

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ МИКРОСХЕМЫ ПАМЯТИ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

### PROCEDURE PECULIAR FEATURES FOR ANALYSIS OF MEMORY CHIP TEST FOR THE EFFECT OF INDIVIDUAL HEAVY CHARGED PARTICLES

*В. В. Гаганов<sup>1</sup>, А. В. Грунин<sup>1</sup>, И. Ю. Дроздов<sup>1</sup>, К. А. Игнатов<sup>1</sup>, Ф. К. Киселев<sup>1</sup>, Е. Н. Крылевский<sup>1</sup>,  
Ю. Г. Кудрявцев<sup>1</sup>, С. А. Лазарев<sup>1</sup>, К. М. Музюкин<sup>1</sup>, А. В. Силаев<sup>1</sup>, Б. В. Цыганков<sup>1</sup>, Я. Я. Петричкович<sup>2</sup>,  
В. В. Гусев<sup>2</sup>, Л. П. Мироненко<sup>2</sup>*

*V. V. Gaganov<sup>1</sup>, A. V. Grunin<sup>1</sup>, I. Yu. Drozdov<sup>1</sup>, K. A. Ignatov<sup>1</sup>, F. K. Kiselev<sup>1</sup>, E. N. Krylevskii<sup>1</sup>,  
Yu. G. Kudryavtsev<sup>1</sup>, S. A. Lazarev<sup>1</sup>, K. M. Muzyukin<sup>1</sup>, A. V. Silaev<sup>1</sup>, B. V. Tsygankov<sup>1</sup>,  
Ya. Ya. Petrichkovich<sup>2</sup>, V. V. Gusev<sup>2</sup>, L. P. Mironenko<sup>2</sup>*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,

пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия<sup>1</sup>,  
ОАО научно-производственный центр НПЦ «ЭЛВИС»<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal Nuclear Center of Russia – All-Russia Research Institute of Experimental Physics

<sup>2</sup>Public Corporation Research-and-Production Center «Electronic Computation-Information Systems»  
(RPC «ELVIS»)

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 на сумму длины трека в чувствительной области, длины «воронки» и длины области диффузии; 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 является избыточным и требуемого согласования с экспериментальными результатами можно добиться изменением формы чувствительной области в соответствии с алгоритмом, приведенным в статье. Это также исключает необходимость экспериментальной оценки длины «воронки» и длины области диффузии неравновесных носителей.

To evaluate frequency of single radiation effects in IC chip an integral rectangular parallelepiped model (IRPP-model) is widely applied. It is based, as in the case of earlier RPP-model, on seven simple assumptions [1]: 1 – energy release in the sensitive area equals to the energy loss of a ion passing through it; 2 – ions with equal values of linear energy transfer (LET) create an equal effect; 3 – one can neglect a change of LET along the ion track in the sensitive volume; 4 – value of generated charge of non-equilibrium carriers is proportional to the product of LET and the sum of track length in the sensitive area, length of «funnel» and length of diffusion region; 5 – length of charge collection area does not depend on LET; 6 – sensitive volume represents a region; 7 – particle flow in the chip is isotropic and, correspondingly, LET-spectrum does not depend on the action direction.

In both methods the sensitive volume's shape is a parallelepiped. To agree with measurement results of the dependence of upset cross-section on LET in IRPP-model, there is introduced a supplement assumption on sensitive volume characteristics' scatter according to

Weibull distribution [1]. In our opinion, the last assumption is excessive, and one can approach the required agreement with experimental results through a change of the sensitive area shape according to the algorithm, presented in our article. This also excludes the necessity for experimental estimate of the length of «funnel» and the length of the diffusion region of non-equilibrium carriers.

## Введение

Для оценки частоты одиночных радиационных эффектов в 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 на сумму длины трека в чувствительной области, длины «воронки» и длины области диффузии; 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 является избыточным и 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<sup>1</sup> исходных данных количе-

ства 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

### А. Объект исследований

Объектом исследований являлись образцы ИМС статической асинхронной памяти 1657PY1Y, распаянные на модули (рис. 1).

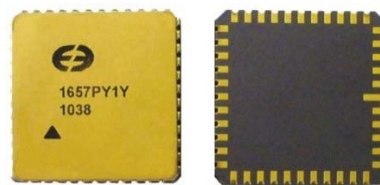


Рис. 1. Внешний вид ИМС 1657PY1Y

Основные характеристики микросхемы представлены в табл. 1.

Таблица 1

### Основные характеристики ИМС 1657PY1Y Удельное энерговыделение при максимальном импульсе АИР

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

<sup>1</sup> Неоднородность наблюдений, выражающаяся в непостоянной дисперсии случайной ошибки регрессионной модели

## Б. Условия проведения эксперимента

Испытания на воздействие тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) проводилось 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).

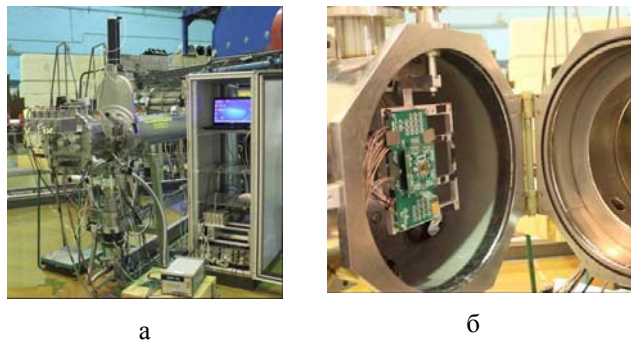


Рис. 2. Испытательный стенд Роскосмоса БИС ОИ-А (400М): а – общий вид вывода ускорителя У400-М; б – расположение ИМС 1657PY1U в испытательной камере.

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 проводилось при углах падения ионов 0°, 30°, 45° (Ne, Ar, Kr, Xe) и 0°, 30°, 45°, 60° (Kr) на кристалл микросхемы.

Перед проведением испытаний образцы микросхемы 1657PY1U декапсулировались (удалялась крышка корпуса для обеспечения воздействия тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) непосредственно на кристалл облучаемых образцов ИМС).

В. Методика регистрации обратимых одиночных сбоев (SingleEventUpset-SEU)

Критерием возникновения эффекта SEU являлось изменение состояния одной ячейки памяти ИМС 1657PY1U. Регистрация возникновения эффекта SEU при облучении в образцах ИМС 1657PY1U проводилась при проведении процедуры функционального контроля.

## Обработка экспериментальных данных

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

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

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  $\beta$  порядка  $10^9$ . При таких значениях параметра масштаба  $\beta$  в выражении (1) может быть использовано разложение экспоненциальной функции по малому параметру и выражение (1) упрощается:

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

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

С учетом наличия эффекта гетероскедастичности в измерениях флюенса и числа сбоев, обработка экспериментальных данных проводилась с использованием выражения (2) методом максимума правдоподобия. Использовалась функция правдоподобия  $\Pi$  в виде:

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

где  $N$  – количество экспериментов;  $\Phi_i$ ,  $L_i$ ,  $\theta_i$ ,  $M_i$  значения флюенса, ЛПЭ, угла падения ТЗЧ и количества зарегистрированных одиночных сбоев в  $i$ -том эксперименте;  $\Phi_i^0$  оцененные значения флюенса ТЗЧ в  $i$ -том эксперименте;  $a$  – оценка относительной погрешности измерения флюенса ТЗЧ.

Оптимизация функции (3) выполнялась по параметрам  $\Sigma$ ,  $L_0$ ,  $\alpha$  (2) и  $a$ ,  $\Phi_i^0$  (3). Оценка интервала неопределенности по каждому параметру проводилась 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

Полученные в результате обработки значения параметров зависимости сечения SEU при воздействии ТЗЧ приведены в табл. 2.

Таблица 2

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

Параметр	Значение параметра 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> )	$3,9 \pm 1,2$
$\alpha$	$0,460 \pm 0,054$
$a$ , %	$8,9 \pm 1,8$

Также в табл. 2 приведены значения доверительных интервалов при значении доверительной вероятности 95%. Сравнение полученных зависимостей с экспериментальными данными приведено на рис. 3. В качестве экспериментальных данных на рис. 3 использованы средние значения по всем экспериментам с данными значениями ЛПЭ и угла падения.

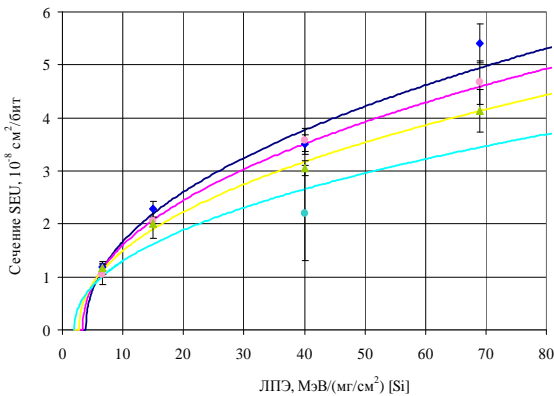


Рис. 3. Зависимости сечения SEU от ЛПЭ ионов при температуре  $T = 25^\circ\text{C}$  для углов падения  $0^\circ$  (синий),  $30^\circ$  (красный),  $45^\circ$  (жёлтый) и  $60^\circ$  (голубой)

### Результаты численного моделирования

Численное моделирование проведенных экспериментов по измерению SEU при воздействии ТЗЧ выполнялось методом Монте-Карло по программе, разработанной на основе библиотек GEANT4 [4].

Рассчитывались распределения энерговыделений в чувствительных областях микросхемы при воздействии ионов Ne, Ar, Kr и Xe с энергиями, указанными выше. Сечение модели микросхемы 1657РУ1У показано на рис. 4. Пассивные слои микросхемы моделировались двенадцатью слоями с однородными распределениями вещества в каждом слое. Состав и весовые соотношения элементов (Al, SiO<sub>2</sub> и т.д.) в каждом слое определялись на основе данных о топологии этих слоев.

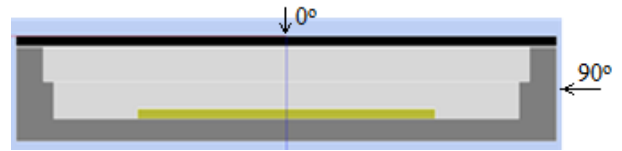


Рис. 4. Сечение геометрической модели микросхемы 1657РУ1У (кристалл–желтый, корпус–серый, крышка корпуса–черный)

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

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

$$\text{и глубина } H = K \cdot \frac{L_0}{L},$$

где  $\sigma(L, 0)$  – 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 и 6, соответственно.

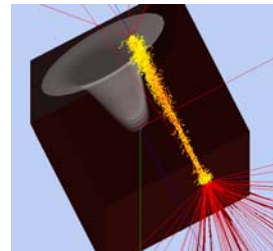


Рис. 5. Геометрическая модель чувствительной области (траектории частиц: ионы (сверху вниз) – синий, электроны – красный, точки взаимодействия – желтый)

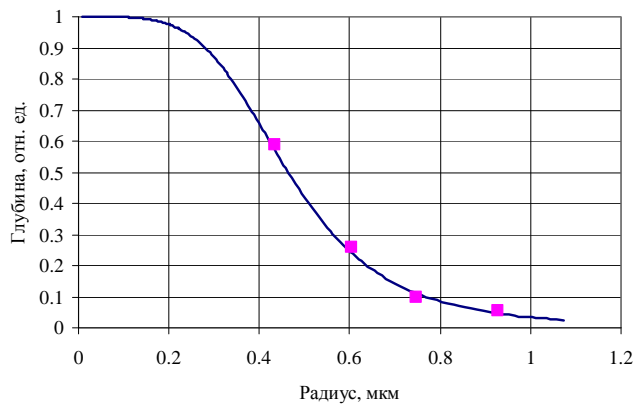


Рис. 6. Зависимость высоты чувствительной области от радиуса (точки – расчет по экспериментальным сечениям)

При проведении расчетов поток частиц моделировался плоским мононаправленным источником площадью, равной площади микросхемы и углом падения  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  и  $45^\circ$  относительно нормали к поверхности кристалла. В результате расчетов методом Монте-Карло для ионов были получены распределения энерговыделений в чувствительных областях микросхемы. Расчет зависимостей сечений SEU от значения порогового энерговыделения проводился с использованием соотношения.

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

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

На рис. 7 приведен пример полученных расчетных зависимостей сечений эффекта SEU от значения порогового энерговыделения при воздействии ТЗЧ. Для определения параметров расчетной модели сечений SEU при воздействии протонов проведена обработка полученных данных методом наименьших квадратов

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

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

Анализ результатов выполненных расчетов показал, что описанным методом при имеющемся наборе экспериментальных данных можно выделить только диапазон возможных значений глубины чувствительной области от 0,08 мкм до 0,4 мкм. Значения параметров расчетной модели сечений SEU при этом находятся в диапазоне:  $E_0$  от 0,067 до 0,31 МэВ,

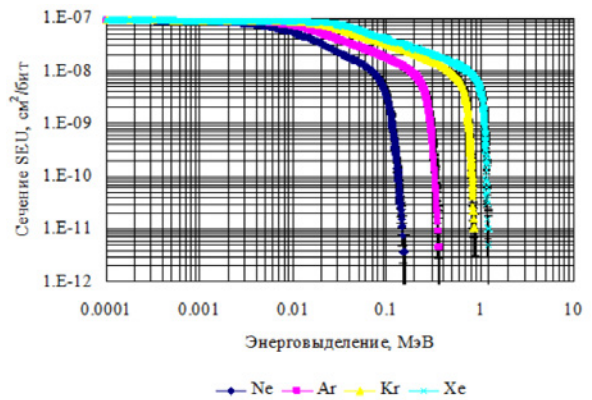


Рис. 7. Расчетные зависимости сечений SEU от величины энерговыделения при воздействии ионов при нормальном падении

объем чувствительной области  $V$  от  $0,0726$  до  $0,363 \text{ мкм}^3$ , тем не менее пороговая плотность энерговыделения  $w$  изменяется незначительно от  $9,8 \cdot 10^{11} \text{ МэВ/см}^3$  до  $9,5 \cdot 10^{11} \text{ МэВ/см}^3$ . В качестве иллюстрации корректности проведенных расчетов на рисунке 8 приведено сопоставление экспериментальных данных, расчетных зависимостей (2) с параметрами из таблицы 2 и результатов расчетов методом Монте-Карло сечения SEU микросхемы 1657PY1Y от ЛПЭ ТЗЧ при  $T = 25^\circ\text{C}$  для углов падения  $0^\circ$  (синий),  $30^\circ$  (красный) и  $45^\circ$  (голубой).

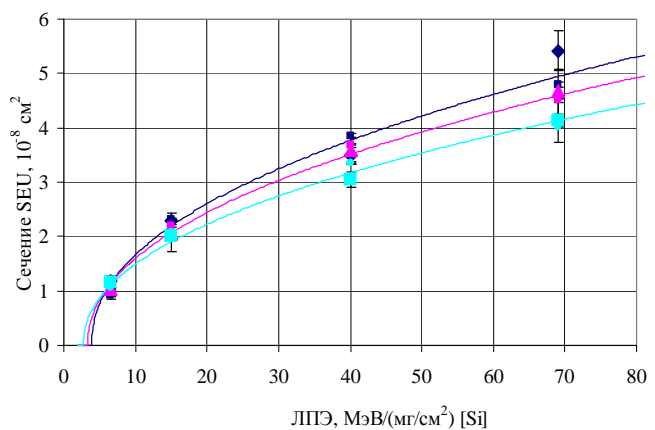


Рис. 8. Сечения SEU микросхемы 1657PY1Y от ЛПЭ ТЗЧ при  $T = 25^\circ\text{C}$  для углов падения  $0^\circ$  (синий),  $30^\circ$  (красный) и  $45^\circ$  (голубой) (линии – расчет по (2) с параметрами табл. 2, крупные точки – эксперимент, мелкие точки – расчет Монте-Карло)

С использованием предложенной модели проведены расчеты зависимостей сечения SEU от начального значения ЛПЭ ТЗЧ для двух случаев облучения: при нормальном падении ионов  $^{40}\text{Ar}$  с энергией от 1,4 МэВ/нуклон до 5 ГэВ/нуклон и  $^{197}\text{Au}$  с энергией от 0,4 МэВ/нуклон до 2,5 ГэВ/нуклон, а также для ионов  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{84}\text{Kr}$ ,

$^{136}\text{Xe}$ ,  $^{197}\text{Au}$  и  $^{238}\text{U}$  с энергиями 125, 162, 238, 286, 330 и 336 МэВ/нуклон, соответственно, под углом  $90^\circ$  (см. рис. 4). В последнем случае энергии выбирались из условия превышения пробега ионов массовой толщины ИМС в направлении распространения. В первом случае расчеты проводились для глубины чувствительной области 0,4 мкм, а во втором для глубины 0,4 мкм и 4 мкм. Результаты расчетов в сравнении с экспериментальными данными приведены на рис. 9.

Одним из интересных результатов проведенных расчетов является прогнозирование наличия одиночных сбоев при энергии ионов  $^{40}\text{Ar}$  более 40 МэВ/нуклон, для которых значения начальной ЛПЭ ниже измеренного порога.

Численные значения сечения SEU при распространении ионов под углом  $90^\circ$  (см. рис. 4) позволяют прогнозировать наличие в этом случае эффекта массовых сбоев (MultipleBitUpset-MBU). 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.

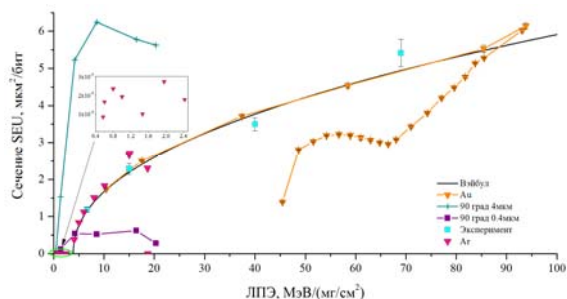


Рис. 9. Зависимости сечения SEU от начального значения ЛПЭ ТЗЧ при различном направлении распространения

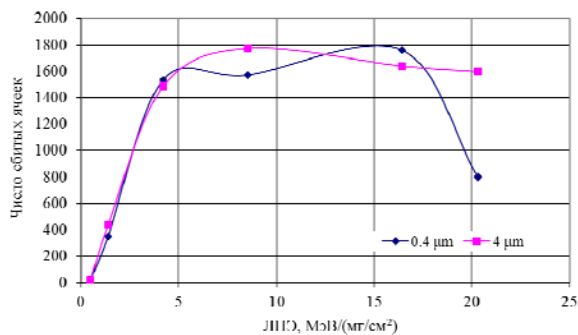


Рис. 10. Зависимости числа ячеек, перешедших в инверсное состояние, от начального ЛПЭ иона для двух значений глубины чувствительной области

## 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

Использование для обработки результатов измерений зависимости сечения SEU метода максимума правдоподобия позволяет провести корректный учет наличия эффекта гетероскедастичности при измерениях флюенса и числа сбоев. Кроме того, использование этого метода позволяет, помимо оценки интересующих параметров, получить корректную оценку их интервалов 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 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  $90^\circ$  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. T. L. Petersrn, J. C. Pickel, J. H. Adams, Jr., E. C. Smith, "Rate prediction for sigle event effects," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 39, pp. 1577–1599, Dec. 1992.
2. S. M. Barbero, S. K. Höffgen, G. Berger, H. Guerrero, Compendium of international irradiation test facilities (1st edition). RADECS 2011, Sevilla, Spain, September 19/23 2011, pp. 41–42.

3. W. Lederman, Handbook of applicable mathematics, vol. VI, part A. New York: John Wiley & Sons, 1984, ch. 6.

4. S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, i.e., "Geant4—a simulation toolkit", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and

Associated Equipment, Volume 506, Issue 3, Pages 250–303, 1 July 2003.

5. A. Haran, J. Barak, L. Weissman, D. David, E. Keren, "14 MeV neutrons SEU cross section in deep submicron devices calculated using heavy ion SEU cross section," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 58, pp. 848–854, Jun. 2011.