



УДК 621.382

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.346.349

# УГЛОВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ И УСРЕДНЕНИЕ ПО ПОЛНОМУ ТЕЛЕСНОМУ УГЛУ СЕЧЕНИЯ СБОЕВ СОВРЕМЕННЫХ КОММЕРЧЕСКИХ ИМС ПАМЯТИ

## ANGULAR DEPENDENCE AND AVERAGING OVER FULL SOLID ANGLE OF UPSET CROSS SECTION IN MODERN COTS MEMORY CIRCUITS

ПИВКО ОКСАНА СЕРГЕЕВНА

pivko@mri-progress.ru

PIVKO OKSANA S.

pivko@mri-progress.ru

ГАЛИМОВ АРТУР МАРАТОВИЧ

GALIMOV ARTUR M.

АО «НИИМА «Прогресс»

125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54

Microelectronics Research Institute PROGRESS JSC

("PROGRESS MRI" JSC)

54 Cherepanovykh Lane, Moscow, 125183, Russia

В работе проведено исследование угловой зависимости сечения сбоев для современных коммерческих микросхем памяти, выполненных в базе планарной КМОП- и FinFET-технологии.

**Ключевые слова:** одиночные сбои; частота сбоев; сечение сбоев; угловая зависимость; ТЗЧ.

The paper highlights angular dependence of the upset cross section in modern commercial memory circuits designed in the planar CMOS and FinFET technologies.

**Keywords:** single event upsets; soft error rate; upset cross section; angular dependence; heavy ions.

### ВВЕДЕНИЕ

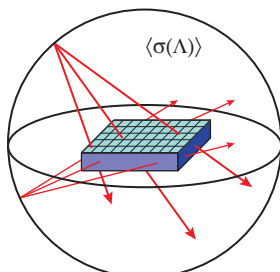
Современная тенденция снижения стоимости изготовления бортовой космической аппаратуры привела к необходимости использования в составе аппаратуры нестойких к радиации коммерческих микросхем памяти. При этом испытания данных микросхем, как правило, проводятся в ограниченном объеме, что значительно усложняет прогнозирование их показателей стойкости в целевых условиях эксплуатации. В частности, в области оценки надежности бортовой аппаратуры особое внимание уделяется проблеме прогнозирования частот сбоев памяти от тяжелых заряженных частиц космоса (ТЗЧ) по ограниченному набору экспериментальных данных на ускорителе.

Наиболее острой проблемой расчетных методов прогнозирования частот сбоев является пересчет сечения сбоев от одностороннего потока на ускорителе к изотропному потоку частиц в космосе или сечению, усредненному по полному телесному углу. В работе [1] представлен анализ существующих методов пересчета сечения, основанных на дозиметрическом приближении изолированного чувствительного объема. Показано, что для микросхем памяти, изготовленных по крупным проектным нормам (500 нм), данные методы показывают заниженную оценку сечения, усредненного по полному телесному углу. В работах

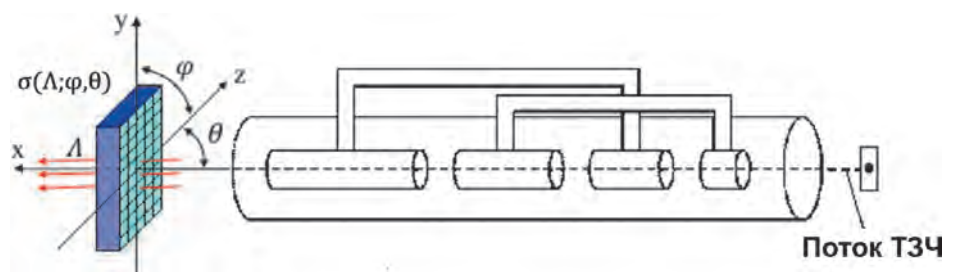
[2, 3] проведен анализ области применения традиционной концепции изолированного чувствительного объема для современных проектных норм. Показано, что вследствие выраженного нелокального воздействия ТЗЧ в плотном массиве ячеек памяти использование данной концепции не является корректным для современных проектных норм. Данная работа посвящена исследованию альтернативного феноменологического подхода к усреднению сечения сбоев микросхем памяти, изготовленных по современным коммерческим КМОП-технологиям с проектными нормами 28 нм и менее.

### ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Известно, что экспериментальное исследование угловой зависимости сечения сбоев позволяет достоверно прогнозировать частоту сбоев в космическом пространстве. Экспериментальный или, другими словами, феноменологический подход к расчету частоты сбоев позволяет учесть все эффекты, возникающие в микросхеме, и не использует произвольных параметров, поскольку вся необходимая для прогнозирования информация уже содержится в экспериментальных данных [4]. Выражение для расчета частоты сбоев от ТЗЧ  $R_{II}$  в рамках феноменологического подхода выглядит следующим образом:



а) Космическое пространство



б) Ускорительная установка

Рис. 1. Траектория движения ТЗЧ в космическом пространстве и в ускорительной установке

$$R_{III} = \int \sigma(\Lambda) \phi(\Lambda) d\Lambda, \quad (1)$$

где  $\Lambda$  — линейная передача энергии ТЗЧ (ЛПЭ),  $\phi(\Lambda)$  — дифференциальный спектр ЛПЭ изотропного потока ТЗЧ,  $\sigma(\Lambda)$  — полное сечение сбоев, экспериментально усредненное по полному телесному углу. На рис. 1 качественно проиллюстрировано воздействие изотропного потока ТЗЧ космоса (а) и однонаправленного потока ТЗЧ на ускорительной установке (б). Для прогнозирования частот сбоев необходимо проводить экспериментальное исследование сечения сбоев в полном диапазоне полярного и азимутального углов, что позволит корректно смоделировать изотропный поток ТЗЧ в космосе. Расчет среднего сечения сбоев выглядит следующим образом:

$$\langle \sigma(\Lambda) \rangle = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sigma(\Lambda; \varphi, \theta) \sin \theta d\theta d\varphi, \quad (2)$$

где  $\sigma(\Lambda; \varphi, \theta)$  — сечение сбоев, экспериментально измеренное в диапазоне полярного  $\theta$  и азимутального угла  $\varphi$  падения ТЗЧ.

Однако на практике подробное исследование  $\sigma(\Lambda; \varphi, \theta)$  затруднено из-за высокой стоимости и трудоемкости процесса. В оставшейся части работы исследуется возможность экспериментального усреднения сечения с использованием минимального количества углов облучения.

### ПАМЯТЬ В БАЗИСЕ ПЛАНАРНОЙ КМОП-ТЕХНОЛОГИИ

В работе были рассмотрены две наиболее популярные современные технологии изготовления цифровых микросхем: традиционная планарная КМОП и плавниковая (FinFET) технология. На рис. 2 качественно показана область собирания заряда от ТЗЧ в структуре планарного транзистора. Из-за малого порогового заряда, нелокального воздействия ТЗЧ и большой области собирания заряда чувствительной областью памяти оказывается единый тонкий чувствительный слой. Для тонкого чувствительного слоя  $\sigma(\Lambda)$  возможно получить при фиксированном полярном угле падения ТЗЧ, равном 60 градусам [1, 2].

В данной работе было проведено исследование литературных экспериментальных зависимостей сечения сбоев нескольких блоков памяти в составе современных ПЛИС [5–7]. Произведены расчеты усредненного сечения сбоев и определен угол падения частиц, которому соответствует  $\sigma(\Lambda)$ . Экспериментальные зависимости сечения от полярного угла экстраполированы полиномами до 90 градусов. В работе [8] показано, что наибольший вклад в частоты сбоев коммерческих микросхем памяти вносят частицы с малыми ЛПЭ (менее 10 МэВ/мг/см<sup>2</sup>). Экспериментальная ситуация такова,

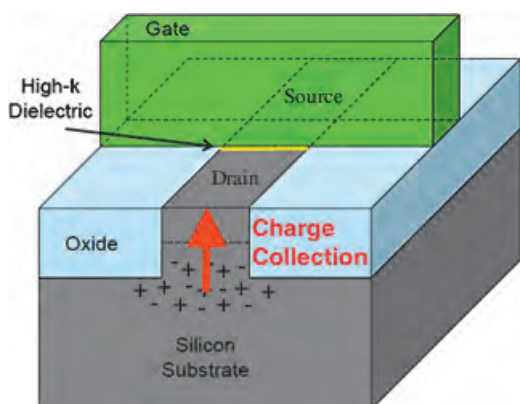
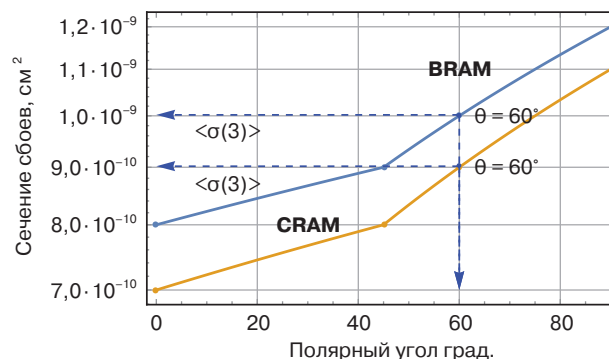
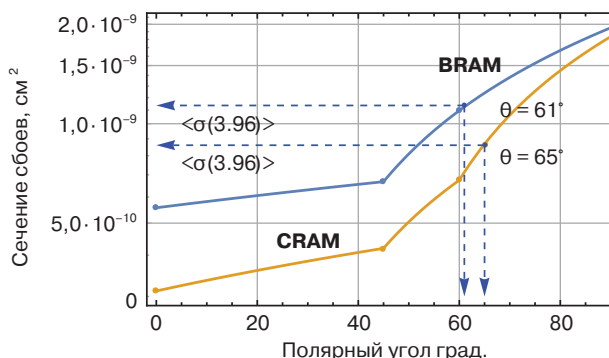


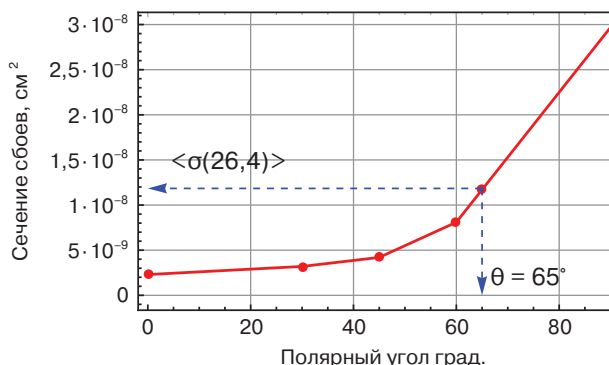
Рис. 2. Механизм собирания заряда в структуре планарного транзистора



а) 28 нм Xilinx Artix-7 SRAM [5]

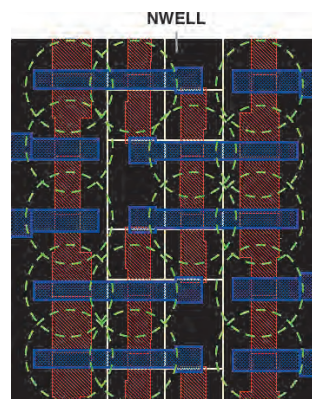


б) 20 нм Xilinx Kintex UltraScale SRAM [6]



в) 28 nm Xilinx Kintex-7 [7]

Рис. 3. Результаты расчета полного сечения сбоев  $\sigma(\Lambda)$  и определенного соответствующего ему угла падения частиц  $\theta$



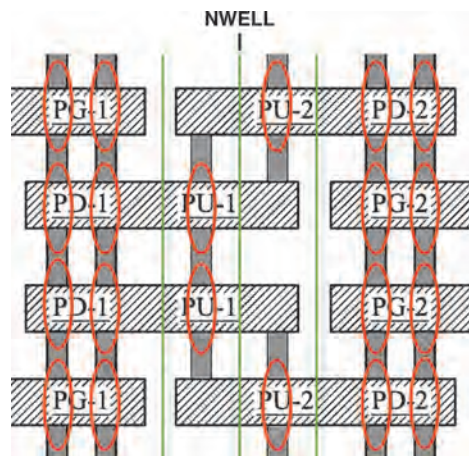
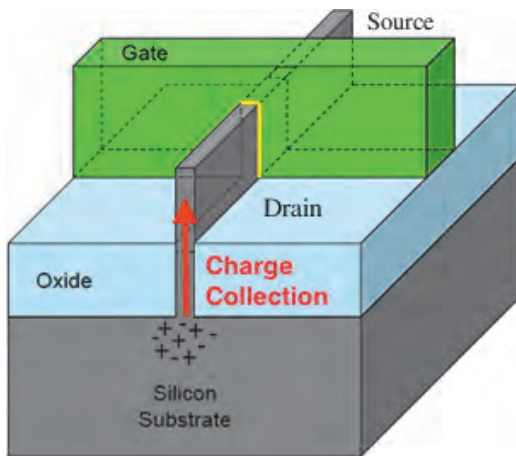


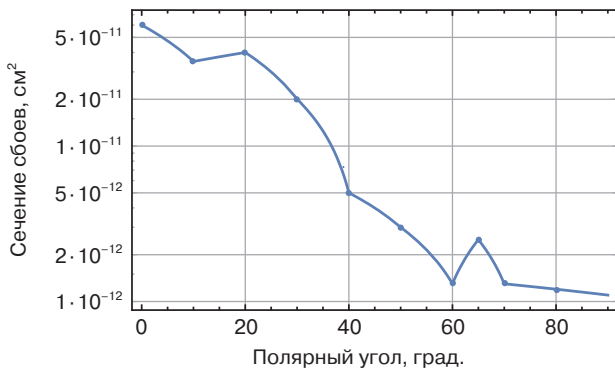
Рис. 4. Механизм сбора заряда в структуре FinFET

что для частиц с малыми ЛПЭ азимутальная зависимость сечения, как правило, незначительна по сравнению с полярной зависимостью [5]. Пренебрегая азимутальной зависимостью, получили выражение для усреднения сечения:

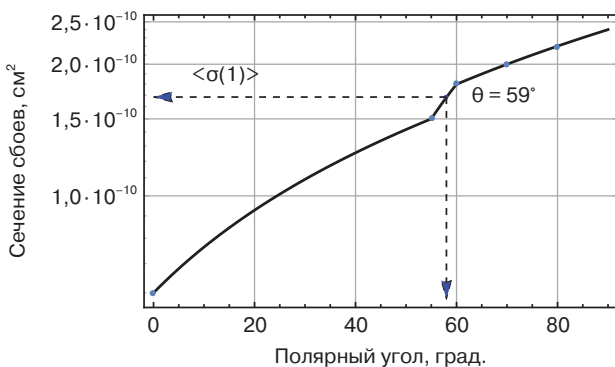
$$\sigma(\Lambda) = \int_0^{\pi/2} \sigma(\Lambda; \theta) \sin \theta d\theta. \quad (3)$$

На рис. 3 представлены результаты расчета  $\sigma(\Lambda)$  (7) для нескольких современных коммерческих микросхем памяти, изготовленных в базе планарной КМОП-технологии. Стрелками указаны полученные значения  $\sigma(\Lambda)$  и полярный угол  $\theta$ , соответствующий значению  $\sigma(\Lambda)$ .

Как видно из рис. 3, сечению  $\sigma(\Lambda)$  приблизительно соответствует угол падения 60 градусов, что подтверждает модель тонкой чувствительной области планарной структуры. Полученные результаты позволяют сделать заключение, что для коммерческих микросхем памяти экспериментальное усреднение сечения слоев можно проводить под одним углом падения ТЗЧ, равным 60 градусам. Кроме того, стоит отметить, что сечение может иметь выраженную азимутальную зависимость для высоких значений ЛПЭ, которая проявляется в отличии сечения множества слоев при облучении вдоль и поперек технологических карманов кристалла памяти. Поэтому для усреднения сечения при высоких значениях ЛПЭ целесообразно проводить



а) Измерения поперек «плавника»,  $\varphi = 0^\circ$



б) Измерения вдоль «плавника»,  $\varphi = 90^\circ$

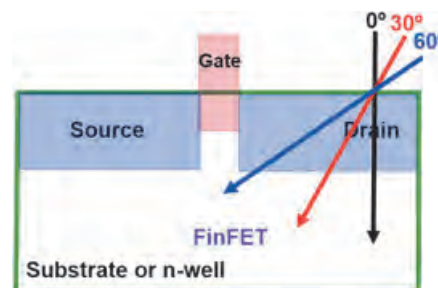
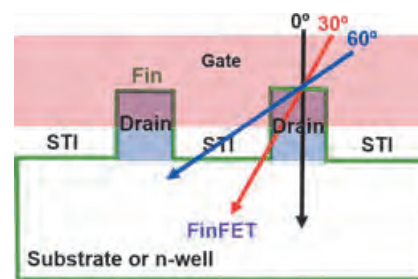


Рис. 5. Экспериментальные угловые зависимости для 16 нм FinFET-триггера [9]

два сеанса облучения для азимутальных углов падения: вдоль и поперек технологических карманов кристалла.

### ПАМЯТЬ В БАЗИСЕ FINFET-ТЕХНОЛОГИИ

При переходе от планарного транзистора к плавниковому эффективная область собирания заряда значительно сокращается и ограничивается областью «плавника», как это показано на рис. 4. Согласно исследованиям чувствительности FinFET-технологии к сбоям [9], условием возникновения сбоя является прямое попадание ТЗЧ в область «плавника». Вследствие этого для малых ЛПЭ сечение сбоев практически пропорционально длине хорды трека заряженной частицы в чувствительных областях. Поэтому для FinFET-технологии характерна ярко выраженная полярная и азимутальная зависимость сечения сбоев.

На рис. 5 наглядно продемонстрированы различия, наблюдаемые при измерении FinFET-структуры вдоль и поперек «плавника». Рис. 5а иллюстрирует разрез FinFET-триггера поперек «плавника» и зависимость сечения сбоев от полярного угла при фиксированном азимутальном угле, равном 0 градусам; рис. 5б иллюстрирует разрез вдоль «плавника» и зависимость сечения сбоев от полярного угла при фиксированном азимутальном угле равном 90 градусам.

Из графиков видно, что при измерениях FinFET-структуры поперек плавника сечение уменьшается с увеличением полярного угла, при этом худшее значение наблюдается при нормальном угле падения частиц. При измерениях вдоль плавника сечение растет с увеличением полярного угла, а поведение сечения совпадает с наблюдаемым в планарной структуре. Из представленных экспериментальных данных видно, что из-за сильной азимутальной зависимости FinFET-структуры одного сеанса измерений под фиксированным полярным углом недостаточно. В данном случае в качестве замены экспериментального исследования в дальнейшем планируется рассмотреть современные методы моделирования энерговыделения от ТЗЧ в чувствительных областях FinFET-памяти [10].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующие дозиметрические методы расчета  $\sigma(\Lambda)$  не учитывают нелокальный характер воздействия ТЗЧ и не могут применяться для современных коммерческих микросхем памяти. В работе рассмотрен феноменологический подход к расчету  $\sigma(\Lambda)$ . Экспериментальное усреднение сечения сбоев для современных

коммерческих микросхем памяти, выполненных в базе планарной КМОП-технологии, следует проводить под фиксированным полярным углом падения ТЗЧ, равным 60 градусам, что подтверждается экспериментальными данными. Для FinFET-технологии характерна выраженная азимутальная зависимость, поэтому одного сеанса под фиксированным углом недостаточно для корректного усреднения сечения сбоев.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пивко О. С., Галимов А. М., Зебрев Г. И. Экспериментальное усреднение сечения сбоев от ТЗЧ по полному телесному углу // Электроника, микро- и нанoeлектроника, Суздаль, 2018.
2. Zebrev G. I., Galimov A. M. *Compact Modeling and Simulation of Heavy Ion Induced Soft Error Rate in Space Environment: Principles and Validation* // IEEE TNS. Vol. 64. № 8, Aug. 2017.
3. Galimov A. M., Elushov I. V., Zebrev G. I. *A simple calculation method for heavy ion induced soft error rate in space environment* // International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016. — International Society for Optics and Photonics, 2016. — Т. 10224. — С. 1022414.
4. Zebrev G. I., Ishutin I. O., Useinov R. G., Anashin V. S. *Methodology of Soft Error Rate Computation in Modern Microelectronics* // IEEE TNS, 2010. Vol. 57. № 6. P. 3725–3733.
5. Tonfat J. *Analyzing the Influence of the Angles of Incidence and Rotation on MBU Events Induced by Low LET Heavy Ions in a 28-nm SRAM-based FPGA* // IEEE TNS 2017.
6. Lee D. S. *Single-Event Characterization of the 20 nm Xilinx Kintex UltraScale Field-Programmable Gate Array under Heavy Ion Irradiation* // IEEE TNS 2014.
7. Lee D. S., Swift G. M. *Addressing Angular Single-Event Effects in the Estimation of On-Orbit Error Rates* // IEEE Transactions on Nuclear Science, 2015. Vol. 62. № 6.
8. Галимов А. М., Мрозовская Е. В., Жиленков И. В., Галимова Р. М., Зебрев Г. И. Параметрический анализ расчетов интенсивности сбоев в условиях космического пространства // Вопросы атомной науки и техники, серия «Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру». — Москва, 2017. — Вып. 1. — С. 26–30.
9. Nsengiyumva P. *Angular Effects on Single-Event Mechanisms in Bulk FinFET Technologies* // IEEE TNS, 2018. Vol. 65. № 1.
10. Инструмент моделирования сбоев CREME-МC URL: <https://creme.isde.vanderbilt.edu>.



**ТЕХНОСФЕРА**  
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

[www.technosphere.ru](http://www.technosphere.ru)

ЭЛЕКТРОНИКА  
НАУКА  
ТЕХНОЛОГИИ  
БАЗИС

НАНОИНДУСТРИЯ  
НАУКА  
ТЕХНОЛОГИИ  
БАЗИС

ФОТОНИКА  
НАУКА  
ТЕХНОЛОГИИ  
БАЗИС

ПЕРВАЯ  
МИЛЯ  
НАУКА  
ТЕХНОЛОГИИ  
БАЗИС

АНАЛИТИКА  
НАУКА  
ТЕХНОЛОГИИ  
БАЗИС

СТАНКОИНСТРУМЕНТ  
НАУКА  
ТЕХНОЛОГИИ  
БАЗИС

Цифровая экономика