

УДК 539.311.322:539.171

Л15

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *Н.А. Ухин* (РНИЦ «Курчатовский институт»);
доктор технических наук, профессор *Г.Д. Кузнецов* (МИСиС)

Ладыгин Е.А.

Л15 **Обеспечение надежности электронных компонентов космических аппаратов: Учеб. пособие. – М.: МИСиС, 2003. – 111 с.**

В учебном пособии изложены основы современных методов обеспечения надежности электронных компонентов космических аппаратов (КА), работающих в специфических условиях длительного воздействия космической радиации.

Для основного класса электронных компонентов, широко применяемых в аппаратуре КА – полупроводниковых приборов и микросхем, показана эффективность комплексного использования радиационных воздействий испытательного, отбраковочного и технологического характера для решения проблем обеспечения их надежности и радиационной стойкости.

В пособии даны сведения о радиационной обстановке в околоземном космическом пространстве, приведен анализ физических эффектов в приборах и микросхемах при облучении, изложены научно обоснованные рекомендации по оптимизации режимов испытаний, расчету необходимой локальной защиты микросхем, разработке оптимальных вариантов радиационно-термических тренировок и радиационно-термических процессов для улучшения параметров, повышения стойкости приборов и микросхем к радиации, отбраковки приборов со скрытыми дефектами.

Содержание пособия соответствует программе курса «Основы лучевой технологии микроэлектроники».

Учебное пособие предназначено для студентов специальностей 200100 и 200200 «Микроэлектроника и твердотельная электроника», а также будет полезно при выполнении дипломных и диссертационных работ в области радиационной физики, радиационного материаловедения и технологии приборов и микросхем, применяемых в аппаратуре КА.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ И РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ ...	8
1.1. Радиационная обстановка в околоземном космическом пространстве	8
1.2. Воздействие радиации на полупроводниковые материалы.....	11
1.3. Радиационные эффекты в биполярных приборах и микросхемах и анализ возможности их полезного использования.....	16
1.4. Радиационные эффекты в кремниевых МОП и КМОП приборах и микросхемах	22
1.4.1. Свойства структуры Si-SiO ₂ и накопление заряда при облучении в объеме подзатворного SiO ₂	23
1.4.2. Кинетика роста поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO ₂ при облучении	29
1.4.3. Радиационное накопление глубоких центров в приповерхностной области кремния.....	31
1.4.4. Термостабильность и кинетика отжига радиационных дефектов в объеме SiO ₂ , на границе раздела Si-SiO ₂ и в приповерхностной области кремния	34
1.5. Обоснование выбора МОП и КМОП микросхем в качестве основных компонентов РЭА КА	37
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ И КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОСХЕМ	42
2.1. Конструктивно-технологические характеристики КМОП микросхем.....	42
2.2. Методики исследований зарядовых эффектов и электрических параметров в КМОП-элементах микросхем при облучении и отжиге	43
2.3. Методика контроля компенсации проводимости кремниевой подложки при облучении и отжиге	48
2.4. Основные характеристики облучательных и термических установок и методики радиационно-термических обработок.....	49
3. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ БЛОКОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	52
3.1. Этапы разработки и общие технические принципы методики	52
3.2. Оценка радиационной обстановки на поверхности КА и за общей конструкционной защитой блоков для САС КА 10 лет.....	55
3.3. Поэлементный анализ РС применяемых в блоках ППП и ИМС и выявление «нестойких» элементов.....	58
3.4. Расчет дополнительной локальной защиты микросхем, имеющих недостаточный уровень радиационной стойкости	59
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РС МИКРОСХЕМ В РЕЖИМАХ, ПРИБЛИЖЕННЫХ К УСЛОВИЯМ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ В РЭА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.....	66

4.1. Сравнение радиационных условий эксплуатации микросхем в РЭА КА с режимами регламентных (ускоренных) наземных испытаний.....	66
4.2. Определительные испытания на РС КМОП БИС микропроцессорного набора	71
4.3. Повышение показателей РС микросхем в условиях низкой интенсивности излучения	73
4.4. Показатели РС микросхем в условиях, имитирующих пересечение радиационных поясов и сеансность включения питания	75
5. ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ТРЕНИРОВКИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ И ОТБРАКОВКИ МИКРОСХЕМ С АНОМАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТЬЮ И РАДИАЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ	80
5.1. Влияние исходного разброса параметров микросхем на показатели их радиационной стойкости.....	80
5.2. Анализ зарядовых неоднородностей в КМОП базовых элементах микросхем при облучении и разработка методики РТТ	81
6. ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ И ПОВЫШЕНИЯ РС КМОП МИКРОСХЕМ.....	96
6.1. Физические основы метода РТП для класса МОП и КМОП микросхем	96
6.2. Разработка режимов операций облучения и отжига РТП при изготовлении КМОП микросхем.....	97
6.3. Закономерности изменения пороговых напряжений и крутизны сток-затворных характеристик n - и p -канальных транзисторных элементов КМОП БИС.....	98
6.4. Повышение радиационной стойкости базовых элементов КМОП микросхем, изготовленных с применением РТП.....	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	106
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	107
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	109

ВВЕДЕНИЕ

Анализ отечественных и зарубежных работ в области радиационной физики полупроводниковых материалов, приборов и микросхем, являющихся основой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов (КА) различного назначения (специального, народнохозяйственного, научного), показывает, что для обеспечения надежности электронных компонентов (полупроводниковых приборов и микросхем различных классов) в аппаратуре КА на этапах ее проектирования необходимо проведение работ по комплексному использованию радиационных и радиационно-термических воздействий на приборы и микросхемы ионизирующего высокоэнергетичного излучения в широком диапазоне мощностей экспозиционных ($10^{-2} \dots 10^{12}$ Р/с) и интегральных поглощенных доз радиации ($10^2 \dots 10^{10}$ рад). Цели таких работ: оптимизация режимов радиационных испытаний и приближение этих режимов к реальным условиям эксплуатации КА, оценка радиационной стойкости отечественных и зарубежных типов применяемых в КА приборов и микросхем, оценка необходимой локальной защиты элементов с недостаточной стойкостью, индивидуальная разбраковка (классификация) элементов по уровню надежности и радиационной стойкости методом радиационно-термической тренировки (РТТ) в дополнение к электротермотренировке (ЭТТ), разработка оптимальных вариантов радиационно-технологических процессов (РТП) для повышения срока службы, радиационной стойкости, быстродействия, теплофизических и других характеристик приборов и микросхем в аппаратуре КА.

Требования к КА различного назначения ввиду общности условий их эксплуатации и функционирования во многом идентичны, что позволяет проводить реализацию технической политики по развитию космических средств по единой программе, основными задачами которой являются разработка и производство электронных компонентов, в первую очередь изделий твердотельной электроники (полупроводниковых приборов и микросхем), составляющих 80...90 % всех комплектующих изделий и определяющих тактико-технические характеристики радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) КА и космических систем в целом.

Специфические требования, предъявляемые к электронным компонентам для комплектации РЭА КА, – это в первую очередь возрастающие сроки службы в условиях воздействия различных фак-

торов космического пространства: ионизирующих излучений естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ), галактических космических излучений, факторов ядерных взрывов, искусственных радиационных поясов Земли (ИРПЗ), излучений бортовых ядерных установок и т.п. – привели в свое время к разработке и организации производства специализированной номенклатуры изделий электронной техники (ИЭТ), разработке ограничительных перечней изделий, специальных справочников по стойкости ИЭТ к воздействию космической радиации в соответствии с требованиями групп жесткости.

В последние годы в связи с прекращением производства ряда необходимых ИЭТ разработчики РЭА КА поставлены перед необходимостью комплектования аппаратуры изделиями электронной техники (в том числе и зарубежными) с неизвестной системой контроля качества и приемосдаточных испытаний и тем более – с неизвестным уровнем радиационной стойкости. Положение усугубляется еще и тем, что в РЭА КА используется достаточно широкая номенклатура ИЭТ при относительно небольшой, в современных условиях, потребности в количестве каждого типа изделий.

В связи с изложенным, становится весьма актуальной разработка и использование наряду с традиционными статистическими методами выходного контроля качества ИЭТ новых методов практически «индивидуального» подхода к испытаниям и разбраковке (классификации) конкретных партий и образцов ИЭТ по уровню качества и радиационной стойкости (РС), приближения условий испытаний изделий к реальным условиям их функционирования в блоках КА в течение заданного срока активного существования (САС), повышения эксплуатационных характеристик, улучшения электрических параметров и радиационной стойкости ИЭТ на заключительных стадиях производства. Актуальность решения указанных проблем становится еще более очевидной при выдвижении новых требований по САС КА до 10 и более лет.

Для выявления имеющихся резервов и обеспечения надежности и РС электронных компонентов в аппаратуре КА с большими сроками службы представляется целесообразным поэтапно выполнить следующие работы:

1. На примере конкретных радиоэлектронных блоков КА разработать расчетно-экспериментальную методику оценки их радиационной стойкости, выявить элементы с недостаточным уровнем РС и разработать методику расчета их дополнительной локальной защиты с учетом местоположения в блоках и угла падения излучения.

2. В связи с отсутствием данных по радиационной стойкости зарубежных и новых отечественных типов микросхем (ячейки микропроцессоров, схемы памяти, линейки ФПЗС и др.), предназначенных для применения в новых разработках космических средств, провести исследования их РС в соответствии с требованиями ТЗ.

3. Провести экспериментальную оценку РС микросхем в режимах, максимально приближенных к условиям их эксплуатации в радиоэлектронных системах КА по мощности излучения и длительности облучения, электрическим режимам, сеансности процессов облучения и отжига, функциональному применению и др.

4. Разработать методики оптимальных вариантов радиационно-термической тренировки микросхем с целью выявления в партии образцов с аномальным поведением параметров (имеющих скрытые дефекты производства) и их индивидуальной отбраковки и отбора микросхем с более высокой радиационной стойкостью.

5. Разработать методики оптимальных вариантов радиационно-термических процессов с использованием операции «глубокого» и «сверхглубокого» облучения и последующего отжига для эффективного регулирования и улучшения параметров приборов и микросхем в конце цикла их изготовления.

6. Провести сравнительные испытания на РС микросхем, изготовленных с применением РТП и по текущей технологии, с целью исследования эффективности применения РТП для повышения надежности и стойкости микросхем.

7. Экспериментально исследовать возможность создания с применением РТП МОП-элементов микросхем, удовлетворяющих предельным требованиям по радиационной стойкости.

Цель проведения указанных этапов состоит в обосновании, экспериментальном обеспечении и разработке различных методов повышения надежности микроэлектронной элементной базы аппаратуры КА на основе комплексного применения радиационных и радиационно-термических воздействий испытательного, отбраковочного и технологического характера.

В настоящем пособии даны примеры реализации указанных методов и их физическое обоснование.

1. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ И РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

В настоящей главе на основе анализа отечественных и зарубежных работ проведена оценка радиационной обстановки в космическом пространстве, рассмотрены основные закономерности воздействия радиационных факторов на полупроводниковые материалы и микросхемные элементы, приведены данные по РС применяемых в КА приборов и микросхем различного конструктивно-технологического исполнения (биполярных, МОП, КМОП) и их соответствие современным и перспективным требованиям по РС на радиоэлектронные блоки аппаратуры КА, а также данные по применению радиационно-термических процессов в полупроводниковой электронике.

1.1. Радиационная обстановка в околоземном космическом пространстве

Основными источниками космической радиации в околоземном пространстве являются [1 – 3]:

– внутренний и внешний естественные радиационные пояса Земли (ЕРПЗ), расположенные соответственно на высотах 600...10 000 и 10 000...85 000 км от поверхности Земли;

– потоки солнечных и космических лучей, включающие в себя первичное космическое (галактическое) излучение и космическое излучение Солнца, возникающее при интенсивных хромосферных вспышках.

Внутренний радиационный пояс Земли состоит из протонов с энергией 0,1...400 МэВ и электронов с энергией 0,04...6 МэВ и простирается на расстояния примерно от 600 до 10 000 км от поверхности Земли. Внешний радиационный пояс Земли состоит из протонов с энергией до 60 МэВ и электронов с энергией до 5 МэВ (большая часть электронов имеет энергию порядка сотен кэВ), начинается на высотах около 10 000 км (вблизи геомагнитного экватора) и простирается в зависимости от солнечной активности до высот 60 000...85 000 км. Эти данные объясняют тот факт, что для пилотируемых КА («Мир», «МКС» и др.) приходится использовать орбиты на высотах до 400 км (ниже внутреннего радиационного пояса Земли).

С учетом данных «Модели космоса» по спектральным энергетическим характеристикам частиц средние плотности потоков протонов и электронов различных энергий во внутреннем ЕРПЗ можно рассчитать из следующих выражений:

$$\varphi_p(E) = 2 \cdot 10^7 \exp(-E_p/0,25), \quad (1.1)$$

где φ_p – плотность потока протонов, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;
 E_p – энергия протонов, $E_p = 0,1 \dots 400$ МэВ.

$$\varphi_e(E) = 2 \cdot 10^7 \exp(-E_e/0,41), \quad (1.2)$$

где φ_e – плотность потока электронов, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;
 E_e – энергия электронов, $E_e = 0,04 \dots 6$ МэВ.

Для высоких (выше 10 000 км) и геостационарных орбит во внешнем ЕРПЗ коэффициенты в знаменателе показателя степени экспоненты в выражениях (1.1) и (1.2) составляют 0,15 и 0,34 соответственно.

Состав, плотности потоков, пространственное и энергетическое распределение частиц (электронов, протонов) в ЕРПЗ зависят от динамики процессов на Солнце, при этом внутренний радиационный пояс менее подвержен этому влиянию.

Поглощенные дозы радиации от электронного и протонного излучений можно оценить по выражению

$$D_{e,p} = 1,6 \cdot 10^{-8} \frac{E_{e,p}}{R_{e,p}} \cdot \varphi_{e,p} t, \quad (1.3)$$

где $D_{e,p}$ – поглощенная доза от электронов или протонов, рад;
 $E_{e,p}$ – энергия электронов или протонов, МэВ;
 $R_{e,p}$ – средний пробег электронов или протонов с энергией $E_{e,p}$ в конструкционных материалах КА, $\text{г} \cdot \text{см}^{-2}$;
 $\varphi_{e,p}$ – плотность потока электронов или протонов, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;
 t – срок активного существования КА, с.

Расчетная оценка показывает, что воздействие электронного и протонного излучений ЕРПЗ с учетом различных вариантов спектральных энергетических характеристик и геометрии облучения приводит к годовым дозам облучения на поверхности КА $(1,3 \dots 4,0) \cdot 10^7$ рад, при этом основной вклад вносит электронная составляющая излучения.

В результате ядерных взрывов в верхних слоях атмосферы возникают искусственные радиационные пояса Земли, однако плотность электронов в них быстро падает во времени и они имеют определенный период существования. При возникновении ИРПЗ дополнительная годовая доза электронного облучения на поверхности КА может составить примерно $4 \cdot 10^6$ рад ($5 \cdot 10^{14}$ см⁻²).

Солнечное космическое излучение (СКИ) наблюдается только во время циклов солнечной активности («вспышки» на Солнце) и продолжается короткое время (до четырех суток). Оно состоит в основном из протонов (~ 85 %), альфа-частиц и ядер легких элементов с энергией 1...100 МэВ, при этом с ростом энергии частиц их плотность резко снижается. Максимально возможные годовые дозы от протонного облучения СКИ могут составить на поверхности КА до 10^4 рад.

Первичное галактическое излучение состоит из потоков протонов (около 80 %), альфа-частиц (ядер гелия) и небольшого числа ядер более тяжелых элементов. Частицы галактического излучения обладают очень высокой энергией (от 10^8 до 10^{20} эВ), но плотность потока этих частиц мала [$\sim 1-2$ част/(см²·с)], что дает незначительный вклад в годовую дозу облучения на поверхности КА (1...10 рад). Однако частицы сверхвысоких энергий при прохождении через обшивку и конструкционные элементы КА за счет высокой проникающей способности могут инициировать целый каскад вторичных фотоядерных реакций, ухудшать радиационную обстановку в центральной части объекта и приводить к одиночным сбоям в работе электронных систем, особенно в схемах ОЗУ.

Современные КА проектируются, как правило, на сроки активного существования 7–12 лет. Оценка показывает, что для различных вариантов орбит суммарная доза облучения на поверхности КА при таких значениях САС может достигать $5 \cdot 10^8 \dots 10^9$ рад, превышающих максимальные требования по РС элементной базы. Это обстоятельство требует наряду с применением оптимального сочетания конструкционной и локальной защиты элементов (в первую очередь – микросхем) с низкой РС, проведения комплекса исследований по выявлению резервов и разработке методов повышения РС полупроводниковых приборов и микросхем на стадиях их разработки, производства, выходного и входного контроля, отбраковочных испытаний и эксплуатации в РЭА КА. Наметившиеся в последние годы тенденции в космической промышленности к созданию негерметизированных модульных и сверхмалых КА, в которых использование эффективных мер защиты затруднено, а также создание в недалеком

будущем штатных КА с ядерными источниками энергии на борту выдвигают дополнительные требования по повышению надежности и РС микроэлектронной элементной базы КА [3].

Проведенный анализ применяемой в различных радиоэлектронных блоках КА (БЦВК, вторичные источники питания, блоки ориентации и др.) микроэлектронной элементной базы (более 200 типонаименований приборов и микросхем) показал, что по результатам регламентных (ускоренных) испытаний показатели их РС резко отличаются и по поглощенной дозе излучения находятся в диапазоне $10^3 \dots 5 \cdot 10^6$ рад [3, 4]. Более высокой РС обладают биполярные диоды, диодные матрицы, транзисторы, микросхемы, работающие на принципах переноса тока неосновными носителями заряда, механизм деградации параметров которых при облучении носит в основном объемный характер (образование «глубоких» радиационных центров в активных областях), а роль поверхностных радиационных процессов мала. Наименее радиационно-стойкими проявляют себя МОП и КМОП микросхемы, работающие на принципах переноса тока основными носителями заряда, механизм деградации параметров которых при облучении носит в основном поверхностный «зарядовый» характер. Однако, несмотря на сравнительно низкую РС МОП и КМОП микросхем, их применение в РЭА КА постоянно растет по причине малой потребляемой мощности, большого запаса по помехоустойчивости, сравнительно высокого быстродействия, простоты схемотехники. Это обстоятельство делает МОП и КМОП микросхемы наиболее важными объектами экспериментальных исследований с целью обеспечения и повышения их радиационной стойкости при комплексном применении радиационных и радиационно-термических воздействий испытательного, отбраковочного и технологического характера.

1.2. Воздействие радиации на полупроводниковые материалы

Кратко проанализируем результаты работ в области радиационной физики полупроводниковых материалов и приборных структур, лежащих в основе создания методов радиационных испытаний, конструирования радиационно-стойких приборов и микросхем, радиационно-термической тренировки и «индивидуальной» сертификации (разбраковки) элементов по уровню РС, методов радиационной технологии. В основе всех вторичных процессов, развивающихся в активных и пассивных областях биполярных и МОП микроэлектронных структур, лежат первичные физические эффекты: интенсив-

ная генерация неравновесных смещений атомов («холодный» массоперенос), сильная ионизация атомов вещества (генерация электронно-дырочных пар), возбуждение атомов и электронов без смещения (нагрев кристаллов), ядерные превращения [5–8].

Согласно современным представлениям, неравновесные смещенные атомы и вакансии, суммарная концентрация которых может превышать на 10–12 порядков равновесную концентрацию при данной температуре (для кремния $\sim 10^6$ при 300 К), в процессе облучения быстро диффундируют по кристаллу и при сильной конкуренции кулоновских и деформационных сил создают термостабильные комплексы (центры) с участием остаточных и легирующих примесей, приводящие к появлению в запрещенной зоне спектра дополнительных глубоких энергетических уровней. Термостабильными в рабочем диапазоне температур полупроводниковых приборов и интегральных микросхем радиационными комплексами (центрами) являются не точечные первичные нарушения, а их ассоциации между собой и с атомами остаточных и легирующих примесей [9].

Типичными для кремния являются комплексы акцепторного характера (ловушки электронов) типа V-O (А-центры, E(0,17) эВ), V-P (Е-центры, E(0,4) эВ), V-V (j-центры: E(0,4) эВ – соответствует двукратно отрицательно заряженной дивакансии, E(0,54) эВ – соответствует однократно отрицательно заряженной дивакансии, H(0,28) эВ – донорного характера (ловушка для дырок) и соответствует положительно заряженной дивакансии). Их относительная концентрация, вносимая в кристаллы полупроводника при облучении, зависит как от исходных свойств полупроводника, так и от условий облучения. Кроме этих основных радиационных центров могут образовываться также и более сложные комплексы. Например, могут образовываться центры донорного характера дивакансия-кислород (H(0,35) эВ в *p*-кремнии, E(0,21) эВ в *n*-кремнии). Атомы акцепторной примеси (бора) создают с вакансиями в зонном кремнии *p*-типа преобладающие радиационные центры донорного характера с уровнем H(0,21) эВ (дивакансия-бор), и акцепторного характера с уровнем H(0,45) эВ (вакансия-бор, аналог Е-центра в *n*-кремнии), однако природа этих центров окончательно не установлена [8–10].

Атомы кислорода в кремнии при облучении принимают также активное участие в образовании сложных центров прилипания для неосновных носителей заряда (H(0,31), H(0,39), H(0,48) эВ в кислородном *n*-кремнии; E(0,30), E(0,37), E(0,47) эВ в кислородном *p*-кремнии), а также центров интенсивной излучательной рекомбинации.