

A.A. Novikov, A.A. Pechenkin, A.I. Chumakov, A.O. Akhmetov, O.B. Mavritskii
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
31, Kashirskoe sh., Moscow, 114509, Russian Federation., e-mail: aanov@spels.ru,
e-mail: aapech@spels.ru, e-mail: aichum@spels.ru, e-mail: ahmet@spels.ru, e-mail: obmavr@spels.ru

See laser testing at different temperatures

Key words: single event effects, laser technique, temperature dependence

IC's SEE sensitivity may depend on temperature. Traditional ion irradiation methods have some limitations, which laser SEE technique can overcome. In this work, SEE laser test results for various temperatures are discussed.

The main problem for laser SEE testing at different temperatures is to determine correlation between laser pulse energy and LET. In the first approximation, LET values with the same laser pulse energy and different temperatures are directly proportional to the absorption coefficient of laser light in a semiconductor. Use of tabulated values could lead to errors and absorption coefficient should be determined for each sensitive volume of device under test (DUT). Temperature dependence of absorption coefficient could be determined using ionization response of DUT in power supply circuit under local laser irradiation.

Using this approach a satisfactory correlation of ion and laser SEE test result was observed.

A.A. Новиков, А.А. Печенкин, А.И. Чумаков, А.О. Ахметов, О.Б. Маврицкий
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Каширское шоссе, 31, г. Москва, 115409, Россия, e-mail: aanov@spels.ru, e-mail: aapech@spels.ru,
e-mail: aichum@spels.ru, e-mail: ahmet@spels.ru, e-mail: obmavr@spels.ru

ИСПЫТАНИЯ ИС НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЗЧ В ДИАПАЗОНЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ТЕМПЕРАТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНЫХ МЕТОДОВ

Ключевые слова: одиночные эффекты, лазерные методы, температурная зависимость СБИС, дозовые радиационные отказы, функционально-логическое моделирование.

Чувствительность ИС по одиночным эффектам может зависеть от температуры. Традиционные методы ионного облучения имеют ограничения, которые можно преодолеть с использованием лазерных методов. В работе представлены результаты и обсуждение испытаний и исследований ИС лазерными методами в диапазоне температур.

Основная проблема при использовании лазерных методов в диапазоне температур – определение эквивалентных значений линейных потерь энергии (ЛПЭ) для лазерного воздействия. В первом приближении эквивалентные ЛПЭ при одинаковой энергии импульса лазерного излучения и различных температурах прямо пропорциональны коэффициенту поглощения лазерного излучения в полупроводнике. Использование табличных значений коэффициента поглощения может привести к некорректным оценкам, необходимо определять коэффициент поглощения индивидуально для каждой рассматриваемой области ИС. Оценить температурное изменение коэффициента поглощения лазерного излучения возможно из параметров ионизационной реакции в цепи питания ИС на локальное лазерное воздействие.

При использовании этого подхода наблюдалась удовлетворительная корреляция между результатами, полученными на ускорителе ионов, и результатами, полученными с использованием лазерных методов.

Чувствительность интегральных схем (ИС) по одиночным эффектам может сильно зависеть от температуры. Поэтому часто возникает необходимость в проведении испытаний и исследований в диапазоне эксплуатационных температур. Традиционно испытания и исследования по оценки параметров чувствительности ИС проводятся с использованием ускорителей ионов и протонов. Облучение потоками ионов проводится в условиях вакуума, что усложняет стабилизацию температуры, особенно данная проблема актуальна для сложнофункциональных ИС с высоким тепловыделением и частыми

А.А. Новиков, А.А. Печенкин, А.И. Чумаков, А.О. Ахметов, О.Б. Маврицкий
ИСПЫТАНИЯ ИС НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЗЧ В ДИАПАЗОНЕ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ТЕМПЕРАТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНЫХ
МЕТОДОВ

изменениями тока потребления в нормальном режиме работы. Следует так же отметить, что традиционно требования задаются на температурные параметры окружающей среды, в то время как данное понятие не применимо для условий вакуума. Альтернативным способом испытаний являются методы с использованием сфокусированного и локального лазерного излучения, которые не только позволяют избавиться от проблем, присущих экспериментам в условиях вакуума, но и предоставляет большее пространственное и временное разрешение, чем традиционные методы [1-4].

Основная проблема, которая стоит при использовании лазерных методов в диапазоне температур – определение эквивалентных значений линейных потерь энергии (ЛПЭ) для лазерного воздействия. В общем случае эквивалентные ЛПЭ определяются следующим выражением [1]:

$$LET = \alpha \cdot (1 - R_\lambda) \cdot \frac{\varepsilon_i \cdot \lambda}{hc} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{J}{K_m} = K_\lambda \cdot \frac{J}{K_m}, \quad (1)$$

где α - коэффициент поглощения лазерного излучения в полупроводнике, R_λ - коэффициент отражения, ε_i - энергия образования электрон-дырочной пары, hc/λ - энергия фотона, ρ - плотность полупроводника, K_m - коэффициент оптических потерь, K_λ - коэффициент пропорциональности между ЛПЭ и энергией лазерного импульса без учета оптических потерь.

Коэффициент оптических потерь определяется, как правило, плотностью металлизации в облучаемой области и, следовательно, может считаться постоянным в рассматриваемом диапазоне температур. Иногда важно учитывать температурную зависимость коэффициента оптических потерь, особенно, когда чувствительный по ОЭ объём расположен под полупроводниковыми слоями. В данной работе рассматривается температурная зависимость только для K_λ .

В первом приближении только коэффициент поглощения α имеет температурную зависимость. В данном приближении выражение для эквивалентных ЛПЭ как функцию от температуры можно представить следующим образом:

$$LET(T) = LET(T_0) \frac{\alpha(T)}{\alpha(T_0)}, \quad (2)$$

где T_0 – температура соответствующим условиям.

Для проверки этого выражения были проведены экспериментальные исследования контроллера шины MIL-STD-1553A/B. Зависимость пороговых ЛПЭ тиристорного эффекта (ТЭ) от температуры была получена ранее с использованием испытательного стенда Роскосмоса на базе циклотрона "У-400М" (ОИЯИ, г. Дубна). Исследования проводились использованием лазерной установки «ПИКО-4» в НИЯУ МИФИ [2].

Обычно поверхность кристалла ИС сканируется несколько раз с различными энергиями импульса лазерного излучения и по результатам сканирования определяется зависимость сечения ОЭ от энергии лазерного излучения. Другой подход – определять пороговую энергию импульса лазерного излучения в наиболее чувствительных областях кристалла ИС по методике локального лазерного воздействия. Был выбран тиристорный эффект, так как, предположительно, он больше всего зависит от температуры. С целью снижения влияния погрешностей позиционирования и локальных неоднородностей металлизации, проводилось усреднение пороговой энергии для нескольких значений диаметров пятна лазерного излучения. Зависимости пороговой энергии лазерного излучения для возникновения тиристорного эффекта в ИС от температуры для различных длин волн приведены на рисунке 1. Зависимости нормированы на величину пороговой

А.А. Новиков, А.А. Печенкин, А.И. Чумаков, А.О. Ахметов, О.Б. Маврицкий
**ИСПЫТАНИЯ ИС НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЗЧ В ДИАПАЗОНЕ
 ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ТЕМПЕРАТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНЫХ
 МЕТОДОВ**

энергии при 25°C. Для сравнения на рисунке 1 так же приведены пороговые значения ЛПЭ, полученные при облучении на ускорителе ионов.

Из полученных зависимостей можно сделать вывод, что пренебрежение температурной зависимостью коэффициента поглощения лазерного излучения в ходе исследований и испытаний с использованием лазерных методов может приводить к существенному занижению пороговых значений ЛПЭ при повышенных температурах. Величина расхождения уменьшается для коротковолнового излучения, что связано с более высоким начальным значением коэффициента поглощения и его низкой температурной зависимостью.

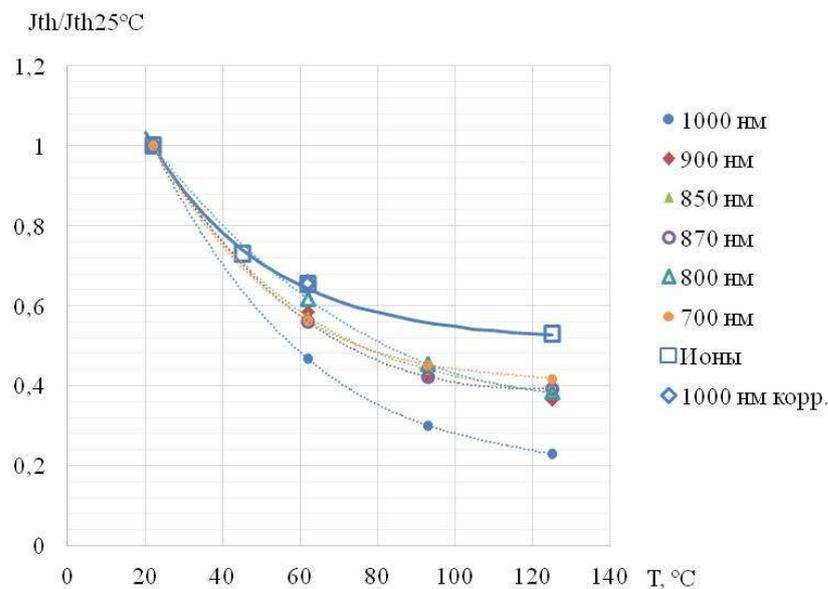


Рисунок 1 – Изменение пороговой энергии лазерного излучения при изменении температуры ИС для различных длин волн.

По литературным данным для чистого кремния коэффициент поглощения изменяется приблизительно вдвое при нагреве от 20°C до 60°C (для длины волны 1000 нм) [5]. Скорректированные экспериментальные данные с учётом изменения коэффициента поглощения хорошо совпадают с результатами, полученными на ускорителях ионов.

Таким образом, для испытаний и исследований в диапазоне температур лазерными методами необходимо получение достоверной информации об изменении коэффициента поглощения лазерного излучения. Простейший подход – использование табличных значений – может приводить к некорректным оценкам, т.к. коэффициент поглощения зависит от степени легирования полупроводника и для различных ИС или даже различных чувствительных областей одной и той же ИС зависимость коэффициента поглощения от температуры может меняться [6].

Альтернативный подход – оценка коэффициента поглощения лазерного излучений из параметров ионизационной реакции в цепи питания ИС на локальное лазерное воздействие. Амплитуда импульса ионизационной реакции может быть описана следующим выражением [1]:

$$\Delta U_{max} \approx 10^5 q_e \cdot g_0 \cdot \frac{R_t}{\tau} \cdot \frac{K_\lambda}{K_m} \cdot J_u \cdot L_{max} \quad (3)$$

А.А. Новиков, А.А. Печенкин, А.И. Чумаков, А.О. Ахметов, О.Б. Маврицкий
 ИСПЫТАНИЯ ИС НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЗЧ В ДИАПАЗОНЕ
 ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ТЕМПЕРАТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНЫХ
 МЕТОДОВ

где q_e – заряд электрона, g_0 – темп генерации носителей в кремнии, R_t – сопротивление токосъемного резистора, J_u – энергия импульса лазерного излучения, τ – эквивалентная постоянная времени переходного процесса, L_{max} – длина собирания заряда.

Используя выражения (1) и (4) может быть получено следующее соотношение для оценки эквивалентных значений ЛПЭ в диапазоне температур:

$$\frac{LET(T)}{LET(T_0)} \approx \frac{\Delta U_{max}(T) \cdot \tau(T) \cdot L_{max}(T_0)}{\Delta U_{max}(T_0) \cdot \tau(T_0) \cdot L_{max}(T)} \quad (4)$$

где $L_{max}(T)$ может быть определена исходя из электрических параметров ИС, которые могут быть получены измерениями ионизационного отклика с различными параметрами резистивно-емкостного нагружения в цепи питания. Также ожидается, что $L_{max}(T)$ будет слабо зависеть от температуры (основываясь на аппроксимациях подвижностей неосновных носителей из [7]).

Для проверки этого подхода были проведены измерения ионизационной реакции на локальное лазерное воздействие с использованием токосъемного сопротивления 50 Ом. Измерения выполнены с использованием осциллографа TDS-3034C с усреднением по 512 точек для уменьшения влияния шумов.

Зависимости амплитуды и длительности на полувысоте ионизационной реакции от температуры для различных длин волн на токосъемном сопротивлении 50 Ом приведены на рисунках 2 и 3.

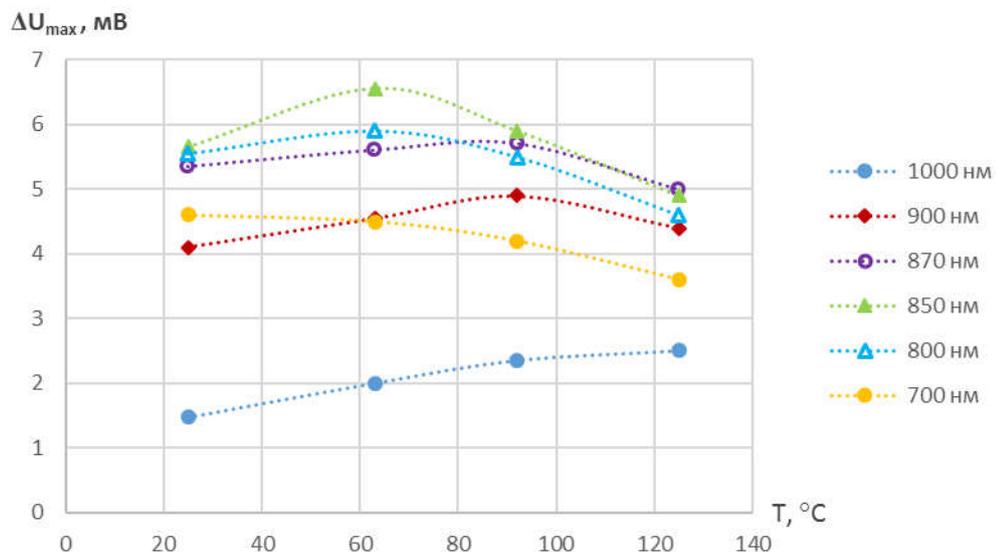


Рисунок 2 – Зависимости амплитуды ионизационной реакции на токосъемном сопротивлении 50 Ом от температуры для различных длин волн.

А.А. Новиков, А.А. Печенкин, А.И. Чумаков, А.О. Ахметов, О.Б. Маврицкий
 ИСПЫТАНИЯ ИС НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЗЧ В ДИАПАЗОНЕ
 ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ТЕМПЕРАТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНЫХ
 МЕТОДОВ

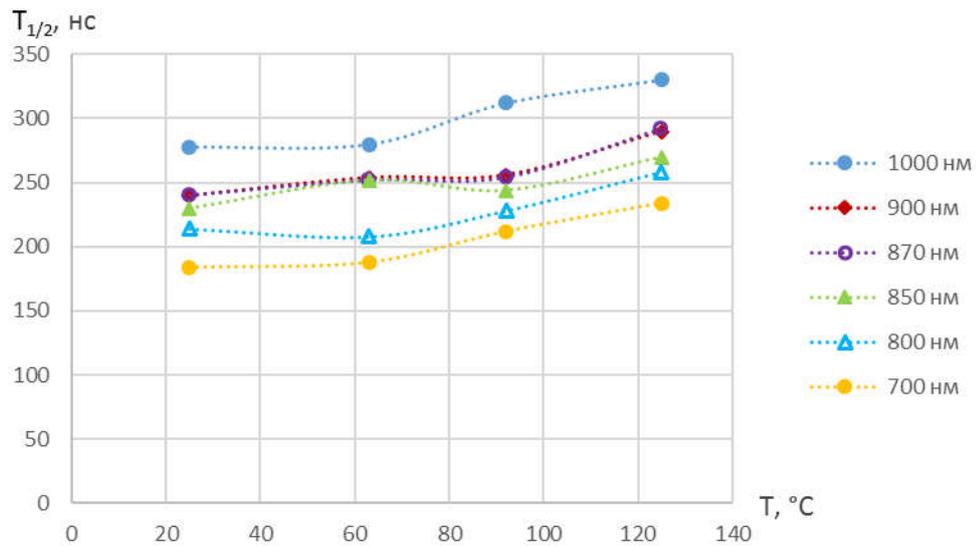


Рисунок 3 – Зависимости длительности на полувисоте ионизационной реакции на токосъемном сопротивлении 50 Ом от температуры для различных длин волн

Скорректированные с использованием ионизационной реакции зависимости пороговой энергии лазерного излучения для возникновения тиристорного эффекта в ИС от температуры для различных длин волн приведены на рисунке 4. Зависимости гораздо лучше коррелируют с результатами, полученными на ускорителе ионов, чем до коррекции (рисунок 1).

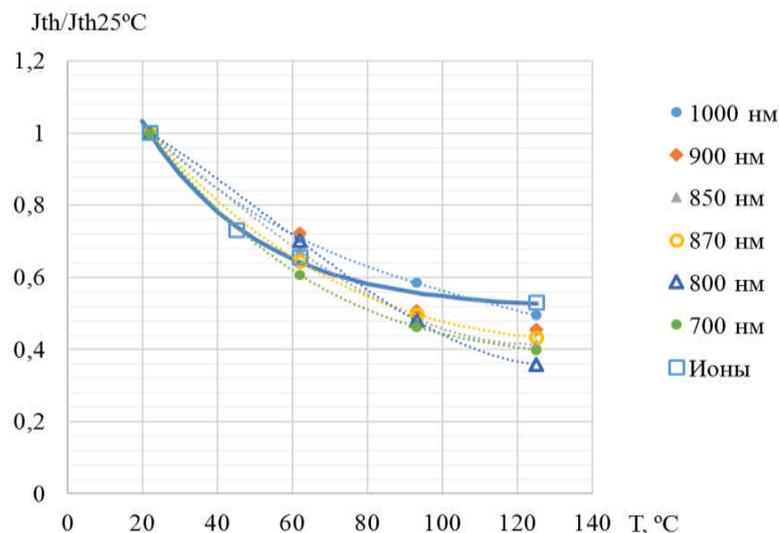


Рисунок 4 – Изменение пороговой энергии лазерного излучения при изменении температуры ИС для различных длин волн.

Подводя итоги, для использования лазерных методов в диапазоне температур необходимо знать температурную зависимость коэффициента поглощения лазерного излучения. Наиболее удобным и точным способом получить эту зависимость является

А.А. Новиков, А.А. Печенкин, А.И. Чумаков, А.О. Ахметов, О.Б. Маврицкий
ИСПЫТАНИЯ ИС НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЗЧ В ДИАПАЗОНЕ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ТЕМПЕРАТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНЫХ
МЕТОДОВ

исследование ионизационной реакции ИС в цепи питания при различных температурах. С использованием этого подхода наблюдалась удовлетворительная корреляция между результатами, полученными на ускорителе ионов, и результатами, полученными с использованием лазерных методов [8].

Работа частично выполнена в рамках выполнения государственного задания № 8.826.2014/К Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Chumakov A.I., Pechenkin A.A., Savchenkov D.V., Tararaksin A.S., Vasil'ev A.L., Yanenko A.V. Local laser irradiation technique for SEE testing of ICs // Proc. 12th European Conf. on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS-2011, Sevilla; Spain; Sept. 19 -23, 2011, pp. 449-453
2. 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 // IEEE Radiation Effects Data Workshop, REDW 2012, Miami, FL; United States; Jul. 16-20, 2012, pp.
3. Kastensmidt F.L., Tambara L., Bobrovskiy D.V., Pechenkin A.A., Nikiforov A.Y. Laser testing methodology for diagnosing diverse soft errors in a nanoscale SRAM-Based FPGA // IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 61, no. 6, pp. 3130-3137, 2014.
4. Pechenkin A.A., Savchenkov D.V., Mavritskii O.B., Chumakov A.I., Bobrovskiy D.V. Evaluation of sensitivity parameters for single event latchup effect in CMOS LSI ICs by pulsed laser backside irradiation tests // Russian Microelectronics, vol. 44, no. 1, pp. 33-39, 2015.
5. Jerome Faist. Optical properties of semiconductors // Eidgenössische Technische Hochschule Zurich. 2008
6. Barton D.L., Bernhard-Höfer K., Cole Jr. E.I. FLIP-chip and 'backside' techniques. // Microelectronics Reliability, 39 (6-7), pp. 721-730, 1999
7. Arora N.D., Hauser J.R., Roulston D.J. Electron and hole mobilities in silicon as a function of concentration and temperature // Electron Devices, IEEE Transactions on, vol.29, no.2, pp.292,295, Feb 1982
8. Novikov A.A., Pechenkin A.A., Chumakov A.I., Akhmetov A.O., Mavritskii O.B. SEE Laser Testing at Different Temperatures // 2015 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), Moscow, 2015, pp. 1-3.

REFERENCES:

1. Chumakov A.I., Pechenkin A.A., Savchenkov D.V., Tararaksin A.S., Vasil'ev A.L., Yanenko A.V. Local laser irradiation technique for SEE testing of ICs // Proc. 12th European Conf. on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS-2011, Sevilla; Spain; Sept. 19 -23, 2011, pp. 449-453
2. 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 // IEEE Radiation Effects Data Workshop, REDW 2012, Miami, FL; United States; Jul. 16-20, 2012, pp.
3. Kastensmidt F.L., Tambara L., Bobrovskiy D.V., Pechenkin A.A., Nikiforov A.Y. Laser testing methodology for diagnosing diverse soft errors in a nanoscale SRAM-Based FPGA // IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 61, no. 6, pp. 3130-3137, 2014.
4. Pechenkin A.A., Savchenkov D.V., Mavritskii O.B., Chumakov A.I., Bobrovskiy D.V. Evaluation of sensitivity parameters for single event latchup effect in CMOS LSI ICs by pulsed laser backside irradiation tests // Russian Microelectronics, vol. 44, no. 1, pp. 33-39, 2015.
5. Jerome Faist. Optical properties of semiconductors // Eidgenössische Technische Hochschule Zurich. 2008
6. Barton D.L., Bernhard-Höfer K., Cole Jr. E.I. FLIP-chip and 'backside' techniques. // Microelectronics Reliability, 39 (6-7), pp. 721-730, 1999
7. Arora N.D., Hauser J.R., Roulston D.J. Electron and hole mobilities in silicon as a function of concentration and temperature // Electron Devices, IEEE Transactions on, vol.29, no.2, pp.292,295, Feb 1982
8. Novikov A.A., Pechenkin A.A., Chumakov A.I., Akhmetov A.O., Mavritskii O.B. SEE Laser Testing at Different Temperatures // 2015 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), Moscow, 2015, pp. 1-3.