

# Автоматизированная пикосекундная лазерная установка для моделирования эффектов от отдельных заряженных частиц космического пространства в микроэлектронных приборах

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

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>2</sup>ОАО «ЭНПО Специализированные электронные системы», [anegor@spels.ru](mailto:anegor@spels.ru)

**Аннотация** — Представлены основные технические характеристики автоматизированной установки для моделирования локальных радиационных эффектов, созданной на основе перестраиваемого по длине волны твердотельного пикосекундного лазера. Обсуждаются ее конструктивные особенности, возможности и преимущества для моделирования эффектов от отдельных заряженных частиц космического пространства в современных микроэлектронных приборах на основе Si, GaAs, SiGe и др.

**Ключевые слова** — отдельная заряженная частица; локальный радиационный эффект; радиационная стойкость; пикосекундный лазер; сфокусированное лазерное излучение.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно развиваются лазерные методы [1-7] оценки чувствительности электронной компонентной базы (ЭКБ) к локальным радиационным эффектам от воздействия отдельных заряженных частиц (ОЗЧ) – ионов и протонов космического пространства (КП). Ранее в работе [8] был представлен обзор лазерных имитационных установок «ПИКО», основанных на использовании сфокусированного излучения первой (1064 нм) и второй (532 нм) гармоник твердотельных неодимовых лазеров пикосекундной длительности. Вместе с тем, в связи с широким распространением в последнее время субмикронных СБИС с большим количеством слоев металлизации, затрудняющих облучение со стороны приборных слоев, а также развитием ЭКБ твердотельной СВЧ-электроники на основе GaAs, SiGe и т.п., весьма интересным представляется использование для моделирования эффектов от ОЗЧ пикосекундных лазеров с перестройкой по длине волны. В этом случае глубина и форма имитируемых зарядовых «треков» могут варьироваться в значительных пределах путем перестройки длины волны лазерного излучения. Подобное изменение конфигурации зарядового «трека» может служить инструментом исследования механизмов сбора заряда [9]. Возможность перестройки длины волны лазерных импульсов может помочь ответить на

вопрос, как параметры, характеризующие процессы сбора заряда, зависят от профиля распределения неравновесных носителей заряда.

Выбор длины волны, соответствующей энергии кванта, меньшей ширины запрещенной зоны полупроводника, позволяет в ряде случаев генерировать неравновесные носители заряда за счет многофотонных процессов [10]. При этом сводится к минимуму влияние линейного поглощения в материале подложки, а неравновесные носители генерируются непосредственно в области фокусировки вблизи активных областей.

В связи с изложенным, актуальной является задача по разработке установки для моделирования локальных радиационных эффектов от ОЗЧ КП в микроэлектронных приборах, в которой в качестве источника использовался бы перестраиваемый по длине волны пикосекундный лазер. В данной работе рассматриваются характерные особенности и основные технические характеристики созданной установки, получившей наименование «ПИКО-4», обсуждаются ее возможности и преимущества.

Внешний вид установки «ПИКО-4» показан на

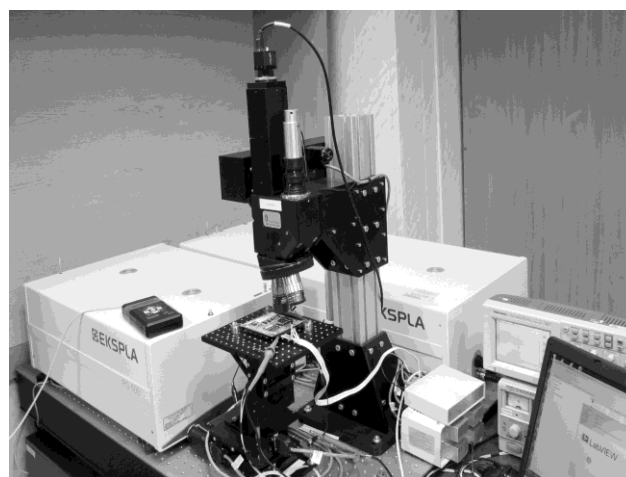


Рис. 1. Внешний вид установки «ПИКО-4»

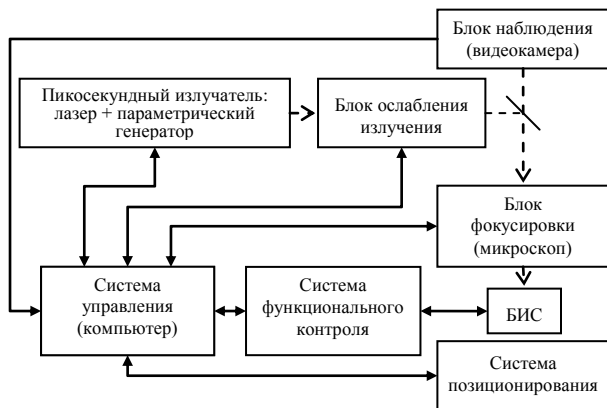


Рис. 2. Общая структурная схема установки

рис. 1, а ее структурная схема – на рис. 2. В состав установки вошли следующие основные компоненты (см. рис. 3): пикосекундный излучатель (1) с блоком перестройки длины волны (2); блок ослабления лазерного излучения (3); блок фокусировки оптического излучения (4); видеокамера (5); блок позиционирования объекта (6); оптическая плита (7); система управления на базе ПК с блоками сопряжения и система функционального контроля.

Излучение с выхода пикосекундного лазерного излучателя, пройдя через блок ослабления излучения, вводится в оптический канал блока фокусировки (микроскопа), где с помощью микрообъектива фокусируется на поверхности исследуемого объекта (см. рис. 2). Одновременно с этим изображение в плоскости фокусировки регистрируется блоком визуального контроля (видеокамерой), причем на изображение программно накладывается указатель, отображающий положение фокуса лазерного пучка. Задание точки фокусировки на исследуемом объекте осуществляется путем перемещения самого объекта относительно неподвижного фокуса лазерного пучка с помощью системы позиционирования. Система функционального контроля задает режимы работы исследуемого прибора, фиксирует все необходимые параметры и регистрирует события (импульсную реакцию, сбой, отказы), возникающие вследствие воздействия лазерного импульса.

**Пикосекундный лазерный излучатель** состоит из лазера накачки PL2210 и оптического параметрического генератора PG503, расположенных на общей оптической плите и оптически соединенных между собой посредством системы зеркал.

Лазер накачки PL2210 представляет собой малогабаритный высокостабильный твердотельный пикосекундный лазер с диодной накачкой, работающий на частоте повторения импульсов до 1000 Гц. PL2210 оснащен встроенным преобразователем во вторую гармонику и генерирует импульсы излучения на длине волны 532 нм длительностью 25 пс. Оптическая схема PL2210 (высокостабильный задающий генератор +

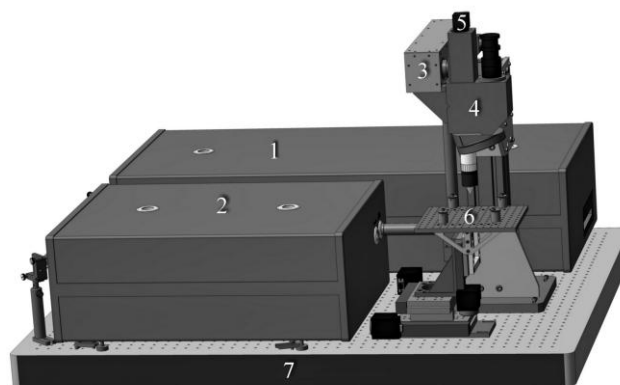


Рис. 3. Расположение основных частей установки на оптическом столе

регенеративный усилитель) и конструкция лазера обеспечивают близкий к гауссовому поперечный профиль выходного пучка ( $TEM_{00}$ , параметр  $M^2$  не превышает 1,2) при нестабильности импульса по энергии не более 2%.

Изучение второй гармоники с выхода лазера накачки PL2210 поступает на вход оптического параметрического генератора PG503. Оптическая схема PG503 включает в себя двухпроходный параметрический генератор и однопроходный параметрический усилитель. Для согласования с блоком фокусировки перед выходом из PG503 пучок дополнительно расширяется в диаметре, что в сочетании с малой расходимостью и хорошим качеством лазерного пучка дает возможность сфокусировать излучение в объектной плоскости в пятно малого диаметра (до 2...3 мкм в зависимости от длины волны).

**Блок ослабления лазерного излучения** предназначен для прецизионного изменения энергии лазерного импульса, что необходимо для определения уровней стойкости к воздействию ОЗЧ.

Принцип действия блока основан на зависимости пропускания поляризатором линейно поляризованного света от угла между плоскостями поляризации световой волны и поляризатора. Конструктивно блок ослабления выполнен в виде трех последовательно расположенных поляризационных призм Глана, одна из которых (средняя) вращается вокруг продольной оси с помощью шагового привода, подключаемого через USB-контроллер к ПК. Применение данной схемы обеспечивает регулировку коэффициента ослабления энергии лазерных импульсов в диапазоне  $1...5 \cdot 10^4$  при неизменном состоянии поляризации лазерного излучения на выходе.

**ПЗС видеокамера** используется для получения изображения исследуемого объекта на экране монитора при изучении топологии кристалла БИС, позиционировании лазерного пучка, его точной фокусировке и т.д. Видеокамера также позволяет контролировать динамику процесса сканирования и осуществлять фотографирование поверхности

кристалла БИС в соответствии с заданной программой. Размер матрицы видеокамеры составляет 1392×1040 пикселей при максимальном оптическом разрешении (на исследуемом объекте) около 0,5 мкм, что близко к дифракционному пределу.

**Блок фокусировки оптического излучения** разработан на основе микроскопа Mic301LP, оснащенного специальным портом для ввода в оптический тракт лазерного излучения. Для фокусировки лазерного излучения, а также для наблюдения увеличенного изображения поверхности исследуемого объекта с помощью видеокамеры, используются закрепленные на револьверной головке сменные микрообъективы с большим свободным расстоянием, предназначенные для работы в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне длин волн. Блок фокусировки может комплектоваться объективами, имеющими различное увеличение (кратность) в диапазоне от 5× до 100×, что позволяет варьировать параметры оптического тракта в зависимости от решаемых задач.

Микрообъектив с малой кратностью (5×) используется, как правило, для получения панорамных изображений исследуемых объектов. Микрообъективы с кратностями 20× и более дают высокое оптическое разрешение, что необходимо для получения детальных изображений топологии, а также обеспечивают острую фокусировку лазерного пучка в пятно диаметром до 2...3 мкм (в зависимости от используемой длины волны). Высокий контраст изображения достигается применением бестеневого телецентрического осветителя, обеспечивающего освещение объекта пучком света практически по нормали к его поверхности.

**Блок позиционирования объекта** обеспечивает прецизионное перемещение исследуемого объекта относительно фиксированного положения сфокусированного лазерного пучка. Он состоит из двух одинаковых линейных подач с шаговым приводом, имеющих минимальный шаг 0,125 мкм и полный диапазон перемещения 100 мм, обеспечивающих перемещение объекта в горизонтальной плоскости, а также вертикальной подачи в диапазоне 25 мм с шагом 0,16 мкм, служащей для фокусировки и наведения на резкость. Управление перемещением осуществляется программно с помощью USB-контроллера, подключаемого к ПК. Программное обеспечение позволяет осуществлять перемещения в горизонтальной плоскости на заданные расстояния, устанавливать объект в положение с определенными координатами, проводить сканирование заданной области по различным траекториям в режиме автоматической фокусировки. Максимальная скорость перемещения в любом из направлений составляет 500 мкм/с.

**Система функционального контроля** исследуемого объекта построена на основе виртуальной лаборатории LabVIEW и системы сбора

данных на базе крейта и набора модулей National Instruments. Ее основными функциями являются:

- 1) задание режимов работы исследуемого полупроводникового прибора;
- 2) контроль его работоспособности до и после воздействия, регистрация событий.

**Система управления** представляет собой ПК, работающий под управлением операционной системы MS Windows, к которому через USB-интерфейс подключаются все необходимые интерфейсные блоки, входящие в состав установки, а также видеокамера. Специализированное программное обеспечение позволяет выполнять следующие основные функции:

- 1) перемещение объекта в горизонтальной плоскости;
- 2) настройка на резкость, автокомпенсация расфокусировки из-за наклона поверхности объекта;
- 3) задание различных режимов работы лазерного излучателя и управление энергией лазерного импульса;
- 4) сканирование заданных областей объекта, синхронизированное с облучением;
- 5) управление яркостью осветителя;
- 6) вывод изображения объекта на экран монитора с указанием точки фокусировки лазерного луча;
- 7) получение панорамных фотографий и т.п.

После запуска управляющей программы происходит проверка готовности всех блоков. На объектном столике (вручную) устанавливается исследуемый образец, и уже с помощью программы система позиционирования в полуавтоматическом режиме располагает исследуемую поверхность образца в фокальную плоскость микрообъектива, совмещенную с плоскостью наблюдения микроскопа.

Особенностью программного обеспечения «ПИКО-4» является возможность проводить измерения не только при одновременной синхронизированной работе всех блоков лазерной установки, но и на основании результатов обработки сигналов, полученных системой функционального контроля в режиме реального времени, автоматически изменять параметры лазерной системы (длину волны, диаметр пятна, энергию в импульсе и т.п.) или режим работы БИС на следующем шаге программы. Такая обратная связь позволяет существенно повысить эффективность измерений, особенно при необходимости сканирования больших (по сравнению с размером пятна фокусировки) областей БИС.

## II. ПРИМЕРЫ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ «ПИКО-4»

Для иллюстрации возможностей созданной установки на рис. 4 приведен фрагмент карты тиристорного эффекта (ТЭ), полученной сканированием кристалла ADuC841 лазерным пучком диаметром 30 мкм и энергией в импульсе 30 нДж (кружками на карте обозначены чувствительные области). Результаты подобного сканирования в

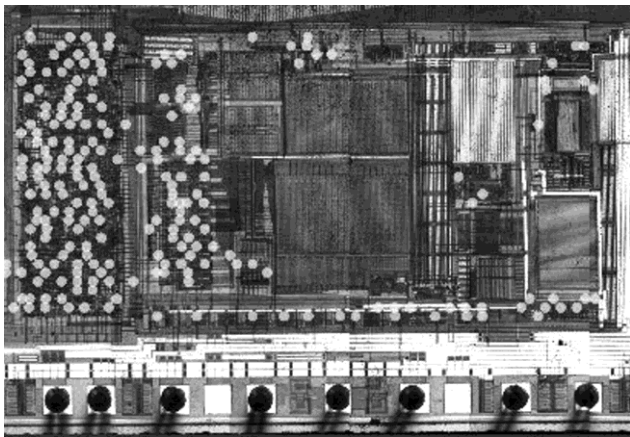


Рис. 4. Фотография фрагмента карты ТЭ БИС ADuC841

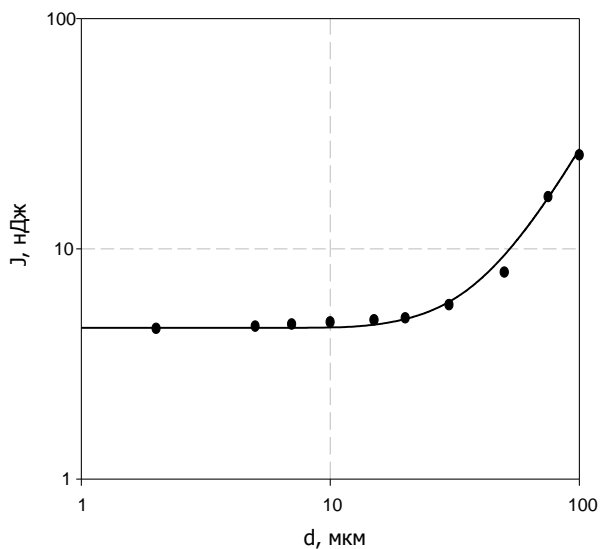


Рис. 5. Зависимость пороговой энергии ТЭ  $J$  от диаметра лазерного пятна  $d$  на длине волны 900 нм для ПЛИС XCV50.

дальнейшем могут быть использованы для коррекции топологии БИС с целью исключения ТЭ.

На рис. 5 представлена зависимость пороговой энергии ТЭ от диаметра пятна лазерного излучения в ПЛИС XCV50, полученная для длины волны лазерного излучения 900 нм. Важно отметить, что при облучении этой же ПЛИС лазерным пучком с длиной волны 1064 нм и диаметром 30 мкм на лазерной установке предыдущего поколения «ПИКО-3» данный эффект не наблюдался вплоть до уровней энергии 500 нДж, соответствующих началу термического повреждения активных структур ПЛИС.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведено описание экспериментальной установки «ПИКО-4» для исследования эффектов от ОЗЧ в современных полупроводниковых приборах и интегральных схемах. Для создания в активном объеме

полупроводника распределения неравновесных носителей, эквивалентного ионизационному треку от воздействия ОЗЧ, в данной установке используется сфокусированное лазерное излучение пикосекундной длительности с перестройкой в широком диапазоне длин волн (0,7...2,1 мкм). Это позволяет существенно расширить область ее применения, в том числе, для приборов на основе полупроводниковых материалов с различной шириной запрещенной зоны (Si, GaAs, Si-Ge и т.п.), а также использовать эффект двухфотонного поглощения. Разработанная установка обеспечивает:

- 1) малый диаметр пятна фокусировки лазерного излучения на поверхности объекта (до 2 мкм);
- 2) высокую разрешающую способность оптической системы наблюдения (до 0,5 мкм) и точность позиционирования объекта (до 0,2 мкм);
- 3) большую скорость перемещения и площадь сканирования объекта.

Лазерная установка «ПИКО-4» может быть использована для проведения научных исследований и испытаний на радиационную стойкость широкого класса перспективных изделий микро- и нанoeлектроники, предназначенных для работы в реальных условиях космического пространства.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чумаков А.И. Действие космической радиации на ИС. М.: Радио и связь. 2004. 320 с.
- [2] Buchner S. et al. Laboratory Tests for Single-Event Effects // IEEE Trans. on Nuclear Science. 1996. V. 43. № 2. P. 678–686.
- [3] Messenger G.C., Ash M.S. Single Event Phenomena. N.Y.: Chapman & Hall. 1997. 368 p.
- [4] Jones R. et al. Comparison between SRAM SEE cross-section from ion beam testing with those obtained using a new picosecond pulsed laser facility // IEEE Trans. on Nuclear Science. 2000. V. 47. № 4. P. 539–544.
- [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. и др. 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.
- [8] Егоров А.Н., Маврицкий О.Б., Чумаков А.И. и др. Лазерные имитаторы «ПИКО» для испытаний электронной компонентной базы на стойкость к воздействию отдельных ядерных частиц // Спецтехника и связь. 2011. № 4–5. С. 8–13.
- [9] Joseph S. Melinger, Dale McMorow, A.B. Campbell, Stephen Buchner, Lan Hu Tran et. al. Pulsed laser-induced single event upset and charge collection measurements as a function of optical penetration depth // J. of Appl. Phys. 1998. V. 84. № 2. P. 690–703.