

ДЕТЕКТОРНАЯ ЧАСТЬ СТАНЦИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБЛУЧЕНИЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ ПУЧКАМИ ИОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

*О. А. Васильев^а, А. Г. Воронин^а, Д. Е. Карманов^а, И. М. Ковалев^а,
А. А. Курганов^а, М. М. Меркин^а, А. Д. Панов^а, Д. М. Подорожный^а,
А. А. Сливин^б, Е. М. Сыресин^б, А. Н. Турундаевский^а, Г. А. Филатов^б*

^а Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В данной работе описана компоновка прототипа детекторной части станции, реализующей новый метод исследования интегральных схем на стойкость к эффектам однократного действия при эксплуатации в космическом пространстве, и показана его работоспособность на основе монте-карло-моделирования.

We present composition of a Detector Part of the Station prototype which uses a novel method of integral circuit single event effect durability studies. Performance of the prototype is verified using the Monte Carlo simulation.

PACS: 29.90.+g; 29.40.Wk

ВВЕДЕНИЕ

Сложные большие интегральные схемы (БИС), находящиеся в космическом пространстве, подвержены влиянию солнечных излучений и галактических частиц. Чем выше скорость функционирования БИС, тем сильнее они подвержены этим влияниям. Современные БИС состоят из элементов с субмикронными размерами, а это значит, что они имеют меньшие емкости в узлах и, соответственно, меньшие заряды хранения информации. Меньшие напряжения и мощности также означают меньшие заряды и токи, необходимые для хранения и изменения информации. Все эти эффекты делают приборы более чувствительными к радиации и означают, что даже частицы с маленькими энергиями могут привести к сбоям. При создании специализированных БИС, работающих в космических условиях, необходимо учитывать два класса радиационных эффектов [1]:

- накопленная доза ионизации — Total Ionizing Dose (TID);
- эффекты однократного действия (ЭОД) или единичных событий — Single Event Effects (SEE).

Накопленная доза ионизации приводит к постепенной деградации схемы из-за накапливаемого в материале заряда. SEE вызываются одиночными высокоэнергетическими ионизирующими частицами, и их воздействие носит перемежающийся характер, связанный со случайным попаданием отдельных частиц в чувствительные микрообъемы элементов памяти, вызывая, в частности, переключение логического состояния [1].

ЭОД, в свою очередь, можно разделить на обратимые и необратимые [2]. Обратимые переключения (сбои) имеют место, как правило, в запоминающих устройствах статической и динамической памяти и представляют собой обратимое переключение ячейки из одного состояния в другое без потери работоспособности ячейки (single-event upset, SEU). В настоящее время уже давно существуют эффективные методы обнаружения и коррекции таких сбоев (Error Detection and Correction, EDAC), которые могут быть реализованы как на аппаратном, так и на программном уровне.

Гораздо более опасными являются одиночные события, приводящие к необратимым разрушающим последствиям. Главными разновидностями таких катастрофических отказов являются радиационно-индуцированная защелка (single-event latchup, SEL), радиационное выжигание мощных МОП-транзисторов (single-event burnout, SEB), а также пробой окислов транзисторов, вызванные одиночной частицей (single-event gate rupture, SEGR).

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ НА СТОЙКОСТЬ К ЭФФЕКТАМ ОДНОКРАТНОГО ДЕЙСТВИЯ

На сегодняшний день для изучения стойкости ИС к ЭОД применяют два взаимно дополняющих метода: исследования в пучках тяжелых ядер низких энергий и исследования с помощью импульсных лазеров [3–7]. Оба подхода имеют как свои достоинства, так и недостатки [8, 9]. Для дальнейшего изложения важно отметить, что существующие в России ускорители ионов (в частности, У-400 и У-400М [10]) дают достаточно широкий пучок, как правило, превышающий по размеру испытываемый образец, что позволяет исследовать только параметры чувствительности, усредненные по всему образцу, в то время как очевидно, что пороговые ЛПЭ и сечения могут сильно различаться для различных частей (узлов) современных СБИС.

Использование лазерного имитатора со сфокусированным пятном диаметром в несколько микрометров [7, 9] и сопоставимой точностью его наведения позволяет обойти эту трудность, однако здесь имеются свои проблемы. Наиболее существенная из них связана с наличием на поверхности современных СБИС многослойной металлизации, которая покрывает значительную часть их площади. Это может приводить к «холостым выстрелам» лазерного излучения, когда оптическое излучение в определенных частях образца практически полностью отражается от слоев металлизации [8], что очевидно искажает измеренную величину сечений ЭОД. Однако даже если излучение проникает сквозь защитные слои, его ЛПЭ оказываются заниженными по сравнению с реальной ионизирующей частицей, что может приводить к систематическим ошибкам в определении пороговых ЛПЭ.

Эти трудности можно разрешить, если сочетать исследования на лазерных имитаторах с исследованием на ускорителях ионов, дополнив последние аппаратурой,

позволяющей восстанавливать точку попадания частицы ускорителя в образец. Такое исследование не заменяет испытаний с лазерным имитатором, так как набор данных на ускорителе весьма дорогостоящее мероприятие, особенно с учетом того, что для исследований различных видов ЭОД необходимо проводить измерения в широком диапазоне ЛПЭ [8]. Однако координатная привязка при испытаниях на ускорителе позволит прокалибровать данные с лазерного имитатора, измерив, например, систематические сдвиги критических величин ЛПЭ.

Необходимая для подобных исследований аппаратура хорошо известна в физике высоких энергий, это так называемые трековые системы.

ДЕТЕКТОРНАЯ ЧАСТЬ СТАНЦИИ (ДЧС)

ДЧС является экспериментальной установкой, позволяющей восстанавливать траектории (треки) и энергию (по энерговыделению в слоях) попадающих в нее частиц.

ДЧС состоит из нескольких детектирующих плоскостей (ДП), расположенных друг за другом перпендикулярно пучку ускорителя (расположение плоскостей в установке приведено на рис. 1).

В системе используются плоскости трех типов:

- детектирующие плоскости с высоким координатным разрешением (ДП-ВКР);
- детектирующие плоскости с низким координатным разрешением (ДП-НКР);
- детектирующие плоскости без координатной чувствительности (ДП-БКЧ).

ДП всех типов имеют одинаковую форму — центрально-симметричную относительно оси пучка ускорителя, независимо от типа установленного детектора. В центре плоскости располагается ее чувствительный элемент — кремниевый детектор. Способ крепления ДП на пучок одинаков для всех типов плоскостей.

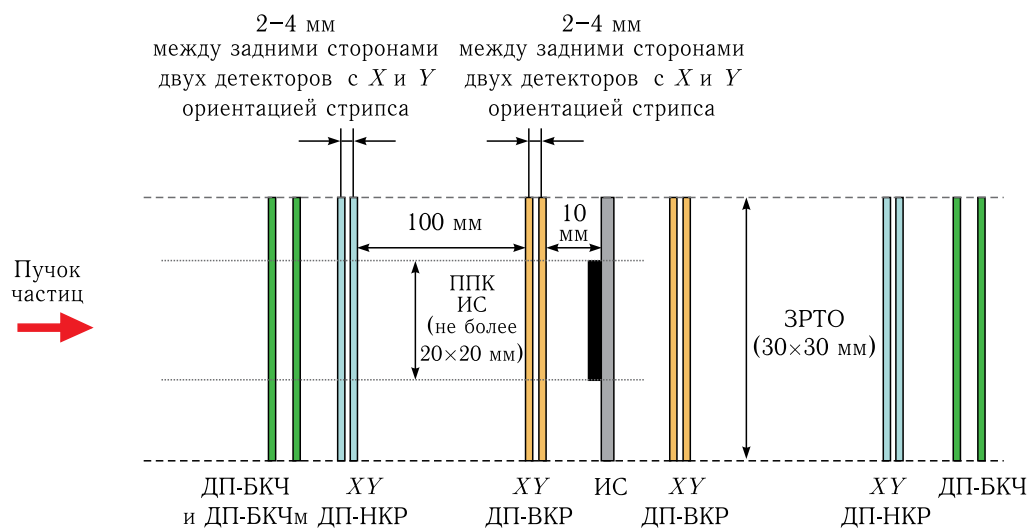


Рис. 1. Структурная схема расположения плоскостей ДЧС

Также в ДЧС входят блоки, не устанавливаемые непосредственно под пучок ускорителя:

- блок плат контроллеров и платы выработки сигнала запуска чтения данных (БК — блок контроллеров);
- блок связи с компьютером управления ДЧС (БСК — покупное изделие);
- необходимые блоки питания (покупные изделия).

Перечисленные блоки располагаются вне пучка ускорителя, но в непосредственной близости от него, на расстоянии 1–2 м.

В состав ДЧС также входит управляющий компьютер, на который установлено специализированное ПО ДЧС, в том числе:

- ПО управления частями ДЧС;
- ПО предварительной обработки собранных данных.

Управляющий компьютер ДЧС располагается в рабочем помещении операторов.

ДЧС обеспечивает проведение необходимых измерений в пределах так называемой зоны размещения тестируемого образца — ЗРТО — 30×30 мм. При этом предельная площадь собственно корпуса испытываемой микросхемы (ППК ИС) не должна превышать 4 см^2 в пределах ЗРТО.

Ожидаемый диапазон так называемых линейных потерь энергии (ЛПЭ) от ядер в микросхеме — $1\text{--}80 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ (что для кремниевых ИС соответствует энерговыделению $\sim 0,2\text{--}20 \text{ МэВ}/\text{мкм}$). Для этих величин ЛПЭ ожидаемый уровень сигнала в кремниевых датчиках ДЧС составит от 0,13 пКл (для релятивистских ядер углерода) до 300 пКл (для медленных ядер золота) для толщины датчиков 300 мкм. В этих пределах ДЧС обеспечивает: точность определения энерговыделения (ЛПЭ) в ИС не хуже 10%; точность определения места попадания ядра в микросхему — ± 100 мкм.

ДЧС обеспечивает регистрацию величины энерговыделения и координаты попадания индивидуального ядра в корпус ИС не менее чем для 65% падающих на корпус ИС ядер при потоках ядер, не превышающих 10^4 ядер/с на ППК ИС (т. е. на 4 см^2) (это соответствует потоку в $2,2 \cdot 10^4$ ядер/с на всю ЗРТО в 9 см^2). Указанная оценка эффективности регистрации получается в предположении, что время регистрации события в ДЧС не превышает 40 мкс (так называемое мертвое время системы в режиме полной обработки события). Однако этого времени достаточно только для события, в котором ДЧС регистрирует единственную частицу (ядро-снаряд) и она не претерпевает ядерных превращений (взаимодействий) в датчиках ДЧС. События с распадом исходного ядра регистрируются медленнее и приводят к дополнительным потерям в регистрации событий.

ДЧС обеспечивает подсчет числа ядер, падающих в корпус ИС, с потерями не более 5% для потоков ядер, не превышающих 10^4 ядра/с на ППК ИС. Для более высоких потоков потери статистики в режиме счета возрастут и составят не более 30% для потока в 10^5 ядер/с на ЗРТО (на 9 см^2), что определяется мертвым временем ДЧС в счетном режиме — менее 4 мкс при счете событий с энерговыделением выше определенного порога.

На каждой детектирующей плоскости располагается один кремниевый детектор.

На ДП-ВКР располагается один «мелкостриповый» детектор со следующими характеристиками: шаг стрипов 100 мкм, количество стрипов 320, габарит детектора $34,0$ (поперек стрипов) $\times 32,4$ мм (вдоль стрипов), толщина детектора 300 мкм.

На ДП-НКР располагается один «крупностриповый» детектор со следующими характеристиками: шаг стрипов 1 мм, количество стрипов 32, габарит детектора 34,0 (поперек стрипов) × 32,4 мм (вдоль стрипов), толщина детектора 300 мкм.

На ДП-БКЧ располагается один «падовый» детектор, который не разделен на части (стрипы) и также имеет габарит 34,0 × 32,4 мм и толщину 300 мкм. В пДЧ необходимо использовать падовые детекторы двух размеров — большой и малый. Габариты большого и малого детектора одинаковы — 34,0 × 32,4 мм, и толщина — 300 мкм, различается размер активной области.

Для считывания каналов на ДП-ВКР и ДП-НКР установлены специализированные интегральные микросхемы НУКЛОН (СИМС НУКЛОН), хорошо зарекомендовавшие себя в рамках успешно проведенного космического эксперимента НУКЛОН [11]. СИМС НУКЛОН является 32-канальной микросхемой считывания сигналов с кремниевых детекторов с беспрецедентно широким динамическим диапазоном воспринимаемых сигналов.

Активная область у всех детекторов, за исключением малого детектора БКЧ, одинаковая — 32 мм поперек стрипов (если есть стрипы), 29,6 мм вдоль стрипов (опять же, если есть стрипы). Активная область малого детектора БКЧ — габарит малого — 20,0 × 20,0 мм и толщина — 300 мкм. Центр активной области малого детектора БКЧ совпадает с центром его габаритного размера.

Работа регистрирующей части ДЧС управляется двумя блоками — блоком контроллеров (БК) и блоком связи с компьютером (БСК).

Блок БСК представляет собой стандартный HUB ETHERNET (покупное изделие) с не менее чем 16 входами. Скорость обмена БСК с частями СДЧ и с компьютером управления на уровне 5–10 МБ/с. БСК подключается к компьютеру управления ДЧС, ко всем плоскостям ДЧС (через промежуточные платы контроллеров БК) и к плате контроллера триггера в составе БК, обеспечивая их информационную связь между собой.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОВ РАБОТЫ

Описанная установка может работать в двух режимах — пролетном и режиме фиксированной ЛПЭ.

«Пролетный» режим — предварительный, предназначен для калибровки станции и изучения структуры исследуемого образца и позволяет, в том числе, локализовать положение кристалла исследуемой интегральной микросхемы в корпусе.

Режим «фиксированной ЛПЭ» — основной, предназначен для исследования сбое- и отказоустойчивости тестируемой микросхемы при попадании частиц с заданной величиной ЛПЭ. Энергия частиц-снарядов выбирается на основании результатов анализа данных «пролетного режима» так, чтобы в кристалле ИС они оставляли определенную величину ЛПЭ. При этом датчики ДЧС регистрируют энерговыделение и координаты ядер-снарядов.

Рис. 2 дает общее представление о принципе работы методики энергетической томографии. На рисунке показаны две трехмерные диаграммы энерговыделений ядер золота в первой (левая диаграмма) и второй (правая диаграмма) падовых плоскостях

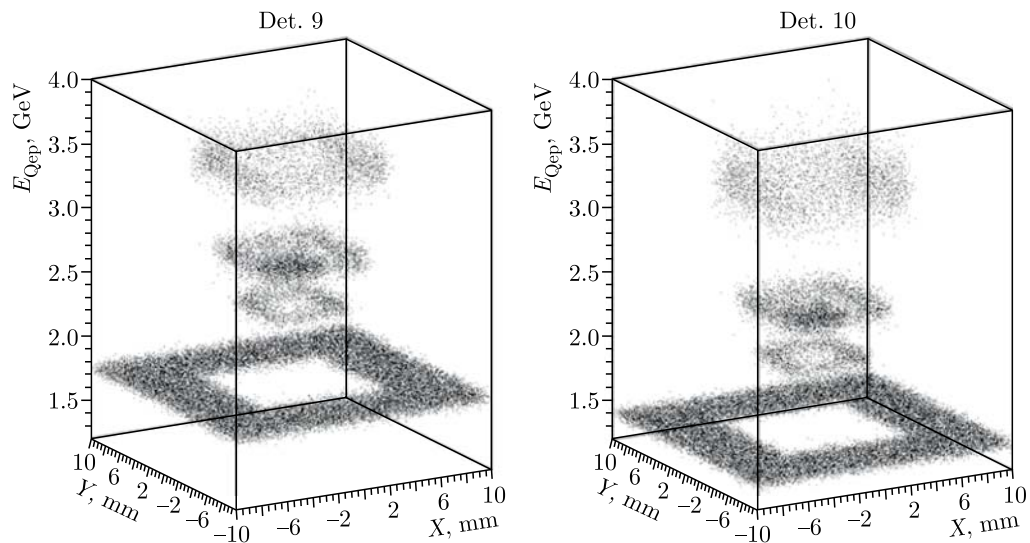


Рис. 2. Энергетическая томография модели микросхемы в керамическом корпусе (с воздушными пустотами)

после образца для микросхемы с воздушными пустотами. По осям X и Y (мм) отложены реконструированные координаты ядра при прохождении кремния микросхемы. По оси Z отложено энерговыделение в ГэВ. Хорошо видно, как энерговыделение разрешает основные структуры внутри микросхемы.

На рис. 3 показан пример распределения ошибки определения одной из поперечных координат при энергии 205 МэВ/нуклон. Стандартное отклонение восстановленной координаты от координаты попадания при данной энергии составило 50 мкм. В ходе моделирования было показано, что полученное координатное разрешение слабо зависит от энергии и не превышает 56 мкм в худшем случае [12].

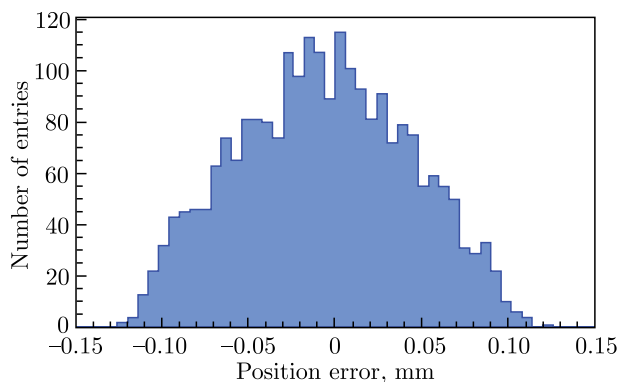


Рис. 3. Распределение отклонений восстановленной координаты треков частиц от места их попадания в микросхему в режиме «фиксированной ЛПЭ»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана новая методика исследования стойкости интегральных схем к эффектам одиночного действия. Разработан прототип детекторной части станции, реализующий данную методику. Проведено монте-карло-моделирование, которое целиком подтвердило характеристики, обеспечиваемые прототипом. В настоящий момент прототип находится на стадии изготовления.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Уникальный идентификатор соглашения — RFMEFI60719X0326.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Таперо К. И., Улимов В. Н., Членов А. М.* Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. С. 304.
2. Single Event Effects Specification.
<https://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/seespec.htm>.
3. *Чумаков А. И.* Действие космической радиации на ИМС. М.: Радио и связь, 2004. 320 с.
4. *Allen G. R.* Compendium of Test Results of Single Event Effects Conducted by the Jet Propulsion Laboratory // 2008 IEEE Radiation Effects Data Workshop Record. 2008. P. 21.
5. *Pouget V.* Fundamentals of Laser SEE Testing and Recent Trends // RALFDAY, EADS France, Suresnes, 11th Sept., 2009.
6. *Jones R. et al.* Comparison between SRAM SEE Cross-Sections from Ion Beam Testing with Those Obtained Using a New Picosecond Pulsed Laser Facility // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2000. V. NS-47, No. 3. P. 539–544.
7. *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 ИМС // Микроэлектроника. 2004. Т. 33, № 2. С. 128–133.
8. *Яненко А. В., Чумаков А. И., Печенкин А. А., Савченков Д. В., Тараксин А. С., Васильев А. Л.* Сравнительный анализ испытаний электронной компонентной базы на стойкость к воздействию отдельных ядерных частиц на лазерных имитаторах и ускорителях ионов // Спецтехника и связь. 2011. № 4, 5.
9. *Чумаков А. И.* Возможности и ограничения лазерных методов при оценке параметров чувствительности БИС к эффектам воздействия тяжелых заряженных частиц // Безопасность информ. технологий. 2019. Т. 26, № 3.
10. *Oganessian Yu. Ts., Gulbekyan G. G., Gikal B. N., Kalagin I. V.* Status Report of the U400 Cyclotron at the FLNR JINR // Proc. of APAC 2004 Intern. Conf., Gyeongju, Korea, 2004. P. 52–54.
11. *Аткин Э. В., Воронин А. Г., Клюев А. Д. и др.* Специализированная интегральная микросхема съема и обработки информации микрополосковых детекторов // Микроэлектроника. 2011. Т. 40, № 1. С. 57–63.
12. *Васильев О. А., Карманов Д. Е., Ковалев И. М. и др.* Результаты предварительного моделирования проекта ДЧС-NICA // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17, № 6.

Получено 15 августа 2020 г.