

УДК 539.1: 537.5
МРНТИ 29.15.35

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Г.М. АЯЗБАЕВ¹, А.Ю. ЛОЗБИН¹, А.С. ИНЧИН²

¹Казахский Национальный университет им. аль-Фараби
²Институт космической техники и технологий

Аннотация: В данной статье рассматриваются основные методы создания интегральных схем с повышенной радиационной стойкостью. Перечисляются факторы радиационных воздействий космического пространства и их характерные воздействия на элементы радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов. Рассмотрены различные подходы к повышению надежности интегральных схем, стойких к ионизирующему излучению. Показаны различные архитектуры построения радиационно-стойких процессорных каналов в составе «систем на кристаллах» (СнК).

Ключевые слова: космический аппарат, радиационная стойкость, резервирование, трехканальная вычислительная система

METHODS OF INCREASING THE RADIATION DURABILITY OF SYSTEMS ON CRYSTAL FOR SMALL SPACECRAFTS

Abstract: This article discusses the basic methods of creating integrated circuits with high radiation resistance. The factors of radiation effects of outer space and their characteristic effects on the elements of the spacecraft electronic equipment are listed. Various approaches to increasing the reliability of integrated circuits resistant to ionizing radiation are considered. Various architectures of the construction of radiation-resistant processor channels in the “systems on crystals” (SoC) are shown.

Keywords: spacecraft, radiation resistance, redundancy, three-channel computing system

КІШІ ҒАРЫШ АППАРАТТАРЫНЫҢ КРИСТАЛДАҒЫ ЖҮЙЕСІНІҢ РАДИАЦИЯЛЫҚ ТӨЗІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ӘДІСТЕРІ

Аңдатпа: Бұл мақалада жоғары радиациялық кедергісі бар интегралды схемаларды құрудың негізгі әдістері қарастырылады. Ғарыш кеңістігінің радиациялық әсері мен ғарыш аппараттарының элементтеріне олардың сипаттамалық әсерлерінің факторлары келтірілген. Иондаушы сәулеленуге төзімді интегралды сұлбалардың сенімділігін арттырудың түрлі тәсілдері зерттеледі. «Кристалдардағы жүйелер» (SoC) жүйесінде радиацияға төзімді процессорлық арналардың құрылысының түрлі сәулеттері көрсетілген.

Түйінді сөздер: ғарыш аппараттары, радиациялық кедергісі, артықшылығы, үш арналы есептеу жүйесі

После того, как в 1999 году Калифорнийским политехническим и Стэнфордским университетами был разработан новый формат сверхмалых КА CubeSat (10×10×10 см³-1U), создание и эксплуатация малых и сверхмалых космических аппаратов

(КА) обрели новый бурный виток развития.

В данной статье в качестве малых КА рассматривается линейка малых и сверхмалых КА формата CubeSat от 1U и более (возможно создание КА до 10U).

Сегодня малые КА CubeSat выросли от

университетских технологических разработок до серьёзных коммерческих проектов. Эксплуатация малых КА приобретает все более глобальный характер, способный решить широкий круг задач.

В качестве яркого примера можно привести проект Planet Labs с сетью группировок ДЗЗ спутников CubeSat «Dove», обновляющий ежедневную карту мира.

Принципом развития малых КА CubeSat является использования подходов COTS (Commercial Off-The-Shelf) и IOTS (Industry-Off-The-Shelf), описывающие технологию применения доступных и открытых решений коммерческого и промышленного назначения. Это означает замену дорогих электронных начинок военного и космического класса радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) КА дешевыми, общедоступными и широко апробированными компонентами гражданского применения. Использование такого подхода отразилось на ряде качеств современных малых КА в сравнении с большими КА:

- сокращения сроков и стоимости разработки;
- удобство эксплуатации и обслуживания;
- доступность университетам и частным компаниям;
- широкую возможность творческого проектирования и др.

Другим фактором развитие малых КА является интенсивное развитие технологии СБИС (сверхбольшая интегральная схема), которая позволяет интегрировать на одном кристалле функции нескольких цифровых устройств. На одном чипе интегрируется процессорное ядро, кэш память, контроллеры оперативной памяти, таймеры, интерфейсы и многие другие периферийные устройств, определяя тем самым новую концепцию построения вычислительных систем - «система на кристалле» (СНК).

Сегодня малые КА, конечно, уступают по надежности и производительности традиционным спутникам в следствие критичности их ресурса. Поэтому при проектировании малых КА для каждой новой задачи необходимо

определить золотую границу деления ресурса между надежностью и производительностью.

Одним из перспективных решений при проектировании РЭА КА является применение ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема). ПЛИС – это цифровое устройство, позволяющее создавать интегральные программируемые логики. Логика функционирования ПЛИС не изготавливается на фабрике, а проектируется конечным пользователем с помощью программных средств. Главной особенностью ПЛИС является возможность проектирования параллельных схем в отличие от классических микропроцессорных систем. Микропроцессоры ограничены возможностью архитектуры ядра и фактически являются одноканальными системами, которые за единицу процессорного времени выполняют одну машинную инструкцию. Параллельность в микропроцессорных системах достигается за счет распределения процессорного времени на количество параллельных процессов (квази-параллельные процессы). Особенность распараллеливания процессов ПЛИС делает ее перспективной элементной базой для создания надежных систем и систем, требующих большого объема вычислительной обработки. Поэтому использование СНК на основе ПЛИС дает возможность по новому подойти к организации резервирования и повышения надежности РЭА малых КА.

Основой современной электроники являются интегральные схемы (ИС). Базовый элемент ИС является транзистор. СБИС могут содержать миллиарды транзисторов. Современные ИС основаны на структуре «металл–оксид–полупроводник» (МОП) для аналоговых ИС и комплементарной МОП-технологии (КМОП) для цифровых ИС [1].

С развитием полупроводниковых технологий наблюдается постоянное уменьшение размеров и напряжения питания ИС, а также рост тактовой частоты работы ИС. Но в микроэлектронике космического назначения не всегда успешно используются новые технологии ИС в силу их эксплуатации в жесткой среде выживания.

Микросхемы КА для обеспечения корректной и бесперебойной работы должны обладать высокой устойчивостью к сбоям, которые вызваны воздействием различных факторов космического пространства. Наиболее значимым фактором, вызывающим повреждение РЭА КА, являются ионизирующее излучение (ИИ) и космическая плазма.

Отказы полупроводниковых приборов и ИС при воздействии ионизирующих излучений в основном происходят вследствие ионизационных эффектов. Эффекты ионизации по характеру воздействия на полупроводниковую электронику делятся на поверхностные и объемные ионизационные эффекты.

Поверхностные ионизационные эффекты наблюдаются в основном с постепенным накоплением зарядов в слоях подзатворных диэлектриков ИС и выражаются в суммарной дозе ионизации (Total Ionization Dose, TID).

Общая накопленная доза происходит вследствие ионизации затвора и подзатворного оксида (SiO_2) при попадании космических частиц на КМОП-структуры ИС. В подзатворном окисле накапливается индуцированный излучением положительный заряд и на границе подложки (Si) и подзатворного оксида (SiO_2) возникают паразитные токи утечки. В результате происходит повышение стати-

ческого тока потребления, смещение пороговых напряжений и изменение динамических характеристик транзисторов.

На основе эффекта накопленной дозы увеличивается ток, протекающий через транзистор в выключенном состоянии, возрастает потребление питания и рассеивание тепла, что приводит к ускоренному старению и разрушению транзистора.

Объемные ионизационные эффекты наблюдаются в основном из-за процессов генерации и переноса электронно-дырочных пар в структурах ИС. Такие эффекты могут быть следствием воздействий импульсных ИИ (гамма, рентгеновских, электронных и др.) и отдельных высокоэнергетических частиц (протонов и ионов солнечных и галактических космических лучей). Объемные ионизационные эффекты выражаются одиночными событиями радиационного воздействия (Single Event Effects, SEE) и делятся на ряд эффектов по характеру воздействий (SEU, SEL, SET, SEGR).

При одиночных случайных событиях тяжелые частицы, попадая в КМОП-схемы ИС проникают в структуры полупроводникового материала и оставляют за собой трек свободных носителей заряда (Рисунок 1).

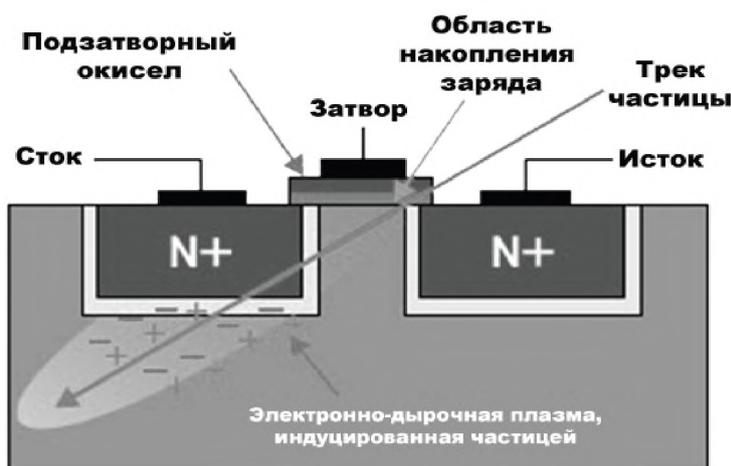


Рис. 1 – Воздействие тяжелых частиц в КМОП-структуры ИС

Одинокые обратимые события (Single Event Upset, SEU) происходят в основном при попадании ионов в схемы памяти и статические триггеры. Импульс тока, индуцированный ионом, изменяет состояние логического элемента. При обнаружении сбоя можно восстановить правильное состояние логического элемента. С уменьшением размеров транзисторов уменьшается их устойчивость для SEU.

Наиболее опасными являются одинокые сбои переключения (Single Event Transient, SET) и защелкивания транзисторов (Single Event Latch-up, SEL). Такие сбои в основном происходят вследствие причины резкого скачка напряжения на входе транзистора, которые могут быть вызваны эффектами фототоков большой дозой излучения.

Обычным КМОП-транзисторам свойственен паразитный тиристор, который в случае большого входного напряжения переходит во включенное состояние. В следствии этого между стоком и истоком транзистора возникает область с низким сопротивлением. Ток, протекая в нижние слои микросхемы, нагревает устройство и может его разрушить. В случае защелкивания сбой необратим и ток не перестает течь даже после разрешения причины возникновения (коррекции входного напряжения). С увеличением частоты тактовой синхронизации полупроводниковых элементов увеличивается вероятность проявления сбоев переключения и защелкивания.

Задача повышения радиационной стойкости ИС КА может быть решена на разных уровнях разработки ИС. Сегодня существуют несколько подходов к повышению надежности СБИС, стойких к ИИ:

Технологический. Наиболее перспективный подход основывается на использовании специализированных технологических процессов изготовления СБИС (объемный КМОП-процесс выращивания эпитаксиального слоя) и специализированных материалов – технология «кремний на изоляторе» (КНИ), «кремний на сапфире» (КНС). ИС, произведенные по такой технологии, в сотни раз дороже, чем ИС произведенные по классической КМОП технологии.

Схемотехнический. Такой подход считается наиболее выгодным. Современные средства проектирования системы на кристалле для ПЛИС позволяют разработать ИС с достаточно повышенной радиационной стойкостью. С помощью использования библиотек элементов с мажоритированной логикой, кодеров и декодеров коррекции ошибок, можно добиться показателей радиационной стойкости ИС, близких к технологическим решениям (на примере практики французской компаний MHS и американской компаний Aeroflex).

Системный. Это классический и стандартный подход, который предполагает резервирование модулей, использование программных методов коррекций (EDAC) и других методов защиты на системном уровне.

Также отдельно можно выделить использование методов локальной защиты микроэлектроники КА с использованием специальных корпусов и покрытий. Но такой подход применим в основном для больших КА (от 50 кг и выше).

Как было отмечено, схемотехнический подход создания радиационно-стойкой электроники КА является более разумным подходом для перспективных проектов. Также важно, что такой подход позволяет разрабатывать оптимальные архитектуры СНК бортовой электроники КА в зависимости от его функционального назначения в составе КА.

Центральным вычислительным узлом бортового модуля (СНК) КА является процессор (ядро или канал). Поэтому, рассмотрим основные архитектуры построения радиационно-стойких процессорных каналов в составе СНК.

Одноканальные архитектуры. Являются наиболее простым решением. Для повышения стойкости в основном используют временную или программную избыточность. Процедуры проверки и корректировки сбоев реализуются программными методами и применением сторожевого таймера.

Двухканальные архитектуры. По сути они являются одноканальной системой с резервным каналом. Но резервный канал может использоваться для парирования возникаю-

щих сбоях на главном канале и при отказе первого канала может его заменить, продолжая прерванный контекст вычисления с заменой ролей между каналами.

Трехканальные архитектуры. В основном построен на методе мажоритирования выходных сигналов из трех независимых каналов по принципу голосования два из трех (Triple modular redundancy, TMR). Являются более надежными и применяемыми системами резервирования вычислительных блоков коммерческих КА. К особенностям системы можно отнести избыточное увеличение площади проектируемой логики.

Таким образом в данной статье рассмотрены основные подходы создания ИС

с повышенной радиационной стойкостью. Перечислены факторы радиационных воздействий космического пространства и их характеры воздействия на ИС КА. Показаны разные архитектуры построения процессоров в СНК. Тем не менее, конечная эффективность результата создания радиационно-стойкой архитектуры СНК КА возлагается на инженера-разработчика и зависит от его опыта и навыка. В зависимости от приоритета поставленных целей и критериев ограниченности необходимо решить оптимально задачу выбора количества и качества схем резервирования из большого количества комбинаций канального резервирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богатырев Ю., Шведов С. Радиационно стойкие интегральные схемы // Наука и Инновации. 2012. – №3.
2. Телец Б., Цыбин С., Быстрицкий А., Подъяпольский С. ПЛИС для космических применений. Архитектурные и схемотехнические особенности // Электроника: НТБ. 2005. – №6.
3. Юдинцев В. Радиационно-стойкие интегральные схемы. Надежность в космосе и на земле // Электроник: НТБ. 2007. – №5.
4. Леонтьев А.В Проблемы применимости многоканальных вычислительных структур для систем управления космическими аппаратами // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления»: сборник докладов. – Екатеринбург: [УрФУ], 2015. – С. 159-165.
5. Сабуров В.А. Способы повышения радиационной стойкости интегральных микросхем к эффекту SEU на различных этапах создания // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. – №1.
6. Полесский С., Жаднов В., Артюхова М., Прохоров В. Обеспечение радиационной стойкости аппаратуры космических аппаратов при проектировании // Компоненты и Технологии. 2010. – №9.
7. Попович А. Топологическая норма и радиационная стойкость // Компоненты и Технологии. 2010. – №9.