сечение упругого рассеяния нейтронов на атоме кремния представляет собой непостоянную функцию.

Характерные времена, за которые происходит единичный сбой, составляют от долей наносекунд до нескольких наносекунд, характерные времена рекомбинации носителей при задаваемых концентрациях примесей – микросекунды [5], поэтому процесс разделения зарядов в обедненной области полупроводника можно рассматривать в пренебрежение рекомбинацией.

## 3. Количественное описание физических процессов, протекающих при попадании нейтронов в микросхему

### 3.1. Передача энергии

При упругом столкновении нейтрона с веществом энергия первично выбитого атома на угол  $\theta$  (угол рассеяния) в системе центра масс равна [6]:

$$E = \frac{4m_1M_2}{(m_1 + M_2)^2} E_n F, \quad (1)$$

где  $m_1$  – масса нейтрона,  $M_2$  – масса атома кремния,  $E_n$  – энергия нейтрона,  $F = \sin(\theta/2)^2$ .

Стоит отметить, что не вся энергия ПВА или вторичных частиц-продуктов ядерных реакций расходуется на ионизацию, часть энергии идет на фононы и на процесс дефектообразования [7]. Например, для нейтрона с энергией 13.85 МэВ, максимальная переданная энергия составляет 1.84 МэВ. С учетом угла рассеяния и дифракции на ядре, в среднем 151 кэВ идет на ионизацию (в 5.4 раз меньше, чем при постоянном сечении), 30 кэВ – фононы и выбивание атомов кремния из положения равновесия (см. рис.1). Однако, с увеличением энергии нейтрона доля ионизации от ПВА возрастает.

Выбивание атома с энергией  $E$  – случайный процесс, реализуемый с вероятностью  $\sigma(\theta, E_n)/\sigma_{\text{tot}}(E_n)$ , часть  $E$  идет на ионизацию  $E_{\text{ion}}(\theta)$ .

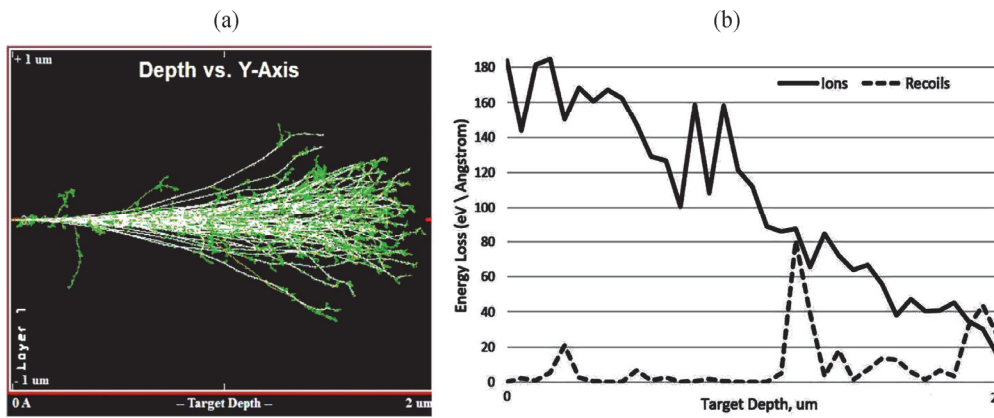


Рис.1. (а) Траектории ПВА, (б) Ионизационные потери, рассчитанные по СРИМ для ПВА и вторичных выбитых атомов с энергией 1.85 МэВ.

Угловая зависимость сечения связана с дифракцией нейтрона на ядре. Экспериментальные данные дифференциального сечения упругого рассеяния нейтронов на кремнии представляют собой непостоянную функцию [8,9]. В результате угловая зависимость как функция переданной энергии имеет вид непостоянного по энергии сечения выбитых атомов кремния.

Расчет ионизационных потерь первично выбитых атомов в кремнии был основан на симуляторе TRIM 2013 [10]. Начальное положение движения заряженных частиц было получено при воздействии нейтрона с энергией 13.85 МэВ на транзистор. Полученные результаты вычислений представляют собой спектр ПВА на кремнии (см. рис.2).

Критический заряд связан с ионизационными потерями, поэтому вероятность того, что переданный заряд больше критического (вероятность сбоя) определяется интегралом по спектру ПВА от критической энергии до максимальных потерь на ионизацию.

Например, для технологии 0.25 мкм критическая энергия составляет 0.2 МэВ, для 0.5 мкм – 1.6 МэВ, чему из рис.2 соответствуют вероятности 25% и 2.5%.

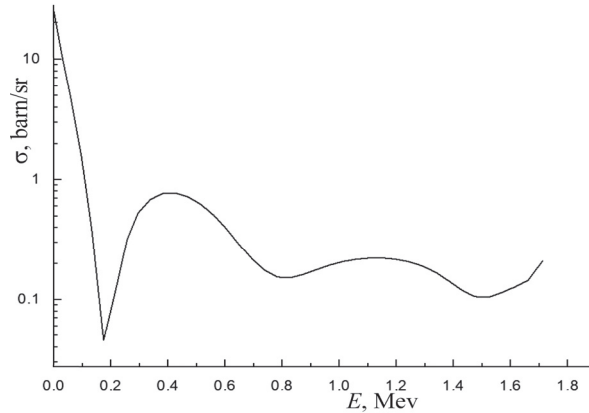


Рис.2. Спектр ПВА как функция ионизационных потерь нейтрона с энергией 13.85 МэВ на кремнии.

### 3.2. Плотность носителей заряда

При нахождении избыточной концентрации носителей при взаимодействии вторичных частиц с атомами кристаллической решетки кремния необходимо найти максимальный радиус ( $b_{\max}$ ), на котором может быть оторван электрон от своего основного атома. В качестве максимального прицельного параметра рассматривается случай, когда электрону передается энергия, равная энергии ионизации [11]:

$$b_{\max} = \frac{Ze}{v} \sqrt{\frac{2}{m_e E_{e-h}}}, \quad (2)$$

где  $Z$  – зарядовое число,  $e$  – электрический заряд электрона,  $v$  – скорость заряженной частицы,  $m_e$  – масса электрона,  $E_{e-h}$  – энергия образования электронно-дырочной пары.

Плотность носителей заряда определяется с помощью выражения:

$$n = \frac{Y}{\pi b_{\max}^2}, \quad Y = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \frac{\rho_{\text{Si}}}{E_{e-h}}, \quad (3)$$

где  $Y$  – число пар, рожденных на единицу длины,  $\rho$  – плотность материала.

Например, при попадании нейтрона с энергией 1 МэВ в микросхему максимальная концентрация носителей равна  $1.7 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$ , средняя концентрация носителей составляет  $8.5 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$ , что сопоставимо с атомарной концентрацией. Значительно увеличенная плотность носителей заряда по сравнению с легирующей примесью является прямым доказательством нарушения равновесного состояния системы, которое может привести к сбою микросхемы.

### 3.3. Критический заряд

Геометрические размеры микросхемы играют немаловажную роль в радиационной стойкости системы [12]. Впервые влияние масштабирования устройства на отказоустойчивость устройства к SEU было рассмотрено Петерсеном и др. еще 40 лет назад [13]. Полученное выражение описывает пропорциональность

Табл.1. Критический заряд для разных технологий

Технология, мкм	0.8	0.5	0.25	0.18	0.09
$L$ , мкм	2.4	1.5	0.8	0.54	0.27
$Q_c$ , фКл	132.48	51.75	14.72	6.7	1.67

критического заряда квадрату размера элемента. В таблице 1 представлены расчеты критического заряда для различных топологических размеров микросхем.

Образованный заряд при попадании нейтрона с энергией 13.85 МэВ в микросхему определяется формулой:

$$Q = \frac{E_{\text{ion}}}{E_{e-h}} e, \quad (4)$$

где  $E_{\text{ion}}$  – ионизационные потери.

В работе также представлены результаты скачков напряжения после воздействия нейтронов на микросхемы (Таблица 2).

Анализ чипов указанных технологий позволяет сделать вывод: с уменьшением топологических размеров МОП транзисторов радиационная стойкость к воздействию нейтронов уменьшается.

Табл.2. Скачок потенциала, образованный при попадании нейтрона с энергией 13.85 МэВ

Технология, мкм	1	0.8	0.5	0.25	0.18	0.09
$U_1$ , В	0.07	0.1	0.28	1.11	2.16	8.7
$U$ , В	5	5	5	2.5	1.8	1.2–2.5

#### 4. Заключение

В работе рассматриваются физические процессы, протекающие при попадании нейтрона в микросхему. Дополнительные носители, образованные вторичными выбитыми атомами кремния, создают ток, который может привести к нежелательным эффектам во внешних цепях. Предложенный подход быстрого анализа радиационной стойкости микросхемы позволяет дать оценку отказоустойчивости полупроводникового устройства. В работе указывается достаточно простое аналитическое выражение для расчета плотности носителей заряда, которое при анализе микросхемы позволяет оценить восприимчивость к одиночным событиям. Также представлено теоретическое прогнозирование вероятностей сбоев микросхем различных топологических размеров. На сегодняшний день предложены ряд методов по смягчению последствий влияния радиации на микросхемы. Однако, существующие стратегии не являются универсальным решением, так как с уменьшением размеров элементов наблюдается снижение их отказоустойчивости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **E. Petersen**. Single Event Effects in Aerospace, New Jersey: IEEE Press, 2011.
2. **П.А. Александров, С.С. Фанченко, Е.В. Ефименко**. Нано- и микросистемная техника. **24**, 19, 2022.
3. **F.A. Haider, F.P. Chee, H. Abu Hassan, et al.**, AIP Conference Proceedings, **1704**, 050015 (2016). <https://doi.org/10.1063/1.4940111>.
4. **J.S. George**, AIP Conference Proceedings, **2160**, 060002 (2019) <https://doi.org/10.1063/1.5127719>.
5. **J.G. Fossum, R.P. Mertens, D.S. Lee, J.F. Nijs**. Solid-State Electronics, **26**, 569 (1983).
6. **Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц**. Теоретическая физика. том. 1, Механика, 5-е изд., Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2004.
7. **А.И. Чумаков**. Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС), МЭС-2020, ном. 2, 153 (2020).
8. **K. Shibata, S. Kunieda**. J. Nuclear Science and Technology, **45**, 123, 2008.
9. **D. Schmidt, W. Mannhart**. Differential cross sections of neutron scattering on elemental silicon at energies between 7.89 MeV and 13.85 MeV Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig (Germany). Neutronenphysik. Germany, 2001.
10. **J.F. Ziegler**. SRIM-2000 code. URL <http://www.srim.org/>.
11. **G. Steinbrück**. Solid State Detectors Lecture for Summer Students at DESY Hamburg University, August 17, 2007 [Online]. <https://docplayer.net/124300787-Solid-state-detectors-lecture-for-summer-students-at-desy.html>.
12. **П.А. Александров, В.И. Жук, В.Л. Литвинов**. Способы построения отказоустойчивых цифровых микросхем и оценки вероятностей их отказа, вызванного облучением. Москва: ПоРог, 2019.
13. **E.L. Petersen, P. Shapiro, J.H. Adams**. IEEE Transactions on Nuclear Science. № 29, 2055 (1982).

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF NEUTRON IRRADIATION ON THE FAULT TOLERANCE OF A MICROCIRCUIT

P.A. ALEXANDROV, S.S. FANCHENKO, E.V. EFIMENKO

Reducing transistor size leads to an increase in the sensitivity to single event upsets (SEU) for CMOS integrated circuits designed for operation in irradiated conditions. Ionization energy losses for neutrons in the range 1–14 MeV is calculated based on the calculated spectra of primary knock-on silicon atoms. CMOS SRAM chips susceptibility to SEU under irradiation is estimated for various circuit topological sizes.