

Оценка параметров чувствительности БИС по одиночным эффектам с помощью лазерного излучения

А.И. Чумаков

ОАО «ЭНПО СПЭЛС», aichum@spels.ru

Аннотация - Представлены результаты расчетных оценок эквивалентных значений линейных потерь энергии тяжелых заряженных частиц и сечений из результатов экспериментальных исследований по чувствительности БИС к локальным радиационным эффектам с использованием методики локального лазерного облучения.

Ключевые слова — одиночные эффекты, радиация, локально лазерное излучение, БИС.

I. ВВЕДЕНИЕ

Применение современных изделий микроэлектроники в электронной аппаратуре космических аппаратов делает крайне актуальной задачу по оценке их стойкости к эффектам воздействия отдельных заряженных частиц (ОЗЧ) – от излучений низкоинтенсивных потоков высокоэнергетичных протонов и тяжелых заряженных частиц [1-3]. Возникающие локальные радиационные эффекты типа сбоев или отказов, несмотря на их относительно невысокую вероятность появления в реальных условиях эксплуатации, тем не менее, в ряде случаев приводят к функциональным отказам работы всего космического аппарата.

Как правило, 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.

II. ЛАЗЕРНАЯ МЕТОДИКА

Альтернативными средствами являются методы, основанные на применении сфокусированного лазерного излучения [4,5]. В первом приближении, эквивалентная величина ЛПЭ без учета эффектов

двухфононого поглощения может быть оценена следующим образом [3]:

$$L_z \approx \alpha_o \cdot (1 - R_\lambda) \cdot \frac{J_{ли}}{K_m} \cdot \frac{\varepsilon_i}{h\nu} \cdot \frac{1}{\rho} = \frac{K_\lambda}{K_m} \cdot J_{ли}, \quad (1)$$

где α_o - коэффициент межзонного поглощения лазерного излучения; $J_{ли}$ - энергия лазерного излучения; R_λ - коэффициент отражения от поверхности ИС; K_m - коэффициент потерь лазерного излучения на оптических неоднородностях (слоях металлизации и поликремния); 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.

Применение методов, основанных на использовании сфокусированного лазерного излучения, имеет существенные ограничения в БИС из-за наличия в них многослойной металлизации, которая покрывает значительную часть поверхности кристалла. Существует относительно высокая вероятность «холостых» выстрелов лазерного излучения, когда оптическое излучение практически полностью поглощается/отражается в защитном окисле и слоях металлизации. В этом случае более эффективной оказывается методика локального лазерного воздействия [5].

Методика применения локального лазерного излучения основана на сканировании всей поверхности кристалла БИС и подсчета общего количества имеющих место локальных радиационных эффектов - $N_{лз}$. При этом за счет более широкого диаметра оптического пятна удается проинтегрировать оптические неоднородности и пользоваться неким усредненным коэффициентом оптических потерь. По результатам экспериментальных исследований могут быть определены эквивалентные значения линейных потерь энергии L_z и сечений наблюдаемых эффектов $\sigma_{лз}$ из соотношений:

$$L_z \approx K_\lambda \cdot J_{ли} / K_m; \quad (2)$$

$$\sigma_{лз} = A_{лз} \cdot N_{лз} / N_I; \quad (3)$$

где $J_{л,л}$ - значение энергии лазерного излучения, приведенное к сфокусированному значению; $A_{ис}$ - площадь кристалла БИС; M_l - общее количество импульсов лазерного излучения при сканировании всей поверхности кристалла БИС. Таким образом, необходимым условием оценки эквивалентных значений ЛПЭ является определение коэффициента оптических потерь K_m .

III. ИОНИЗАЦИОННАЯ РЕАКЦИЯ В ЦЕПИ ПИТАНИЯ

Реальная структура БИС представляет множество р–п переходов, приводя к формированию сложного распределения токов и потенциалов внутри структуры. В случае локального лазерного облучения за счет переотражений, дифракции и т.п. часть оптического излучения достигает активных полупроводниковых структур, формируя ионизационную реакцию. Если рассматривать общую ионизационную реакцию в цепи питания, то можно предположить что она будет формироваться в БИС как интегрированная реакция, как будто облучается один «большой» р–п переход [6].

Проверка этого предположения проводилась путем численного моделирования ионизационной реакции полупроводниковых структур, состоящих из множества р–п переходов, расположенных на разных расстояниях друг от друга. Результаты проведенного анализа выявили, что вплоть до расстояний между переходами порядка 10 мкм заметных различий в реакции структуры не наблюдается. На рис. 1 в качестве примера представлены результаты моделирования ионизационного тока при воздействии импульса ионизирующего излучения длительностью 70 пс для отдельного р–п перехода площадью 100×100 мкм² и структуры, состоящей из пяти р–п переходов длиной 100 мкм и шириной 10 мкм с расстояниями между ними, равными также 10 мкм.

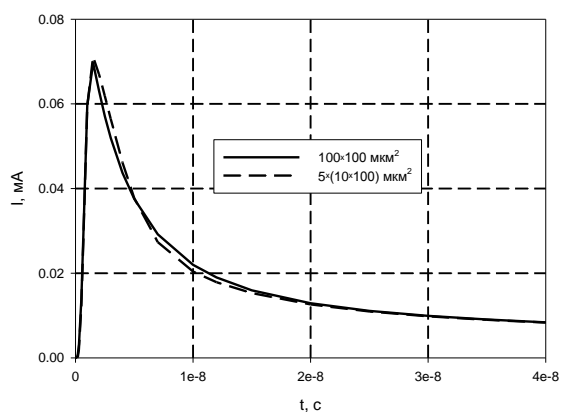


Рис. 1. Ионизационный ток в отдельном р–п переходе и в структуре с пятью р–п переходами при воздействии импульса излучения длительностью 70 пс

Небольшие отличия имеют место только на начальном участке при временах менее 1 нс. Однако этот участок не оказывает существенного влияния на условия возникновения сбоев и отказов в БИС, так как в этом диапазоне временных интервалов происходит интегрирование ионизационного тока при формировании ионизационной реакции отдельным элементом в составе БИС.

Следует также отметить, что условия переключения элементов БИС при воздействии отдельных заряженных частиц определяются не эквивалентностью параметров характеристик импульсов ионизационного тока, а достижением импульса напряжения некоторого критического значения. Поэтому в области малых времен происходит интегрирование тока на внутренних и внешних емкостях БИС, вследствие чего и еще «уравнивание» процессов формирования ионизационной реакции.

Вторая возможная причина создания отличий в характере ионизационной реакции обусловлена возможными неравномерностями объемной ионизации полупроводниковой структуры за счет теневых эффектов, создаваемых полосками ионизации. Проведенные ранее исследования по адекватности лазерных имитационных методов [7] более подробно исследовали эту задачу, и было выяснено, что формально задача сводится к введению коэффициента потерь оптического излучения за счет создания теневых эффектов слоями металлизации.

Важный результат, который получился в ходе расчетного моделирования, связан с независимостью характеристик интегрированной ионизационной реакции БИС от значения локальной площади зоны облучения, при условии, что не будут иметь место нелинейные эффекты, обусловленные как поглощением оптического излучения в материалах, так и самими ионизационными эффектами.

Представленные результаты были подтверждены в ходе экспериментальных исследований, когда проводилось сканирование поверхности кристалла разных БИС импульсным пучком с диаметром, равным 1 мм. Никаких заметных изменений в характере ионизационной реакции при изменении области воздействия в зависимости от местоположения на кристалле БИС обнаружено не было. Совершенно очевидно, что этот результат справедлив только для объемных БИС с приблизительно однородными элементами, выполненными по субмикронным проектным нормам. При наличии элементов неоднородности, занимающих значительную площадь, например, конденсаторов, мощных выходных транзисторов и т.п. характер ионизационной реакции может изменяться в этих областях.

Таким образом, проведенный анализ позволяет заключить, что при оценках коэффициента оптических потерь K_m можно использовать допущение о независимости ионизационной реакции в цепи питания от местоположения зоны облучения для большинства БИС, выполненных по объемной технологии. В этом случае можно провести оценку K_m из сравнения расчетных и экспериментальных амплитудно-временных характеристик ионизационной реакции в цепи питания при локальном облучении части кристалла БИС. В линейном приближении ионизационный ток в цепи питания ΔI определяется процессами собирания заряда с подложки:

$$\Delta I(t) \approx q \cdot g_o \cdot (1 - R_\lambda) \cdot \frac{J_u}{T_p} \cdot \frac{\alpha_o}{K_m} \cdot \frac{\varepsilon_i}{hv} \cdot \frac{10^{-2}}{10^{-7} \rho} L(t), \quad (4)$$

где g_o – скорость генерации носителей заряда в кремнии; T_p – длительность импульса лазерного излучения; J_u – энергия лазерного излучения; K_m – коэффициент потерь лазерного излучения на оптических неоднородностях при измерении ионизационной реакции в цепи питания; $L(t)$ – значение эффективной длины собирания носителей заряда из подложки; t – текущее время.

За счет интегрирования на внутренних и внешних инерционностях ИС форма ионизационной реакции на токосъемном резисторе может быть оценена из соотношения [6]:

$$\Delta U(t) \approx \frac{R_t}{R_{in} + R_t} \cdot \frac{\exp(-t/RC)}{C} \cdot \int_0^t \exp(x/RC) \cdot \Delta I(x) dx \quad (5)$$

где R_t – величина токосъемного резистора, R_{in} – величина эквивалентного внутреннего сопротивления ИС; $C = C_{in} + C_l$ – величина суммарной емкости ИС и измерительной оснастки (внешних цепей), C_{in} – величина эквивалентной внутренней емкости ИС; C_l – эквивалентная емкость внешних измерительных цепей; $RC = (R_{in} + R_t) C$ – эквивалентная постоянная времени. Важно подчеркнуть, что в современных БИС величина C_{in} может составлять несколько нФ, поэтому ее влиянием нельзя пренебрегать.

С учетом соотношений (4) - (5) оценка ионизационной реакции может быть представлена в следующем виде:

$$\Delta U(t) \approx 10^5 q \cdot g_o \cdot (1 - R_\lambda) \cdot \frac{R_t}{R_{in} + R_t} \cdot \frac{J_u}{C} \cdot \frac{\alpha_o}{K_m} \cdot \frac{\varepsilon_i}{hv} \cdot \frac{1}{\rho} L_e(t), \quad (6)$$

где $L_e(t)$ – эффективная длина собирания носителей заряда, определяемая с учетом интегрирования ионизационного тока на внутренних и внешних инерционностях.

На рис. 2 в качестве примера представлены результаты моделирования изменения эффективной длины собирания носителей заряда во времени для подложки р-типа с уровнем легирования равным

$1.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, при внешнем напряжении на р-п переходе, равным 0, времени жизни неосновных носителей заряда, равным 2 мкс, и воздействии импульса ионизирующего излучения с эффективной длительностью 70 пс. Результаты моделирования показывают, что амплитудно-временные характеристики в сильной степени определяются параметрами эквивалентной RC-цепи и при одинаковых значениях постоянной времени формы импульсов не отличаются друг от друга.

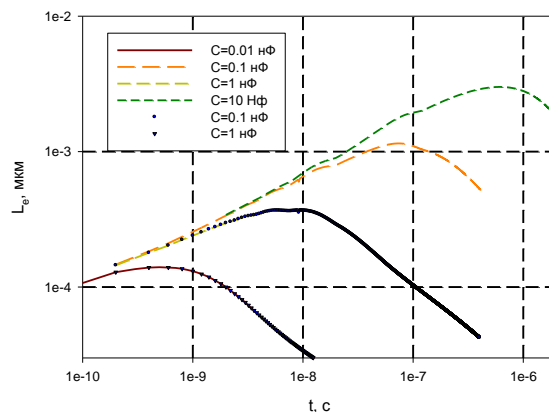


Рис. 2. Изменение эффективной длины во времени для полупроводниковой структуры при воздействии импульса ионизирующего излучения длительностью 70 пс и разных значениях C : кривые $R=100$ Ом, символы $R=10$ Ом

Таким образом, из анализа ионизационной реакции можно провести оценку ряда необходимых параметров. Например, проведя измерения ионизационной реакции БИС при локальном лазерном облучении и разных значениях внешних элементах R_t и C_l , можно из величины длительности импульса (рис. 3) определить значения внутренних эквивалентных емкости и резистора и тем самым провести расчетную оценку $\Delta U(t)$.

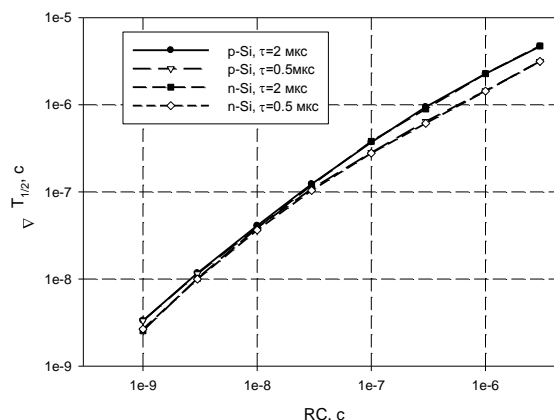


Рис. 3. Изменения длительности импульса ионизационной реакции на полувывсоте в подложках п- и р- типа от величины эквивалентной постоянной времени RC

Полученные результаты, в свою очередь, позволяют определить максимальное значение эффективной длины собирания заряда с подложки L_{e_max} (рис. 4). В дальнейшем на основе полученных параметров из сравнения расчетных и экспериментальных значений амплитуд ионизационной реакции в цепи питания можно оценить значение коэффициента оптических потерь K'_m . Как следует из представленных на рис. 4 зависимостей, значительную погрешность в величине K'_m может дать неопределенность в типе подложки, хотя для большинства современных субмикронных БИС используется подложка р-типа. В случае отсутствия сведений о типе используемой подложки рекомендуется применять среднее значение, при котором погрешность оценок может составлять величину около 30% (штрих-пунктир на рис. 4).

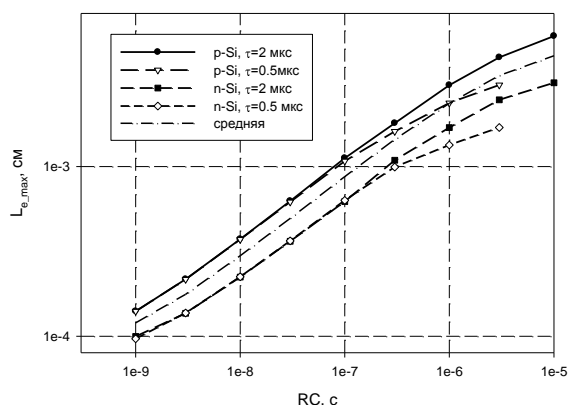


Рис. 4. Зависимость максимальной длины собирания в подложках n- и p- типов от величины эквивалентной постоянной времени RC

Представленные результаты расчетно-экспериментального моделирования позволяют провести оценку эквивалентных значений ЛПЭ с помощью следующего соотношения:

$$L_z = \frac{J_{lu}}{J_u} \cdot \frac{\Delta U_{max}}{L_{e_max}} \left(1 + \frac{R_{in}}{R_t}\right) \cdot \frac{C}{10^5 \cdot q \cdot g_o} \cdot \frac{K'_m}{K_m} \quad (7)$$

Принимая во внимание, что размерность энергии лазерного излучения в данном соотношении не играет роли, значения ЛПЭ в единицах МэВ·см²/мг могут быть определены с использованием следующего соотношения:

$$L_z \approx 9.1 \cdot 10^9 \frac{J_{lu}}{J_u} \cdot \frac{C \cdot \Delta U_{max}}{L_{e_max}} \left(1 + \frac{R_{in}}{R_t}\right) \cdot \frac{K'_m}{K_m} \quad (8)$$

Интересно отметить две характерные особенности представленного соотношения. Если оценку эквивалентных значений ЛПЭ делать по методике локального облучения, то при выборе одной и той же области облучения значения K_m и K'_m будут равны между собой. На это также указывают результаты сканирования поверхности кристалла. Во многих

субмикронных БИС вариации коэффициента оптических потерь незначительны, и ими можно пренебречь. Вторая особенность заключается в том, что в соотношении (8) стоят отношения энергий лазерного излучения, поэтому погрешности в определении коэффициентов поглощения и отражения не влияют на результаты оценок величин ЛПЭ. Важно только одно – чтобы величина длины поглощения лазерного излучения превышала максимальное значение эффективной длины собирания носителей заряда.

Таким образом, предлагаемая методика определения эквивалентных значений по результатам локального лазерного излучения сводится к выполнению следующих основных операций:

- сканирование кристалла БИС по методике локального лазерного облучения с целью определения областей чувствительности и сечений эффектов;
- определение в чувствительных областях пороговых значений энергии лазерного излучения, приведенных к сфокусированному воздействию [5,8];
- измерение ионизационной реакции в исследуемых областях БИС при локальном воздействии лазерного излучения при нескольких значениях внешних резисторов и/или конденсаторов с целью определения эквивалентных значений емкостей и сопротивлений;
- оценка по результатам измерений эффективной длины собирания;
- определение значения ЛПЭ из соотношения (8).

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] 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. Моделирование эффекта «просадки» питания в ИС при воздействии импульса ионизирующего излучения // Микроэлектроника. – 2006. - Т. 35. - №3. - С. 184-190.
- [7] Никифоров А.Ю., Скоробогатов П.К. Физические основы лазерного имитационного моделирования объемных ионизационных эффектов в полупроводниковых приборах и ИС: линейная модель // Микроэлектроника. – 2004. – Т. 33. - №2. - С. 121-132.
- [8] Чумаков А.И., Печенкин А.А., Егоров А.Н. и др. Методика оценки параметров чувствительности ИС к тиристорному эффекту при воздействии отдельных ядерных частиц // Микроэлектроника. – 2008. – Т. 37. - № 1. - С. 45-51.