

Оценка устойчивости электронной аппаратуры к воздействию дестабилизирующих факторов космического пространства

к.т.н. Сергей Кравчук, д.т.н. Владимир Соколов,
к.т.н. Оксана Вовк, к.т.н. Николай Жегов
(МОКБ «Марс» – филиал ФГУП «ВНИИА»)

В статье представлен обзор методов испытания электронной аппаратуры на стойкость к различным дестабилизирующим факторам космического пространства. Авторы рассматривают современные методы оценки стойкости, а также описывают развитие базовых методик испытаний.

В настоящее время без космических аппаратов (КА) невозможно представить функционирование современного общества. Это не только спутники связи, навигационные, телекоммуникационные и метеорологические спутники. Это геофизические, геодезические, астрономические спутники, спутники дистанционного зондирования Земли, разведывательные и военные спутники. Если исследования дальнего космического пространства с помощью космических обсерваторий (зондов) направлены на получение от этого пользы в долгосрочной перспективе, то информация со спутников связи, навигационных, телекоммуникационных, метеорологических спутников является неотъемлемой частью нашей жизни. Поэтому к стабильности их работы предъявляются жёсткие требования.

Прогнозирование и обеспечение стабильности функционирования КА в космическом пространстве определяются устойчивостью электронной аппаратуры (ЭА) к воздействию дестабилизирующих факторов космического пространства. Интерпретация результатов испытаний электронной аппаратуры к этим воздействиям является непростой задачей.

Согласно современным представлениям, основными дестабилизирующими факторами космического пространства (КП) являются ионизирующее излучение, космическая плазма, тепловое излучение Солнца, планет и КП, невесомость, собственная внешняя атмосфера, микрометеориты, космический вакуум, замкнутый объём [1]. В общем случае необходимо принимать во внимание все действующие факторы, но влияние двух первых доминирует.

При выборе методов прогнозирования и обеспечения устойчивости электронной аппаратуры КА к воздействию дестабилизирующих факторов космического пространства необходимо учитывать ряд аспектов. Основные из них перечислены ниже.

Во-первых, в реальных условиях эксплуатации космические аппараты функционируют продолжительное время, подвергаясь при этом воздействию ионизирующих излучений, иногда при сопутствующем влиянии повышенных или пониженных температур. В результате изделия электронной техники в космических аппаратах неизбежно подвергаются воздействию ионизирующих излучений космического пространства (основной дестабилизирующий фактор – протоны средних энергий – 90% от всех излучений) и повышенных температур.

При проведении НИОКР для оценки стойкости и надёжности изделий применяются методики, регламентируемые базовыми методиками. Эти методики предполагают испытание на воздействие каждого дестабилизирующего фактора (протоны, электроны) на отдельные партии с последующим воздействием механико-климатических факторов, и отдельно оценивается наработка на надёжность.

Во-вторых, плотность галактического излучения составляет 1–2 част/(см²×с) при энергии частиц 10⁸...10²⁰ эВ, плотность потока частиц солнечного излучения составляет до 10⁶ част/(см²×с) при их энергии до 10⁷ эВ [2].

Так как совокупность ионизирующих излучений космического пространства (ИИ КП) не может быть воспроизведена в земных условиях, при исследовании

радиационной стойкости приборов был популярен метод моделирования, состоящий в замене всего спектра космических излучений излучениями одной энергии с плотностью потока 10⁶...10⁹ част/(см²×с) [3]. За счёт высокой интенсивности излучений многих испытательных установок дозы ИИ, получаемых аппаратурой за весь срок функционирования на орбите, набирались за непродолжительное время.

В-третьих, в реальных условиях космического пространства на аппаратуру значительное влияние могут оказывать единичные тяжёлые заряженные частицы (ТЗЧ). К тяжёлым заряженным частицам относятся протоны и дейтроны (ядра лёгкого и тяжёлого водорода), альфа-частицы (ядра атомов гелия, состоящие из двух протонов и двух нейтронов) и ядра химических элементов. Энергия их колеблется в пределах 2...11 МэВ. Оценка влияния этих частиц на аппаратуру производится, как правило, расчётными методами, имеющими определённую погрешность.

Важно учитывать, что, например, в местах прохождения солнечно-синхронной орбиты через полярные области и на высоких орбитах отсутствует геомагнитная защита от воздействия ТЗЧ галактических и солнечных космических лучей. При длительном функционировании КА на таких орбитах особенно велика вероятность воздействия этих частиц на аппаратуру.

В табл. 1 обобщены параметры ионизирующих излучений космического пространства.

Рассмотрим влияние указанных расхождений моделирования на точность результатов испытаний и предлагаемые современными базовыми методиками способы решения этих проблем.

Что касается испытаний электронной техники космических аппаратов на радиационную стойкость и надёжность, то, несмотря на то что методы и критерии оценки воздействия дестабилизирующих факторов космического пространства однозначно указаны в базовых

методиках, учёт расхождения реальных условий и принятых методов моделирования – задача разработчиков космических аппаратов.

В базовых методиках и академических изданиях весьма подробно описано, что радиационная среда космического пространства состоит преимущественно из протонного и электронного излучений. А исследовательские и зачётные испытания, как правило, проводятся при воздействии протонного излучения на одну партию приборов, электронного излучения – на другую партию приборов.

Многие космические аппараты предназначены для функционирования в течение длительного времени (от нескольких месяцев до нескольких лет). Следовательно, помимо воздействия ионизирующих излучений космического пространства, аппаратура космического пространства подвергается процессам старения, которые традиционно описываются в терминах параметров надёжности и имитируются воздействием повышенных температур. Эти испытания согласно базовым методикам проводятся на третьей партии приборов.

Попытки описания комплексного воздействия различных дестабилизирующих факторов космического пространства на электронную аппаратуру с помощью математических методов дают теоретические результаты, малоприменимые для решения практических задач. К тому же базовые методики не позволяют использовать результаты таких методов для официального установления уровня стойкости.

Ещё в 1975 году анализировался подход к анализу комплексного воздействия дестабилизирующих факторов [4]. И этот анализ осуществлялся в терминах надёжности.

В источнике [4] дестабилизирующие процессы разделены на две группы:

- 1) процессы флуктуаций значений ВВФ (внешних воздействующих факторов);
- 2) процессы старения и износа элементов, входящих в состав изделия.

Если рассмотреть ситуацию, в которой в изделии имеют место и те, и другие процессы, то речь идёт о комбинированных отказах.

Уже в [4] в своё время обращалось внимание на то, что предположение, будто в изделии имеют место процессы только одной группы (флуктуационные или старения и износа), является идеализацией реальной ситуации. Это может быть близко к действительности в отдельные, ограниченные во времени периоды жизни изделия. Если говорить строго, то в каждом изделии имеют место и те, и другие процессы.

Таблица 1. Параметры ионизирующих излучений космического пространства

Вид излучения	Состав излучения	Энергия частиц, эВ	Плотность потока, част/ (см ² ×с)	Средняя доза облучения КА на его поверхности за год, рад
Галактические космические лучи (ГКЛ)	Протоны (90%)	10 ⁸ ...10 ²⁰	1...2	10
	Ядра гелия (7...15%)			
	Ядра тяжёлых элементов (1%)			
Солнечные космические лучи (СКЛ)	Протоны (90%)	1...10 ⁷	10 ³ ...10 ⁶	10 ³ ...10 ⁴
	Ядра других частиц (10%)			
Радиационные пояса Земли (РПЗ)				за 5 лет
Внешний	Протоны Электроны	(1...10)×10 ⁶	10 ⁶ ...10 ⁷	5×10 ⁴ ...5×10 ⁵
Внутренний	Протоны Электроны	(20...800)×10 ⁶ < 1×10 ⁶	10 ⁴ ...10 ⁷	5×10 ⁴ ...5×10 ⁵

Согласно [4], интенсивность комбинированных отказов увеличивается с течением времени. Комбинированные параметрические отказы (при которых происходит постепенное изменение параметров элементов) имеют такую особенность, что им предшествуют сбои, интенсивность которых возрастает, и в результате они переходят в устойчивый отказ.

В [4] делался вывод, что подробные исследования комбинированных отказов приводят к весьма сложным распределениям *t* (времени, необходимого для изменения параметра под влиянием старения или износа до границы поля допусков) одного из элементов. Учитывая условия практического использования этих распределений, вряд ли целесообразно искать для них точные модели.

Например, в [5] исследовались две идентичные партии микросхем. Первая партия подвергалась воздействию электрических нагрузок, затем воздействию ионизирующих излучений такой же дозой. Деградиация параметров микросхем первой партии оказалась существенно, что предсказывалось. Согласно мнению авторов [5], предложенный способ позволяет определить наличие в микросхемах скрытых дефектов, которые при последующей эксплуатации могут привести к их отказу ранее прогнозируемого срока службы.

Остановимся подробнее на критериях, описывающих радиационную стойкость и надёжность.

Под надёжностью в широком смысле понимается свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и услови-

ях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования [6]. Это комплексное свойство, состоящее из сочетания свойств: безотказности, долговечности, сохраняемости и ремонтпригодности. Все они теснейшим образом связаны с определёнными случайными величинами, имеющими размерность времени. Критерием, характеризующим безотказность, является время безотказной работы.

Безотказность – свойство непрерывно сохранять работоспособность в течение заданного времени.

Время безотказной работы – это показатель надёжности системы, в течение которого изделие работает.

В отличие от радиационной стойкости, надёжность определяется расчётными методами. Если, например, КА должен функционировать в течение 10 лет, то экспериментально проводить подобные испытания не представляется возможным. Поэтому имитацию функционирования изделий на длительных сроках проводят при повышенных температурах, так называемых температурах испытаний (*T*_{исп}).

Температура испытаний – это условная (расчётная) постоянная температура, при непосредственном воздействии которой в приборах (материалах) в течение рассматриваемого времени происходят те же изменения, что и при реальном распределении температур.

Температура старения прибора обусловлена влиянием на его характеристики термически активных физико-химических процессов, протекающих в его составных частях, и описывается с помощью коэффициента относительной регрессии (КОР). КОР характеризует изменение физико-химических свойств материалов и элементов приборов, влияющих на изменение

параметров работоспособности приборов, протекающих в его составных частях.

Скорость процессов старения определяется уравнением Аррениуса:

$$b = C \times \exp(-Ea/(R \times T)) = C \times \exp(-B/T). \\ B = Ea/R,$$

где b – скорость процесса старения;

Ea – энергия активации процесса, Дж/моль⁻¹(кал/моль);

R – универсальная газовая постоянная;

T – температура.

При испытаниях приборов для ускорения процесса старения в качестве форсирующего фактора используют температуру. Коэффициент ускорения определяют по формуле:

$$K_{\text{уск}} = b_{\text{исп}} / b_{\text{xp}} = \exp(B/A),$$

где b – скорость процессов старения при температурах $T_{\text{исп}}$ и T_{xp} ;

$$t_{\text{xp}} / t_{\text{исп}} = b_{\text{исп}} / b_{\text{xp}};$$

$$A = T_{\text{исп}} \times T_{\text{xp}} / (T_{\text{исп}} - T_{\text{xp}}).$$

В [7] подчёркивается, что тепловое старение ИЭТ не отражает всего многообразия картины физической деградации. Деградация изделий является постоянным процессом, который доминирует над другими процессами, сопровождающими длительную эксплуатацию изделий. Особую роль играет процесс теплового старения в случаях эксплуатации ИЭТ на борту КА, например, в атмосфере сухого азота или вакууме, когда процессы гидратации и коррозии практически исключены.

Критерием радиационной стойкости является параметр объекта, значение которого в пределах установленных норм гарантирует работоспособное состояние объекта согласно требованиям НТД и КД во время и после действия ионизирующего излучения. Событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта, называется отказом. Так как нарушение вызвано воздействием ионизирующих излучений, то это радиационный отказ.

Радиационная стойкость описывается следующим образом.

Показатели стойкости к воздействию ионизирующих излучений – это максимальный уровень этих излучений, при котором значения параметров, характеризующих работоспособность аппаратуры, не выходят за пределы, установленные для этой аппаратуры.

Время потери работоспособности – время нахождения параметров аппаратуры за пределами, установленными в НД на аппаратуру.

Уровень бессбойной работы – максимальный уровень воздействующего фактора, который не приводит к выходу параметров аппаратуры за нормы, установленные

в нормативной документации, по эффекту сбоя.

Дополнительно, в случае необходимости, устанавливаются требования и критерии годности БИС и СБИС (допустимые значения частоты одиночных сбоев и отсутствие катастрофических отказов вследствие тиристорного эффекта) в ТЗ, стандартах и ТУ.

В настоящее время в рамках развития базовых методик испытаний результаты испытаний могут интерпретироваться как вероятность сбоев и/или отказов при применении в условиях воздействия ионизирующих излучений.

Согласно РД 134-0139-2005 «Методы оценки стойкости к воздействию заряженных частиц космического пространства по одиночным сбоям и отказам», показателями стойкости аппаратуры космических аппаратов являются частота сбоев и вероятность безотказной работы (интенсивность отказов). При этом критерием сбоеустойчивости рекомендуется считать превышение отношения допустимой частоты сбоев к расчётной частоте сбоев на один порядок.

Определить радиационную стойкость можно как экспериментальными, так и расчётно-экспериментальными или расчётными методами.

Экспериментальные методы подразумевают облучение аппаратуры или её составляющих на моделирующих установках.

Согласно базовым методикам допускается не подтверждать испытаниями стойкость аппаратуры по необратимым изменениям параметров, обусловленным структурными и ионизационными дозовыми эффектами, показатели стойкости которых, установленные по данным стойкости комплектующих изделий по расчётному методу, не менее чем в несколько раз превышают значения требований, заданных в документах на аппаратуру, и не противоречат результатам испытаний наименее стойких подсистем.

Однако при этом должна быть подтверждена принадлежность каждого из применяемых ЭКБ производственной партии, стойкость которых установлена. «Для отечественных ЭКБ разрешается не проводить испытания на стойкость, показатели стойкости которых подтверждаются данными ТУ на ту же партию изделий, сопроводительными документами на поставку, официальными результатами ранее проведённых испытаний изделий той же партии.

Согласно отраслевым стандартам можно не испытывать ЭРИ импортного про-

изводства, в сертификатах на поставленную партию которых имеются данные по радиационной стойкости, обеспечивающие заданные требования.

Оценка стойкости аппаратуры может быть проведена расчётно-экспериментальным методом, если она попадает под действие следующих условий:

- существующие испытательные установки не позволяют проводить испытания аппаратуры в целом (из-за значительных габаритов аппаратуры уровень вторичного излучения от облученной аппаратуры будет выше допустимого при проведении исследовательских работ в течение срока, существенно превышающего срок разработки КА);
- при разработке КА закупается ограниченное число комплектующей аппаратуры (аппаратура БСУ КА дорогостоящая, средства на закупку аппаратуры для проведения специальных испытаний не предусмотрены).

В настоящее время достаточно полно разработаны методы оценки стойкости ЭРИ и РЭА к воздействию ионизирующих излучений космического пространства, которые заключаются в проведении ускоренных испытаний на испытательных установках протонного и электронного излучений при высоких интенсивностях.

Правомерность такого подхода подтверждена в [8]. В этой работе исследовано облучение электронами 11 МэВ кремниевых окислов Si/SiO₂ в течение 30 с, 45 с, 60 с и 120 с и установлено, что количество радиационных дефектов возрастает с увеличением времени облучения, т.е. с увеличением дозы облучения.

Некоторые авторы рассматривают возможность описания комплексного характера воздействия дестабилизирующих факторов на аппаратуру КА путём установления связи между теориями радиационной стойкости и надёжности.

В [9] делается вывод, что из сопоставления определений «радиационная стойкость» и «безотказность», описывающих надёжность, следует, что они близки по смыслу. Отличием, с одной стороны, является отсутствие в явном виде упоминания о том, в течение какого времени не должны появляться отказы при воздействии ионизирующих излучений. С другой стороны, при определении безотказности в требованиях надёжности отсутствуют указания, в условиях воздействия каких факторов не должны появляться отказы.

Согласно источнику [9], это можно позволить для решения задач теории стойкости при хорошо развитом понятийном и

математическом аппарате теории надёжности. Для этого необходимо проанализировать информацию о перестройке внутренней структуры материалов приборов и параметров приборов при радиационных воздействиях и при длительном хранении или температурном воздействии.

В многочисленных источниках информации от 60-х годов и до настоящего времени описаны воздействие того или иного дестабилизирующего фактора на параметры приборов и, в лучшем случае, результаты отжига при повышенных температурах. Однако совместное воздействие дестабилизирующих факторов фактически не проанализировано в источниках информации.

В [10] представлена кривая восстановления прямого падения напряжения при изохронном отжиге диодной структуры, подвергшейся облучению. Кривая восстановления падения прямого напряжения в полулогарифмическом масштабе состоит из прямолинейных участков с различным наклоном, то есть кинетика восстановления падения прямого напряжения на этих участках следует экспоненциальной зависимости вида:

$$U_D(T)/U_D(\Phi) = K_1 \times \exp(-Ea/(kT)),$$

где $U_D(T)$ – прямое падение напряжения диода после отжига при температуре T , $U_D(\Phi)$ – прямое падение напряжения диода после облучения, K_1 – константа кинетики, Ea – энергия активации отжига дефектов в диапазоне температур.

С ростом температуры отжига энергия активации возрастает, что свидетельствует об отжиге более крупных дефектов. Ломаный ход кривой восстановления свидетельствует о том, что в процессе отжига дефекты перестраиваются.

В ряде работ, таких как [11–16], описано и проанализировано восстановление параметров облучённых ионизирующими излучениями приборов после термического отжига в течение различных промежутков времени.

Такие результаты свидетельствуют о том, что испытания комплексного воздействия дестабилизирующих факторов космического пространства не дадут правильных результатов, если одну и ту же партию приборов сначала подвергнуть радиационному воздействию, а потом тепловому, имитирующему длительную эксплуатацию прибора.

С другой стороны, в [17] утверждает, что к дефектам и несовершенствам, внесённым в приборы при их изготовлении, добавляются радиационные дефекты, вследствие чего термодинамическая

неустойчивость структуры приборов возрастает. Радиационные дефекты, взаимодействуя между собой и имеющимися в приборах несовершенствами, способствуют возникновению неблагоприятных ситуаций, приводящих к отказам при дальнейшей длительной эксплуатации.

Наиболее общая точка зрения изложена в [18]. Как известно, более упорядоченная структура является более стабильной, а следовательно, обладает и более высокой радиационной стойкостью и надёжностью.

Подробно упорядочение структуры кристаллов ионизирующим излучением описано в 2009 г. в книге Мамонтова А.П. с соавторами [18]. Этими исследователями разработана теория о том, что определяющее влияние на ход радиационных процессов оказывает исходная неравномерность структуры кристаллов и плёнок. А при облучении преобладают два процесса: стимулирование реакций в кристалле, «замороженных» при выращивании (стремление кристалла к равновесию), и накопление радиационных дефектов (переход кристалла в более неравновесное состояние). В условиях облучения при комнатных температурах относительно большими дозами высокоэнергетических частиц ($10^{14} \dots 10^{15} \text{ см}^{-2}$) изменения свойств кристаллов определяются наличием радиационных дефектов. Для яркого проявления процессов, связанных с установлением более равновесного состояния (по отношению к исходному, до облучения), необходимо снизить концентрацию вводимых облучением радиационных дефектов. Это можно сделать в том числе уменьшением энергии и доз облучения.

То есть процессы накопления, отжига дефектов носят нелинейный характер. Взаимодействие процессов стабилизации и старения структур, вызванных отжигом и накоплением дефектов, зависит от нескольких факторов, таких как начальное состояние структуры, уровни радиационных воздействий, последовательность радиационных и термических воздействий, конструкция полупроводникового прибора и пр.

Например, весьма интересный и нестандартный эффект описан в [19]. Установлено, что предварительное гамма-облучение может привести к повышению стойкости мощных n-МОП транзисторов к воздействию электростатического разряда (ЭСР). Наиболее вероятной причиной этого эффекта в [19] считается деградация коэффициента усиления «паразитного» биполярного транзистора в структуре n-МОП в результате гамма-облучения, после кото-

рого для включения биполярного транзистора требуется большее напряжение ЭСР.

Обычно, чтобы решить на практике задачу прогнозирования стойкости аппаратуры КА к комплексному воздействию дестабилизирующих факторов космического пространства, применяется значительный запас по времени функционирования изделий.

Чтобы обсудить вопрос радиационных испытаний, необходимо обратить внимание на ещё один вопрос. Для имитации воздействия протонов и электронов космического пространства на аппаратуру наиболее доступными являются ускоритель протонов с энергией 20 МэВ и ускоритель электронов с энергией 1 МэВ. Однако эти установки не задействованы на регулярной основе в испытаниях электронных компонентов, а сами эти испытания не носят массового характера, организации – держатели этих установок обычно не обеспечивают их метрологическую аттестацию на право проведения радиационных испытаний. Это вызывает проблемы с воспроизводимостью результатов испытаний и их достоверностью [20].

При определении уровня радиационной стойкости, согласно ОСТ 134-1034-2012, для аппаратуры необратимые изменения её параметров при воздействии электронов и протонов могут моделироваться последовательным облучением аппаратуры гамма-нейтронным излучением.

Как упоминалось в начале статьи, необходимо учитывать, что в реальных условиях на аппаратуру КА действуют не только ионизирующие излучения различных энергий и типов частиц в течение различных сроков функционирования на орбите КА, а также и то, что воздействующие ионизирующие излучения имеют различную интенсивность. А при моделировании ионизирующих излучений космического пространства в земных условиях весь спектр космических излучений заменяется излучениями с плотностью потока $10^6 \dots 10^9 \text{ част}/(\text{см}^2 \times \text{с})$ [3]. Эти различия необходимо учитывать при оценке радиационной стойкости аппаратуры КА.

Например, в [21] установлено, что для операционного усилителя малой мощности с частотной компенсацией и высоким коэффициентом усиления наблюдается ярко выраженный эффект увеличения деградации со снижением интенсивности излучения, который заключается в радикально большей динамике изменения параметров от уровня дозы гамма-излучения в случае проведения облучения при низкой интенсивности

(0,014 рад (Si)/с) по сравнению с облучением при высокой интенсивности (20 рад (Si)/с).

Кроме того, в [21] установлено, что для изделий биполярной технологии использование ускоренных испытаний на основе проведения облучений при повышенной интенсивности и повышенной температуре может приводить к завышению показателей стойкости испытываемых изделий.

Поэтому современные базовые методики дополнены методами оценки радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры с учётом воздействия низкоинтенсивных излучений (мощность дозы которых не превышает 0,01 рад/с, имитирующих воздействие естественного ионизирующего излучения КП по дозовым ионизационным эффектам). Расчётно-экспериментальный метод состоит в определении уровня радиационной стойкости по формуле: $D_{РЭА} = D_{ТУ} (P_{ЭКС}/P_{ИСП})^n$, где $D_{РЭА}$ – уровень радиационной стойкости при низкой мощности поглощённой дозы ИИ КП;

$D_{ТУ}$ – уровень радиационной стойкости, подтверждённый документами;

$P_{ИСП}$ – мощность поглощённой дозы облучения испытательной установки, при которой проводились испытания изделий ЭКБ по ТУ (рекомендуется от 0,01 до 0,1 рад/с);

$P_{ЭКС}$ – мощность поглощённой дозы воздействия ИИ КП, соответствующая реальным условиям эксплуатации;

n – коэффициент аппроксимации зависимости уровня радиационной стойкости изделий ЭКБ от мощности дозы излучения.

Кроме того, для современных базовых методик с учётом длительного воздействия низкоинтенсивного облучения подчёркнуто, что эти методы справедливы для изделия на основе биполярной, гибридной технологий, технологии изготовления биполярных и комплементарных «металл-окисел-полупроводник» структур на одном кристалле, а также на основе технологий «металл-окисел-полупроводник», «кремний на изоляторе», комплементарных «металл-окисел-полупроводник» структур (для ИС, не содержащих биполярных структур). Отдельно выделена методика об оценке радиационной стойкости и испытаний функционально-сложных изделий микроэлектроники.

Если продолжать обсуждение проблемы плотности воздействующих частиц, то немаловажным аспектом является воздействие единичных тяжёлых заряженных частиц на электронную аппаратуру. Внимание на этот вопрос обращалось ещё в 90-х годах прошлого века [2].

В связи с тенденцией к повышению степени интеграции электронных приборов, сопровождаемой миниатюризацией активного объёма отдельных компонентов интегральных схем, возможно произвольное искажение информации и появление ошибок при её обработке без устойчивого повреждения элементов интегральных схем (так называемые перемежающиеся отказы), которые возникают под действием ИИ с чрезвычайно низкими интегральными потоками вплоть до воздействия отдельных частиц. Как оказалось, перемежающиеся отказы могут быть вызваны фоном естественной радиации, например, радиоактивными изотопами урана и тория, содержащимися в ничтожных количествах в корпусах приборов. Перемежающиеся отказы являются специфическим типом радиационных эффектов, возникающих в микроэлектронных приборах с высоким уровнем интеграции, причём защита от них путём увеличения толщины экранов неэффективна как раз в силу очень низкого порога их возникновения.

Согласно базовым методикам для БИС и СБИС, предназначенных для функционирования в КА, требования по стойкости по эффектам одиночных сбоев предъявляют от воздействия отдельных протонов естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ), галактических космических лучей (ГКЛ), солнечных космических лучей (СКЛ) и тяжёлых заряженных частиц ГКЛ и СКЛ.

В [22] представлены результаты расчёта частоты и числа (вероятности) случайных одиночных эффектов в аппаратуре КА. Они создаются ионизирующими излучениями КП и потоком частиц от бортовых радиоизотопных источников тепла на основе диоксида плутония-238 в период межпланетного полёта космического аппарата с посадкой на Марс.

Максимальное число одиночных сбоев происходит при воздействии пиковых потоков солнечной вспышки, длящихся 12–24 ч. Воздействие ГКЛ по всей траектории движения КА различно. Анализ одиночных отказов основан на понятии вероятности одиночных отказов. В [22] установлено, что для интегральных микросхем частота одиночных сбоев, создаваемая потоком частиц от сборки источников тепла из 8 штук, составляет один сбой за четверо суток полёта. Частота сбоев от ГКЛ составляет от трёх до пяти сбоев за два года полёта, частота сбоев при воздействии пиковых потоков от солнечных вспышек составляет от 2 до 5 сбоев

за 12 часов. Эти сбои парируются применением программных методов.

Оценка сбоев и защита от воздействия ТЗЧ проводятся разными способами. В литературе описаны различные подходы к оценке и описанию этих эффектов.

В [23] представлены результаты исследования эффектов локальной ионизации при воздействии ТЗЧ в диодных матрицах и определена ширина чувствительной области приборов. Для испытаний облучение образцов проводилось ионами в вакуумной камере при различных температурах. В процессе облучения контролировалось возникновение одиночных радиационных эффектов в виде одиночных эффектов переходных ионизационных реакций SET (Single Event Transient). Установлено, что ширина чувствительной области не зависит от температуры облучения и ограничена толщиной эпитаксиального слоя.

Во многих источниках, например [24], [25], [26], также описаны исследования приборов на стойкость к воздействию ТЗЧ с помощью ионов в условиях вакуума.

В [27] проведён сравнительный анализ методов формирования одиночных радиационных эффектов в аппаратуре, предназначенной для функционирования в КА. В качестве критерия радиационной стойкости по одиночным радиационным эффектам принимается частота одиночных сбоев или вероятность необратимых отказов. Она определяется зависимостью сечения образования одиночных радиационных эффектов от линейных потерь энергии ТЗЧ.

Для моделирования ТЗЧ КП применяются ускорители тяжёлых заряженных частиц. Такие эксперименты отличаются высокой трудоёмкостью и требуют декапсуляции ИМС, что вносит дополнительную погрешность при испытаниях.

В [27] анализируется возможность для формирования использования генераторов сфокусированного лазерного излучения видимого и инфракрасного спектра и пучков высокоэнергетических электронов. Все эти методы требуют калибровки, расчётов и дополнительной апробации.

В [28] рекомендуется обеспечивать аппаратную избыточность в сочетании со схемотехническими и программно-алгоритмическими решениями для парирования неизбежных сбоев и необратимых отказов с учётом эффектов одиночных отказов при воздействии заряженных частиц ионизирующих излучений КП.

Таким образом, цель этой статьи – если не дать ответ на весьма актуальный

и до сих пор нерешённый вопрос разработки способов интерпретации результатов испытаний, проводимых по действующим базовым методикам на стойкость к комплексному воздействию дестабилизирующих факторов в реальных условиях функционирования аппаратуры, то обратить внимание на существование задачи по разрешению этого вопроса. Очень важно учитывать, что любое моделирование имеет существенное отличие от реальных условий.

Поэтому базовые методики испытаний совершенствуются в направлении ориентации результатов радиационных испытаний на разработчиков ЭРИ или РЭА.

Литература

1. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения / К.И. Таперо, В.Н. Улимов, А.М. Членов. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 304 с.
2. Радиационная стойкость в оптоэлектронике / Ф.А. Заитов, Н.Н. Литвинова, В.Г. Савицкий, В.Г. Средин. М.: Воениздат, 1987. 166 с.
3. Райкунов Г.Г. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов. М.: Физматлит, 2013. 256 с.
4. Надёжность и эффективность АСУ / под общ. ред. Ю.Г. Заренина. Киев: Техника, 1975. 368 с.
5. Патент 2 100 817, Российская Федерация, МПК G 01 R 31/08. Способ испытаний на надёжность изделий электронной техники: № 4902384/28: заявл. 14.01.1991: опубл. 27.12.1997 / Б.А. Воронцов, И.В. Куликов. 7 с.
6. ГОСТ 27.002-2015. Надёжность в технике: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21.06.2016 № 654-ст: дата введения 2017-03-01.
7. Борисов Ю.А. Прогнозирование радиационного старения полупроводниковых материалов / Ю.А. Борисов, В.Ф. Герасимов, Н.Ю. Никифоров [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2013. Вып. 1–3. С. 174–176.
8. Materials Science and Engineering B100 (2003) 23/26. Institute of Solid State Physics, Bulgarian Academy of Sciences, An advantage of MOS structures with ultra thin oxide during irradiation. S. Kaschieva.
9. Мьрова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. М.: Радио и связь, 1989. 297 с.
10. Сирота Н.Н., Чернышев А.А., Кориунов Ф.П. Отжиг радиационных дефектов в кремниевых диодах, облучённых быстрыми нейтронами // Тр. института тв. тела и полупроводников, 2012. С. 33–39.
11. Вавилов В.С., Горин Б.М., Данилин Н.С. и др. Радиационные методы в твердотельной электронике. М.: Радио и связь, 1990.
12. Коваленко А.К., Королева Е.А., Галеев А.П. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру 2015, вып. 9. С. 11–13.
13. Temperature dependence of radiation damage and its annealing in silicon detectors. H.J. Zioch and al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2021, vol. 68, N8, pt. 1, p. 1694–1700.
14. Stein H.J. Thermodynamic and morphological analysis of large silicon self-interstitial clusters using atomic simulations. J. of Applied Phys., 117(2015), issued 3, April 07.
15. Гарнык В.С. Влияние характера рассеяния на время жизни неосновных носителей заряда в кремнии, легированном гафнием // Физика и техника полупроводников. 1994. Т. 28, вып. 2. С. 228–231.
16. Кориунов Ф.П., Богатырёв Ю.В., Носов Ю.П. Применение гамма-излучения для регулирования параметров серийных кремниевых диодов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. М., 2009. Вып. 3. С. 5–8.
17. Чернышёв А.А. Основы надёжности полупроводниковых приборов и интегральных схем. М.: Радио и связь, 1988.
18. Мамонтов А.П., Чернов И.П. Эффект малых доз ионизирующих излучений. Томск: Дельтаплан, 2009. 288 с.
19. Арзамасцева Д.М., Петров А.С., Таперо К.И. Механизм деградации мощных n-МОП транзисторов при воздействии электростатического разряда после предварительного гамма-облучения // Тезисы докладов 26-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2023», НТ сборник, Лыткарино 6–7 июня 2023 г., АО «НИИП». С. 94–95.
20. Таперо К.И., Петров А.С. Проблемные вопросы оценки радиационной стойкости солнечных батарей космического применения // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру 2023. Вып. 4. С. 5–11.
21. Петров А.С., Емельянов В.И., Таперо К.И. и др. Сравнение различных методов моделирования эффектов низкой интенсивности в биполярных операционных усилителях // Тезисы докладов 26-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2023», НТ сборник, Лыткарино 6–7 июня 2023 г., АО «НИИП». С. 100–101.
22. Хамидуллина Н.М., Черников П.С., Зефирова И.В. Сравнение параметров одиночных эффектов, создаваемых ионизирующими излучениями космического пространства и радиоизотопных источников в РЭА межпланетных КА // Тезисы докладов 26-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2023», НТ сборник, Лыткарино 6–7 июня 2023 г., АО «НИИП». С. 15–16.
23. Бакеренков А.С., Чубунов П.А., Бондаренко Н.А. и др. Анализ конфигурации чувствительных областей в диодных матрицах 2ДС627/ББ при воздействии ТЗЧ // Тезисы докладов 26-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2023», НТ сборник, Лыткарино 6–7 июня 2023 г., АО «НИИП». С. 137–138.
24. Бондаренко Н.А., Мальцева М.С., Бабак Р.П. и др. Особенности подготовки и проведения испытаний регуляторов напряжения на стойкость к воздействию ТЗЧ // Тезисы докладов 26-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2023», НТ сборник, Лыткарино 6–7 июня 2023 г., АО «НИИП». С. 147–148.
25. Цветков А.И., Лыков В.В., Никольская Т.В. и др. Особенности сбоя флеш-памяти с интерфейсом передачи данных SPI 16 Мбит W25Q16BV во время испытаний на стойкость к воздействию ТЗЧ // Тезисы докладов 26-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2023», НТ сборник, Лыткарино 6–7 июня 2023 г., АО «НИИП». С. 149–150.
26. Воробьёв Л.С., Лыков В.В., Шляев Т.В. и др. Особенности проявления микродозового эффекта (SENE) при испытаниях цифрового потенциометра на стойкость к воздействию ТЗЧ // Тезисы докладов 26-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2023», НТ сборник, Лыткарино 6–7 июня 2023 г., АО «НИИП». С. 151–152.
27. Яковлев М.В. Одиночные радиационные эффекты в элементах электроники // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру 2023. Вып. 4. С. 13–16.
28. Иванова В.А., Моргачёв Е.О., Орешко А.Ш. и др. Радиационные условия на орбитах мониторинга арктических регионов // Космонавтика и ракетостроение. 2023. Вып. 4(133). С. 106–112.

