

УДК 544.541

Исследования сбоеустойчивости электронных компонентов под действием отдельных частиц

П. А. Александров, А. В. Беклемишева, П. Ю. Макавеев, Е. И. Уксусов, С. С. Фанченко, Е. В. Ефименко

Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский институт», Москва, 123182, Россия

Актуальной проблемой на сегодняшний день является обеспечение отказоустойчивости в системах управления, работающих в условиях воздействия высокоэнергетических частиц, например, космического излучения, состоящего главным образом из протонов, имеющих энергию до 10^{20} эВ. Таких частиц довольно мало, но они в результате взаимодействия с веществом продуцируют нейтроны, часть из которых в результате упругих столкновений с атомами кремния (это основная составляющая современной микросхемы) дают первично выбитые атомы (ПВА) достаточной энергии для генерации электронно-дырочных пар в полупроводнике, и уже они, воздействуя на работающий транзистор, могут дать сбой в работе всего устройства. Сразу ясно, что теоретический расчет здесь сильно затруднен из-за сложности описанных выше процессов, и поэтому нужны эксперименты с реальным облучением и измерением количества сбоев. В данной работе экспериментально исследуется сбоеустойчивость при воздействии нейтронов Pu-Be источника со средней энергией около 3.8 МэВ, на интегральную микросхему. Разработан экспериментальный стенд, фиксирующий количество сбоев в микросхеме при облучении. Демонстрируется возможность повышения отказоустойчивости микросхем ПЛИС за счет использования резервирования (пространственного и временного троирования).

Ключевые слова: отказоустойчивость в системах управления, нейтроны, сбоеустойчивость, микроэлектроника, электронные компоненты, высокоэнергетические частицы, программируемые логические интегральные схемы, микросхемы.

Введение

Устойчивость полупроводниковых микросхем к радиационному воздействию можно условно поделить на две части. Одна из них – устойчивость к дозе облучения. При этом рассматривается относительно слабое воздействие, которое приводит к выходу атомов кремния (основного элемента микросхемы) из положения равновесия в кристаллической решетке, что дает уменьшение подвижности носителей заряда, постепенному ухудшению параметров транзисторов и выходу их из строя. Этот процесс известен, он исследуется теоретически и экспериментально и хорошо поддается экспериментальной проверке. Основные методы увеличения стойкости по отношению к этому процессу – технологические.

Большой интерес представляет устойчивость по отношению к действию отдельных частиц высокой энергии [1]. При этом происходит рождение первично выбитых атомов кремния (ПВА), которые в результате торможения в решетке полупроводника генерируют электрон-дырочные пары, и они уже заряжают конденсаторы, работающие в составе транзистора, до напряжения, сравнимого с напряжением питания,

✉ А.В. Беклемишева: annabekl@ya.ru

Поступила в редакцию: 31.10.2024

После доработки: 15.12.2024

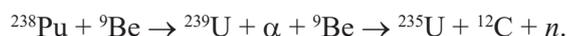
Принята к публикации: 24.12.2024

что и приводит к сбою, т.е. временной потере работоспособности [2, 3]. Понятно, что этот процесс носит пороговый характер по энергии ПВА. Также отсюда следует зависимость эффекта от размеров транзистора или от топологического размера, принятого при изготовлении микросхемы.

Ввиду того, что поток таких высокоэнергетичных частиц мал, будут в малом количестве и многократные сбои. В этом случае для борьбы с этим эффектом прибегают к резервированию и чаще всего к мажоритарному резервированию, где правильный результат определяется по наибольшему числу совпадений в вычислениях разными процессорами. Количество одинаковых процессоров должно быть нечетным, т.е. три и более.

Экспериментальная часть

Достаточно большая энергия ПВА получается при воздействии на микросхему тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) в космосе или быстрых нейтронов. Заметим здесь, что ТЗЧ, попадая на детали конструкции или в любое другое материальное тело генерируют быстрые нейтроны в довольно большом количестве, которые уже дают ПВА. Это основная причина, почему для дальнейших исследований был выбран Pu-Be источник нейтронов. Этот источник представляет собой механическую смесь наночастиц ^{238}Pu и ^9Be и работает по схеме



Он представляет интерес, так как получаемые нейтроны имеют энергию выше, чем от ядерного реактора [4, 5], выше, чем энергия нейтронов, возникающих при делении ядер при этом средняя энергия составляет около 3.8 МэВ, максимальная – 10 МэВ, и этого оказывается достаточно, чтобы возникали сбои от отдельных частиц. Энергетический спектр нейтронов был снят с использованием спектрометра-дозатора SDMF-1608.

Другое важное обстоятельство возникло при обсуждении количества необходимых микросхем при выполнении задачи управления летательным аппаратом в космосе, где и существует указанное выше радиационное воздействие. Таких систем управления требуется мало, поэтому целесообразно использовать программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Современные ПЛИС позволяют программным образом организовать в составе одной микросхемы процессор, оперативную память и все остальное, необходимое для нормального функционирования системы управления. Кроме того, часто в составе ПЛИС имеется дополнительная флеш-память, которая имеет напряжение питания около 15 В и поэтому обладает большей стойкостью по отношению к стойкости логических элементов, которые имеют меньшее напряжение питания. Важным аргументом за использование ПЛИС является то, что современная технология позволяет иметь в составе ПЛИС достаточно большое количество логических элементов, и можно программным образом создать систему с различным образом резервирования и затем, проведя радиационные испытания, определить количество сбоев при разных способах резервирования.

Для проведения этой работы были использованы микросхемы Altera Cyclone III EP3C25F324C6 (24624 логических элементов; тактовая частота – 50 МГц; топологический размер – 65 нм; напряжение питания – 1.2 В; число входов/выходов – 324), а также отладочная плата Altera Max 10 10M08SAE144C8GES (8000 логических элементов; тактовая частота – 50 МГц; топологический размер – 55 нм; напряжение питания – 3.3 В; число входов/выходов – 144). Для программирования данных микросхем использовался программный пакет Quartus II.

Система на основе процессора Nios II состоит из двух отдельных частей: аппаратной и программной. Встроенный в платформу Quartus II инструмент Platform Designer используется для реализации аппаратной части (настройка конфигурации процессора и периферии). Платформа Nios II EDS используется для работы с программной частью проекта. Архитектура процессора Nios II определяет следующие функциональные блоки:

- файл регистров;
- арифметико-логическое устройство (АЛУ);
- интерфейс для логики пользовательских инструкций;
- контроллер исключений;

- внутренний или внешний контроллер прерываний;
- шину инструкций;
- шину данных;
- блок управления памятью (MMU);
- блок защиты памяти (MPU);
- блоки памяти для кэшей инструкций и данных;
- интерфейс тесно связанной памяти для инструкций и данных;
- модуль отладки JTAG;
- производительность процессора 51 млн операций в секунду (51 DMIPS) на частоте 50 МГц.

Для регистрации сбоев во время облучения был создан стенд с выводом информации о количестве сбоев (рис. 1) на компьютер, находящийся вне зоны облучения. Известно [6], что резервирование дает увеличение стойкости по отношению к сбоям примерно в 250 раз. Сначала проводились тестовые облучения микросхемы памяти 573 PФ2 без резервирования. Это четыре серии облучения, в ходе которых получено 47, 66, 61 и 24 сбоя при флюенсе в каждом случае в $8 \cdot 10^{11}$ Н/см², причем жестких сбоев (отказов) не было обнаружено.

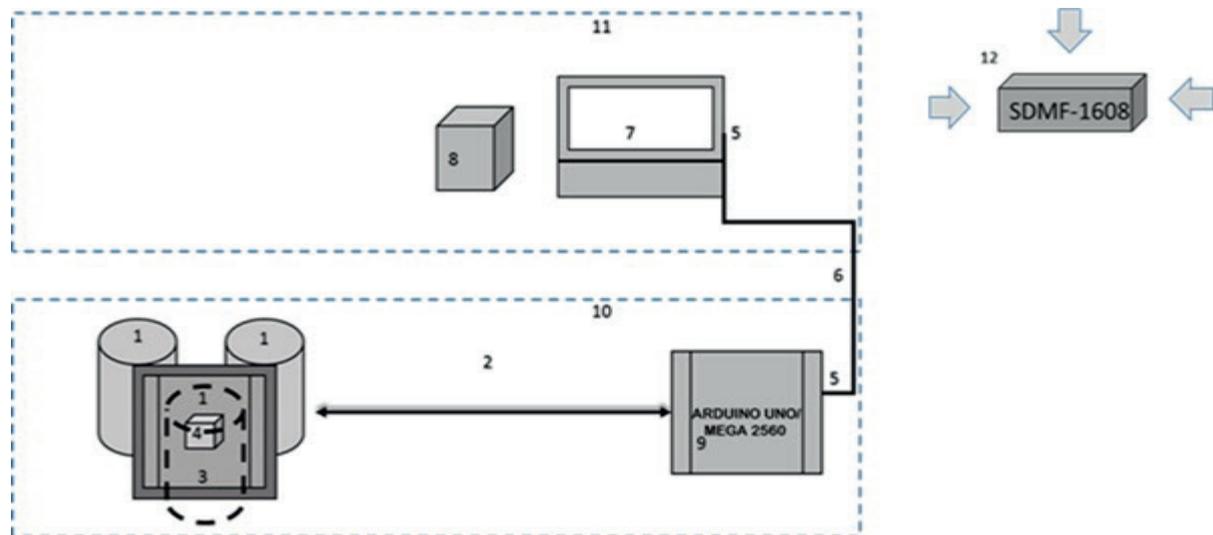


Рис. 1. Стенд для изучения количества сбоев во время облучения: 1) источники нейтронов с потоком, плотно прилегающие к кристаллу с трех сторон; 2) сигналы от трех процессоров (расстояние – 1 м); 3) отладочная плата, $S = 85 \times 75$ мм; 4) кристалл FPGA $S = 20 \times 20$ мм (10M08SAE144C8G); 5) USB-разъем, 6) кабель длиной 10 м; 7) ноутбук с программой; 8) программа регистрации; 9) микропроцессор ARDUINO UNO или MEGA 2560; 10) помещение, в котором происходит облучение микросхемы потоком нейтронов; 11) помещение без нейтронов; 12) спектрометр-дозиметр SDMF-1608 переносной

Микросхемы с памятью требуют при проектировании меньших ресурсов, чем с процессорами, поэтому радиационные испытания были проведены в первую очередь с ними. Микросхема FPGA EP4CE10F17C8N программировалась как память, в которую была записана информация. Память циклически опрашивалась, результаты опроса регистрировались в случае ошибки при облучении быстрыми нейтронами в течение недели и записывались в файл на внешний компьютер. В файле записывались вид ошибки и время ее возникновения. По результатам обработки число сбоев за время облучения составило ~ 0.3 % от зарегистрированных правильных чтений памяти.

Микросхема FPGA 10M08SAE144C8GES программировалась двумя способами: как процессор Nios II с оперативной памятью и последовательным интерфейсом UART для вывода результатов на внешний компьютер и как три процессора Nios II с оперативной памятью. Каждый из трех указанных процессоров соединялся с интерфейсом UART для вывода результатов на внешний компьютер.

Программа процессоров Nios II была также двух видов. Сначала процессоры записывали в память данные 10101010101010101010101010101010 и циклически опрашивали память, в случае сбоев выдавая

сигнал об ошибке на внешний компьютер. Во втором случае программа производила циклически арифметические вычисления с заведомо известным результатом и, в случае ошибки вычислений, выдавала сигнал на внешний компьютер. По результатам обработки число сбоев в случае работы трех процессоров за время облучения составило $\sim 0.08\%$ от зарегистрированных правильных случаев обращений к памяти и вычислений арифметических выражений, см. также [7].

Для исследований использовались ПЛИС (FPGA) фирмы Altera Cyclon IV и MAX 10. По размерам они близки к отечественным ПЛИС 5578TC0 24 и программируются тоже в САПР Quartus II.

Выводы

Удалось разработать систему для тестирования сбоеустойчивости оборудования под воздействием высокоэнергетических частиц с энергией до 10^{20} эВ, показывающую высокие результаты по снижению сбоев при воздействии нейтронов на интегральную микросхему. Получены экспериментальные данные, демонстрирующие возможность повышения отказоустойчивости микросхем ПЛИС за счет использования резервирования (пространственного и временного троирования). Измерялось количество сбоев в одном запрограммированном процессоре, в системе с мажоритарным пространственным троированием и в случае, когда производится мажоритарное временное троирование. Количество сбоев уменьшается примерно в 250 раз, а при временном мажоритарном троировании уменьшается еще в 2.5 раза по сравнению со схемой, не использующей резервирование.

Благодарности

Авторы благодарят НИЦ «Курчатовский институт» за финансирование работы, выполняемой в соответствии с утвержденным тематическим планом НИОКР в рамках государственного задания по комплексной теме 17п «Выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в целях обеспечения создания прототипов плазменных ракетных двигателей» по тематике 17п.2 «Разработка и экспериментальная верификация покомпонентного резервирования для управляющих систем плазменных ракетных двигателей».

Финансирование

Работа финансируется НИЦ «Курчатовский институт» в рамках НИОКТР ««Разработка и экспериментальная верификация покомпонентного резервирования для управляющих систем плазменных и ракетных двигателей», выполнявшейся в соответствии с приказом НИЦ «Курчатовский институт» от 16 января 2024 № 109.

Вклад авторов

Александров П.А. – формулировка идеи и целей исследования, постановка задачи, выбор методов исследования; разработка концепции исследования, разработка методик измерения; участие в проведении исследования и обсуждении результатов.

Фанченко С.С. – формулировка идеи и целей исследования, постановка задачи, выбор методов исследования; разработка концепции исследования, разработка методик измерения; анализ нормативной базы.

Макавеев П.Ю. – анализ нормативной базы; постановка эксперимента; выполнение экспериментальных работ, обработка результатов; проведение численных расчетов.

Уксусов Е.И. – формулировка идеи и целей исследования, постановка задачи, выбор методов исследования; разработка концепции исследования, разработка методик измерения; анализ нормативной базы.

Ефименко Е.В. – анализ нормативной базы; участие в проведении исследования и обсуждении результатов; разработка математической модели.

Беклемишева А.В. – формулировка идеи и целей исследования, постановка задачи, выбор методов исследования; разработка концепции исследования, разработка методик измерения; подготовка текста статьи.

Конфликт интересов

Конфликт интересов отсутствует.

Список литературы

1. Голяков А.Д., Ричняк А.М. Исследование отказоустойчивости оптико-электронной навигационной системы автономного космического аппарата // Труды МАИ, 2021. В. № 117. С. 20–42.
2. Ефименко Е.В., Фанченко С.С., Александров П.А. Исследование влияния облучения нейтронами на отказоустойчивость микросхемы // Известия НАН Армении. Физика, 2022, Т. 57. № 3. С. 457–462.
3. Александров П.А., Жук В.И., Литвино В.Л. Способы построения отказоустойчивых цифровых микросхем и оценки вероятностей их отказа, вызванного облучением М.: ПоРог, 2019.
4. Haider F.A., Chee F.P., Hassan H.A. Changes in electrical properties of MOS transistor induced by single 14 MeV neutron // AIP Conference Proceedings, 2016, 1704, 050015.
5. Petersen E.L. Single Event Effects in Aerospace New Jersey: IEEE Press, 2011, 520p. ISBN: 978-1-118-08431-1.
6. Mark W.L. Evaluation of the Leon3 Soft-Core Processor Within a Xilinx Radiation-Hardened Field-Programmable Gate Array. SANDIA REPORT, 2012, 0454.
7. Cannon M.J. Improving the Single Event Effect Response of Triple Modular Redundancy on SRAM FPGAs Through Placement and Routing. Brigham Young University: ProQuest Dissertations Publishing, 2019, 22616967.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2025, vol. 14, no. 1, pp. 85–90

Investigations into the failure tolerance of electronic components under the influence of individual particles

P. A. Alexandrov, A. V. Beklemisheva [✉], P. Yu. Makaveev, E. I. Uksusov, S. S. Fanchenko, E. V. Efimenko

National Research Center «Kurchatov Institute», sq. Academician Kurchatova, 1, Moscow, 123182 Russia

[✉] annabekl@ya.ru

Received October 31, 2024; revised December 15, 2024; accepted December 24, 2024

A pressing issue today is to ensure fault tolerance in control systems operating under conditions of high-energy particle impact, such as cosmic radiation, consisting mainly of protons with energies up to eV. There are quite a few such particles, but as a result of interaction with matter they produce neutrons, some of which, as a result of elastic collisions with silicon atoms (the main component of a modern microcircuit), produce primarily knocked-out atoms (PKAs) of sufficient energy to generate electron-hole pairs in a semiconductor, and they, acting on a working transistor, can cause a failure in the operation of the entire device. It is immediately clear that theoretical calculations here are greatly complicated by the complexity of the processes described above, and therefore experiments with real irradiation and measurement of the number of failures are needed. In this work, fault tolerance is experimentally investigated when an integrated circuit is exposed to Pu-Be source neutrons with an average energy of about 3.8 MeV. An experimental setup is developed that records the number of faults in the circuit when irradiated. The possibility of increasing the fault tolerance of FPGA circuits by using redundancy (spatial and temporal triplication) is demonstrated.

Keywords: fault tolerance in control systems, neutrons, fault tolerance, microelectronics, electronic components, high-energy particles, programmable logic integrated circuits, microcircuits.

References

1. *Golyakov A.D., Richnyak A.M.* Issledovanie otkazoustojchivosti optiko-elektronnoj navigacionnoj sistemy avtonomnogo kosmicheskogo apparata [Study of fault tolerance of the optical-electronic navigation system of an autonomous spacecraft]. Trudy MAI, 2021, no.117. pp. 20–42. (in Russian).
2. *Efimenko E.V., Fanchenko S.S., Aleksandrov P.A.* Issledovanie vliyaniya oblucheniya nejtronami na otkazoustojchivost' mikroskhemy [Study of the influence of neutron irradiation on the fault tolerance of a microcircuit]. Izvestiya NAN Armenii, Fizika, 2022, vol.57, no. 3, pp. 457–462. (in Russian).
3. *Aleksandrov P.A., Zhuk V.I., Litvino V.L.* Methods for constructing fault-tolerant digital microcircuits and assessing the probabilities of their failure caused by radiation. Moscow, Porog, 2019.
4. *Haider F.A., Chee F.P., Hassan H.A.* Changes in electrical properties of MOS transistor induced by single 14 MeV neutron AIP Conference Proceedings, 2016. 1704. 050015.
5. *Petersen E.L.* Single Event Effects in Aerospace. New Jercey, IEEE Press, 2011, 520 p. ISBN: 978-1-118-08431-1.
6. *Mark W.L.* Evaluation of the Leon3 Soft-Core Processor within a Xilinx Radiation-Hardened Field-Programmable Gate Array. SANDIA REPORT – SAND2012-0454, 2012.
7. *Cannon M.J.* Improving the Single Event Effect Response of Triple Modular Redundancy on SRAM FPGAs Through Placement and Routing. Brigham Young University ProQuest Dissertations Publishing, 2019. 22616967.