

Александр И. Чумаков
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия
e-mail: aichum@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6270-2663>

ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ МЕТОДОВ ПРИ ОЦЕНКЕ
ПАРАМЕТРОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ БИС К ЭФФЕКТАМ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2019.3.05>

Аннотация. В работе проводится анализ применимости методов оценки параметров чувствительности БИС по одиночным радиационным эффектам (ОРЭ) с использованием сфокусированного лазерного излучения пикосекундной длительности с целью расширения их применения для субмикронных БИС. Проведено сравнение структуры трека тяжелой заряженной частицы и области ионизации полупроводниковой структуры при облучении сфокусированным лазерным излучением. Показано, что сравнение геометрических размеров необходимо проводить за времена формирования ионизационной реакции, когда область ионизации трека расширяется за счет амбиполярной диффузии. Определены ограничения, обусловленные влиянием оптических неоднородностей, расположенных на поверхности кристалла БИС, а также при облучении с донной стороны кристалла. Показано, что лазерные методы могут быть применимы для оценки зависимостей сечений одиночных радиационных эффектов в функции линейных потерь энергии (ЛПЭ) для полупроводниковых структур с размерами, существенно меньшими, чем диаметр сфокусированного лазерного излучения. Представлены дополнительные возможности лазерных методов, позволяющие определять области возникновения ОРЭ, исследовать влияние режима и эффективность методов парирования ОРЭ. Представленные результаты позволяют использовать методы оценки параметров чувствительности по ОРЭ на основе сфокусированного ЛИ для БИС с глубоко субмикронными размерами.

Ключевые слова: одиночные радиационные эффекты, сфокусированное лазерное излучение, параметры чувствительности.

Для цитирования: ЧУМАКОВ, Александр И. ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ МЕТОДОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ БИС К ЭФФЕКТАМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ. *Безопасность информационных технологий*, [S.l.], v. 26, n. 3, p. 58-67. 2019. ISSN 2074-7136. Доступно на: <<https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1217>>. Дата доступа: 11 sep. 2019. doi:<http://dx.doi.org/10.26583/bit.2019.3.05>.

Alexander I. Chumakov
National Research Nuclear University MEPHI,
Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 115409, Russia
e-mail: aichum@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6270-2663>

Possibilities and limitations of focused laser technique application for SEE sensitivity parameters estimation

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2019.3.05>

Abstract. The paper analyzes the applicability of methods for estimating the parameters of the VLSI sensitivity by single radiation effects (SEE) using focused laser radiation of picosecond duration in order to expand their application for submicron VLSI. A comparison of ionization track structure from a heavy charged particle and the ionization region of a semiconductor structure under focused laser radiation is made. It is shown that the comparison of geometric dimensions should be carried out during the ionization reaction, when the ionization region of the track expands due to ambipolar diffusion. Limitations due to the influence of optical inhomogeneities located on the surface of the VLSI chip, as well as under irradiation from the bottom side of the chip are determined. It is shown that laser methods can be applied to estimate the dependences of cross sections of single radiation effects as a function of

linear energy transfer (LET) for semiconductor structures with sizes significantly smaller than the diameter of the focused laser radiation. Additional features of laser methods are presented to determine the SEE location on chip surface and to study the influence of the electrical mode and the effectiveness of SEE parry methods. The presented results allow the use of laser technique to estimate SEE sensitivity parameters estimation for deep submicron VLSI.

Keywords: single event effects, focused picosecond laser beam, SEE sensitivity parameters.

For citation: Chumakov, Alexander I. Possibilities and limitations of focused laser technique application for SEE sensitivity parameters estimation. IT Security (Russia), [S.l.], v. 26, n. 3, p. 58-67. 2019. ISSN 2074-7136. Available at: <<https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1217>>. Date accessed: 11 sep. 2019. doi:<http://dx.doi.org/10.26583/bit.2019.3.05>.

Введение

Современные изделия микроэлектроники имеют высокую чувствительность к эффектам воздействия тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), что во многих случаях приводит к потере информации и функциональным сбоям электронной аппаратуры [1-3]. Подобное поведение больших интегральных микросхем (БИС) создает определенные трудности при построении радиоэлектронной аппаратуры космического пространства из-за возникновения в них одиночных радиационных эффектов (ОРЭ) типа отказов или сбоев. Поэтому с целью парирования нежелательных ОРЭ, приводящих к потере информации, проводят оценку чувствительности БИС к воздействию ТЗЧ на ускорителях ионов. Однако экспериментальная оценка параметров чувствительности БИС по ОРЭ, к которым относятся сечение, насыщение и пороговые значения линейных потерь энергии (ЛПЭ), подобным методом имеет ряд существенных недостатков, связанных как с экономическими факторами, так и собственно с научно-техническими проблемами. В данном случае, например, невозможно точное определение местоположения чувствительной области на кристалле ИС, фактически крайне затруднительно проведение испытаний при отрицательных температурах, очень неэффективными оказываются исследования по влиянию различных режимов и условий эксплуатации на бессбойное функционирование электронной аппаратуры и т.п.

Альтернативой является метод экспериментальных исследований, основанный на применении сфокусированного лазерного излучения (ЛИ) пикосекундной длительности [4-7]. Метод основан на том, что с помощью ЛИ пытаются в полупроводниковой структуре смоделировать пространственно-временное распределение избыточных носителей заряда, такое же, как и при прохождении ТЗЧ. Однако совершенно очевидно, что сделать полную эквивалентность на этом физическом уровне не представляется возможным в силу принципиальных различий в физике взаимодействия оптического излучения и ТЗЧ с материалами полупроводниковой структурой. При этом во многих случаях удается достичь эквивалентности на электрическом уровне, проявляющейся в тождественности возникающих электрических сигналов как внутри БИС, так и на ее выводах. В принципе этого достаточно для корректного моделирования эффектов воздействия ТЗЧ с помощью сфокусированного лазерного излучения.

Следует также сразу отметить, что лазерное излучение не позволяет моделировать все типы возникающих ОРЭ, в частности, эффекты, связанные с ионизацией диэлектрических структур или с образованием радиационных дефектов кристаллической решетки полупроводника типа «спайков» [2].

1. Формирование «трека ТЗЧ» оптическим излучением

В основе моделирования сфокусированным лазерным излучением эффектов воздействия ТЗЧ лежит возможность генерации локального заряда внутри отдельной

полупроводниковой чувствительной области по аналогии с ионизацией внутри трека при прохождении ТЗЧ. Однако в силу физических ограничений минимальный размер оптического пятна ограничен длиной волны и характеристиками фокусирующей системы. Предельно достижимый минимальный диаметр сфокусированного лазерного излучения d_e определяется из соотношения [4]:

$$d_e = 4\lambda f / \pi d_l; \quad (1)$$

где λ - длина волны; f - фокусное расстояние объектива, d_l - диаметр фокусирующей линзы.

Таким образом, для получения минимального радиуса фокусирующего пятна на поверхности кристалла БИС необходимо увеличивать диаметр линзы и уменьшать фокусное расстояние. Однако при этом возрастает угол расходимости оптического излучения, что приводит к заметному увеличению диаметра пятна по мере отдаления от точки фокусировки. С учетом того что в современных БИС имеется большая неопределенность в толщинах пассивирующего окисла, необходимо обеспечить, как минимум, относительно слабую расходимость оптического излучения на длине не менее $L_p \sim 10$ мкм. В этом случае получим, что минимальный диаметр сфокусированного лазерного излучения ограничивается следующим образом:

$$d_e \geq (4\lambda L_p / \pi K_l)^{1/2}; \quad (2)$$

где K_l – допустимый коэффициент увеличения диаметра лазерного пятна на расстоянии L_p от места глубокой фокусировки.

Несложно заметить, что для длины волны в районе $\lambda \approx 1.0$ мкм оптимальный диаметр оптического пятна лежит в районе 2...3 мкм.

Наилучшие характеристики лазерного излучения для фокусировки имеют место при гауссовой форме распределения интенсивности излучения в зависимости от радиуса

$$I(r) = I_0 \cdot \exp \left[-\left(r/r_{l0} \right)^2 \right] \quad (3)$$

где I_0 – интенсивность лазерного излучения в центре гауссова пучка; r_{l0} – характерный радиус лазерного пучка. Это исходное распределение и будет определять размеры начального «трека ТЗЧ».

Существуют также ограничения на минимальный размер длины фокусного расстояния. На него накладываается с одной стороны конечная толщина самой линзы (чем больше диаметр линзы, тем она толще), а с другой – необходимость фокусировки ЛИ на поверхность кристалла БИС, находящихся в корпусах. Исходя из этих ограничений, значение f не может быть менее 10 мм.

При воздействии ТЗЧ геометрические размеры области ионизации несколько иные. В первом приближении, радиальное распределение дозы вокруг трека ТЗЧ описывается следующей приближенной зависимостью [8]:

$$D(r) \approx D_0 \cdot (r_0/r)^2, \quad (4)$$

где D_0 и r_0 – коэффициенты аппроксимаций. Величина D_0 определяется в первую очередь значениями ЛПЭ, а радиус r_0 с типовым значением около долей нм зависит от приведенной на нуклон энергии ТЗЧ.

Исходя из этих соображений, на первый взгляд, кажется невозможным моделирование сфокусированным лазерным излучением треков ТЗЧ, радиус которых в значительной степени определяется пробегами вторичных электронов и существенно меньше характерных размеров сфокусированного оптического пятна ЛИ. Однако, как будет показано ниже, данное обстоятельство во многих случаях не оказывает заметного влияния на конечный результат, а именно оценку параметров чувствительности по одиночным эффектам сбоев и отказов при воздействии ТЗЧ.

2. Влияние геометрических факторов

Из представленных соотношений (3) и (4) для форм распределения генерированных излучением избыточных носителей заряда следует, что напрямую их сравнить сложно. Хотя надо отметить, что в ряде программ физико-топологического моделирования типа TCAD для описания распределения вторичных электронов вдоль оси трека также используется гауссово распределение, правда с совершенно другой величиной характерного радиуса трека. Ясно только одно, что исходный радиус при прохождении ТЗЧ лежит в районе нескольких нм, тогда как оптический радиус около 1 мкм.

На самом деле подобное сравнение не является корректным. Дело в том, что в конечном итоге нас интересует электрический отклик полупроводниковой структуры на локальную ионизацию. Очевидно, что в этом случае можно не анализировать времена, меньшие характерного времени ионизационной реакции полупроводниковой структуры τ_e . Это время меняется в широких пределах и зависит как от технологии изготовления БИС, так и от самого ОРЭ. Например, по эффектам одиночных сбоев

$$\tau_e \approx R_o \cdot C_{in}, \quad (5)$$

где R_o – сопротивление открытого транзистора, C_{in} - эквивалентная емкость ячейки памяти по входу.

Для технологий 65...90 нм значения R_o могут составлять несколько кОм, а C_{in} лежать около 10 фФ [9]. Таким образом, для приведенных технологий значение τ_e лежит в пределах десятков пс, а за это время (t) трек, созданный ТЗЧ, за счет процессов амбиполярной диффузии расплывается, и распределение концентрации избыточных электронно-дырочных пар приближенно описывается следующим соотношением:

$$n(r, t) \approx \frac{L_z \cdot \rho}{4\pi \cdot \epsilon_i \cdot D_a \cdot t} \exp\left(-\frac{r^2}{4D_a \cdot t}\right); \quad (6)$$

где L_z – линейные потери энергии ТЗЧ; ρ - плотность кремния; ϵ_i - энергия образования одной электронно-дырочной пары; D_a - коэффициент амбиполярной диффузии.

Нетрудно заметить, что за времена порядка сотен пс трек достаточно сильно изменяется по сравнению со своей первоначальной формой (4) и его характерный размер становится порядка $r_t \sim 2\sqrt{D_a \cdot t}$ и составляет уже величину порядка 1 мкм. По сути дела, в диапазоне этих времен уже нельзя говорить об узком исходном треке, проходящем через чувствительную область, а более корректно определять область локальной ионизации, покрывающей отдельную чувствительную область. Следует также отметить, что полученные размеры уже коррелируют с диаметром сфокусированного лазерного излучения (1).

Анализ временных процессов развития одиночных тиристорных эффектов [2, 8] показывает, что для них характерные времена лежат в районе десятков нс. Соответственно, в этом случае величина r_t лежит уже около 10 мкм, что заведомо больше диаметра сфокусированного лазерного излучения.

Отметим, что в этих временных интервалах на распределение концентрации избыточных носителей заметного влияния процессы рекомбинации электронно-дырочных пар не оказывают. Действительно, характерное время рекомбинации Шокли-Рида составляет величины около 1 мкс, а характерное время процессов Оже рекомбинации даже при концентрациях около 10^{19} см⁻³ не меньше единиц нс.

Надо также подчеркнуть, что полученные ограничения на минимальные размеры эффективного трека могут оказаться еще менее жесткими. Действительно, при высоких концентрациях электронно-дырочных пар происходит полное заливание p-n переходов, которые фактически исчезают. В этот период времени дрейфовые процессы переноса

носителей заряда типа эффекта «воронки» несущественны из-за малых размеров чувствительной области. По сути дела, в этом случае имеют место эффекты, похожие на обычные объемные ионизационные эффекты с очень высокими уровнями ионизации. Другими словами, происходит «насыщение» полупроводниковой структуры, и до тех пор, пока она из него не выйдет, отдельных элементов БИС фактически не существует. По этому критерию также можно оценить максимальный эффективный радиус трека r_{max} , исходя из равенства концентраций носителей заряда в базовой области p-n перехода N_b и в треке:

$$r_{max} = \sqrt{\frac{L_z \cdot \rho}{\pi \cdot e \cdot \varepsilon_i \cdot N_b}}; \quad (7)$$

Даже при ЛПЭ на уровне 1 МэВ·см²/мг и типовых концентрациях в подложке $N_b \sim 10^{16}$ см⁻³ получаем значение $r_{max} \approx 1$ мкм. Если же значение ЛПЭ увеличивается практически на два порядка (до значений 80 МэВ·см²/мг), то значение «максимального» радиуса трека уже будет составлять почти 10 мкм. Совершенно очевидно, что в этом случае эквивалентность сфокусированного лазерного излучения и ТЗЧ даже на физическом уровне имеет место.

Таким образом, из представленных результатов следует, что при относительно высоких значениях ЛПЭ (более 5 МэВ·см²/мг) влияние различий в геометрических размерах трека иона и области ионизации сфокусированным лазерным излучением на электрическую реакцию элементов БИС фактически отсутствует при моделировании одиночных радиационных дефектов, вызванных объемной ионизацией.

3. Влияние оптических потерь

Более сильное влияние могут оказать потери ЛИ на различных оптических неоднородностях, находящихся на поверхности кристалла БИС. Действительно, все вышеизложенное относилось к случаю анализа практически «чистой» и прозрачной поверхности кристалла БИС. В реальной ситуации над чувствительными полупроводниковыми элементами находятся слои металлизации поликремния, оксидов и т.п. Совершенно очевидно, что в этом случае формирование сфокусированного оптического пятна будет происходить другим образом. На эти процессы будут влиять эффекты отражений, в том числе и многократных, интерференции, дифракции и т.п. На рис. 1 в качестве примера представлена упрощенная картинка энерговыделения сфокусированного лазерного излучения внутри чувствительного микрообъема (SV) элемента БИС. Как несложно заметить, классическое приближение (соотношения (1) и (3)) в этом случае практически не работает. К наиболее существенным потерям лазерного излучения следует отнести отражение от слоев металлизации (5), поглощения в слоях поликремния (2) и вышележащих слоях высоколегированных полупроводниковых областей (3). Тем не менее часть оптического излучения даже при наличии практически сплошной металлизации может достичь чувствительной области. В основном это будет вторичное излучение за счет внутреннего отражения от верхней поверхности кристалла БИС (6), многократного отражения от многоуровневой металлизации (7); рассеянного ЛИ (8) и отражения его от донной поверхности кристалла (9). Очевидно, что говорить в этом случае о какой-то конкретной величине диаметра сфокусированного ЛИ и о расчетных оценках величины энергии ЛИ внутри чувствительной области не представляется возможным. Возможным выходом из создавшейся ситуации является экспериментальная оценка либо самих этих величин, либо их влияния на конечный результат.

Экспериментальная оценка величины потерь энергии ЛИ, выделенной в чувствительном объеме, возможна по ионизационной реакции БИС в цепи питания в

предположении, что она формируется по всей облучаемой локальной площади кристалла БИС. Именно такой подход лежит в основе локальной лазерной методики для оценки эффективных значений ЛПЭ при воздействии лазерным излучением [10-12].

Однако при использовании данной методики существует ряд ограничений. Одно из них связано с тем, чтобы оптические потери не превышали двух... трех порядков, так как в противном случае возникновение радиационного эффекта возможно за счет переотраженного оптического излучения, которое тяжело сопоставить с исходным сфокусированным лазерным излучением.

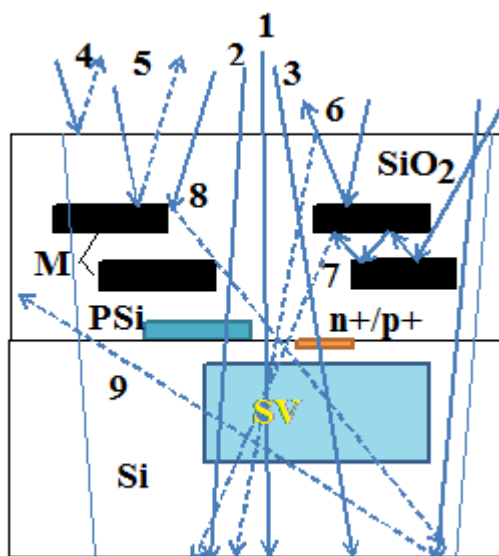


Рис. 1. Энерговыведение ЛИ в чувствительном объеме (SV) элемента БИС при облучении со стороны приборного слоя: 1 – прохождение ЛИ через диоксид кремния с потерями энергии в вышележащих слоях кремния; 2 – дополнительные потери в поликремнии (PSi); 3 – дополнительные потери энергии ЛИ в вышележащих n+/p+ слоях; 4 – отражение ЛИ от поверхности кристалла БИС; 5 – потери энергии ЛИ на слоях металлизации (M); 6 – вторичное ЛИ после внутреннего отражения от поверхности кристалла БИС; 7 – вторичное ЛИ после многократного отражения от многоуровневой металлизации; 8 – рассеяние ЛИ; 9 – отражение ЛИ от донной части кристалла БИС
(Fig. 1. Laser radiation energy losses in the sensitive volume (SV) of VLSI element irradiated by from front chip side: 1 – passing of laser beam through silicon dioxide with energy losses in the upper layers of silicon; 2 – additional losses in polysilicon (PSi); 3 – additional energy losses of laser beam in the upper lying n + / p + layers; 4 – optical reflection from the chip surface; 5 – optical energy losses on the metallization layers (M); 6 – secondary laser radiation after internal reflection from chip surface; 7 – secondary laser radiation after multiple reflection from multi-level metallization; 8 – optical scattering; 9 – laser reflection from the backside of chip)

Другое ограничение обусловлено тем обстоятельством, что в некоторых структурах БИС (например, в некоторых аналоговых и смешанных БИС, в изделиях по КНИ технологии) ионизационный ток может зависеть от местоположения облучаемой локальной области при отсутствии оптических неоднородностей на поверхности кристалла. В этом случае может потребоваться дополнительное сканирование поверхности кристалла БИС локальным рентгеновским воздействием, хотя для КНИ изделий можно обойтись поправочным коэффициентом, учитывающим долю кремневой поверхности.

В случае больших оптических потерь представляется более оправданным переход на облучение сфокусированным (локальным) ЛИ с тыльной стороны кристалла БИС (рис. 2). Очевидно, что в этом случае возрастают потери энергии лазерного излучения в подложке,

особенно, если она является высоколегированной (более $10^{17} \dots 10^{18} \text{ см}^{-3}$), однако это обстоятельство не является существенным, если за счет этих потерь энергии не происходит существенного разогрева кристалла. Достоинством облучения с тыла являются также более равномерные оптические потери ЛИ по всей поверхности БИС, что позволяет во многих случаях использовать одну и ту же величину коэффициента потерь вне зависимости от места расположения области сфокусированного лазерного воздействия.

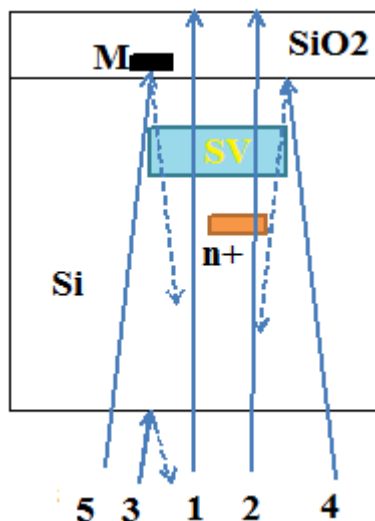


Рис. 2. Энерговыведение ЛИ в чувствительном объеме (SV) элемента БИС при облучении с донной стороны кристалла: 1 – прохождение ЛИ через кремневую подложку с потерями энергии; 2 – дополнительные потери в скрытых n+(p+) слоях; 3 – отражение ЛИ от поверхности кристалла БИС; 4 – вторичное ЛИ после внутреннего отражения от поверхности кристалла БИС; 5 – вторичное ЛИ после внутреннего отражения от металлизации БИС

(Fig. 2. Laser radiation energy losses in the sensitive volume (SV) of VLSI element by backside irradiation: 1 – passing of laser beam through silicon substrate with energy losses; 2 – additional losses in hidden n + / p + layers; 3 – optical reflection from the chip surface; 4 – secondary laser radiation after internal reflection from chip surface; 5 – secondary laser radiation after internal reflection from metallization)

4. Возможности лазерных методов

Лазерным излучением можно смоделировать практически любые ЛПЭ для существующих ядерных частиц. Действительно, в первом приближении можно записать следующую взаимосвязь между энергией лазерного излучения $J_{ли}$ и эффективным значением ЛПЭ L_z [2]:

$$L_z = 1,8 \cdot 10^4 \cdot \alpha_o \cdot J_{ли} \cdot \lambda \cdot (1 - R_\lambda) / (K_l \rho), \quad [\text{МэВ} \cdot \text{см}^2 / \text{мг}], \quad (8)$$

где α_o – коэффициент межзонного поглощения лазерного излучения в $1/\text{см}$; λ – длина волны лазерного излучения в мкм; $J_{ли}$ – энергия лазерного излучения в нДж; R_λ – коэффициент отражения от поверхности ИС; ρ – плотность полупроводника в $\text{мг}/\text{см}^3$; K_l – коэффициент потерь ЛИ на оптических неоднородностях.

Таким образом, за счет изменения энергии ЛИ можно получить любое эквивалентное значение ЛПЭ, а за счет плавной регулировки энергии ЛИ удастся более точно оценить пороговые эквивалентные значения ЛПЭ для возникновения ОРЭ.

Очевидно, что основная проблема заключается в оценке коэффициента K_l . Рекомендуется проводить его оценку с помощью калибровочных испытаний по результатам облучений ионами не менее чем при двух значащихся значениях сечений

одиночных эффектов [13]. Вместе с тем существует возможность его оценки и другими методами с использованием методики локального лазерного облучения, а также за счет применения импульсных и/или стационарных воздействий [14-15].

Оценка сечения насыщения σ_s проводится из результатов сканирования всей площади кристалла БИС (A_{IC}) при относительно высокой энергии (на порядок больше, чем пороговая энергия возникновения ОРЭ) и определения общего количества возникающих ОРЭ N_{SEE} :

$$\sigma_s \approx A_{IC} N_{SEE}/N_I; \quad (9)$$

где N_I – общее количество импульсов ЛИ при сканировании общей поверхности кристалла БИС.

Следует отметить, что соотношение (8) может давать заметную погрешность при относительно малых значениях ЛПЭ (менее 5 МэВ·см²/мг) за счет возможности возникновения одновременно нескольких ОРЭ из-за влияния конечного размера сфокусированного ЛИ. Однако при больших ЛПЭ эти различия исчезают.

Кроме этого, лазерные методы позволяют решить следующие задачи:

- возможность целенаправленного воздействия на интересующие области кристалла БИС;
- исследование влияние электрического и функционального режимов БИС на параметры чувствительности;
- возможность исследования влияния условий эксплуатации (температура, сопутствующая поглощенная доза ионизирующего излучения) на параметры чувствительности;
- отработка мер парирования одиночных радиационных эффектов в составе аппаратуры и т.п.

Действительно, можно воздействовать сфокусированным ЛИ с точностью до долей мкм на определенные участки кристалла БИС для определения наиболее чувствительных элементов и узлов к различным типам ОРЭ. При этом существуют неограниченные возможности по исследованию возникающих эффектов от режима работы, температуры, суммарной дозы и т.п. Например, для тиристорного эффекта можно экспериментально снять зависимость тока в состоянии тиристорного эффекта от координат воздействия ЛИ или карту расположения ОРЭ при разных значениях энергии ЛИ (ЛПЭ). Следует отметить, что только с помощью лазерных методов существуют уникальные возможности по привязке частоты синхронизации БИС к моменту воздействия ЛИ.

5. Заключение

Результаты проведенного анализа позволяют сделать следующие краткие выводы:

- методы оценки параметров чувствительности по ОРЭ на основе сфокусированного ЛИ могут использоваться даже для БИС с глубоко субмикронными размерами;
- основное ограничение применения лазерных методов обусловлено влиянием оптических неоднородностей, расположенных на поверхности кристалла БИС. Данное ограничение может быть устранено при облучении БИС с тыльной стороны;
- эквивалентные значения ЛПЭ могут быть определены как с помощью калибровочных испытаний на ускорителе ионов, так и с применением методики локального лазерного воздействия по ионизационной реакции в цепи питания;
- значения сечений ОРЭ определяются путем сканирования всей площади кристалла и определения общего количества возникающих ОРЭ;

• лазерные методы дают уникальные возможности по определению наиболее уязвимых элементов БИС и исследованиям влияния режимов работы и эксплуатации на чувствительность БИС к воздействию ТЗЧ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ионизирующее излучение космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / Под ред. Г.Г. Райкунова. М.: Физматлит, 2013. – 256 с.
2. Чумаков А.И. Действие космической радиации на ИС. М.: Радио и связь. 2004. – 320 с. URL: < <https://elibrary.ru/item.asp?id=19635287> > (дата обращения: 11.07.2019).
3. Чумаков А.И., Ужегов В.М., Ахметов А.О., Бойченко Д.В., Яненко А.В., Рясной Н.В. Оценка показателей стойкости интегральных схем при воздействии тяжелых заряженных частиц с использованием различных моделей. Безопасность информационных технологий, [S.I.], v. 24, n. 1. P. 73–84, apr. 2017. ISSN 2074-7136. URL: <<https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/58>> (дата обращения: 11.07.2019). DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2017.1.09>.
4. Маврицкий О.Б., Чумаков А.И., Егоров А.Н., Печенкин А.А., Никифоров А.Ю. Технические средства проведения лазерных испытаний полупроводниковых элементов на стойкость к воздействию тяжелых заряженных частиц (Обзор). Приборы и техника эксперимента, № 5, 2016. С. 5–29. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26665034> (дата обращения: 11.07.2019).
5. Чумаков А.И., Печенкин А.А., Егоров А.Н., Маврицкий О.Б., Баранов С.В., Васильев А.Л., Яненко А.В. Методика оценки параметров чувствительности ИС к тиристорному эффекту при воздействии отдельных ядерных частиц. Микроэлектроника, том 37, № 1, 2008. С. 45–51. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9594374> (дата обращения: 11.07.2019).
6. Егоров А.Н., Маврицкий О.Б., Чумаков А.И., Никифоров А.Ю., Телец В.А., Печенкин А.А., Яненко А.В., Кольцов Д.О., Савченков Д.В. Лазерные имитаторы «ПИКО» для испытаний электронной компонентной базы на стойкость к воздействию отдельных ядерных частиц. Спецтехника и связь, № 4-5, 2011. С. 8–13. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17307023> (дата обращения: 11.07.2019).
7. Новиков А.А., Печенкин А.А., Чумаков А.И., Ахметов А.О., Маврицкий О.Б. Испытания ИС на стойкость к воздействию ТЗЧ в диапазоне эксплуатационных температур с использованием лазерных методов. Безопасность информационных технологий, [S.I.], v. 23, n. 3. P. 55–60, oct. 2016. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/18> (дата обращения: 11.07.2019).
8. Waligorski M.R.P., Hamm R.N., Katz R. The radial distribution of dose around the path of a heavy ion in liquid water //Nucl. Tracks and Radiat. Meas. v. 11, 1986. P. 306–319.
9. Pavlov A. CMOS SRAM Circuit Design and Parametric Test in Nano-Scaled Technologies. Springer, 2008. – 193 p.
10. Чумаков А.И., Маврицкий О.Б., Егоров А.Н., Печенкин А.А., Савченков Д.В., Новиков А.А., Васильев А.Л., Яненко А.В. Способ расчетно-экспериментальной оценки радиационной стойкости интегральных схем к воздействию отдельных заряженных частиц, основанный на локальном лазерном облучении. Патент на изобретение RU 2661556 04.07.2017. URL: <<https://elibrary.ru/item.asp?id=37377405>> (дата обращения: 11.07.2019).
11. Chumakov A.I., Pechenkin A.A., Savchenkov D.V., Tararaksin A.S., Vasil'ev A.L., Yanenko A.V. Local Laser Irradiation Technique for SEE Testing of ICs. Proceedings of 2011 12th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems. (RADECS 2011). P. 449–453. URL: < <https://elibrary.ru/item.asp?id=18056923> > (дата обращения: 11.07.2019).
12. Savchenkov D.V., Chumakov A.I., Petrov A.G., Pechenkin A.A., Egorov A.N., Mavritskiy O.B., Yanenko A.V. Study of SEL and SEU in SRAM using different laser techniques. Proceedings of the European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS, art. no. 6937411, (2013). URL: < <https://elibrary.ru/item.asp?id=23980829> > (дата обращения: 11.07.2019).
13. Яненко А.В., Чумаков А.И., Печенкин А.А., Савченков Д.В., Тарараксин А.С., Васильев А.Л. Сравнительный анализ испытаний ЭРИ на стойкость к воздействию отдельных ядерных частиц на лазерных имитаторах и ускорителях ионов Спецтехника и связь, №№4-5, 2011. С. 4–7. URL: < <https://elibrary.ru/item.asp?id=17307022> > (дата обращения: 11.07.2019).
14. Чумаков А.И., Васильев А.Л., Печенкин А.А., Савченков Д.В., Тарараксин А.С., Яненко А. В. Совместное использование лазерной и импульсной гамма_установок при оценке параметров чувствительности БИС к эффектам воздействия отдельных ядерных частиц. Микроэлектроника, т. 41, №4, 2012. С. 243–247. URL: <<https://elibrary.ru/item.asp?id=17745871>> (дата обращения: 11.07.2019).

15. Чумаков А.И. Лазерная методика оценки параметров чувствительности БИС к эффектам воздействия отдельных заряженных частиц. Микроэлектроника. т. 47, № 3, 2018. С. 198–204. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34925085> (дата обращения: 11.07.2019).

REFERENCES:

- [1] Ioniziruyushcheye izlucheniye kosmicheskogo prostranstva i ikh vozdeystviye na bortovuyu apparaturu kosmicheskikh apparatov /Pod red. G.G. Raykunova. M.: Fizmatlit, 2013. – 256 s. (in Russian).
- [2] Chumakov A.I., Deistvie kosmicheskoi radiatsii na IS (Effects of Cosmic Radiation on IC), Moscow: Radio i Svyaz', 2004. – 320 s. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19635287> (accessed: 11.07.2019) (in Russian).
- [3] Chumakov A.I., Uzhegov V.M., Akhmetov O.A., Boychenko D.V., Yanenko A.V., Ryasnoy N.V. Single Event Effects Rate Calculation with Different Models. IT Security (Russia), [S.l.], v. 24, n. 1. P. 73–84, apr. 2017. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/58> (accessed: 11.07.2019). DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2017.1.09> (in Russian).
- [4] Mavritskii O.B., Egorov A.N., Nikiforov A.Y., Chumakov A.I., Pechenkin A.A. Laser Equipment For Hardness Evaluation Of Semiconductor Elements Exposed To Heavy Charged Particles (Review) Instruments and Experimental Techniques. V. 59, № 5, 2016. P. 627–649. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26665034> (accessed: 11.07.2019).
- [5] Chumakov A.I., Pechenkin A.A., Egorov A.N., Mavritskiy O.B., Baranov S.V. Vasil'ev A.L., Yanenko A.V. Estimating IC susceptibility to single-event latchup. Russian Microelectronics, v.37 (1), 2008. P. 41–46. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9594374> (accessed: 11.07.2019).
- [6] Egorov A.N., Mavritskii O.B., Chumakov A.I., Nikiforov A.Y., Телец В.А., Pechenkin A.A., Yanenko A.V., Kol'cov D.O., Savchenkov D.V. Lazernyye imitatory «PICO» dlya ispytaniy elektronnoy komponentnoy bazy na stoykost' k vozdeystviyu otdel'nykh yadernykh chastits. Spetstekhnika i svyaz', № 4-5, 2011. S. 8–13. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17307023> (accessed: 11.07.2019). (in Russian).
- [7] Novikov A.A., Pechenkin A.A., Chumakov A.I., Akhmetov O.A., Mavritskii See laser testing at different temperatures. IT Security (Russia), [S.l.], v. 23, n. 3. P. 55–60, oct. 2016. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/18> (accessed: 11.07.2019) (in Russian).
- [8] Waligorski M.R.P., Hamm R.N., Katz R. The radial distribution of dose around the path of a heavy ion in liquid water. Nucl. Tracks and Radiat. Meas. 1986, v. 11. P. 306–319.
- [9] Pavlov A. CMOS SRAM Circuit Design and Parametric Test in Nano-Scaled Technologies. Springer. 2008. – 193 p.
- [10] Chumakov A.I., Mavritskii O.B., Egorov A.N., Pechenkin A.A., Savchenkov D.V., Novikov A.A., Vasil'ev A.L., Yanenko A.V. Sposob raschetno-eksperimental'noy otsenki radiatsionnoy stoykosti integral'nykh skhem k vozdeystviyu otdel'nykh zaryazhennykh chastits, osnovannyy na lokal'nom lazernom. obluchenii. Patent na izobreteniyе RU 2661556 04.07.2017. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23980829> (accessed: 11.07.2019) (in Russian).
- [11] Chumakov A.I., Pechenkin A.A., Savchenkov D.V., Tararaksin A.S., Vasil'ev A.L., Yanenko A.V. Local Laser Irradiation Technique for SEE Testing of ICs. Proceedings of 2011 12th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems. (RADECS 2011). P. 449–453. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18056923> (accessed: 11.07.2019).
- [12] Savchenkov D.V., Chumakov A.I., Petrov A.G., Pechenkin A.A., Egorov A.N., Mavritskiy O.B., Yanenko A.V. Study of SEL and SEU in SRAM using different laser techniques. Proceedings of the European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS, art. no. 6937411, (2013). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23980829> (accessed: 11.07.2019).
- [13] Yanenko A.V., Chumakov A.I., Pechenkin A.A., Savchenkov D.V., Tararaksin A.S., A Vasil'ev A.L. Sravnitel'nyy analiz ispytaniy ERI na stoykost' k vozdeystviyu otdel'nykh yadernykh chastits na lazernykh imitatorakh i uskoritelyakh ionov Spetstekhnika i svyaz', № 4-5, 2011. S. 4–7. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17307022> (accessed: 11.07.2019) (in Russian).
- [14] Chumakov A.I., Vasil'ev A.L., Pechenkin A.A., Savchenkov D.V., Tararaksin A.S., Yanenko A.V. Single-event-effect sensitivity characterization of LSI circuits with a laser-based and a pulsed gamma-ray testing facilities used in combination. Russian Microelectronics, v. 41, № 4, 2012. P. 221–225. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20472612> (accessed: 11.07.2019).
- [15] Chumakov A.I. Laser method of evaluating parameters of LSI sensitivity to the impact of single ions Russian Microelectronics, v. 47, № 3, 2018. P. 175–180. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35483601> (accessed: 11.07.2019)

*Поступила в редакцию – 05 июля 2019 г. Окончательный вариант – 18 сентября 2019 г.
Received – July 05, 2019. The final version – September 18, 2019.*