

Александр И. Чумаков¹, Армен В. Согоян², Дмитрий В. Бобровский³,
Дмитрий О. Титовец⁴, Константин А. Чумаков⁵, Сергей Ю. Дианков⁶,
Виталий В. Хаустов⁷, Олег А. Герасимчук⁸, Дмитрий И. Юрков⁹

^{1,2,3,4,8,9} *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия*

^{1,2,3,4} *Акционерное общество «Экспериментальное научно-производственное объединение
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ»,
Каширское ш., 31, 115409, Москва, 115409, Россия*

⁵ *Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-
исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»,
Нахимовский пр-кт, 36, к.1, Москва, 117218, Россия*

^{6,7} *ФГБУ 46 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны
Российской Федерации,*

Чукотский пр-д, д/вл 10, Москва, 129327, Россия

¹ *e-mail: aichum@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6270-2663>*

² *e-mail: avsog@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9380-239X>*

³ *e-mail: dvbob@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3036-2953>*

⁴ *e-mail: dotit@spels.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4934-5945>*

⁵ *e-mail: kachumakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2013-1350>*

⁶ *e-mail: diankov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6399-8985>*

⁷ *e-mail: vvkhaustov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0469-5439>*

⁸ *e-mail: oleg.gerasimchuk@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2307-0848>*

⁹ *e-mail: dmitry_yurkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4672-3007>*

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ К НЕЙТРОННОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2021.2.03>

Аннотация. В работе проводится анализ особенностей возникновения доминирующих радиационных эффектов в современных полупроводниковых изделиях информационных, информационно-вычислительных и управляющих систем при нейтронном воздействии. Данные вопросы имеют существенное значение в свете расширения сферы практического применения в системах управления ядерными энергетическими и физическими установками микросхем повышенной степени интеграции, так как при нейтронном излучении возможно проявление всех основных доминирующих радиационных эффектов, оказывающих влияние на безопасность информационных систем. Показано, что существующие модели, основанные на оценке эквивалентности среднего энерговыделения (дозы), не в полной мере адекватно описывают эффекты от воздействия нейтронного излучения. В ряде случаев необходимо учитывать возможности проявления микродозиметрических эффектов, а в ряде случаев имеют место существенные расхождения из-за различий в процессах первичной рекомбинации избыточного заряда в окислах. Наличие сильной зависимости доли энергии, затрачиваемой на ионизацию, от энергии нейтронов приводит к отличиям в амплитудно-временных характеристиках мощности дозы и плотности потока нейтронов. Существенное уменьшение зарядов переключения в современных изделиях микроэлектроники приводит к появлению одиночных радиационных эффектов при воздействии нейтронов, что также необходимо учитывать при построении сбоеустойчивой электронной аппаратуры. Представленные результаты позволяют корректно проводить оценку стойкости полупроводниковых электронных изделий к нейтронному воздействию искусственного и естественного происхождений.

Ключевые слова: безопасность информационных систем, нейтронное излучение, доминирующие радиационные эффекты, структурные повреждения, объемная ионизация, первичная рекомбинация, одиночные эффекты.

Для цитирования: ЧУМАКОВ, Александр И. et al. ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ К НЕЙТРОННОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ. *Безопасность информационных технологий*, [S.l.], v. 28, n. 2, p. 34–43, 2021. ISSN 2074-7136. Доступно на: <<https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1338>>. Дата доступа: 09 apr. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2021.2.03>.

Alexander I. Chumakov¹, Armen V. Sogoyan², Dmitry V. Bobrovsky³,
Dmitry O. Titovets⁴, Konstantin A. Chumakov⁵, Sergey Y. Diankov⁶,
Vitaly V. Khaustov⁷, Oleg A. Gerasimchuk⁸, Dmitry I. Yurkov⁹

^{1,2,3,4,8,9}National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),
Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 115409, Russia

^{1,2,3,4}Joint Stock Company “Experimental Research and Production Association
SPECIALIZED ELECTRONIC SYSTEMS”
Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 115409, Russia

⁵Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis
of the Russian Academy of Sciences”,
Nakhimovskiy prospekt, 36/1, Moscow, 117218, Russia

^{6,7}46 Central Research Institute of the Russian Defense Ministry,
Chukotsky pr-d, 10, Moscow, 129327, Russia

¹e-mail: aichum@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6270-2663>

²e-mail: avsog@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9380-239X>

³e-mail: dvbob@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3036-2953>

⁴e-mail: dotit@spels.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4934-5945>

⁵e-mail: kachumakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2013-1350>

⁶e-mail: diankov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6399-8985>

⁷e-mail: vvkhaustov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0469-5439>

⁸e-mail: oleg.gerasimchuk@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2307-0848>

⁹e-mail: dmitry_yurkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4672-3007>

Some aspects of IC radiation hardness evaluation when exposed to neutrons

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2021.2.03>

Abstract. Some features of dominant radiation effects in modern ICs of information, information-computing and control systems when exposed to neutrons are analysed. Occurrence of all main dominant radiation effects in ICs is possible under influence of neutrons. Thus these investigations are essential due to expanding the scope of practical application of VLSI in control systems of nuclear power and physical facilities, affecting the security of information systems. It is shown that the existing models based on the assessment of the equivalence of the average energy release (dose) do not fully adequately describe the effects of neutron radiation exposure. In some cases, there are occurrence of microdosimetric effects and significant deviations due to differences in the processes of primary recombination of excess charge in oxides. These effects should not be ignored. Ionisation energy depends on neutron energy, which leads to differences in the amplitude-time characteristics of the dose rate and the neutron flux density. A significant reduction in switching charges in modern microelectronics leads to the appearance of single event effects when exposed to neutrons, which must also be taken into account when constructing radiation-resistant electronic facilities. The presented results allow us to correctly assess the resistance of semiconductor electronic products to the neutron effects of artificial and natural origin.

Keywords: information security, neutron radiation, main radiation effects, general radiation effects, structural damage, volume ionization, primary recombination, single effects.

For citation: CHUMAKOV, Alexander I. et al. Some aspects of IC radiation hardness evaluation when exposed to neutrons. *IT Security (Russia)*, [S.l.], v. 28, n. 2, p. 34–43, 2021. ISSN 2074-7136. Available at: <<https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1338>>. Date accessed: 09 apr. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2021.2.03>.

Введение

Характерной особенностью воздействия нейтронного излучения на интегральные схемы является проявление в них практически всех основных доминирующих эффектов: дефектообразование, объемная ионизация полупроводниковых структур, поверхностные и одиночные радиационные эффекты [1, 2]. Вместе с тем, оценка влияния доминирующих эффектов на отказы и сбои интегральных схем в информационно-вычислительных системах может отличаться от классических представлений, так как при нейтронном воздействии основное энерговыделение обусловлено потерями энергии в чувствительных объемах полупроводниковых элементов вторичными частицами в небольшой локальной области. Кроме того, в области энергий нейтронов до 10 МэВ потери энергии на структурные повреждения (дефектообразование) по порядку величины соизмеримы с ионизационными потерями. При энергиях выше 30...50 МэВ ощутимого различия между эффектами от протонов и нейтронов практически не наблюдается [3, 4]. Поэтому именно диапазон энергий, характерный для спектра быстрых нейтронов (0.1...15 МэВ), представляет наибольший интерес в силу наличия большого количества экспериментальных установок, работающих со спектрами ядерных реакций деления и синтеза.

1. Структурные повреждения

Данный вид радиационного повреждения наиболее изучен. Несмотря на то, что при нейтронном облучении в полупроводниковых материалах образуются разупорядоченные области [1, 2], состоящие из стабильных радиационных дефектов, считается, что структура радиационных дефектов не оказывает влияние на деградацию характеристик полупроводниковых приборов. Пересчет от одного вида излучения к другому может быть проведен по величине энергии, затрачиваемой на структурные повреждения (d-керма).

Однако такой подход может оказаться не применим в случае проявления микродозиметрических эффектов, т.е. тогда, когда среднее энерговыделение при одном взаимодействии нейтрона с веществом становится сравнимым с энергией, необходимой для отказа отдельного элемента [1, 5, 6]. Оценки показывают, что эти эффекты будут сказываться при величинах активного объема прибора V_a менее:

$$V_a \leq 100 / (\Phi_n \times \Sigma_n), \quad (1)$$

где Φ_n – средний флюенс нейтронов, необходимый для отказа элемента, Σ_n – макроскопическое сечение взаимодействия нейтронов с веществом. Например, для спектра нейтронов реакции деления и при $\Phi_n = 10^{14}$ нейтрон/см² получим, что микродозиметрические эффекты будут влиять при величинах активного объема менее 1 мкм³.

В настоящее время подобные эффекты проявляются в ПЗС элементах даже при создании одной разупорядоченной области внутри чувствительной области [1, 2, 7]. Увеличившийся ток утечки при вводе одной разупорядоченной области в чувствительный объем, как правило, приводит к потере одного пикселя. Очевидно, что в этом случае уже невозможно пользоваться пересчетом от эффективности воздействия одного излучения в другое по величине энергии, затрачиваемой на структурные повреждения. Задача может быть решена аналогичным образом, если вместо пороговой энергии образования точечного радиационного дефекта поставить пороговую величину образования одной разупорядоченной области.

2. Объемные ионизационные эффекты

Радиационные эффекты, вызванные объемной ионизацией импульсом быстрых нейтронов, необходимо оценивать с учетом энергетической зависимости энергии нейтронов, затрачиваемой на ионизацию. Дело в том, что эта зависимость в пределах энергий нейтронов в диапазоне 0.1...15 МэВ меняется практически на два порядка, поэтому нейтроны с малой энергией будут давать существенно меньший вклад в общую ионизацию полупроводниковой структуры. С другой стороны, из-за наличия спектральной зависимости нейтроны с разной энергией имеют различные скорости распространения в пространстве, вследствие чего длительность импульса нейтронов при удалении от источника излучения увеличивается. Эти два обстоятельства приводят к двум противоположным эффектам – увеличению длительности плотности потока нейтронов при удалении от источника нейтронов и уменьшению длительности импульса ионизации полупроводниковой структуры внутри этого импульса за счет различной эффективности ионизации при разных энергиях нейтронов. При этом последний эффект в значительной степени будет зависеть от полупроводникового материала, так как помимо энергии нейтронов коэффициент ионизационных потерь зависит от его химического состава материала [8]. Таким образом, в общем случае невозможно использовать непосредственную форму импульсов нейтронного излучения (плотности потока) для оценки объемных ионизационных эффектов в полупроводниковых структурах.

Наглядно это может быть показано при оценках эффективной мощности дозы от воздействия импульса нейтронов со спектром деления и монохроматического излучения с энергией равной 14 МэВ. Предположим, что действует комбинированный мгновенный источник нейтронов со спектром деления dN_n/dE :

$$\frac{dN_n}{dE} = k_f \cdot e^{-\frac{E}{E_o}} \cdot sh\left(\sqrt{\frac{2E}{E_o}}\right), \quad (2)$$

где E – энергия нейтронов в МэВ, $E_o = 1$ МэВ, а k_f – коэффициент нормировки для нейтронов деления и монохромное нейтронное излучение с энергией 14 МэВ:

$$\frac{dN_s}{dE} = k_s \cdot e^{-\left(\frac{E-E_s}{0.5E_o}\right)^2}, \quad (3)$$

где $E_s = 14$ МэВ, k_s – коэффициент нормировки для 14 МэВ нейтронов.

За счет того, что время пролета t_r от источника до детектора зависит от энергии

$$t_r \cong R / c\sqrt{2E/m_n} \quad (4)$$

импульс растягивается во времени, где c – скорость света, m_n – масса нейтрона в МэВ (939.6 МэВ), R – расстояние от источника до детектора.

Из соотношений (2)–(4) нетрудно получить оценки плотности потока нейтронов на удалении R от источника нейтронов:

$$\frac{dN_n(t)}{dt} = k_d \cdot \exp\left(-\frac{E(t)}{E_o}\right) \cdot sh\left(\sqrt{\frac{2E(t)}{E_o}}\right) \cdot \frac{2E(t)}{t}, \quad (5a)$$

$$\frac{dN_s}{dt} = k_s \cdot e^{-\left(\frac{E(t)-E_s}{0.5E_o}\right)^2} \cdot \frac{2E(t)}{t}, \quad (5b)$$

где $E(t) = \frac{m_n}{2} \cdot \left(\frac{R}{c \cdot t_r}\right)^2$.

Умножив плотность потока на K_i – коэффициент ионизационных потерь от нейтронов, получим эквивалентную мощность дозы. На рис. 1 и рис. 2 представлены

нормированные зависимости плотностей потока нейтронов и эквивалентной мощности дозы по кремнию для трех случаев. Первый случай соответствует только спектру вида (2), второй – спектру вида (3), а третий комбинация этих двух спектров, при этом вклад 14 МэВ нейтронов составляет всего 20% от общего числа нейтронов. При оценках для коэффициента ионизационных потерь от нейтронов брались данные из работы [8].

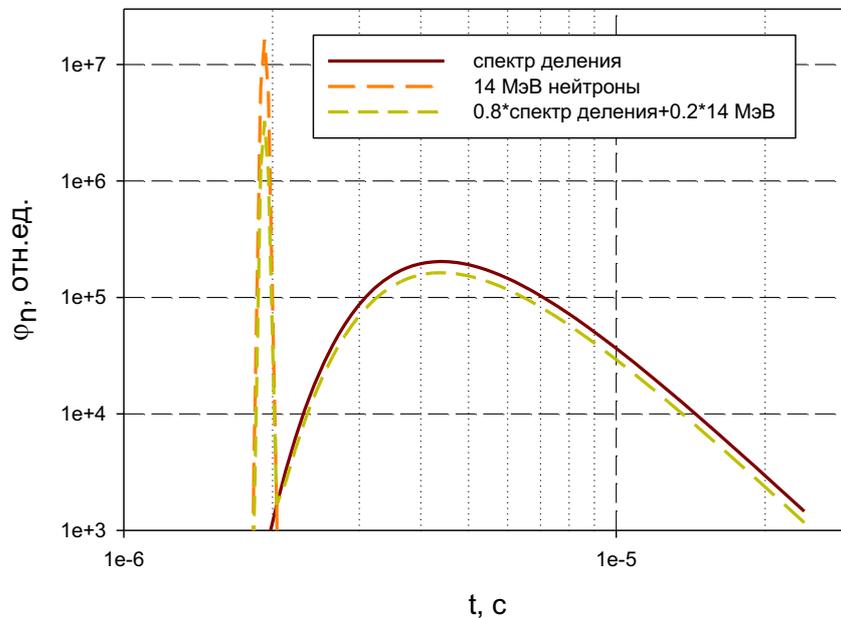


Рис. 1. Относительные значения плотности потоков нейтронов на расстоянии 100 м от точечного источника для разных спектров
Fig. 1. Relative values of the neutron flux density at a distance of 100 m from the point source for different spectra

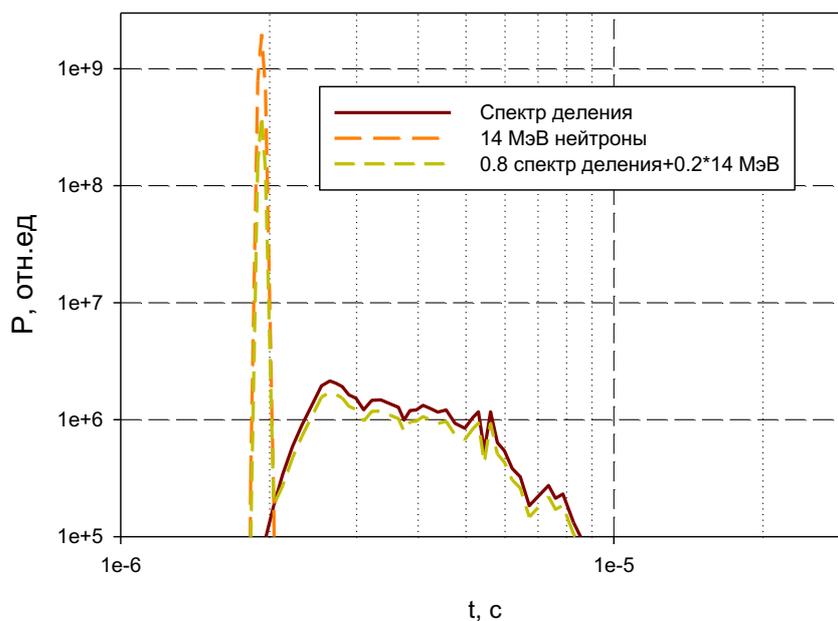


Рис. 2. Относительные значения мощности поглощенной дозы в кремнии при воздействии импульса нейтронов на расстоянии 100 м от точечного источника для разных спектров
Fig. 2. Relative values of the absorbed dose rate in silicon under the influence of a neutron pulse at a distance of 100 m from a point source for different spectra

Из сравнения представленных на рис. 1 и рис. 2 результатов можно сделать следующие выводы:

– отсутствует эквивалентность в амплитудно-временных характеристиках (АВХ) для плотности потока нейтронов и мощности поглощенной дозы. При этом при одной и той же АВХ для плотности потока нейтронов временные зависимости для мощности поглощенной дозы будут отличаться для разных материалов;

– кривые между собой близки только для монохроматического излучения нейтронов;

– происходит существенное уменьшение длительности импульса для немонохроматического излучения по эквивалентной мощности дозы по сравнению с плотностью потока нейтронов;

– форма импульса мощности поглощенной дозы получается неплавной из-за подобной зависимости сечений взаимодействия нейтронов с веществом;

– максимальные значения АВХ для плотности потока и мощности поглощенной дозы не совпадают по времени для немонохроматических излучений;

– фактически максимальное значение мощности поглощенной дозы формируется нейтронами с большими энергиями;

– основные отличия в формах импульса имеют место на «хвостах», когда формируется суммарная доза. При оценках длительности импульса, например, по уровню 0.5, отличия получаются не очень значительными.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что оценка уровней бессбойной работы и/или времени потери работоспособности невозможна, когда расчеты базируются только на АВХ плотностей потока нейтронов. Необходимо дополнительная информация о спектральных характеристиках нейтронного излучения.

В заключении следует отметить, что нейтронный спектр не является фиксированным на различных расстояниях от источника, так как имеют место потери энергии нейтронов при взаимодействии их с веществом, например, с атомами, входящими в состав атмосферы. Однако проведенные оценки на рис. 3 показывают, что на расстояниях порядка 100 м этими изменениями можно пренебречь.

3. Поверхностные ионизационные эффекты

На первый взгляд кажется, что при оценке радиационной стойкости интегральных микросхем и полупроводниковых приборов к эффектам суммарной дозы, обусловленной ионизацией, не должно быть особых проблем. На самом деле, это не так из-за того, что избыточный заряд формируется вторичными частицами – продуктами ядерного рассеяния, которые имеют относительно высокие линейные потери энергии (ЛПЭ). Вследствие этого эффективная поглощенная доза D_e будет несколько меньше суммарной поглощенной дозы за счет процессов первичной рекомбинации электронов и дырок в оксиде кремния:

$$D_e = k_\gamma K_i \Phi_n, \quad (6)$$

где k_γ – коэффициент первичной рекомбинации, величина которого в сильной степени зависит от напряженности электрического поля в оксиде и значений ЛПЭ. На рис. 4 в качестве примера представлены типовые зависимости, представленные в работе [9].

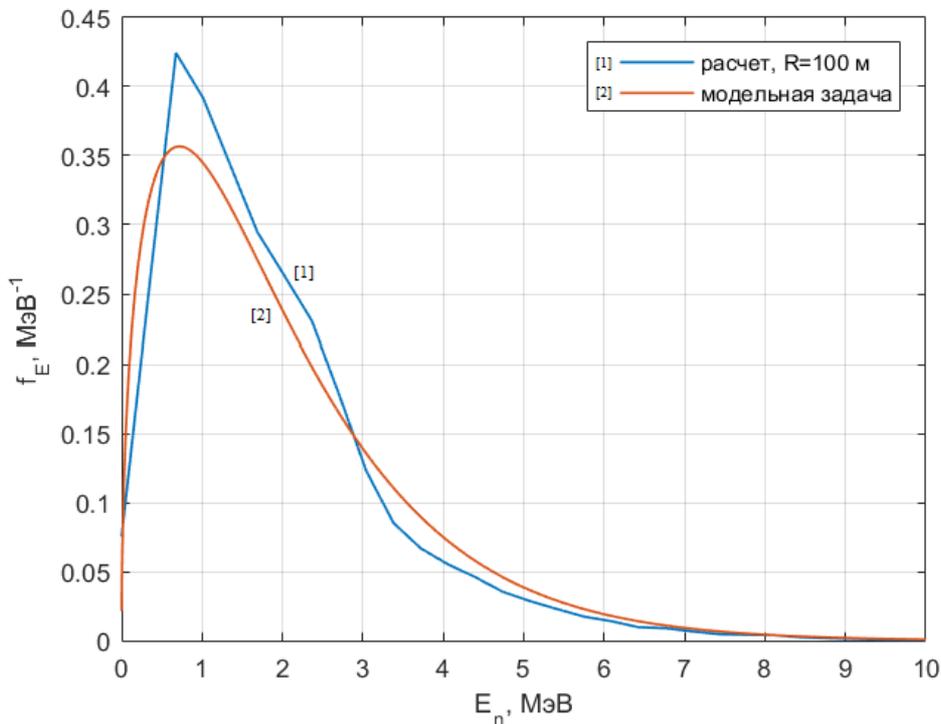


Рис. 3. Расчетные результаты по изменению спектра деления в атмосфере на расстоянии 100 м от точечного источника
 (Fig. 3. Calculated results on the change in the fission spectrum in the atmosphere at a distance of 100 m from the point source)

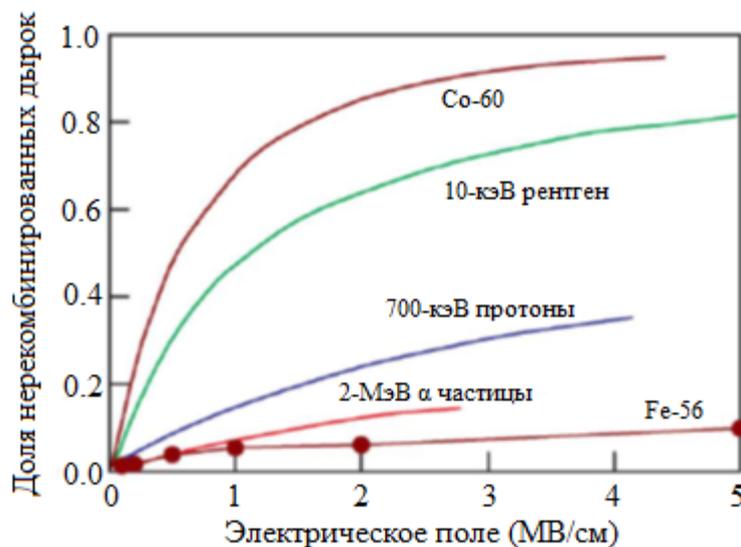


Рис. 4. Зависимости доли оставшихся дырок после процессов первичной рекомбинации от напряженности электрического поля в оксиде кремния [9]
 Fig. 4. Charge yield electric field for Co-60 gamma rays, 10-keV X-rays, 700-keV protons, and 2 MeV α -particles in comparison to the charge yields for Fe ions [9]

Как видно, для получения количественных оценок необходимо определить среднее значение L_z ЛПЭ для вторичных частиц, продуктов взаимодействия нейтронов с

веществом. Достаточно грубая оценка L_z в единицах МэВ·см²/мг может быть проведена из следующего соотношения:

$$L_z \approx 6.25 \cdot 10^4 \cdot K_i / (\Sigma_n R_s), \quad (7)$$

где Σ_n – макроскопическое взаимодействие нейтрона с веществом, R_s – средней пробег вторичной частицы.

Например, для спектра деления в кремнии $\Sigma_n \approx 0.16$ 1/см, $K_i \approx 5 \cdot 10^{-11}$ рад (Si)-нейтрон/см² и, положив $R_s \approx 1$ мкм, получим значение $L_z \approx 0.2$ МэВ·см²/мг. Даже при таких достаточно грубых оценках получаем, что отличия в эффективных дозах при воздействии гамма-излучения и нейтронов при одной и той же суммарной поглощенной дозе составляет величину около порядка. Для 14 МэВ нейтронов эти различия еще будут более существенными.

С учетом того, что для спектра деления всегда присутствует сопутствующее гамма-излучение с эквивалентной мощностью дозы порядка 1 рад (Si)/с на плотность потока нейтронов с уровнем около 10^9 нейтрон/(см²·с), можно уверенно пренебрегать вкладом нейтронного излучения в поверхностные радиационные эффекты. Только при воздействии «чистых» нейтронов синтеза этот вклад в ряде случаев надо учитывать. При этом надо иметь в виду, что эффективная суммарная доза по эффектам в оксидах кремния электронных изделий будет на два и более порядка меньше, чем следует из оценок суммарной поглощенной дозы.

4. Одиночные радиационные эффекты

Одиночные радиационные эффекты возникают в изделиях электронной техники при воздействии нейтронов за счет локального энерговыделения вторичными частицами – продуктами взаимодействия нейтронов с веществом. Проведенный анализ показывает, что в общем случае в интересующем диапазоне энергий нейтронов можно выделить три области энергий [10]:

- 0.1...2 МэВ – энерговыделение производят только первично выбитые атомы за счет упругого рассеяния нейтронов; см ВЫШЕ вначале введение ...
- 2...5 МэВ – энерговыделение производят только атомы Si за счет упругого и неупругого рассеяний;
- 5...15 МэВ – энерговыделение производят атомы Si за счет упругого и неупругого рассеяний, а также тяжелые вторичные ядерные частицы – продукты ядерных реакций.

Хотя ядерные реакции и начинаются в кремнии с энергий выше 4.2 МэВ, но сечение их до 5 МэВ достаточно малое, что позволяет в этой области их не учитывать.

В современных СБИС с проектными нормами менее 90 нм используется медная металлизация, что потенциально может приводить к генерации вторичных частиц, образующихся в меди. Однако в этом случае энергетика тяжелых ядерных частиц будет достаточно низкая (менее 1 МэВ), что с учетом их малых пробегов и более значимой доли энергии, затрачиваемой на структурные повреждения, приведут к незначительному вкладу в общую чувствительность. Возможным механизмом в этом случае, приводящим к ОРЭ, будет ионизация вторичными альфа-частицами, но, по сути дела, этот механизм будет проявляться и для других более лёгких материалов (кремний, алюминий).

Оценку чувствительности к одиночным радиационным эффектам можно проводить на основе BGR функции или используя более простые полуаналитические модели [11]. В любом случае при использовании подобных подходов необходимо определение двух независимых параметров, которые могут быть оценены из независимых экспериментов.

Наиболее информативными будут эксперименты, проведенные при двух энергиях нейтронов. Анализ показывает, что наиболее подходящим вариантом является облучение моноэнергетичными нейтронами синтеза с энергиями около 2 МэВ и 14 МэВ. Подобные условия эксперимента могут быть получены на генераторах нейтронов, например, на генераторе НГ-14 или аналогичных [12].

Заключение

Представленные в настоящей работе результаты, оказывающие влияние на безопасность информационных систем, кратко можно сформулировать следующим образом:

– классический подход по оценке уровней отказов полупроводниковых изделий, основанный на эквивалентности значений энергий, затрачиваемых на структурные повреждения, не применим для изделий с активными чувствительными объемами менее 1 мкм³;

– оценка отказов, обусловленных структурными повреждениями, вследствие создания одной разупорядоченной области в активном объеме, возможна к другим воздействиям, если пересчет проводить с учетом пороговой энергии образования разупорядоченной области;

– форма импульса мощности поглощенной дозы значительно отличается от амплитудно-временных характеристик плотности потока нейтронов из-за сильной зависимости удельных ионизационных потерь от энергии нейтронов;

– оценка уровней дозовых отказов вследствие поверхностных радиационных эффектов по эквивалентности значений суммарной поглощенной дозе приводит к очень значительным ошибкам для нейтронного воздействия из-за малых значений выхода дырок после процессов первичной рекомбинации;

– оценка чувствительности электронных изделий по одиночным радиационным эффектам при воздействии нейтронного излучения произвольного спектра может быть оценена с использованием не менее двух независимых экспериментов при разных энергиях нейтронов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Чумаков А.И. Действие космической радиации на ИС. М.: Радио и связь. 2004. – 320 с.
2. Радиационная стойкость изделий ЭКБ. Научное издание. /Под ред. А.И. Чумакова. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. – 512 с.
3. Measurement and Reporting of Alpha Particle and Terrestrial Cosmic Ray-Induced Soft Errors in Semiconductor Devices. JEDEC Standard No. 89A, Oct 2006, p. 84.
4. Чумаков А.И., Афонин А.В., Полунин В.А. Особенности энерговыделения в микрообъемах элементов СБИС при воздействии нейтронного излучения. Известия ВУЗов. Электроника. 5(97), 2012. С. 5–10.
5. Агаханян Т.М., Аствацатурьян Е.Р., Чумаков А.И. Особенности использования БИС и сверхБИС в аппаратуре ядерного физического эксперимента//Электронные приборы и схемы для экспериментальной физики / Под ред. Т.М. Агаханяна. М.: Энергоатомиздат, 1983. С. 3–9.
6. Agahanyan T.M., Astvacaturyan E.R., Chumakov A.I. On the possibility of controlling non-stationary annealing characteristics in a stationary environment//International Journal of Electronics. 1986. Vol. 61, no. 1. P. 73–78.
7. The Radiation Design Handbook. European Space Agency. ESTEC, Noordwijk, the Netherlands, 1993. – 444 p.
8. Bendel W. Displacement and ionization fractions of fast neutron Kerma in TLDs and Si//IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol. NS-24, no. 6. P. 2516–2521. December 1977. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.1977.4329248>
9. Javanainen A., Schwank J.R., Shaneyfelt M.R. et al. Heavy-Ion Induced Charge Yield in MOSFETs//IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol. 56, no. 6. P. 3367–3371, December 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2009.2033687>.

10. Чумаков А.И. Оценка чувствительности СБИС к одиночным радиационным эффектам при нейтронном воздействии. Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2020. № 2. С. 153–157. DOI: <http://dx.doi.org/10.31114/2078-7707-2020-2-153-157>.
11. Титовец Дмитрий О. и др. Использование функции генерации заряда при оценке параметров чувствительности КМОП микросхем к одиночным сбоям при воздействии нейтронов. Безопасность информационных технологий, [S.I.]. Т. 27, № 3, С. 89–97, 2020. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1295> (дата обращения: 08.09.2020). DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2020.3.08>.
12. Юрков Дмитрий И. и др. Уникальный прототип радиотерапевтической установки: p53- независимый антипролиферативный эффект нейтронного облучения // Acta Naturae (русскоязычная версия). 2019. Т. 11, № 3. С. 33–36. DOI: <http://dx.doi.org/10.32607/20758251-2019-11-3-99-102>.

REFERENCES:

- [1] Chumakov A.I., Effects of Cosmic Radiation on IC, M.: Radio i Svyaz', 2004. – 319 p. (in Russian).
- [2] Radiation resistance of ECB products. /Under red. A.I. Chumakov. M.: NRNU MEPhI, 2015. – 512 p. (in Russian).
- [3] Measurement and Reporting of Alpha Particle and Terrestrial Cosmic Ray-Induced Soft Errors in Semiconductor Devices. JEDEC Standard No. 89A, Oct 2006, p. 84.
- [4] Chumakov A.I., Afonin A.V. Polunin V.A. Features of energy release in microvolumes of VLSI elements upon the effect of neutron radiation Russian Microelectronics. Vol. 42, Issue 7, December 2013. P. 424–427.
- [5] Agahanyan T.M., Astvacaturyan E.R., Chumakov A.I. Features of the use of LSI and VLSI in the equipment of a nuclear physics experiment. M.: Atomenergoizdat, 1983. P. 3–9 (in Russian).
- [6] Agahanyan T.M., Astvacaturyan E.R., Chumakov A.I. On the possibility of controlling non-stationary annealing characteristics in a stationary environment//International Journal of Electronics. 1986. Vol. 61, no. 1. P. 73–78.
- [7] The Radiation Design Handbook. European Space Agency. ESTEC, Noordwijk, the Netherlands, 1993. – 444 p.
- [8] Bendel W. Displacement and ionization fractions of fast neutron Kerma in TLDs and Si//IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol. NS-24, no. 6. P. 2516–2521. December 1977. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.1977.4329248>.
- [9] Javanainen A., Schwank J. R., Shaneyfelt M. R. et al. Heavy-Ion Induced Charge Yield in MOSFETs//IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol. 56, no. 6. P. 3367–3371, December 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2009.2033687>.
- [10] Chumakov A.I. Estimation of Single Event Effect Sensitivity in VLSI to Neutron Irradiation. Problemy razrabotki perspektivnih micro- i nanoelectronnih system (MES). 2020, no. 2. P. 153–157. DOI: <http://dx.doi.org/10.31114/2078-7707-2020-2-153-157> (in Russian).
- [11] Titovets Dmitry O. et al. Evaluating CMOS chip sensitivity parameters to single event upsets under influence of neutrons by the burst generation rate function. IT Security (Russia), [S.I.]. Vol. 27, no. 3. P. 89–97, 2020. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1295> (accessed: 08.09.2020). DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2020.3.08> (in Russian).
- [12] Yurkov D.I. et al. The unique prototype of a radiotherapy unit: p53-independent antiproliferative effect under neutron irradiation. // Acta Naturae (Russian edition). 2019. Vol. 11, no. 3. P. 33–36. DOI: <http://dx.doi.org/10.32607/20758251-2019-11-3-99-102> (in Russian).

*Поступила в редакцию – 22 февраля 2021 г. Окончательный вариант – 05 апреля 2021 г.
Received – February 22, 2021. The final version – April 05, 2021.*