

Оценка параметров чувствительности БИС к эффектам воздействия отдельных ядерных частиц с использованием лазерной и импульсной гамма-установок

А.И. Чумаков¹, А.Л. Васильев¹, А.А. Печенкин¹, Д.В. Савченков², А.С. Тарараксин²,
А.В. Яненко²

¹ ОАО «ЭНПО СПЭЛС»

² НИЯУ «МИФИ», dvsav@spels.ru

Аннотация — Представлены результаты расчетно-экспериментальных оценок эквивалентных значений линейных потерь энергии (ЛПЭ) тяжелых заряженных частиц по чувствительности БИС к локальным радиационным эффектам с использованием методики локального лазерного облучения. В работе обоснована возможность пересчета энергии лазерного излучения в эквивалентные значения ЛПЭ с использованием результатов измерений ионизационного отклика на импульсных гамма-установках. В предлагаемой методике устранены погрешности, обусловленные неопределенностью электрофизических характеристик полупроводниковых структур.

Ключевые слова — одиночные эффекты, дозовые эффекты, метод локального лазерного облучения.

1. ВВЕДЕНИЕ

Применение высокоинтегрированных изделий микроэлектроники в радиоэлектронной аппаратуре космических аппаратов делает крайне актуальной задачу по оценке их стойкости к эффектам воздействия отдельных заряженных частиц (ОЗЧ) – высокоэнергичных протонов и тяжелых заряженных частиц [1]-[3]. Возникающие локальные радиационные эффекты типа сбоев или отказов в ряде случаев приводят к функциональным отказам работы всего космического аппарата.

Обычно минимальный набор параметров чувствительности для каждого типа локального радиационного эффекта в большой интегральной схеме (БИС) включает в себя такие параметры, как сечение насыщения и пороговые значения линейных потерь энергии (ЛПЭ). Традиционные методы оценки параметров чувствительности базируются на проведении испытаний на ускорителях ионов или протонов [1]-[3]. Вместе с тем, эти методы являются трудоемкими, дорогостоящими и не позволяют в силу стохастической природы взаимодействия ионизирующего излучения с веществом целенаправленно исследовать отдельные фрагменты

БИС. Альтернативой являются методы, основанные на применении сфокусированного лазерного излучения [4]-[5]. Однако из-за неопределенности в электрофизических параметрах полупроводниковых структур (в частности, типа проводимости подложки БИС) погрешность оценки эквивалентных значений линейных потерь энергии (ЛПЭ) может достигать 40%.

Оценка эквивалентных значений ЛПЭ может быть проведена с помощью измерения энергии сфокусированного лазерного излучения и ионизационной реакции в цепях питания при локальном лазерном воздействии [6] (рис. 1):

$$L_z \approx 9.1 \cdot 10^9 \frac{J_o}{J_u} \cdot \frac{C \cdot \Delta U_{\max}}{L_{e_max}} \left(1 + \frac{R_{in}}{R_t} \right) \cdot \frac{K'_m}{K_m}, \quad (1)$$

где J_o – значение энергии лазерного излучения, приведенное к сфокусированному значению; J_u – энергия лазерного излучения при измерении амплитуды ионизационной реакции в цепи питания ΔU_{\max} на токосъемном резисторе R_t ; $C=C_{in}+C_l$ – величина суммарной емкости ИС и измерительной оснастки (внешних цепей), C_{in} – величина эквивалентной внутренней емкости ИС; C_l – эквивалентная емкость внешних измерительных цепей; R_t – величина токосъемного резистора, R_{in} – величина эквивалентного внутреннего сопротивления ИС; K'_m – коэффициент потерь лазерного излучения на оптических неоднородностях при измерении ионизационной реакции в цепи питания; K_m – коэффициент потерь лазерного излучения на

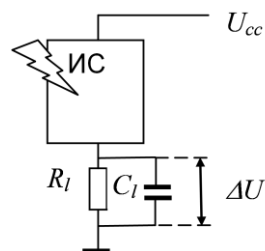


Рис. 1. Измерение ионизационной реакции ИС в цепи питания.

оптических неоднородностях при оценке ЛПЭ; L_{e_max} – максимальное значение эффективной длины собирания носителей заряда из подложки.

Именно неопределенности в величине L_{e_max} дают основную погрешность при оценке эффективных значений ЛПЭ. Действительно, из представленных в работе [6] результатов следует, что при неопределенности типа подложки (n- или p- типа) различия в величине L_{e_max} составляют величину, равную отношению коэффициентов диффузии:

$$\delta \approx \sqrt{D_n / D_p}, \quad (2)$$

где D_n, D_p – коэффициенты диффузии для подложки n- и p- типов. Вторая существенная погрешность связана с возможностью применения эпитаксиальных пленок или тонкопленочных структур, например, в КНИ БИС. Естественно, возникает вопрос о возможности повышения точности оценок ЛПЭ.

II. ИОНИЗАЦИОННАЯ РЕАКЦИЯ БИС

Результаты предыдущего анализа [6] выявили, что ионизационная реакция в БИС формируется как интегрированная реакция большой совокупности множества p-n переходов, которую без большой потери точности можно промоделировать одним большим p-n переходом. Результаты моделирования ионизационной реакции при воздействии импульса ионизирующего излучения длительностью 70 пс для отдельного p-n перехода площадью 100×100 мкм² и для пяти p-n переходов площадью 100×10 мкм² и расстоянием между ними 10 мкм показаны на рис. 2. Видно, что ионизационные токи для этих двух случаев практически совпадают.

Поэтому при локальном воздействии импульсным ионизирующим излучением можем записать:

$$\Delta I(t) \approx q \cdot g_o \cdot P_g \cdot A_g \cdot L_g(t), \quad (3)$$

где ΔI – ионизационный ток в цепи питания; g_o – скорость генерации носителей заряда в кремнии; q – заряд электрона; P_g – мощность дозы импульсного ионизирующего излучения; A_g – площадь кристалла БИС, находящаяся под облучением ($A_g \approx A_{БИС}$ при площади облучения больше площади кристалла БИС – $A_{БИС}$); $L_g(t)$ – значение эффективной длины собирания носителей заряда из подложки; t – текущее время.

В линейном приближении ток в цепи питания определяется процессами собирания заряда с подложки, и его амплитудно-временные характеристики зависят от длительности импульса ионизирующего излучения и от площади зоны облучения. Если происходит облучение всей микросхемы, то при оценках надо использовать несколько уменьшенную площадь кристалла БИС. Действительно, по краям кристалла, как правило, находятся контактные площадки, которые не дают заметного вклада в ионизационный отклик. Оценить их влияние можно вычитанием из общей площади кристалла величины,

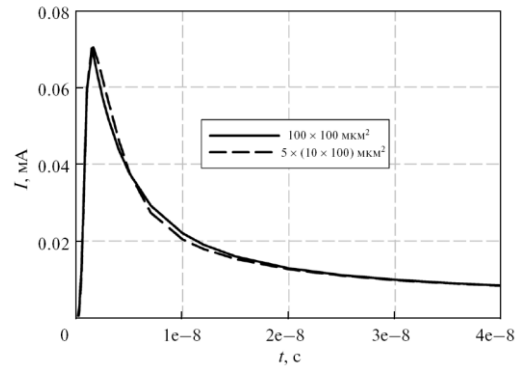


Рис. 2. Осциллограммы ионизационного тока для отдельного p-n перехода и для структуры с пятью p-n переходами, равномерно распределенными по кристаллу при воздействии импульса ионизирующего излучения длительностью 70 пс.

равной периметру кристалла, умноженного на толщину пассивной области (около 30...50 мкм).

За счет интегрирования на внутренних и внешних инерционностях ИС форма ионизационной реакции на токосъемном резисторе не соответствует временной зависимости импульса ионизационного тока:

$$\Delta U_g(t) \approx \frac{R_t}{R_m + R_t} D_g \cdot g_o \cdot q \cdot \frac{1}{C_g} \cdot L_{e_g}(t) \cdot A_g \cdot \exp(-t / RC_g), \quad (4)$$

где D_g – суммарная доза за импульс ионизирующего излучения; C_g – эффективная емкость; $L_{e_g}(t)$ – эффективная длина собирания заряда при формировании ионизационной реакции.

Аналогичное соотношение может быть записано и при оценке ионизационной реакции в случае локального лазерного воздействия на кристалл БИС [6]:

$$\Delta U(t) \approx 10^5 q \cdot g_o \cdot (1 - R_\lambda) \cdot \frac{R_t}{R_m + R_t} \cdot \frac{J_u \cdot \alpha_o \cdot \varepsilon_i}{C_l \cdot K_m \cdot h\nu \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\rho} L_{e_l}(t) \cdot \exp(-t / RC_l), \quad (5)$$

где α_o – коэффициент межзонного поглощения лазерного излучения; J_u – энергия лазерного излучения; R_λ – коэффициент отражения от поверхности ИС; ρ – плотность полупроводника; ε_i – энергия образования одной электронно-дырочной пары (3.6 эВ в кремнии); $h\nu$ – энергия кванта лазерного излучения; K_λ – коэффициент пропорциональности между ЛПЭ и энергией лазерного излучения, $L_{e_l}(t)$ – эффективная длина собирания заряда при формировании ионизационной реакции в случае локального лазерного облучения.

Очевидно, что в общем случае зависимости $L_{e_g}(t)$ и $L_{e_l}(t)$ различаются между собой, в первую очередь, из-за разных амплитудно-временных характеристик импульсов воздействия. Однако эти различия могут быть устранены при полном интегрировании заряда,

т.е. использования больших величин резисторов и емкостей во внешней измерительной цепи.

Анализ показал, что наиболее рациональным является применение «токоємных» низкоиндуктивных резисторов с большими номиналами (несколько кОм). При этом необходимо обеспечить, чтобы ионизационная реакция формировалась в линейной области, т.е. ее амплитуда не должна превышать величину порядка 100 мВ.

III. ОЦЕНКА ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЛПЭ

Если обеспечивается полное интегрирование ионизационного заряда, можем записать, что $L_{e_g_max} = L_{e_l_max}$. С учетом этого условия и соотношений (1), (4) и (5) соотношение для оценки эквивалентного значения ЛПЭ запишется в следующем виде:

$$LET = 6.25 \cdot 10^4 \cdot D_a \cdot A_g \cdot \frac{J_0}{J_u} \cdot \frac{K'_m}{K_m} \cdot \frac{\Delta U_{lm}}{\Delta U_a} \cdot \frac{C_l}{C_a}, \quad (6)$$

где ΔU_{lm} – амплитуда напряжения на интеграторе при лазерном облучении; ΔU_a – амплитуда напряжения на интеграторе при импульсном воздействии ионизирующего излучения. Таким образом, по сравнению с методикой, основанной на соотношении (1), в этом случае необходимо провести дополнительную регистрацию амплитуды ионизационной реакции на импульсной установке. Очевидно, что измерения амплитуд при импульсных воздействиях на лазерной и моделирующей установках необходимо делать в одной оснастке, чтобы убрать неопределенность в значениях емкостей и другой измерительной оснастки.

Более точный анализ с учетом возможного затухания лазерного излучения в подложке и наличия тонкопленочных структур приводит к следующему соотношению

$$LET = 6.25 \cdot 10^4 \cdot D_a \cdot A_g \cdot \frac{J_0}{J_u} \cdot \frac{K'_m}{K_m} \cdot \frac{\Delta U_{lm}}{\Delta U_a} \cdot \frac{C_l}{C_a} \cdot \frac{L_{e_max}}{W_s} \cdot \frac{[1 - \exp(-\alpha_0 \cdot W_s)]}{[1 - \exp(-\alpha_0 \cdot L_e)]}, \quad (7)$$

где W_s – толщина чувствительной области, L_{e_max} – максимальное значение эффективной длины собирания.

Таким образом, если используется лазерное излучение, обеспечивающее относительно равномерное поглощение на глубине нескольких десятков микрометров, или используются БИС с тонкопленочными областями (менее 0.5 мкм), можно использовать соотношение (6). В других случаях необходимо применить более общее соотношение (7).

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальные исследования проводились с применением лазерных установок, имеющих существенно различную длительность импульсов (70 пс и 8 нс) и малогабаритной гамма-установки «АРСА» с длительностью импульса 10 нс. В качестве экспериментальных образцов были выбраны БИС, изготовленные по разным технологиям. Локальное облучение на лазерных имитаторах обеспечивалось с помощью фокусирующей оптической системы, а при облучении на установке «АРСА» с помощью коллиматора диаметром 1.2 мм, изготовленного в свинцовой пластине толщиной 3 мм. Осциллограммы при локальном воздействии получались вычетом сигналов, полученных при облучении через свинцовую пластину с коллиматором и без него.

На рис. 3 представлены характерные осциллограммы ионизационных откликов, полученные при локальном облучении БИС ОЗУ 1635РУ2, изготовленной по объемной КМОП технологии. Нетрудно заметить хорошее соответствие амплитудно-временных характеристик ионизационных реакций для них. Удовлетворительное соответствие было получено также и для БИС, изготовленных с применением эпитаксиальных слоев и КНИ структур.

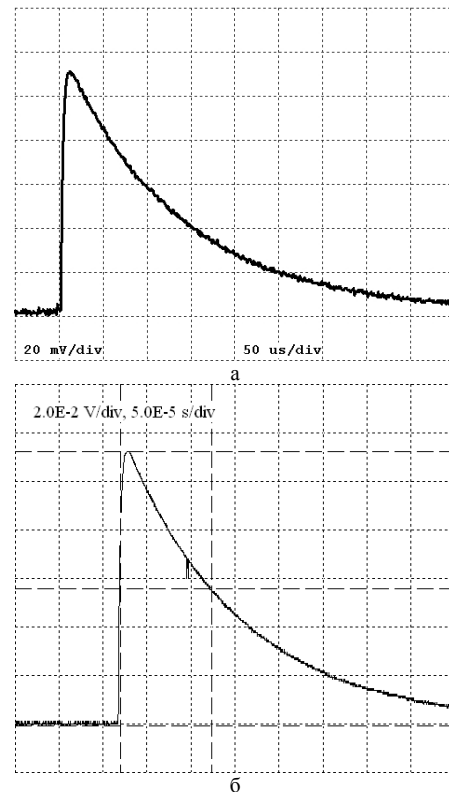


Рис. 3. Осциллограммы импульсов ионизационной реакции в БИС ОЗУ 1892ВМ2Я при локальном облучении на лазерной и гамма-установках: а) $1.2 \cdot 10^9$ рад/с, АРСА; б) 5.7 мкДж, лазер с длиной волны $\lambda = 1.064$ мкм.

С целью оценки изменения коэффициента оптических потерь проводилось сканирование всей площади кристалла. На рис. 4 представлена типовая карта распределения величины, обратной коэффициенту оптических потерь по площади кристалла. Нетрудно заметить, что в центральной области кристалла БИС вариации коэффициента оптических потерь незначительны и составляют величину около 20%. Наибольшие изменения наблюдаются в периферийной части кристалла, там, где имеет место большая неоднородность топологии кристалла БИС и меньшая затененность слоями металлизации.

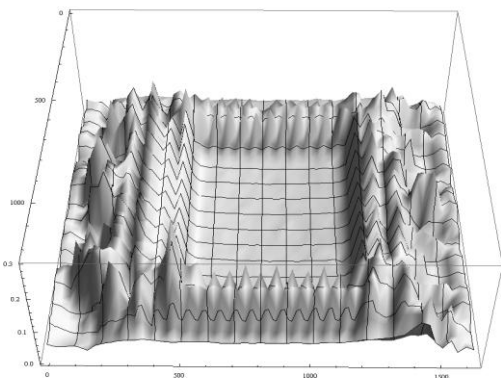


Рис. 4. Типовая карта распределения величины обратной коэффициенту оптических потерь по площади кристалла БИС XC1765.

Экспериментальная проверка возможности применения предлагаемой методики проводилась также и в случае облучения с тыльной стороны кристалла, в частности, для БИС, изготовленных в BGA корпусах с перевернутыми кристаллами. В этом случае была продемонстрирована ее хорошая эффективность.

Кроме того, проводились дополнительные экспериментальные исследования возможности применения однородного гамма-облучения вместо локального воздействия. Проведенные исследования показали, что для большинства БИС существенных различий нет. Вместе с тем, в ряде ИС с существенно неоднородными элементами (например, АЦП) могут иметь место заметные отличия. В этом случае необходимо проводить локальное облучение как на лазерной, так и на гамма-установках.

Проведенные оценки значений ЛПЭ для ряда БИС с различной технологией показали удовлетворительное соответствие с результатами, получаемыми при испытаниях на ускорителях ионов. На рис. 5 показана зависимость сечения ОЭ от ЛПЭ при испытаниях на ускорителе ионов и на лазерном имитаторе для ИС ОЗУ 1635PY2. Хорошая корреляция с результатами испытаний на ионах имела место и для других типов ИС, а именно: BU-61580G3-192, DS1631AU, 5890BM1T.

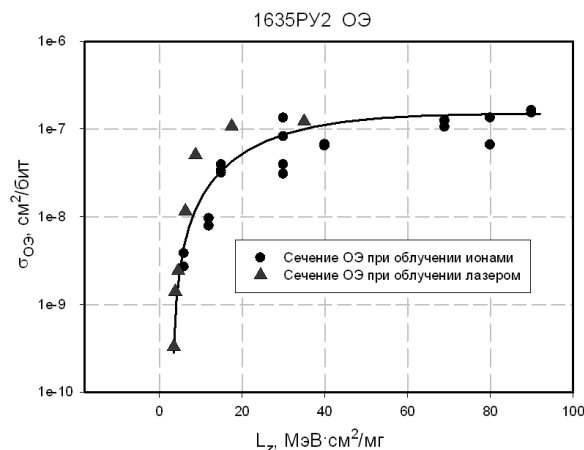


Рис. 5. Зависимость сечения ОЭ от ЛПЭ при облучении на ускорителе ионов и на лазерном имитаторе для ИС ОЗУ 1635PY2.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе обоснована методика оценки эквивалентных значений линейных потерь энергии по результатам облучения кристалла БИС локальным лазерным излучением и гамма-импульсом. Методика может быть распространена для проведения испытаний БИС на стойкость к воздействию ТЗЧ и основана на пересчете энергии лазерного излучения в эквивалентные значения ЛПЭ с использованием результатов измерений пороговой энергии для возникновения эффекта и характеристик ионизационной реакции в цепи питания БИС. В предлагаемой методике устранены погрешности, обусловленные заданием числовых параметров взаимодействия оптического излучения с полупроводниковыми структурами и неопределенностью характеристик полупроводниковых структур.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Messenger G. C., Ash M. S. Single Event Phenomena. N. Y.: Chapman&Hall, 1997. 368 p.
- [2] The Radiation Design Handbook. European Space Agency. ESTEC, Noordwijk, the Nederland, 1993. 444 p.
- [3] Чумаков А.И. Действие космической радиации на ИС. М.: Радио и связь. 2004. 320 с.
- [4] Pouget V. Fundamentals of laser SEE testing and recent trends // RALFDAY 2009, EADS France, Suresnes, 11th September.
- [5] Методика оценки параметров чувствительности ИС к тиристорному эффекту при воздействии отдельных ядерных частиц / Чумаков А. И., Печенкин А. А., Егоров А. Н., Маврицкий О. Б., Баранов С. В., Васильев А. Л., Яненко А.В. // Микроэлектроника. 2008. Т. 37. № 1. С. 45–51.
- [6] Чумаков А. И. Взаимосвязь эквивалентных значений линейных потерь энергии тяжелых заряженных частиц и энергии сфокусированного лазерного излучения // Микроэлектроника. 2011. Т. 40. № 3. С. 163–169.