

Фемтосекундный лазерный комплекс для тестирования СБИС на стойкость к воздействию тяжелых заряженных частиц

О.Б. Маврицкий¹, А.Н. Егоров¹, А.А. Печенкин², Д.В. Савченков³, В.А. Телец³

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²ОАО «ЭНПО Специализированные электронные системы»

³Институт экстремальной прикладной электроники НИЯУ «МИФИ», obmavr@spels.ru

Аннотация — Представлены характеристики уникальной установки для тестирования изделий микроэлектроники на стойкость к радиационному воздействию одиночных тяжелых заряженных частиц, созданной на базе фемтосекундного лазера с перестраиваемой длительностью импульса. Экспериментально подтверждено влияние длительности импульса лазерного излучения на результаты оценки пороговых значений энергии.

Ключевые слова — фемтосекундный лазер; одиночные радиационные эффекты; длительность импульса.

I. ВВЕДЕНИЕ

Одним из хорошо зарекомендовавших себя подходов к решению проблемы обеспечения радиационной стойкости изделий микроэлектроники космического назначения в настоящее время является исследование одиночных эффектов, инициированных с помощью ультракоротких лазерных импульсов, аналогичных одиночным радиационным эффектам (ОРЭ) от воздействия тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) космического происхождения. Ранее мы уже представляли серию лазерных комплексов «ПИКО» на основе твердотельных пикосекундных лазеров [1]-[3] для тестирования интегральных микросхем (ИС) на чувствительность к воздействиям, приводящим к ОРЭ. Наиболее совершенная модель имитационного тестового комплекса «ПИКО-4» [3] на основе пикосекундного источника лазерного излучения с перестройкой по длине волны способна создавать плотности электронно-дырочной плазмы, подобные возникающим при воздействии любых ТЗЧ на различные полупроводниковые приборы. Опыт авторов по работе в области лазерных испытаний ИС показывает, что оптимальная длина волны для исследования ОРЭ в ИС на основе Si и GaAs при облучении со стороны активного слоя лежит в диапазоне 850...900 нм. Такие длины волн обеспечивают достаточно высокую эффективность генерации избыточного заряда на глубине, достаточной для собирания величины заряда, приводящей к ОРЭ в активной области ИС [4], [5]. Используемая в лазерных комплексах «ПИКО» длительность импульса 25...70 пс позволяет проведение тестирования на чувствительность к

одиночным сбоям (ОС) и тиристорным эффектам (ТЭ) большинства кремниевых микросхем, для которых время собирания заряда существенно больше. Однако для современных сверхбыстрых приборов с временами переключения менее 0.1 нс такая длительность импульса может быть слишком большой. Как показали численные расчеты ([6], [7]), при длительности импульсов больше нескольких пикосекунд пороговая энергия ОС повышается. В связи с этим использование более коротких импульсов для выяснения влияния длительности импульса на результаты оценок уровня стойкости ОС в конкретных случаях представляется интересным. Более того, возможность изменять длительность импульсов может сделать данную установку гибким инструментом для экспериментальных исследований стойкости современных сверхбыстрых приборов к ОС.

В данной работе мы представляем новую разработку – экспериментальный комплекс «ФЕМО-Т», использующий фемтосекундный лазерный источник с изменяемой длительностью импульса. Данная установка может применяться в сочетании с лазерными имитаторами серии «ПИКО» или как отдельный комплекс для исследования большинства ОРЭ в современных СБИС. Обсуждаются основные особенности и преимущества данной установки. Представлено сравнение результатов экспериментальных исследований, выполненных по методике локального лазерного облучения [8] на одних и тех же образцах при фемто- и пикосекундной длительности импульсов.

II. ОПИСАНИЕ ТЕСТОВОГО КОМПЛЕКСА

На рис.1 представлена общая блок-схема лазерного комплекса «ФЕМО-Т». Главное отличие новой системы от лазерных имитаторов серии «ПИКО» [3] заключается в применении лазерного источника МРАР-2500 (разработка «Авеста», г. Троицк). Он генерирует фемтосекундные лазерные импульсы с длиной волны 870 нм, высокой энергетической стабильностью, качеством пучка $M^2 < 1.6$ и величиной энергии, достаточной для применения методики локального лазерного облучения. Все эти параметры весьма существенны при последующей фокусировке пучка на объекте.

Дополнительно данный лазер позволяет изменять длительность генерируемого импульса в пределах от 150 фс до 3 пс.

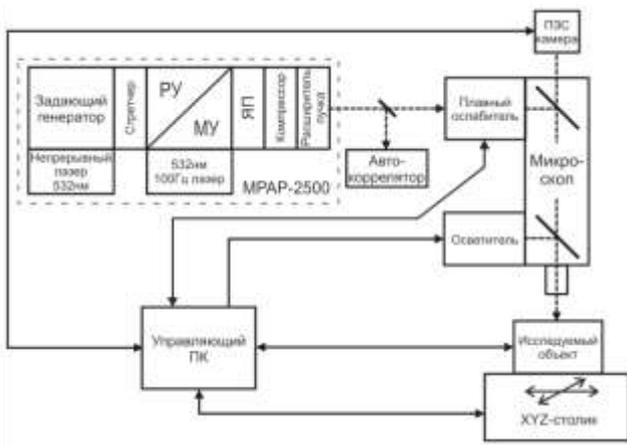
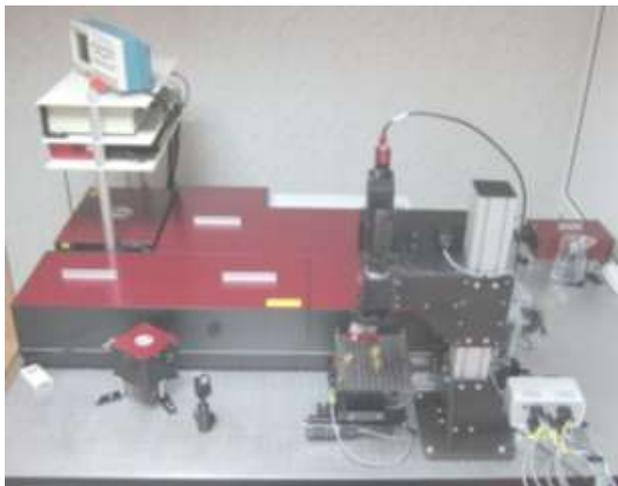


Рис. 1. Общий вид и структурная схема установки

Фемтосекундные импульсы низкой энергии генерируются в Ti:S задающем генераторе TiF-50, накачиваемом второй гармоникой встроенного непрерывного Nd³⁺:YAG лазера с диодной накачкой. После выхода из задающего генератора импульсы проходят через стретчер, где их длительность увеличивается до 200 пс для дальнейшего усиления. Усилительная подсистема состоит из регенеративного усилителя (РУ) и дополнительного многопроходного усилителя (МУ). Система выделения на основе ячеек Поккельса (ЯП) позволяет получать на выходе импульсы с энергией до сотен мкДж с контролируемой частотой следования, включая режим одиночных импульсов. Для накачки усилительной подсистемы используется дополнительный Nd³⁺:YAG лазер с модулированной добротностью и диодной накачкой, оснащенный удвоителем частоты. После усиления длительность импульса уменьшается в регулируемом компрессоре до необходимой величины (из указанного диапазона). Расширитель пучка, расположенный у выхода лазерного источника, увеличивает диаметр пучка для последующего согласования с входной апертурой объектива, используемого для фокусировки

и получения минимально возможного диаметра пятна на исследуемом объекте. Для контроля выходной длительности и формы импульса предусмотрен оптический автокорректор одиночных импульсов ASF-200, оптимизированный под указанный диапазон длительностей измеряемых лазерных импульсов.

Остальная часть оптической схемы в основном аналогична описанной в работе [3] и включает в себя регулируемый ослабитель энергии лазерного излучения, фокусирующую систему (микроскоп с телецентрическим осветителем), ПЗС-видеокамеру, трехкоординатную систему позиционирования объекта и управляющий ПК со всеми необходимыми интерфейсами. Основные параметры «ФЕМТО-Т» представлены в таблице 1. Особо следует отметить, что лазерный пучок в данной установке может быть сфокусирован до пятна 1,2 мкм, что близко к оптическому дифракционному пределу.

Таблица 1

Основные параметры «ФЕМТО-Т»

Параметр	Единицы	Значение
Длина волны	нм	870
Макс. энергия импульса	нДж	0.01...5000
Длительность импульса	фс	100...3000
Мин. диаметр пятна ^{а)}	мкм	1.2
Макс. частота повторения	Гц	100
Качество пучка M ²	–	<1.6
Увеличение объектива	–	5×...100×
Шаг позиционирования XYZ	мкм	0.15

^{а)} для объектива 100×

Также в данном комплексе используется модифицированная система позиционирования с повышенной механической стабильностью и увеличенной скоростью сканирования.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Как показано в работе [7], пороговая энергия ОРЭ зависит от длины волны λ и длительности импульса τ_p лазерного излучения. При фиксированной длине волны можно пользоваться следующим приближением:

$$J = J_0 \left(1 + \left(\frac{\tau_p}{RC} \right)^{\frac{1}{\nu}} \right)^{\nu},$$

где J_0 соответствует пороговой энергии лазерного излучения при $\tau_p \rightarrow 0$; RC – характерное время ионизационной реакции, а ν – коэффициент экспоненциальной аппроксимации с типичной величиной 1,5. Нетрудно видеть, что при длительностях импульса, сравнимых или больших RC , пороговая лазерная энергия возрастает. Поэтому для СБИС с характерными временами переключения меньше нескольких десятков пикосекунд для тестов на

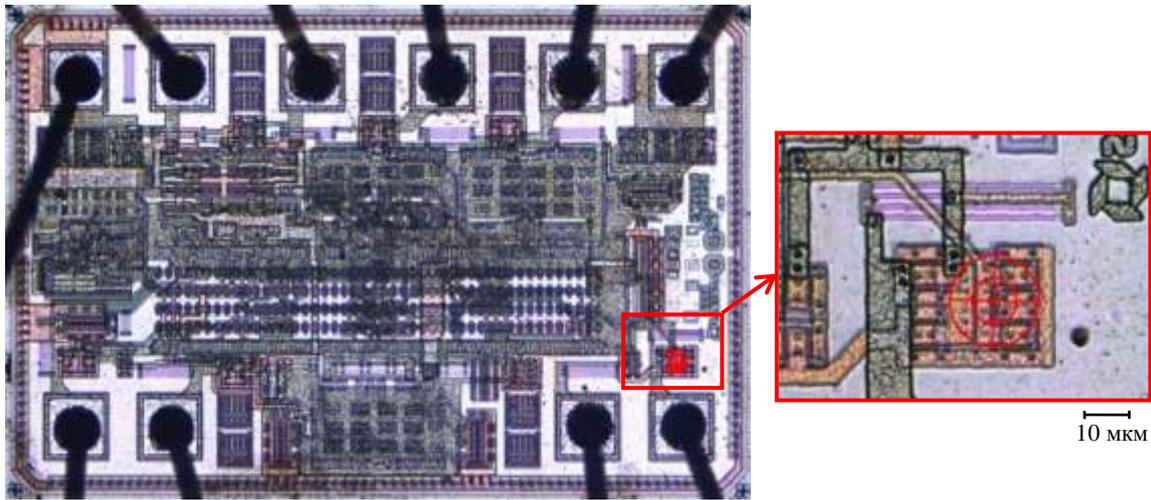


Рис. 2. Расположение чувствительной к ОС области в ИС SY55852U

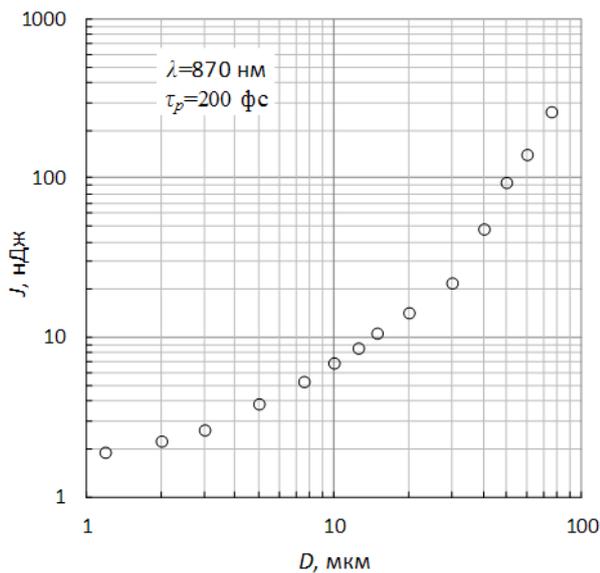


Рис. 3. Зависимость пороговой энергии ОС J от диаметра пятна D для ИС SY55852U

стойкость к воздействию ТЗЧ предпочтительно использовать фемтосекундные импульсы.

Для проверки возможного влияния длительности лазерного импульса на результаты имитационных испытаний ИС на ОС были проведены измерения пороговой энергии ОС для сверхбыстрого CML-триггера SY55852U с использованием длительности импульса 200 фс. Триггер работал в статическом режиме хранения информации, при этом критерием возникновения ОС считалось изменение логического состояния выхода при воздействии лазерного импульса. Для нахождения чувствительных областей, в соответствии с методикой локального лазерного облучения [8], было проведено подробное сканирование всей поверхности кристалла микросхемы лазерным пучком с диаметром 30 мкм.

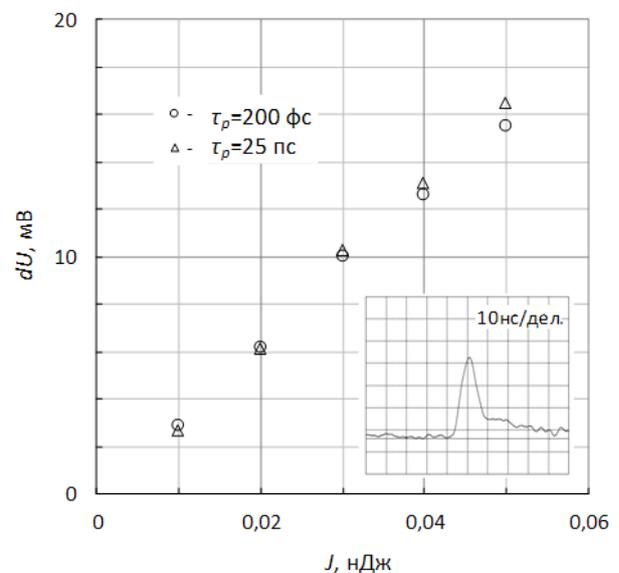


Рис. 4. Зависимость амплитуды импульса напряжения dU на токосъемном резисторе $R=50$ Ом в цепи питания ИС SY55852U от энергии лазерного импульса J

Оказалось, что для этого типа микросхем обнаруживается только одна чувствительная область малых размеров, см. рис. 2.

Затем пороговые энергии ОС были измерены при различных диаметрах пятна от 1,2 до 100 мкм. Полученная зависимость представлена на рис. 3. Она имеет характерный для используемой методики вид, показывающий, что размеры чувствительной области в этой ИС достаточно малы (порядка нескольких мкм). Незначительные флуктуации в поведении кривой могут быть объяснены локальными неоднородностями оптических потерь из-за присутствия слоев металлизации. Эти результаты оказались практически независимыми от длительности импульса в пределах от 0,1 до 3 пс. Для оценки величины оптических потерь мы также регистрировали импульсы

ионизационной реакции в цепи питания ИС при облучении с различными значениями энергии лазерных импульсов (типичная осциллограмма и измеренная зависимость показаны на рис. 4). Эта дополнительная информация может оказаться полезной при расчете коэффициента перевода энергии лазерного излучения в линейные потери энергии (ЛПЭ), применяемые при тестировании на источниках ионов.

Все проведённые на «ФЕМТО-Т» процедуры тестирования были повторены на тестовом комплексе «ПИКО-4» с длительностью импульсов облучения $\tau_p = 25$ пс на той же длине волны 870 нм. Несмотря на то, что в ранее найденной чувствительной области наблюдались импульсы ионизационной реакции практически с той же амплитудой и формой импульса (см. рис. 4), нам не удалось зарегистрировать ни одного ОС вплоть до энергий лазерных импульсов, вызывающих разрушение структуры ИС. Более того, ни одного ОС не наблюдалось и при более коротких длинах волн, доступных на «ПИКО-4» (вплоть до 700 нм). Единственным обоснованным объяснением этого экспериментального факта может быть то, что динамика генерации и собирания заряда внутри ИС SY55852U существенно различна для фемто- и пикосекундных импульсов облучения, что, однако, по каким-то причинам не проявляется во внешних цепях (например, из-за влияния емкости самой ИС или элементов измерительной схемы).

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлено новое средство проведения испытаний ИС на стойкость к ТЗЧ – исследовательский комплекс «ФЕМТО-Т» на базе лазерного источника фемтосекундных импульсов. Отличительными особенностями этого комплекса являются: оптимизированная для тестирования кремниевых и арсенид-галлиевых ИС со стороны активного слоя длина волны 870 нм, предельно малый диаметр пятна фокусировки и возможность изменения длительности импульса в диапазоне от 100 фс до 3 пс. Использование регулируемой длительности импульса может быть полезным при изучении влияния длительности лазерного излучения на результаты лазерных испытаний ИС.

Исследования влияния длительности импульса на результаты испытаний, проведённые на примере сверхбыстрого CML-триггера SY55852U по методике локального лазерного облучения, показали, что ОС в данном типе ИС возникают только при облучении фемтосекундными лазерными импульсами и не наблюдаются при облучении пикосекундными импульсами длительностью 25 пс.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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. 137-142.
- [2] Egorov A.N., Nikiforov A.Yu., Chumakov A.I., Yanenko A.V., Mavritskiy O.B., Pechenkin A.A. Laser Facilities for Radiation Effects Simulation and Testing // RADLAS-2011. Suresnes, France. Sep. 16, 2011.
- [3] Egorov A.N., Chumakov A.I., Mavritskiy O.B., Pechenkin A.A., Koltsov D.O., Yanenko A.V. PICO-4 Single Event Effects Evaluation and Testing Facility Based on Wavelength Tunable Picosecond Laser // Radiation Effects Data Workshop (REDW). 2012, IEEE. P. 1-4.
- [4] Savchenkov D.V., Chumakov A.I., Petrov A.G., Pechenkin A.A., Egorov A.N., Mavritskiy O.B., Yanenko A.V. Study of SEL and SEU in SRAM Using Different Laser Techniques // 14th European Conference on Radiation Effects on Components and Systems (RADECS). 2013.
- [5] Nechaev A.V., Mavritskiy O.B., Egorov A.N., Skorobogatov P.K. Study of ionizing response of semiconductor structures under laser irradiation in wavelength range 850-1064 nm // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2006. V. 70. № 9. P. 1498-1502.
- [6] Douin A., Pouget V., Darracq F., Lewis D., Fouillat P., and Perdu P. Influence of Laser Pulse Duration in Single Event Upset Testing // IEEE Trans. Nucl. Sci. 53. 2006. P. 1799-1805.
- [7] Chumakov A.I. and Gontar V.V. Predicting the Failure Threshold of Dose Rate for ICs Exposed to Pulsed Ionizing Radiation of Arbitrary Pulse Shape // Russian Microelectronics. 2004. V. 33. № 2. P. 99-105.
- [8] Chumakov A.I., Pechenkin A.A., Savchenkov D.V., Tararaksin A.S., Vasil'ev A.L. and Yanenko A.V. Local laser irradiation technique for SEE testing of ICs // Proc. 12th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). 2011. P. 449-453.