

# Методические особенности обработки результатов испытаний микросхемы памяти на воздействие отдельных тяжелых заряженных частиц

*Приведены результаты испытаний КМОП-микросхемы статической асинхронной памяти 1657РУ1У на воздействие отдельных тяжелых заряженных частиц, методы и результаты их обработки и численного моделирования методом Монте-Карло для широкого диапазона энергий. Для численного моделирования предложен алгоритм расчета формы чувствительной области. Результаты численного моделирования показали, что при движении частиц с энергией 150–300 МэВ/нуклон параллельно поверхности кристалла возможно возникновение массовых (более 1000) сбоев от воздействия одной частицы.*

**В. В. Гаганов, А. В. Грунин,  
И. Ю. Дроздов, К. А. Игнатов,  
Ф. К. Киселёв, Е. Н. Крылевский,  
Ю. Г. Кудрявцев, С. А. Лазарев,  
К. М. Музюкин, А. В. Силаев,  
Б. В. Цыганков, Я. Я. Петричкович\*,  
В. В. Гусев\*, Л. П. Мироненко\***

## *Введение*

Для оценки частоты одиночных радиационных эффектов в интегральных микросхемах (ИМС) широко применяется интегральная модель прямоугольного параллелепипеда (IRPP-модель). В ее основе, как и в ранней RPP-модели, лежат семь простых предположений [1]:

- 1) энерговыделение в чувствительной области равно потере энергии проходящего через нее иона (ЛПЭ);
- 2) ионы с одинаковыми значениями ЛПЭ создают одинаковый эффект;
- 3) изменением ЛПЭ вдоль трека иона в чувствительном объеме можно пренебречь;
- 4) величина сгенерированного заряда неравновесных носителей пропорциональна произведению ЛПЭ и суммы длины трека в чувствительной области, длины «воронки» и длины области диффузии;

---

\* ОАО НПЦ «ЭЛВИС».

- 5) длина области сбора заряда не зависит от ЛПЭ;
- 6) чувствительный объем представляет собой замкнутую область;
- 7) поток частиц в микросхеме изотропен, и, соответственно, ЛПЭ-спектр не зависит от направления воздействия.

В обоих методах форма чувствительного объема – параллелепипед. Для согласования с результатами измерений зависимости сечения сбоя от ЛПЭ в IRPP-модели вводится дополнительное предположение о разбросе характеристик чувствительных объемов в соответствии с распределением Вэйбулла [1]. На наш взгляд, такое предположение избыточно, требуемого согласования с экспериментальными результатами можно добиться изменением формы чувствительной области в соответствии с алгоритмом, приведенным в разделе «Результаты численного моделирования». Это также исключает необходимость экспериментальной оценки длины «воронки» и длины области диффузии неравновесных носителей.

Для обработки экспериментальных данных и получения параметров распределения Вэйбулла, как правило, применяется метод наименьших квадратов с коррекцией исходных данных на закон косинуса угла падения частиц и оценки длины области диффузии. В этом случае не учитывается гетероскедастичность\*\* исходных данных количества зарегистрированных сбоев и измерений флюенса ионов. Более адекватным в этом случае является применение метода максимума правдоподобия, приведенное в разделе «Обработка экспериментальных данных».

### Методика экспериментальных исследований

**Объект исследований** – образцы ИМС статической асинхронной памяти 1657PY1Y, распаянные на модули (рис. 1). Основные характеристики микросхемы представлены в табл. 1.

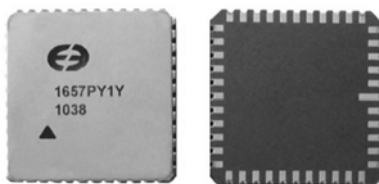


Рис. 1. Внешний вид ИМС 1657PY1Y

Таблица 1

Основные характеристики ИМС 1657PY1Y

Характеристика	Описание
Разработчик и производитель	ОАО НПЦ «ЭЛВИС», Россия
Тип памяти	Статическая асинхронная 8-разрядная
Объем	4 Мбит (8×512 кбайт)
Степень интеграции	VII
Тип корпуса, исполнение	LCC44, выполнен в виде керамического носителя без выводной рамки с выводами в виде контактных площадок
Топологическая норма	0,25 мкм

\*\* Неоднородность наблюдений, выражающаяся в непостоянной дисперсии случайной ошибки регрессионной модели.

**Условия проведения эксперимента.** Испытания на воздействие тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) проводились на испытательном стенде Роскосмоса БИС ОИ-А (400М) (филиал ОАО «ОРКК» – НИИ КП) на базе изохронного циклотрона У-400М (ОИЯИ, г. Дубна Московской области) [2] (рис. 2, см. также цв. вкл.).

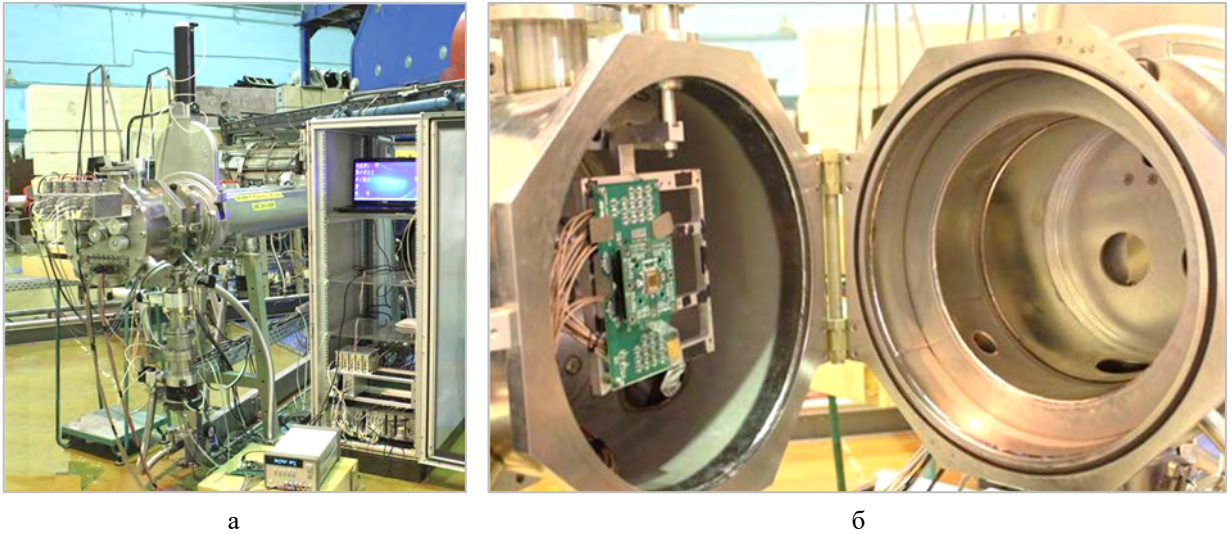


Рис. 2. Испытательный стенд Роскосмоса БИС ОИ-А (400М):  
а – вывод ускорителя У400-М, б – расположение ИМС 1657РУ1У в испытательной камере

Энергия ионов (76 МэВ  $^{22}\text{Ne}$ , 156 МэВ  $^{40}\text{Ar}$ , 282 МэВ  $^{84}\text{Kr}$ , 393 МэВ  $^{136}\text{Xe}$ ) для проведения испытаний выбиралась из условия необходимости обеспечения заданных ЛПЭ на поверхности кристаллов облучаемых ИМС в диапазоне от 5 до 70 МэВ·см<sup>2</sup>/мг (Si) и пробега ионов в кремнии не менее 30 мкм. Облучение проводили при углах падения ионов 0°, 30°, 45° (Ne, Ar, Kr, Xe) и 0°, 30°, 45°, 60° (Kr) на кристалл микросхемы.

Перед испытаниями образцы микросхемы 1657РУ1У декапсулировались (удалялась крышка корпуса для обеспечения воздействия ТЗЧ непосредственно на кристалл облучаемых образцов ИМС).

**Методика регистрации обратимых одиночных сбоев (SingleEventUpset – SEU).** Причиной возникновения эффекта SEU являлось изменение состояния одной ячейки памяти ИМС 1657РУ1У. Регистрация эффекта SEU при облучении сопровождалась процедурой функционального контроля.

### Обработка экспериментальных данных

Для аппроксимации и интерполяции полученных зависимостей сечения SEU от угла падения и значения ЛПЭ использована зависимость

$$\sigma(L, \theta) = \begin{cases} 0 & \text{при } L/\cos(\theta) \leq L_0, \\ \sigma_0 \left( 1 - e^{-\left(\frac{L/\cos(\theta) - L_0}{\beta}\right)^\alpha} \right) \cos(\theta) & \text{при } L/\cos(\theta) > L_0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  – сечение насыщения,  $L$  – значение ЛПЭ,  $L_0$  – пороговое значение ЛПЭ по одиночным сбоям,  $\theta$  – угол падения ТЗЧ относительно нормали к поверхности кристалла,  $\beta$  – параметр масштаба,  $\alpha$  – параметр формы распределения.

Результаты предварительной обработки экспериментальных данных показали, что полученные зависимости сечения SEU от угла и ЛПЭ аппроксимируются зависимостью (1) при значениях параметра масштаба  $\beta \sim 10^9$ . При таких значениях  $\beta$  в выражении (1) может быть использовано разложение экспоненциальной функции по малому параметру, в результате чего выражение (1) упрощается:

$$\sigma(L, \theta) = \begin{cases} 0 & \text{при } L/\cos(\theta) \leq L_0, \\ \Sigma(L/\cos(\theta) - L_0)^\alpha \cos(\theta) & \text{при } L/\cos(\theta) > L_0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\Sigma = \sigma_0/\beta^\alpha$  – нормировочный множитель.

С учетом наличия эффекта гетероскедастичности в измерениях флюенса и числа сбоев экспериментальные данные обрабатывали с использованием (2) методом максимума правдоподобия. Применялась функция правдоподобия

$$-\ln(\Pi) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\Phi_i - \Phi_i^0}{2 \cdot (a\Phi_i^0)^2} \right)^2 + \ln \left( |a\Phi_i^0| \right) + \frac{(M_i - \sigma(L_i, \theta_i)\Phi_i^0)^2}{2 \cdot |\sigma(L_i, \theta_i)\Phi_i^0|} + \frac{1}{2} \ln \left( |\sigma(L_i, \theta_i)\Phi_i^0| \right), \quad (3)$$

где  $N$  – количество экспериментов;  $\Phi_i, L_i, \theta_i, M_i$  – значения флюенса, ЛПЭ, угла падения ТЗЧ и количества зарегистрированных одиночных сбоев в  $i$ -м эксперименте соответственно;  $\Phi_i^0$  – оцененное значения флюенса ТЗЧ в  $i$ -м эксперименте;  $a$  – относительная погрешность измерения флюенса ТЗЧ.

Оптимизация (3) выполнялась по параметрам  $\Sigma, L_0, \alpha$  из (2) и  $a, \Phi_i^0$  из (3). Интервал неопределенности по каждому параметру оценивали путем расчета матрицы ошибок используемых параметров оптимизации. Как известно [3], матрица ошибок является обратной по отношению к матрице вторых производных (матрицы Гессе) функции (3) по набору используемых параметров.

## Результаты эксперимента

В табл. 2 приведены полученные в результате обработки значения параметров зависимости сечения SEU при воздействии ТЗЧ. В таблице указаны доверительные интервалы при доверительной вероятности 95 %. Полученные зависимости сравниваются с экспериментальными данными на рис. 3 (см. также цв. вкл.), в качестве которых использованы средние значения по всем экспериментам с данными значениями ЛПЭ и угла падения.

Таблица 2

Оцененные значения параметров зависимости (2) сечения одиночных сбоев ИМС 1657РУ1У

Параметр, ед. измерения	Значение и интервал неопределенности
$\Sigma$ , см <sup>2</sup> /бит	$(0,72 \pm 0,16) \cdot 10^{-8}$
$L_0$ , МэВ/(мг/см <sup>2</sup> )	$3,9 \pm 1,2$
$\alpha$	$0,460 \pm 0,054$
$a$ , %	$8,9 \pm 1,8$

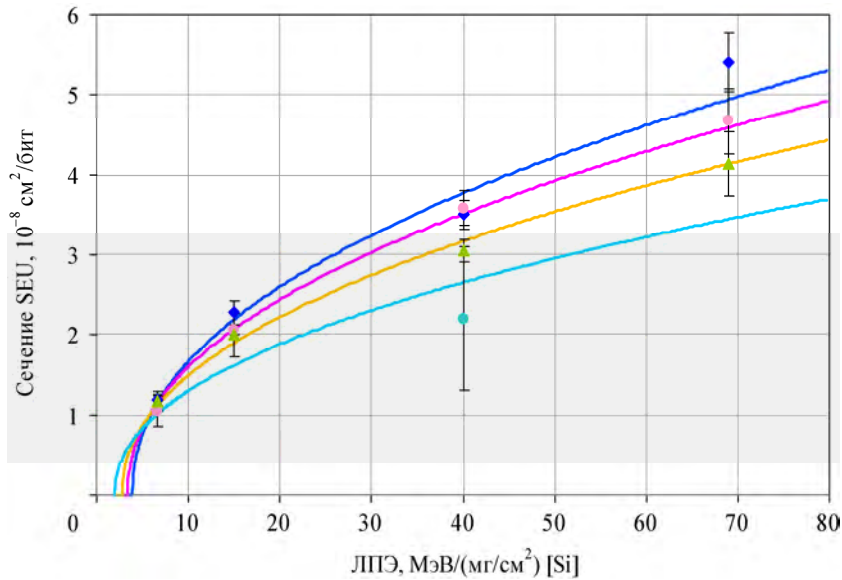


Рис. 3. Зависимости сечения SEU от ЛПЭ ионов при температуре 25 °С для углов падения 0° (синий), 30° (красный), 45° (желтый) и 60° (голубой)

### Результаты численного моделирования

Численное моделирование экспериментов по измерению SEU при воздействии ТЗЧ выполнялось методом Монте-Карло по программе, разработанной на основе библиотек GEANT4 [4]. Рассчитывалось распределение энерговыделения в чувствительных областях микросхемы при воздействии ионов Ne, Ar, Kr и Xe с энергиями, указанными выше. Сечение модели микросхемы 1657PY1Y показано на рис. 4. Пассивные слои микросхемы моделировались двенадцатью слоями с однородным распределением вещества в каждом слое. Состав и массовые соотношения элементов (Al, SiO<sub>2</sub> и т. д) в каждом слое определялись на основе данных о топологии этих слоев.

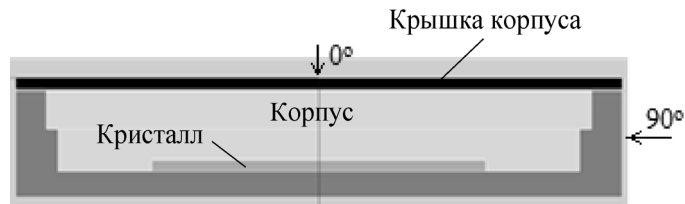


Рис. 4. Сечение геометрической модели микросхемы 1657PY1Y

В геометрической модели кристалл микросхемы разбивался на 2048×2048 элементов (в соответствии с общим количеством ячеек памяти), в каждом элементе выделялась чувствительная область, геометрические характеристики которой рассчитывались с использованием зависимости сечения сбоя при воздействии ТЗЧ по соотношениям:

– для радиуса

$$R = \sqrt{\frac{\sigma(L,0)}{\pi N}},$$

– для глубины

$$H = K \frac{L_0}{L}.$$

Здесь  $\sigma(L, 0)$  – зависимость сечения от ЛПЭ (2) при нормальном падении ТЗЧ на кристалл,  $N = 2$  – количество независимых чувствительных областей в пределах одной ячейки памяти,  $K$  – глубина чувствительной области, значение которой варьировалось от 0,08 мкм до 4 мкм.

Геометрическая модель чувствительной области и зависимость ее высоты от радиуса приведены на рис. 5 (см. также цв. вкл.) и 6 соответственно.

В расчетах поток частиц моделировался плоским мононаправленным источником площадью, равной площади микросхемы, с углом падения  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  и  $45^\circ$  относительно нормали к поверхности кристалла. В результате расчетов методом Монте-Карло было получено распределение энерговыделения ионов в чувствительных областях микросхемы. Зависимости сечений SEU от порогового энерговыделения рассчитывали с помощью соотношения

$$\sigma_{\text{SEU}}(E_0) = \frac{S_0 N n_w(>E_0)}{M}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{\text{SEU}}(E_0)$  [ $\text{см}^2 \cdot \text{бит}^{-1}$ ] – сечение эффекта SEU;  $n_w(>E_0)$ , МэВ – доля событий с энерговыделением более  $E_0$ ,  $M$  – число ячеек памяти,  $S_0$  – площадь источника.

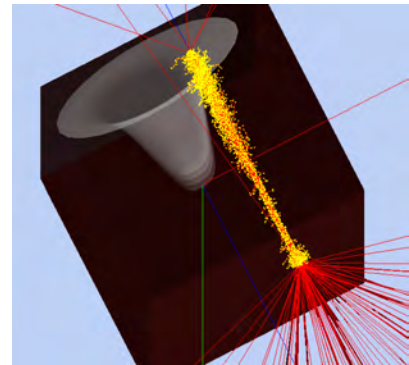


Рис. 5. Геометрическая модель чувствительной области. Траектории частиц: ионы (сверху вниз) – синий, электроны – красный, точки взаимодействия – желтый

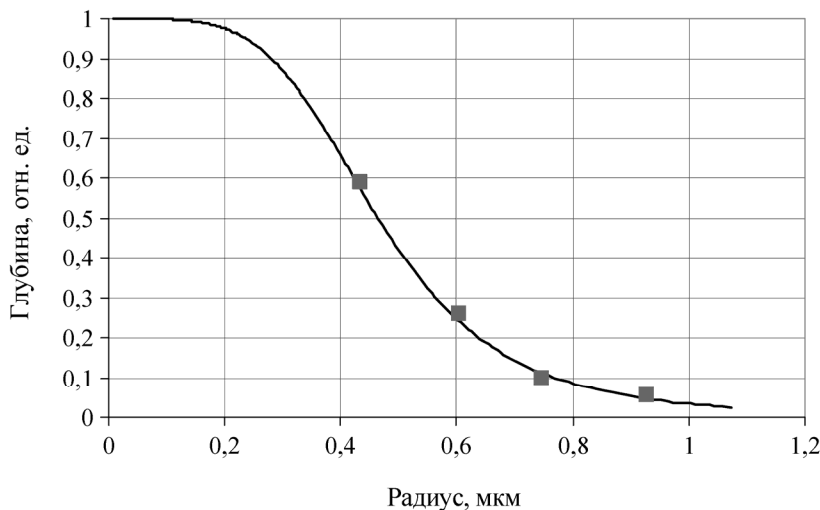


Рис. 6. Зависимость высоты чувствительной области от радиуса (маркеры – расчет по экспериментальным сечениям)

На рис. 7 (см. также цв. вкл.) показаны расчетные зависимости сечений эффекта SEU от порогового энерговыделения при воздействии ТЗЧ. Для определения параметров расчетной модели

сечений SEU при воздействии протонов проведена обработка полученных данных методом наименьших квадратов:

$$Q^2(M, E_0) = \sum_{i=1}^N \left( \sigma_{\text{SEU}}^{\text{exp}}(L_i, \theta_i) - \sigma_{\text{SRE}}^{\text{MK}}(E_0, L_i, \theta_i) \right)^2, \quad (5)$$

где  $\sigma_{\text{SEU}}^{\text{exp}}(L_i, \theta_i)$  – средние по всем экспериментам сечения SEU для значений ЛПЭ  $L_i$  и угла падения ионов  $\theta_i$ ;  $\sigma_{\text{SRE}}^{\text{MK}}(E_0, L_i, \theta_i)$  – сечения SEU, рассчитанные по (4).

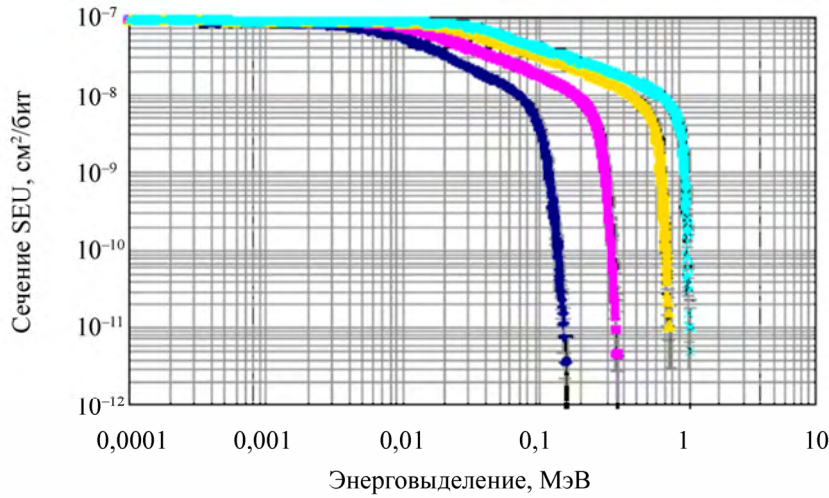


Рис. 7. Расчетные зависимости сечений SEU от энерговыделения при воздействии ионов при нормальном падении:  $\blacklozenge$  – Ne;  $\blacksquare$  – Ar;  $\blacktriangle$  – Kr;  $\times$  – Xe

Расчеты продемонстрировали, что описанным методом при имеющемся наборе экспериментальных данных можно выделить только диапазон возможных значений глубины чувствительной области от 0,08 до 0,4 мкм. Значения параметров расчетной модели сечений SEU при этом находятся в диапазоне:  $E_0$  – от 0,067 до 0,31 МэВ, объем чувствительной области  $V$  – от 0,0726 до 0,363 мкм<sup>3</sup>, тем не менее пороговая плотность энерговыделения  $w$  меняется незначительно – от  $9,8 \cdot 10^{11}$  до  $9,5 \cdot 10^{11}$  МэВ/см<sup>3</sup>. В качестве доказательства корректности расчетов на рис. 8 (см. также цв. вкл.) сравниваются экспериментальные данные, расчетные зависимости (2) с параметрами из табл. 2 и результаты расчетов методом Монте-Карло сечения SEU микросхемы 1657PY1Y от ЛПЭ ТЗЧ при температуре 25 °С для углов падения 0°, 30° и 45°.

С использованием предложенной модели рассчитаны зависимости сечения SEU от начального значения ЛПЭ ТЗЧ для двух случаев облучения: 1) при нормальном падении ионов <sup>40</sup>Ar с энергией от 1,4 МэВ/нуклон до 5 ГэВ/нуклон и <sup>197</sup>Au с энергией от 0,4 МэВ/нуклон до 2,5 ГэВ/нуклон; 2) при падении под углом 90° ионов <sup>22</sup>Ne, <sup>40</sup>Ar, <sup>84</sup>Kr, <sup>136</sup>Xe, <sup>197</sup>Au и <sup>238</sup>U с энергиями 125, 162, 238, 286, 330 и 336 МэВ/нуклон соответственно (см. рис. 4). Во втором случае выбор энергии обусловлен требованием превышения пробега ионов массовой толщины ИМС в направлении распространения. В первом случае расчеты проводили для глубины чувствительной области 0,4 мкм, во втором – для глубины 0,4 мкм и 4 мкм. Результаты расчетов в сравнении с экспериментальными данными приведены на рис. 9 (см. также цв. вкл.).

Один из интересных результатов расчетов – прогнозирование наличия одиночных сбоев при энергии ионов <sup>40</sup>Ar более 40 МэВ/нуклон, для которых значения начальной ЛПЭ ниже измеренного порога.

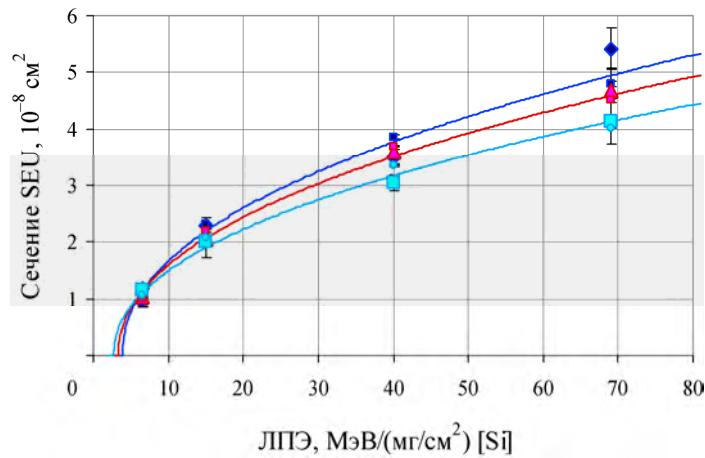


Рис. 8. Сечения SEU микросхемы 1657РУ1У от ЛПЭ ТЗЧ при температуре 25 °С для углов падения 0° (синий), 30° (красный) и 45° (голубой): линии – расчет по (2) с параметрами из табл. 2, крупные маркеры – эксперимент, мелкие маркеры – расчет Монте-Карло

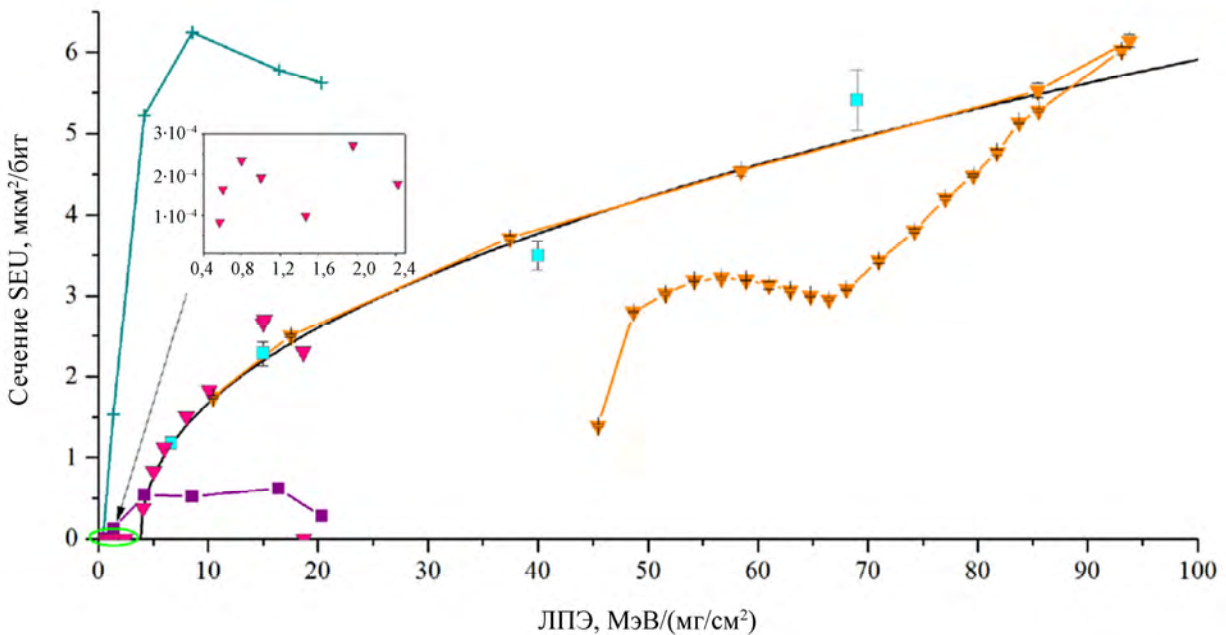


Рис. 9. Зависимости сечения SEU от начального значения ЛПЭ ТЗЧ при различном направлении распространения: — – распределение Вэйбулла; ▼ – нормальное падение ионов  $^{197}\text{Au}$ ; —|— – падение ионов под углом 90°, глубина чувствительной области 4 мкм; ■ – падение ионов под углом 90°, глубина чувствительной области 0,4 мкм; ■ – эксперимент; ▼ – нормальное падение ионов  $^{40}\text{Ag}$



Численные значения сечения SEU при распространении ионов под углом  $90^\circ$  (см. рис. 4) позволяют прогнозировать наличие в этом случае эффекта массовых сбоев. Отметим пропорциональность значения сечения высоте чувствительной области. Зависимости среднего значения количества одновременно сбитых ячеек от начального значения ЛПЭ иона приведены на рис. 10. Они получены как отношения сечения сбоя к площади сечения чувствительной области в плоскости, перпендикулярной направлению распространения.

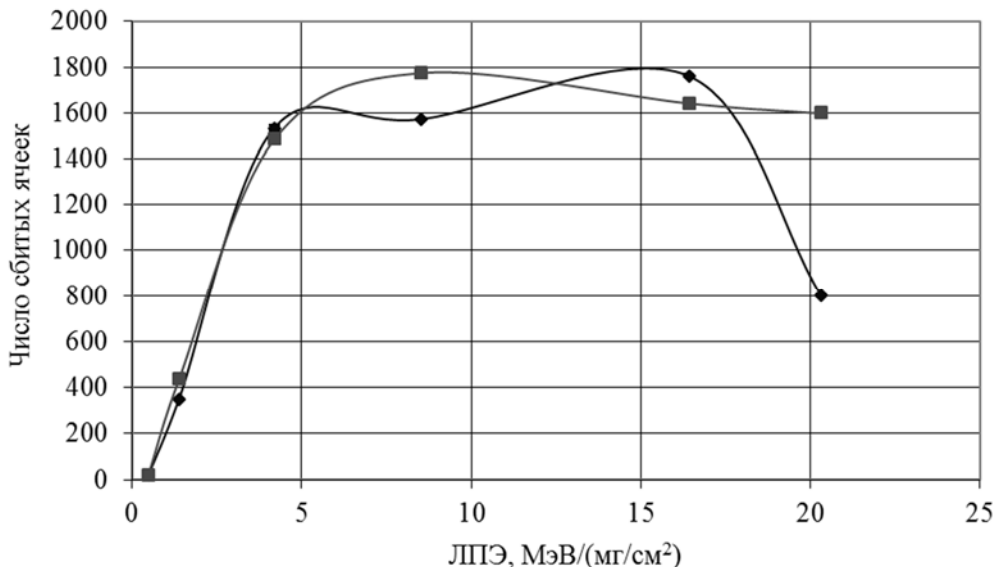


Рис. 10. Зависимости числа ячеек, перешедших в инверсное состояние, от начального ЛПЭ иона для глубины чувствительной области 0,4 мкм (◆) и 4 мкм (■)

### **Благодарности**

Авторы выражают благодарность В. С. Анашину (филиал ОАО «ОРКК» – НИИ КП) за помощь в организации и проведении экспериментов на стенде Роскосмоса в ОИЯИ, г. Дубна.

### **Заключение**

Применение для обработки результатов измерений зависимости сечения SEU метода максимума правдоподобия позволяет корректно учесть наличие эффекта гетероскедастичности при измерениях флюенса и числа сбоев. Помимо оценки интересующих параметров, данный метод позволяет получить их корректные интервалы неопределенности и, с учетом оценки погрешности измерений флюенса, оценить качество проведенного эксперимента.

Модель, основанная на предположении о существовании в ИМС чувствительных областей, ионизация в которых пропорциональна ЛПЭ иона и длине трека, с одинаковой пороговой энергией и формой, рассчитанной с использованием зависимости сечения SEU от ЛПЭ, позволяет достаточно точно описать зависимость сечения сбоев в широком диапазоне углов падения (до  $60^\circ$ ). Эта

модель также позволяет оценить пороговую плотность энерговыделения, необходимого для возникновения сбоя.

Для оценки глубины чувствительной области можно рекомендовать проведение измерений сечения одиночных сбоев при энергиях ионов 150–300 МэВ/нуклон с направлением облучения под углом 90° к нормали. В этом случае должен наблюдаться эффект массовых сбоев вдоль трека иона. Анализ таких событий – треков одиночных сбоев – с учетом изменения энергии иона вдоль трека может дать дополнительную информацию о характере зависимости сечения сбоя от ЛПЭ.

### Список литературы

1. Petersen T. L., Pickel J. C., Adams J. H. et al. Rate prediction for single event effects // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1992. Vol. 39. P. 1577–1599.
2. Barbero S. M., Höffgen S. K., Berger G., Guerrero H. Compendium of international irradiation test facilities. 1<sup>st</sup> ed. – Sevilla: RADECS, 2011.
3. Lederman W. Handbook of applicable mathematics. – N. Y.: John Wiley & Sons, 1984.
4. Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. Geant4 – a simulation toolkit // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2003. Vol. 506, Issue 3. P. 250–303.

### **Procedure Peculiar Features for Analysis of Memory Chip Test for the Effect of Individual Heavy Charged Particles**

V. V. Gaganov, A. V. Grunin, I. Yu. Drozdov, K. A. Ignatov, F. K. Kiselev, E. N. Krylevskii, Yu. G. Kudryavtsev, S. A. Lazarev, K. M. Muzyukin, A. V. Silaev, B. V. Tsygankov, Ya. Ya. Petrichkovich, V. V. Gusev, L. P. Mironenko

*The paper presents data of tests in which CMOS chip of 1657RUIU static asynchronous memory are exposed to heavy ions, methods used to process this data and processing results along with Monte-Carlo simulation results of the effect produced by wide energy range ions in the chip under investigation. An algorithm is proposed for the sensitive volume shape calculation. The simulation results have shown that multiple upsets (more than 1000) can be produced by one ion when ions of 150–300 MeV/nucleon energy are propagating in a direction parallel to the chip surface.*