

# Экспериментальная апробация приближений для лазерных методик исследований ОРЭ

А.И. Чумаков<sup>1,2</sup>, Д.В. Савченков<sup>1,2</sup>, А.А. Печенкин<sup>1,2</sup>, О.Б. Маврицкий<sup>1,2</sup>, А.Н. Егоров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «ЭНПО СПЭЛС»

<sup>2</sup>НИЯУ «МИФИ», [aichum@spels.ru](mailto:aichum@spels.ru)

**Аннотация** — Представлены результаты расчетно-экспериментального моделирования ионизационной реакции тестовых полупроводниковых структур при воздействии сфокусированным и локальным лазерным излучением пикосекундной длительности. Результаты этих исследований необходимы для обоснования возможности применения лазерного излучения для моделирования одиночных радиационных эффектов.

**Ключевые слова** — одиночные эффекты, лазерные методы, линейные потери энергии.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее распространение находят лазерные методы исследования чувствительности СБИС к эффектам воздействия отдельных ядерных частиц. Основная проблема их применения заключается в определении коэффициентов пропорциональности  $K_{Lz} = J_{ли}/L_z$  между энергией лазерного излучения (ЛИ)  $J_{ли}$  и эквивалентными значениями линейных потерь энергии (ЛПЭ)  $L_z$ . Они могут быть выявлены либо путем калибровочных испытаний на ускорителях ионов, либо путем оценки ионизационной реакции СБИС в той же чувствительной области, в которой исследуется одиночный радиационный эффект.

Однако, как правило, полученные коэффициенты пропорциональности  $K_{Lz}$  могут быть использованы только для тех параметров лазерного излучения (диаметр лазерного пятна, длительность и длина волны), которые использовались при проведении калибровочных испытаний. Возникает вопрос о распространении этих коэффициентов на ЛИ с другими параметрами. В настоящей работе представлены результаты расчетно-экспериментального моделирования изменений ионизационной реакции в простейших структурах при различных параметрах локального или сфокусированного лазерного излучения.

### A. Соотношение между лазерной энергией и значениями линейных потерь энергии

Оценка эквивалентности между значениями энергии лазерного излучения и линейными потерями энергии в классическом приближении опирается на следующие допущения [1]:

1) значения энергии ЛИ и ЛПЭ ионов не меняются в пределах чувствительной области (области собирания заряда) вдоль трека ядерной частицы;

2) длительность лазерного импульса очень короткая, т.е. воздействие можно считать дельта-импульсом при оценке ионизационной реакции отдельного элемента СБИС;

3) различия в геометрических размерах трека иона и сфокусированным лазерным излучением внутри чувствительной области элемента СБИС не сильно влияют на коэффициент пропорциональности  $K_{Lz}$ , если за характерное время возникновения одиночного радиационного эффекта (ОРЭ) поперечные размеры «треков» за счет амбиполярной диффузии становятся практически одинаковыми.

В рамках указанных приближений может быть установлена связь между энергией лазерного излучения и значениями ЛПЭ [1]:

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

где  $\alpha_o$  - коэффициент межзонного поглощения лазерного излучения в 1/см;  $\lambda$  - длина волны лазерного излучения в мкм;  $J_{ли}$  - энергия лазерного излучения в нДж;  $R_\lambda$  - коэффициент отражения от поверхности ИС;  $\rho$  - плотность полупроводника в мг/см<sup>3</sup>. В данном соотношении возможность затенения части области облучения металлизацией и неоднородность оптической диэлектрической пленки, которая может приводить к интерференции и дифракции, учтена введением коэффициента оптических потерь  $K_{Is}$ .

Первое ограничение приводит к тому, что длина волны ЛИ при облучении кремневых структур должна быть не менее 850...900 нм. Вместе с тем, в настоящее время в ряде случаев используются лазерное излучение с длиной волны менее 900 нм, что не позволяет уже пользоваться допущением о постоянном значении потерь энергии по глубине чувствительной области. В предельном случае, когда вся энергия ЛИ выделяется в чувствительной области толщиной  $d$ , оценка эквивалентных значений ЛПЭ  $L_{z0}$  должна проводиться с учетом полного поглощения ЛИ в чувствительной области:

$$L_{z0} \approx L_{z\infty} / (\alpha_o \cdot d). \quad (2)$$

Совершенно очевидно, что в диапазоне длин волн ЛИ 530...900 нм реализуется промежуточный случай между этими двумя предельными оценками.

Другое заметное влияние на результаты оценки коэффициентов пропорциональности может оказывать длительность импульса лазерного излучения. Действительно, в общем случае ОПЭ наступает при достижении ионизационной реакции определенного порога помехоустойчивости, относящейся к исследуемому ОПЭ. Очевидно, что воздействие иона представляет из себя дельта-импульс, тогда как лазерное излучение имеет вполне конечную длительность импульса, которая в итоге может повлиять на характеристики ионизационной реакции.

## II. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### A. Методика экспериментальных исследований

Очевидно, что исследование подобных эффектов необходимо проводить на простейших структурах с целью исключения возможного влияния дополнительных эффектов. Поэтому в настоящей работе при отработке экспериментальных методик были выбраны структуры на основе фотодиода ФД-24, р-і-п диода S3590\_03, тестовой структуры, изготовленной по 2 мкм технологии и КМОП ОЗУ емкостью 4 кбит. С целью отработки влияния длительности импульса к этим структурам подключались внешние RC-цепи, моделирующие быстродействие отдельного элемента.

На первом этапе проводилась оценка ионизационной реакции в фотодиоде ФД-24 при воздействии на него локальным лазерным излучением с разными диаметрами оптического пятна, длительностями импульса и длинами волн. В качестве лазерной установки использовались стенды «Пико-4» и «Фемто-Т». Результаты экспериментальных исследований показали непригодность его использования для достижения заявленных целей по трем основным причинам:

- 1) на поверхности фотодиода имеется оптическое покрытие толщиной около 1 мкм, потери ЛИ в котором зависят от длины волны;
- 2) из-за наличия высокоомной подложки происходит омическое ограничение ионизационной реакции при плотностях тока более  $0.01 \text{ А/см}^2$ ;
- 3) из-за наличия относительно большой барьерной емкости фотодиода происходит практически полное интегрирование заряда, что не позволяет исследовать временные зависимости.

На рис. 1 в качестве примера представлены экспериментальные зависимости изменения ионизационной реакции на внешнем резисторе величиной 220 Ом при облучении фотодиода ФД-24 лазерным излучением с длиной волны 870 нм и длительностью 1.5 пс при разных обратных смещениях в зависимости от расстояния объектива до поверхности кристалла. Эта зависимость фактически

характеризует зависимость ионизационной реакции от диаметра оптического пятна.

Анализ полученных результатов позволяет выделить два основных момента:

- уменьшение амплитуды ионизационной реакции в области малых размеров оптического пятна из-за омического ограничения ионизационного тока;
- возрастание тока при увеличении обратного смещения из-за большего вклада дрейфовой компоненты ионизационного тока.

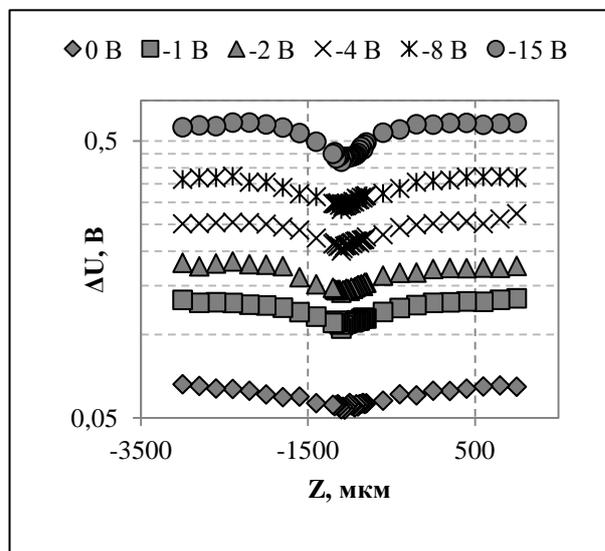


Рис. 1. Изменения амплитуды ионизационной реакции на нагрузке  $R=220 \text{ Ом}$  при облучении фотодиода ФД-24 ЛИ с длиной волны 870 нм и длительностью 1.5 пс

Опыт использования р-і-п диода S3590\_03 для этих же целей в целом показал также отрицательные результаты. Основная причина заключалась в достаточно большой протяженности і-слоя (более 1 мм), из-за чего на результаты измерений очень сильно сказывались времяпролетные эффекты. Вместе с тем на этом объекте был получен важный вывод, что в диапазоне энергий лазерного излучения  $0.1...5 \text{ нДж}$  с длиной волны 870 нм и длительностью 1.5 пс амплитуда ионизационной реакции практически не зависит от диаметра ЛИ при разных обратных смещениях ( $0...64 \text{ В}$ ). Данное обстоятельство экспериментально подтверждает допущение, используемое в методике локального лазерного облучения для исследования ОПЭ [2].

### B. Результаты исследований тестовых структур

Основной объем расчетно-экспериментальных исследований проводился на КМОП тестовых структурах TESTLU, изготовленных по 2 мкм проектным нормам (рис. 2 и рис. 3). На первом этапе исследований стояла задача экспериментальной проверки номограмм, используемых при оценках коэффициента оптических потерь в методике локального лазерного облучения для разных длин волн. Р-п переход карман-подложка облучался на

лазерном источнике ПИКО-4 с длительностью импульса 25 пс с изменяемой длиной волны в диапазоне 700...1000 нм.

В ходе проведения исследований определялись параметры ионизационной реакции (амплитуда  $U_{Rmax}$  и длительность на полувысоте импульса  $\Delta T_{1/2}$ ), которые затем сравнивались с расчетными значениями. Ионизационная реакция тестовой структуры определяется током  $i(t)$ , проинтегрированным RC-цепочкой:

$$U_R(t) = \frac{1}{C} \cdot \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \cdot \int_0^t i(\tau) \cdot \exp\left(\frac{\tau}{RC}\right) d\tau, \quad (3)$$

где  $R$  – токосъемный резистор,  $C$  – емкость ИС. Емкость  $C$  является неизвестной величиной, однако ее можно извлечь из длительности импульса ионизационной реакции на полувысоте  $\Delta T_{1/2}$ .

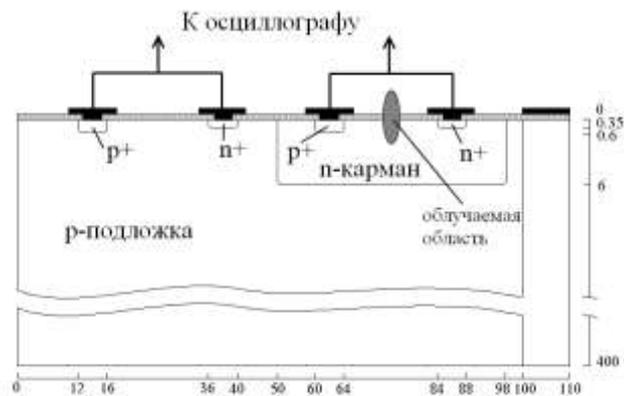


Рис. 2. Вертикальный разрез тестовой тиристорной структуры TESTLU

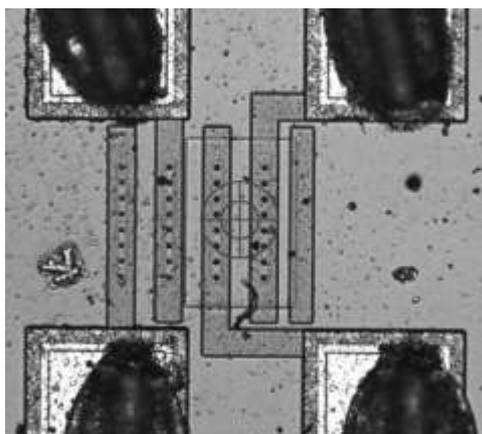


Рис. 3. TESTLU. Область воздействия ЛИ при исследовании ионизационной реакции в тестовой структуре

Экспериментальные и расчетные зависимости на рис. 4 и рис. 5 хорошо согласуются между собой при значении емкости структуры, равном 60 пФ. Коэффициенты потерь (1), оцененные по данным зависимостям, оказались различными для различных длин волн, но, как и ожидалось, близкими к 1.0,

поскольку над областью облучения не было металлизации.

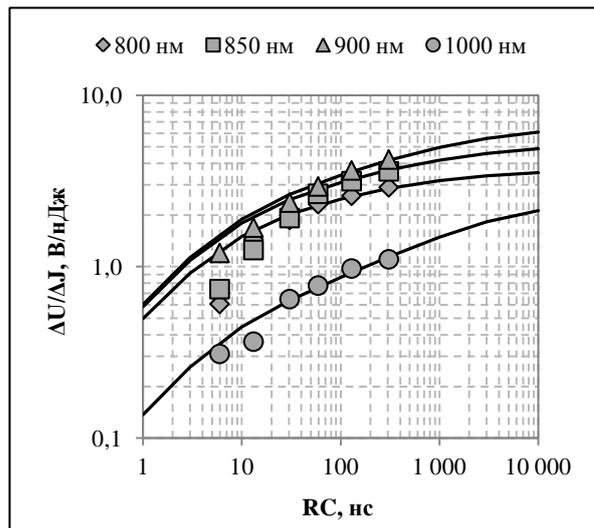


Рис. 4. Экспериментальные и расчетные зависимости амплитуды импульса ионизационной реакции на единицу энергии от  $RC$  для тестовой структуры TESTLU при различных длинах волн лазерного излучения

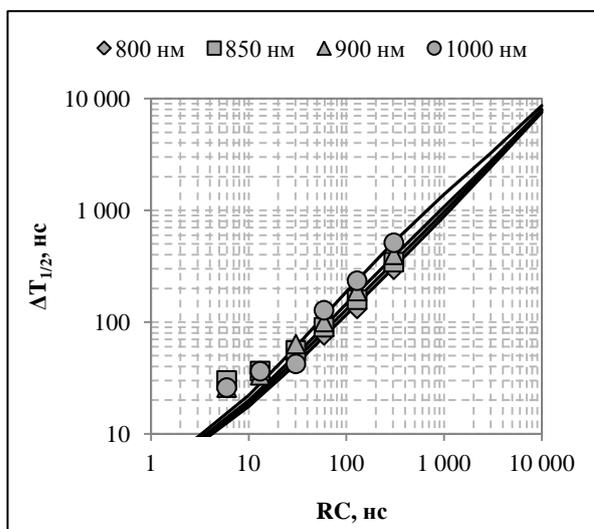


Рис. 5. Экспериментальные и расчетные зависимости длительности импульса ионизационной реакции от  $RC$  для тестовой структуры TESTLU при различных длинах волн лазерного излучения

На следующем этапе были определены пороговые ЛПЭ тиристорного эффекта (ТЭ) для КМОП ОЗУ (537PY6), изготовленного по той же технологии, что и TESTLU, что позволило использовать те же результаты моделирования с помощью DIODE-2D, что и для TESTLU. Оценки пороговых ЛПЭ ТЭ производились для разных длин волн лазерного излучения. Оцененные параметры чувствительности 537PY6 по ТЭ представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры чувствительности по ТЭ ОЗУ 537РУ6

$\lambda$ , нм	$K_{\lambda}$ , МэВ·с м <sup>2</sup> / (мг·нД ж)	$J_{th}$ , нДж (обл. 1)	$J_{th}$ , нДж (обл. 2)	$K_m$	Порог. ЛПЭ ТЭ, МэВ·см <sup>2</sup> /мг (обл. 1)	Порог. ЛПЭ ТЭ, МэВ·см <sup>2</sup> /мг (обл. 2)
1000	403	0.125	0.11	2.2	23	20
900	1589	0.049	0.041	2.3	34	28
870	2431	0.045	0.035	2.7	41	32
Ионы					~20 [3]	

В ходе проведения работ использовались усредненные значения коэффициента оптических потерь. На рисунке 6 показано распределение амплитуды импульса ИР по окрестности размером 400 мкм × 400 мкм точки кристалла 537РУ6, в которой производилась оценка пороговых ЛПЭ ТЭ (эта точка расположена в начале координат).

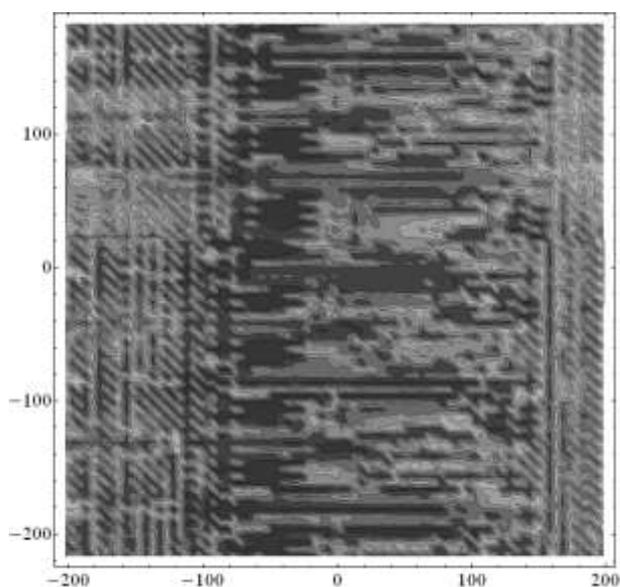


Рис. 6. Распределение амплитуды импульса ионизационной реакции ИС ОЗУ 537РУ6 в окрестности точки, в которой проводилась оценка пороговых ЛПЭ ТЭ (точка расположена в начале координат). Более светлые области соответствуют большей амплитуде импульса ИР

По данному распределению можно судить о распределении коэффициента потерь  $K_m$ . В данном случае усредненное значение коэффициента потерь меняется в диапазоне 1.8...2.4 при изменении диаметра лазерного пятна в диапазоне 40...400 мкм, что хорошо согласуется с оценками, представленными в таблице 1. Однако для других ИС неоднородность распределения коэффициента потерь может представлять проблему.

К наиболее неожиданным результатам следует отнести наличие ионизационной реакции при

облучении контактных окон. При сканировании полос металлизации сфокусированным лазерным лучом при пересечении контактных окон имела место ионизационная реакция (рис. 7). Дополнительные экспериментальные исследования (облучение под углом, облучение полос разной ширины, использование разных длин волн ЛИ) позволили предложить в качестве основной версии пропускание света материалом, расположенным над контактным окном. Наличие подобных эффектов в ряде случаев позволяет расширить область применимости лазерных методов испытаний СБИС.

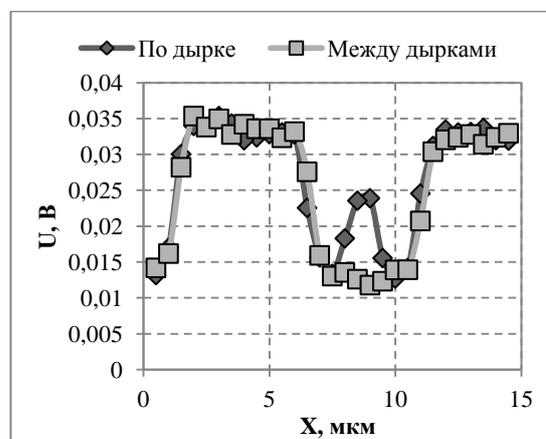


Рис. 7. Изменение амплитуды ионизационной реакции при сканировании полосы структуры TESTLU

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчетно-экспериментального моделирования изменений ионизационной реакции в простейших структурах при различных параметрах лазерного излучения (длительности, длины волны и диаметре) подтвердили справедливость основных предположений, используемых в методике локального лазерного излучения: независимость амплитуды ионизационной реакции от диаметра оптического пятна, изменение амплитудно-временных характеристик ионизационной реакции в цепи питания при изменении длины волны и длительности импульса ЛИ, возможность оценки коэффициента оптических потерь при оценках эффективных значений ЛПЭ по ионизационной реакции в цепи питания.

Авторы выражают благодарность П.К. Скоробогатову за предоставленные тестовые структуры.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чумаков А.И. Действие космической радиации на ИС. М.: Радио и связь, 2004. 320 с.
- [2] A.I. Chumakov et. al, Local Laser Irradiation Technique for SEE Testing of ICs // Proceedings of 12th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems. 2011. P. 449- 453.
- [3] В.В. Емельянов и др. Опыт испытаний изделий полупроводниковой электроники на стенде Роскосмоса с использованием циклотрона У-400М. Сертификация-2011. С-Петербург, 2011.