



УДК 621.382

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.275.277

РАЦИОНАЛЬНЫЙ СОСТАВ И ОСОБЕННОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ И УСТАНОВОК ДЛЯ ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ ЭКБ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ОТДЕЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ

RATIONAL COMPOSITION AND FEATURES OF PRACTICAL APPLICATION OF TEST METHODS AND INSTALLATIONS FOR ESTIMATING MICROELECTRONIC DEVICES RESISTANCE TO SEE

БОРУЗДИНА А. Б.^{1,2}
abbor@spels.ru

BORUZDINA ANNA B.^{1,2}
abbor@spels.ru

ПЕЧЕНКИН А. А.^{1,2}
aapech@spels.ru

PECHENKIN ALEXANDER A.^{1,2}
aapech@spels.ru

ЯНЕНКО А. В.^{1,2}

YANENKO ANDREY V.^{1,2}

ЧУМАКОВ А. И.^{1,2}
aichum@spels.ru

CHUMAKOV ALEXANDER I.^{1,2}
aichum@spels.ru

ЕГОРОВ А. Н.^{1,2}
anegor@spels.ru

EGOROV ANDREY N.^{1,2}
anegor@spels.ru

¹ Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ»
115409, Россия, г. Москва, Каширское ш., 31

¹ National Research Nuclear University MEPhI,
31 Kashirskoe Highway, Moscow, 115409, Russia

² АО «ЭНПО СПЭЛС»
115409, г. Москва, Российская Федерация

² “Specialized Electronic Systems” JSC
Moscow, 115409, Russian Federation

Обосновано, что рациональное сочетание достоверности, информативности и технико-экономической эффективности экспериментальной оценки стойкости ЭКБ к воздействию отдельных ядерных частиц (тяжелых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов космического пространства, а также одиночных нейтронов) обеспечивается комплексным совместным применением циклотронов тяжелых ионов, сфокусированных лазерных источников, ускорителей протонов и генераторов нейтронов, которые не конкурируют, а взаимно дополняют друг друга.

Ключевые слова: ЭКБ; отдельные ядерные частицы; тяжелые заряженные частицы; сфокусированные лазерные источники.

It has been substantiated that a rational combination of reliability, informativeness and technical effectiveness of experimental evaluation of IC resistance to the SEE (heavy charged particles and high-energy cosmic protons, as well as single neutrons) is provided by a complex joint application of heavy ion cyclotrons, focused laser sources, protons accelerators and neutron generators, which do not compete, but complement each other.

Keywords: IC; single charged particles; radiation test facility; focused laser sources.

Характеризация стойкости изделий к воздействию отдельных ядерных частиц как одного из радиационных факторов космического пространства является необходимой процедурой при разработке новых изделий микроэлектроники, а также при проведении сертификационных испытаний для бортовой аппаратуры. Одиночные радиационные эффекты (ОРЭ), проявляющиеся от воздействия отдельных ядерных частиц, можно разделить на сбои (одиночные, многократные, функциональные) и отказы (тиристорные эффекты и катастрофические отказы). Последние более критичны, так как могут приводить к потере функционирования аппаратуры, в составе которой применяются чувствительные к ОРЭ элементы [1].

Основной целью проведения испытаний к воздействию отдельных ядерных частиц является определение параметров чувствительности к ОРЭ. Можно выделить четыре типа установок, позволяющих определять параметры чувствительности к ОЯЧ: ускорители ионов и лазерные установки, обеспечивающие сфокусированное воздействие, — к воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) и ускорители протонов и генераторы нейтронов — к воздействию высокоэнергетичных протонов космического пространства (ВЭП).

Использование ускорителей ионов является общемировой практикой и заключается в облучении объекта испытаний ионами в диапазоне линейных потерь энергии (ЛПЭ) [1, 2].



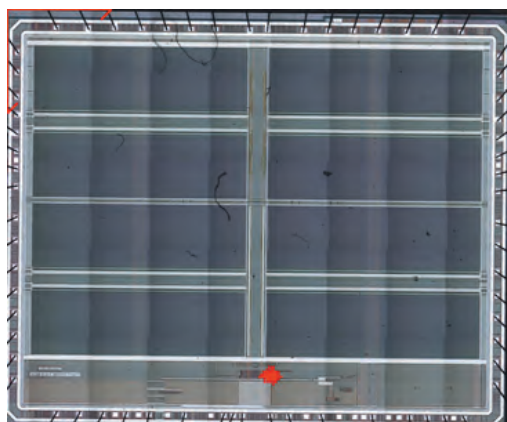
В России испытания на ускорителях ионов проводятся только с использованием испытательных стендов Роскосмоса на базе циклотронов У-400М, У-400 (ЛЯР ОИЯИ, г. Дубна Московской области) в связи с отсутствием других аналогичных испытательных стендов. Стоит отметить, что данные испытательные стенды имеют ограничение, связанное с воздействием на кристалл объекта случайным сканирующим пучком: отсутствие возможности локализации областей, чувствительных к ОРЭ. Проблема решается применением сканирующих микропучков ионов (≈ 2 мкм), однако данная опция на стендах Роскосмоса отсутствует.

Установки, обеспечивающие сфокусированное лазерное воздействие, являются более гибким инструментом. Воздействие позволяет воссоздать ОРЭ за счет ионизации полупроводниковых структур в составе кристалла микросхем лазерным пятном диаметром от 2 мкм до 200 мкм. Испытания могут проводиться как с применением калибровки с ионными данными [3], так и без нее — по ионизационному отклику структуры [4–6]. Данным видом испытательных средств в России обладает ряд испытательных центров (АО «ЭНПО СПЭЛС», филиал АО «ОРКК» — «НИИ КП»), и проведение испытаний не имеет жесткой привязки к датам сессий.

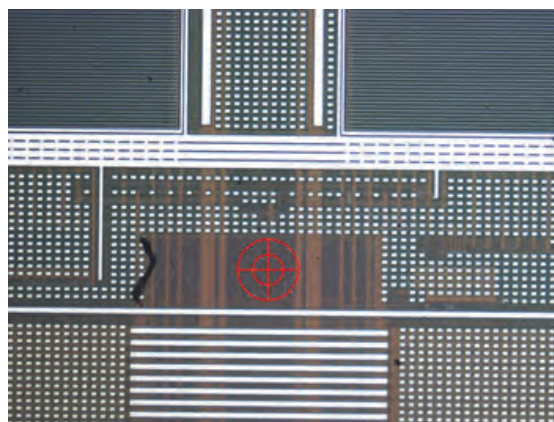
Необходимость локализации возникает как при испытаниях новых разработок, так и при испытаниях в рамках

сертификации микросхем. Лазерные установки позволяют с точностью от 10 до 30 мкм определять зависимость чувствительности к ОРЭ от координат кристалла. В случае чувствительности к ТЭ новой разработки данная опция позволяет выявить области на кристалле, в которых возникают ОРЭ, и дать рекомендацию разработчикам микросхемы для устранения недостатков при проектировании [7, 8]. На рис. 1 приведен пример локализации для ПЗУ области, воздействие в которую ТЗЧ приводит к возникновению отказа в микросхеме.

Работы в рамках сертификации требуют для микросхем, чувствительных к ТЭ, проводить проверку сохранения работоспособности в течение промежутка времени, соответствующего времени срабатывания системы парирования ТЭ в аппаратуре. Корректное проведение данных дополнительных испытаний невозможно на ускорителях ионов в связи с тем, что достоверное покрытие всего кристалла потоком частиц потребует минимум 10-кратного увеличения времени испытаний и в большинстве случаев приведет к отказу микросхемы от сопутствующего дозового воздействия. В связи с этим проверку сохранения работоспособности после ТЭ согласно [3] необходимо проводить на лазерных установках, обеспечивающих полное покрытие кристалла с выдержкой в каждой точке воздействия. В ходе экспериментальных работ по подтверждению сохранения работоспособности после выдержки

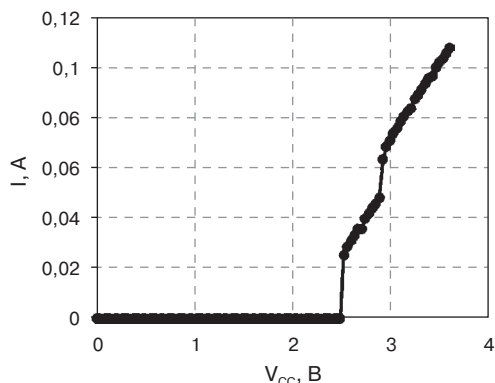


а

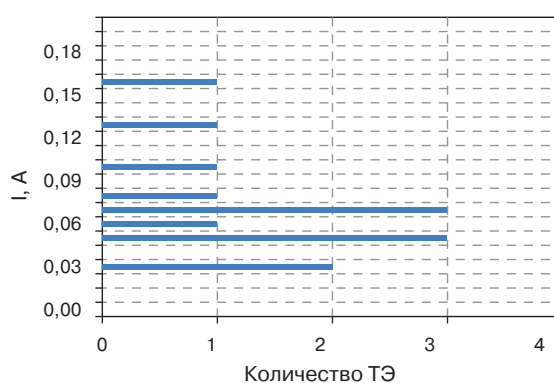


б

Рис. 1. Пример локализации областей кристалла микросхемы, чувствительных к воздействию лазерного излучения по ОРЭ (а), и области, обладающей близкой к минимальной пороговой энергией ЛИ для возникновения ОРЭ (б) с применением сфокусированного лазерного источника



а



б

Рис. 2. Пример данных, полученных при исследовании тиристорных структур, с применением сфокусированного лазера: ВАХ тиристорной структуры для критичной области (а), распределение количества ТЭ в диапазонах значений токов потребления при развитии ТЭ (б)



микросхемы в состоянии ТЭ на лазерных установках также можно получить полезную информацию для разработчиков аппаратуры: напряжение удержания и ток удержания ТЭ, вольт-амперные характеристики тиристорных структур в критических областях кристалла микросхемы (рис. 2а), распределение количества ТЭ в диапазонах значений токов потребления при развитии ТЭ (рис. 2б).

К еще одному достоинству лазерных методов стоит отнести возможность работы с объектами, чувствительная область которых закрыта слоем кремния толщиной до 800 мкм. К подобным объектам относятся микросхемы, закорпусированные по технологии flip-chip [9, 10]. Облучение таких объектов на испытательных стендах Роскосмоса невозможно ввиду ограниченного диапазона энергий ионов: не более 6 МэВ/нуклон при ЛПЭ 60 МэВ·см²/мг (типовое требование по пороговым ЛПЭ), что позволяет обеспечить пробеги частиц не более 150 мкм.

В заключение стоит отметить, что оба рассмотренных метода испытаний на стойкость к воздействию ТЗЧ позволяют оценить параметры чувствительности — конечную цель испытаний. Однако уровень развития испытательных стендов на ускорителях ионов в России не позволяет проводить локализацию областей, чувствительных к одиночным эффектам, и работать с изделиями, требующими обеспечить пробег частиц более 150 мкм до чувствительной области. Применение лазерных методов в дополнение к испытаниям на ускорителях или в качестве самостоятельного инструмента позволяет устранить указанные недостатки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чумаков А. И., Никифоров А. Ю., Телец В. А., Бойченко Д. В. Радиационная стойкость изделий ЭКБ: Научное издание. — Москва, 2015.
2. Chumakov A. I., Vasil'ev A. L., Kozlov A. A., Kol'tov D. O., Krinitskii A. V., Pechenkin A. A., Tararaksin A. S. and Yanenko A. V. *Single-event-effect prediction for ICs in a space environment* // Russian Microelectronics, 2010. Vol. 39. № 2. P. 74–78.
3. ЦДКТ1.027.004-2013. Общая методика испытаний ИЭТ на стойкость к воздействию отдельных тяжелых заряженных частиц на лазерных имитаторах со сфокусированным излучением (определяющие и контрольные испытания).
4. РД В 319.03.58. Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Микросхемы интегральные и полупроводниковые приборы. Методы испытаний и оценки стойкости интегральных схем и мощных МДП-транзисторов по эффектам отказов от воздействия отдельных высокоэнергетичных тяжелых заряженных частиц и протонов космического пространства.
5. РД В 319.03.24. Микросхемы интегральные. Методы испытаний и оценки стойкости больших и сверхбольших интегральных схем к одиночным сбоям от воздействия отдельных высокоэнергетичных тяжелых заряженных частиц и протонов космического пространства.
6. Chumakov A. I. *Laser method of evaluating parameters of LSI sensitivity to the impact of single ions* // Russian Microelectronics, 2018. Vol. 47. № 3. P. 175–180.
7. Chumakov A. I., Pechenkin A. A., Egorov A. N., Mavritsky O. B., Baranov S. V., Vasil'ev A. L. and Yanenko A. V. *Estimating IC susceptibility to single-event latchup* // Russian Microelectronics, 2008. Vol. 37. № 1. P. 41–46.
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. of 12th European Conf. on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS-2011, Sevilla; Spain; Sept. 19–23, 2011. P. 449–453.
9. Bobrovsky D. V., Pechenkin A. A., Novikov A. A., Chumakov A. I., Rysnoy N. V. and Churilin Y. V. *Flip-chip ICs SEE testing technique* // Proc. of 30th Int. Conf. on Microelectronics, MIEL 2017; Nis, Serbia, October 2017. P. 309–311.
10. Chumakov A. I. *Interrelation of equivalent values for linear energy transfer of heavy charged particles and the energy of focused laser radiation* // Russian Microelectronics, 2011. Vol. 40. № 3. P. 149–155.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



ВОЗДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРОНИКЕ: ОТ СХЕМ ПАМЯТИ ДО ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ

под ред. М. Багатен, С. Жерарден
при поддержке филиала ОАО «ОРКК» — «НИИ КП»
пер с англ. под ред. к. т. н. Ю. С. Яскина

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. — Ок. 400 с.

В книге рассказывается о воздействии ионизирующего излучения на современные полупроводниковые приборы, а также обсуждаются схемотехнические методы обеспечения радиационной стойкости заказных микросхем. Издание охватывает широкий спектр устройств, от схем памяти и микропроцессоров до смешанных аналоговых компонентов и формирователей изображений.

В книге представлены несколько вызывающих интерес сфер, включая физику высоких энергий, наземных и космических объектов. Помимо теоретических обоснований в ней достаточно практических аспектов, что позволяет использовать издание для конкретных целей.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 (495) 234-0110; 📠 +7 (495) 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru