
**ВОЗДЕЙСТВИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ
НА ИЗДЕЛИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

УДК 621.382

**СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ И ИМПУЛЬСНОЙ
ГАММА-УСТАНОВОК ПРИ ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ БИС К ЭФФЕКТАМ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ОТДЕЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ**

© 2012 г. А. И. Чумаков, А. Л. Васильев, А. А. Печенкин, Д. В. Савченков,
А. С. Тарараксин, А. В. Яненко

ОАО “ЭНПО Специализированные электронные системы”
Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
E-mail: Aichum@spels.ru

Поступила в редакцию 16.12.2011 г.

Представлены результаты расчетно-экспериментальных оценок эквивалентных значений линейных потерь энергии (ЛПЭ) тяжелых заряженных частиц по чувствительности БИС к одиночным 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.

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) – высокоэнергетичных протонов и тяжелых заряженных частиц [1–3]. Возникающие одиночные радиационные эффекты типа сбоя или отказов, несмотря на относительно невысокую вероятность появления в реальных условиях эксплуатации, тем не менее, 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 трудоемки, дорогостоящи 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 [4–6]. Однако из-за неопределенности в электрофизических параметрах полупроводниковых структур (в частности, типа проводимости подложки БИС) погрешность оценки эквивалентных значений линейных потерь энергии может достигать 40%.

Действительно, оценка эквивалентных значений ЛПЭ может быть приведена с помощью следующего соотношения [7]:

$$L_z \approx 9.1 \times 10^9 \frac{J_o C \Delta U_{\max}}{J_u L_{e_max}} \left(1 + \frac{R_{in}}{R_t} \right) \frac{K'_m}{K_m}, \quad [\text{МэВ см}^2/\text{мг}], \quad (1)$$

где J_o – значение энергии лазерного излучения для возникновения эффекта, 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 сум-

марной емкости, C_{in} – величина эквивалентной внутренней емкости БИС; 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 оптических неоднородностях при оценке ЛПЭ $K'_m \approx K_m$ при измерении в одной и той же чувствительной области; L_{e_max} — максимальное значение эффективной длины собирания носителей заряда.

Именно неопределенности в величине L_{e_max} дают основную погрешность при оценке эффективных значений ЛПЭ. Действительно, из представленных в работе [7] 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 слоев или тонкопленочных структур, например, в КНИ БИС. Естественно возникает вопрос о возможности повышения точности оценок ЛПЭ.

2. ИОНИЗАЦИОННАЯ РЕАКЦИЯ БИС

Результаты предыдущего анализа выявили [7], что ионизационная реакция в БИС формируется как интегрированная реакция большой совокупности множества p - n переходов, которую без существенной потери точности можно промоделировать одним большим p - n переходом. Поэто-

му при локальном воздействии импульсным ионизирующим излучением можем записать:

$$\Delta I(t) \approx qg_o P_g A_g L_g(t), \quad (3)$$

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 ($A_g \approx A_{\text{БИС}}$ при площади облучения больше площади кристалла БИС — $A_{\text{БИС}}$); $L_g(t)$ — 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. Учесть их влияние можно вычитанием из общей площади кристалла величины, равной периметру кристалла, умноженного на толщину пассивной области (около 30–50 мкм).

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

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

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 [7]:

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

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; $L_{e_l}(t)$ — 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.

Ограничения на величины используемых резисторов и конденсаторов легко могут быть получены из анализа особенностей формирования ионизационного тока. При относительно коротких импульсах воздействия (менее 10–50 нс) самая большая временная составляющая обусловлена временем жизни неосновных носителей заряда в подложке, величина которой может достигать нескольких микросекунд. Поэтому постоянная интегрирования должна быть, по крайней мере, больше 10 микросекунд.

Анализ показывает, что в современных БИС с площадью кристалла около 1 см² типовое значение эффективной емкости составляет величину около 10 нФ. Поэтому эффективная емкость не может быть меньше этой величины. В принципе значение этой емкости можно увеличивать, что приведет к уменьшению амплитуды регистриру-

емого сигнала, но этот путь не является оптимальным.

Более рационально применение “токосяемых” низкоиндуктивных резисторов с большими номиналами (несколько кОм). При этом необходимо только обеспечить, чтобы ионизационная реакция формировалась в линейной области, т.е. ее амплитуда не должна превышать величину порядка 100 мВ.

3. 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) выражение для оценки эквивалентного значения ЛПЭ запишется в следующем виде:

$$LET = 6.25 \times 10^4 D_a A_g \frac{J_o K'_m \Delta U_{lm} C_l}{J_u K_m \Delta U_a C_a}, \quad [\text{МэВ см}^2/\text{мг}], \quad (6)$$

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 еще 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 различиях в измерительных цепях.

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

$$LET = 6.25 \times 10^4 D_a A_g \frac{J_o K'_m \Delta U_{lm} C_l L_{e_max}}{J_u K_m \Delta U_a C_a W_s} \frac{[1 - \exp(-\alpha_o W_s)]}{[1 - \exp(-\alpha_o L_{e_max})]}, \quad [\text{МэВ см}^2/\text{мг}], \quad (7)$$

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

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).

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальные исследования проводились с применением лазерных установок, имеющих существенно различную длительность им-

пульсов (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 из свинцовой пластине толщиной 3 мм. Осциллограммы при локальном гамма-воздействии получались вычетом сигналов, полученных при облучении через свинцовую пластину с коллиматором и без него.

На рис. 1 представлены характерные осциллограммы ионизационных откликов, полученные при локальном облучении БИС ОЗУ 1635РУ2, изготовленной по объемной КМОП технологии. Нетрудно

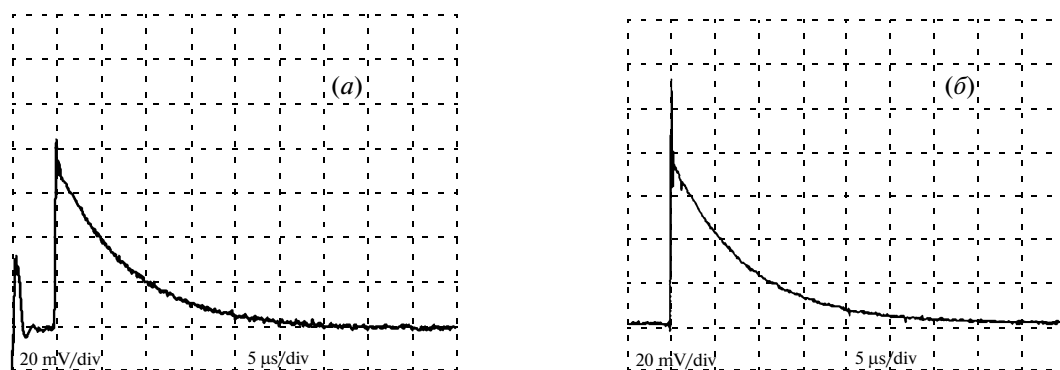


Рис. 1. Осциллограммы импульсов ионизационной реакции в БИС ОЗУ 1635РУ2 при локальном облучении на лазерной и гамма-установках: (а) – 9.1×10^8 рад/с, АРСА; (б) – 600 мкДж, лазер с длиной волны $\lambda = 1.064$ мкм.

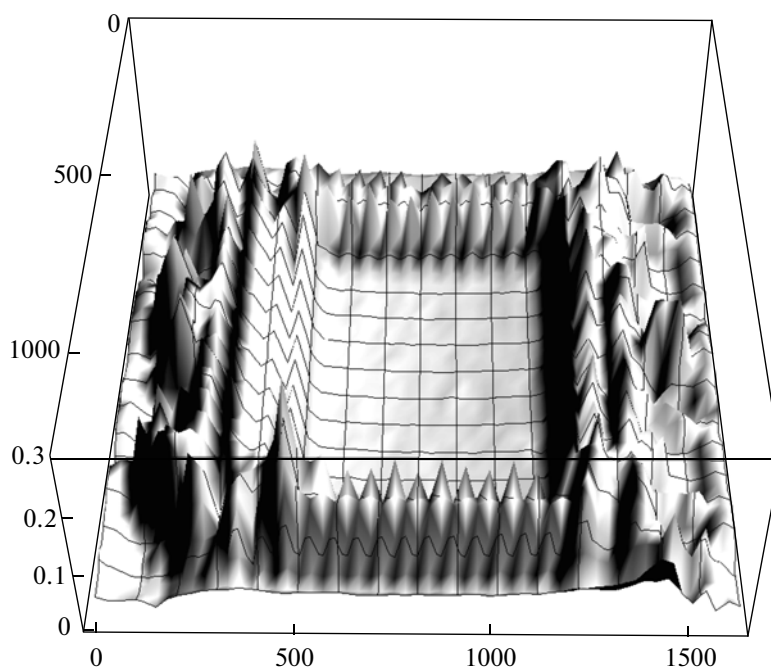


Рис. 2. Типовая карта распределения величины обратной коэффициенту оптических потерь по площади кристалла БИС XC1765.

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.

С целью оценки изменения коэффициента оптических потерь на лазерных имитаторах проводилось сканирование всей площади кристалла. На рис. 2 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 имеют место в периферийной части кристалла, там, где имеет место большая неоднородность топологии кристалла БИС и меньшая затененность слоями металлизации.

Экспериментальная проверка возможности применения предлагаемой методики проводилась также и в случае облучения с тыльной стороны кристалла, в частности, для БИС, изготовленных в ВГА корпусах с перевернутыми кристаллами. В этом случае также была продемонстрирована ее хорошая эффективность (рис. 3).

Дополнительные экспериментальные исследования проводились с целью возможности применения однородного гамма-облучения вместо локального воздействия. Проведенные исследования показали, что для большинства БИС существенных различий нет (рис. 4). Вместе с тем в ряде БИС с существенно неоднородными элементами (например, АЦП) могут иметь заметные отличия. В этом случае необходимо проводить локальное облучение как на лазерной, так и на гамма-установках.

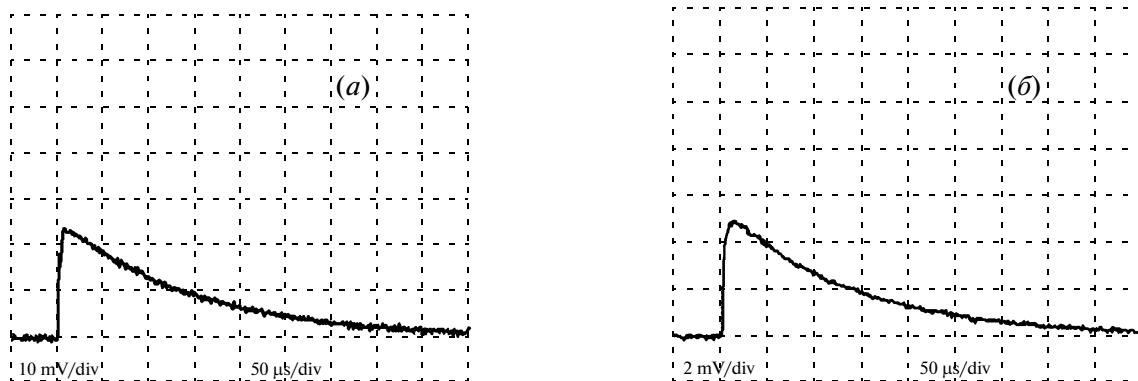
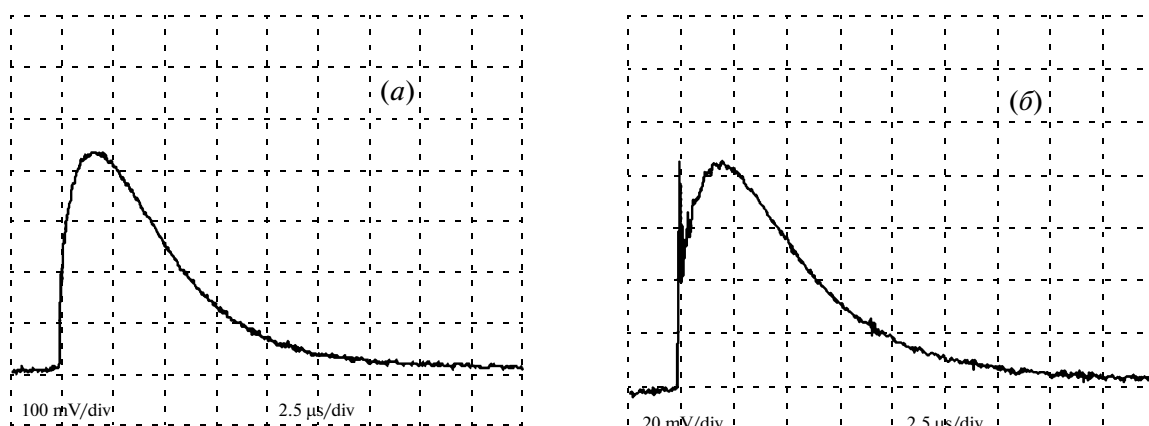


Рис. 3. Осциллограммы импульсов ионизационной реакции в БИС ПЛИС XQV600-4CB при локальном облучении на лазерной и гамма-установке с тыльной стороны кристалла: (а) – 4.2×10^8 рад/с, АРСА; (б) – 7.0 мкДж, лазер с длиной волны $\lambda = 1.064$ мкм.



1×10^8 рад/с, однородное облучение

3×10^8 рад/с, локальное облучение

Рис. 4. Сравнение ионизационной реакции при однородном и локальном гамма-облучениях кристалла БИС ОЗУ К6R4008С: (а) – 1×10^8 рад/с; (б) – 3×10^8 рад/с.

Приведенные оценки значений ЛПЭ для ряда БИС с различной технологией показали удовлетворительное соответствие с результатами, получаемых при испытаниях на ускорителях ионов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе обоснована методика оценки эквивалентных значений линейных потерь энергии по результатам облучения кристалла БИС локальным лазерным излучением и гамма-импульсом. Методика 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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, September 11.
5. Чумаков А.И., Егоров А.Н., Маврицкий О.Б., Яненко А.В. Возможности использования локального лазерного излучения для моделирования эффектов от воздействия отдельных ядерных частиц в ИС // Микроэлектроника. 2004. Т. 33. № 2. С. 128–133.
6. 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. 2008. Т. 37. № 1. С. 45–51.
7. 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.