

НАДЕЖНОСТЬ И РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь

Представлен аналитический обзор по проблемам надежности и радиационной стойкости изделий электронной техники (ИЭТ), в том числе предназначенных для космического применения. Рассмотрены методы оценки и обеспечения надежности и радиационной стойкости полупроводниковых приборов (ПП) и интегральных схем (ИС).

Важнейшую роль в обеспечении длительной и безотказной работы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в космических условиях играет стойкость её элементов к воздействию факторов космической среды: электрическое поле, температура, низкоинтенсивное ионизирующее излучение (ИИ) космического пространства (КП), протоны, электроны и тяжелые ионы. Радиационная стойкость – одна из важнейших характеристик надежности РЭА, которая определяет срок активного существования (САС) и вероятность безотказной работы (ВБР) космических объектов. Создание высокоэффективных надёжных структур радиационностойких изделий электроники является сложной задачей [1-3].

Надежность – одно из основных свойств РЭА, характеризующего способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения при сохранении во времени значений параметров в установленных пределах [4]. Надежность аппаратуры зависит от ее безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. При эксплуатации в условиях КП РЭА космического аппарата (КА) находится под воздействием большого количества внешних факторов. К числу наиболее опасных относится ИИ КП. Для оценки способности РЭА выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах установленных норм в процессе и после воздействия ИИ применяются показатели радиационной стойкости.

Радиационные эффекты, обусловленные воздействием на КА потоков заряженных частиц высокой энергии, зависят от величины поглощенной дозы космической радиации и от мощности дозы. Существуют также эффекты, вызываемые воздействием одиночных заряженных частиц. С величиной полной поглощенной дозы связано постепенное ухудшение свойств материалов и характеристик оборудования КА. Мощность дозы оказывает влияние на процессы люминесценции материалов при облучении и возникновение в них радиационной проводимости. Обратимые и необратимые изменения свойств материалов происходят за счет всех радиационных эффектов, наблюдаемых в твердом теле: ионизационных эффектов, эффектов переноса заряда и эффектов смещения. Наиболее чувствительны к воздействию космической радиации полупроводниковые и оптические материалы, в меньшей степени – полимерные материалы, самую высокую стойкость к воздействию радиации имеют металлы [5].

К основным особенностям электронной компонентной базы (ЭКБ), применяемой в условиях КП, относятся: широкая функциональная номенклатура (порядка 1500 наименований); малая серийность (от 10–15 шт. до 100 тыс. шт. на протяжении всего жизненного цикла изделия); высокие требования к надежности (безотказность, ресурс, сохраняемость): интенсивность отказов $\lambda = 10^{-9}$ – 10^{-10} для активных элементов и $\lambda = 10^{-11}$ – 10^{-12} для пассивных при малосерийном производстве ЭКБ; стойкость к воздействию ИИ КП (не менее 50 крад), расширенный температурный диапазон (от -60 до 125°C); необходимость обеспечения длительных сроков безотказной работы (15 лет и более) [6].

Приведем лишь небольшую статистику по влиянию различных дестабилизирующих факторов на отказы аппаратуры ракетно-космической техники: 54,2% – электростатический

разряд; 28,4% – одиночные события; 5,4% – дозовый отказ; 12,0% – причина не установлена [6].

Применительно к современным КА наибольшие трудности в обеспечении длительных САС возникают со стороны электронных систем космических объектов [7]. Причины такого положения – в высоких темпах роста функциональной и аппаратной сложности электронных систем КА и недостаточной надежности ЭКБ. На рисунке 1 приведены данные о распределении причин отказов бортового оборудования КА.

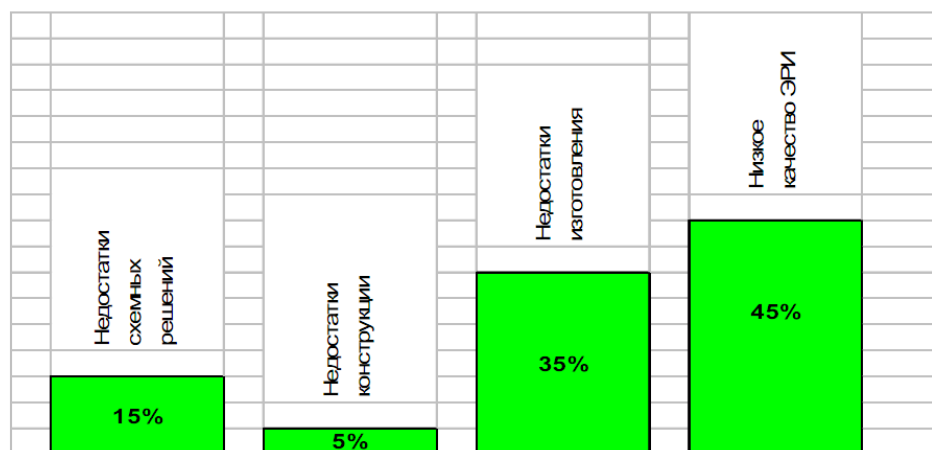


Рисунок 1 – Распределение причин неисправностей бортового оборудования КА

К основным радиационным эффектам в микроэлектронных изделиях относятся [1-3]: деградация электрических и функциональных характеристик ПП и ИС (в первую очередь, полупроводниковых и оптоэлектронных) вследствие накопления радиационно-индуцированного заряда в диэлектрических структурах (поверхностные радиационные эффекты); деградация электрических характеристик ПП и ИС из-за образования радиационных дефектов внутри кристаллической структуры (объемные структурные повреждения); возникновение мощных импульсных электрических разрядов после электростатического пробоя изолирующих материалов; сбои и отказы от воздействия отдельных высокоэнергетических тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) (протоны с энергией выше 10–20 МэВ и ионы солнечных и галактических космических лучей).

В процессе производства гарантии надежности и радиационной стойкости микросхем обеспечиваются: аттестацией каждой партии пластин на соответствие радиационной стойкости, контролем всех динамических параметров, измерением параметров как в нормальных условиях, так и на крайних значениях температур, проведением электротермотренировок (ЭТТ). Для прогнозирования надежности применяются ускоренные испытания [8].

В работе [9] в качестве перспективного средства индивидуальной отбраковки потенциально ненадежной электронной компонентной базы предложен термодинамический подход на базе методов релаксационной спектроскопии глубоких центров в полупроводниках. Для транзисторов и ИС получены зависимости амплитуды релаксации емкости от частоты следования электрических импульсов заполнения глубоких уровней, обусловленных объемными и поверхностными дефектами различной природы.

В работе [10] испытания ИЭТ производства ОАО «Интеграл»: *n*-МОП/КНИ транзисторов (с Н-запиткой) и *p*-МОП/КНИ транзисторов (с 2Т-запиткой и Н-запиткой) показали, что они остаются работоспособными при облучении до дозы $D = (1 \div 2) \cdot 10^6$ рад. В результате применения специальных конструкторско-технологических методов радиационная стойкость мощных *n*-канальных МОП транзисторов IFR830 повысилась на порядок (до $D = 10^6$ рад).

Наиболее перспективным видом реализации сложных микроэлектронных устройств в условиях радиационного воздействия является «система в корпусе» (СвК). Высококачественные аналого-цифровые компоненты СвК рекомендуется создавать с помощью особого технологического маршрута изготовления биполярных и КМОП транзисторов [11].

Современные подходы к повышению надежности специализированных СБИС, стойких к ИИ, можно разделить на четыре большие группы (табл. 1) [6].

Таблица 1

Способы повышения надежности и радиационной стойкости СБИС

Название способов	Краткое содержание	Основные преимущества и недостатки
Технологические способы	Использование специализированных технологических процессов изготовления СБИС и специализированных материалов: «кремний на сапфире» (КНС), «кремний на изоляторе» (КНИ), гетероструктур и т.п.	Высокая цена, отсутствие необходимых материалов и оборудования
Схемотехнические способы	Использование библиотек элементов с мажоритированием на уровне вентилях, кодеров, декодеров Хэмминга, так называемых «усиленных» библиотек элементов, отбор библиотечных компонентов	Возможность реализации на стандартных технологических процессах, относительная дешевизна. Стойкость к воздействию ТЗЧ
Конструктивные способы	Использование специальных корпусов, локальной защиты, покрытий и т.п.	Необходимость применения специализированных материалов для корпусов
Моделирование радиационных эффектов на этапе проектирования СБИС	Прогнозирование стойкости элементов СБИС и аппаратуры на этапе проектирования с использованием специализированных компонентов САПР и моделей компонентов	Необходимость разработки специализированных программных продуктов

Список литературы

1. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. - М.: Радио и связь, 2004. - 320 с.
2. Радиационная стойкость изделий ЭКБ: Научное издание / Под ред. А. И. Чумакова. - М.: НИЯУ МИФИ, 2015. - 512 с.
3. Воздействие ионизирующего излучения в электронике: от схем памяти до формирователей изображений / под ред. М. Багатин, С. Жерардена. Перевод с англ. - М.: Техносфера, 2023. - 504 с.
4. Применение методов анализа надежности и риска при обеспечении, прогнозировании и оценке радиационной стойкости РЭА / К.Г. Сизова, П.К. Скоробогатов, М.О. Прыгунов // Безопасность информационных технологий. - 2018. -Т. 25, № 1. - С. 52-64.
5. Алексеев В.П., Ковалёв А.П. Факторы, определяющие надёжность и долговечность конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов // Новые исследования в разработке техники и технологий. - 2015, № 1. - С. 24-29.
6. Специализированные СБИС для космических применений: проблемы разработки и производства / А. Бумагин, Ю. Гулин, С. Заводсков и др. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. - 2010, № 1. - С. 50-56.
7. Севастьянов Н.Н., Андреев А.И. Основы управления надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации. - Томск: ТГУ, 2015. - 266 с.
8. Ерошкин А.Л., Попо А. А. Оценка надежности полупроводниковых приборов и микросхем // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015, № 12. - С. 221-225.
9. Крылов В. П., Богачев А. М. Релаксация глубоких центров в транзисторах и интегральных микросхемах // Известия вузов. Электроника. – 2020, 25(6). - С. 568-574.
10. Обеспечение радиационной стойкости различных видов МОП-приборов / Ф. П. Коршунов, Ю. В. Богатырев, С. Б. Ластовский и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. - 2012. Вып. 1. С. 27-31.
11. Увеличение радиационной стойкости аналого-цифровых компонентов микроэлектронных систем // О. Дворников, В. Гришков, О. Громыко // Современная электроника. - 2010, № 5. - С. 54-61.