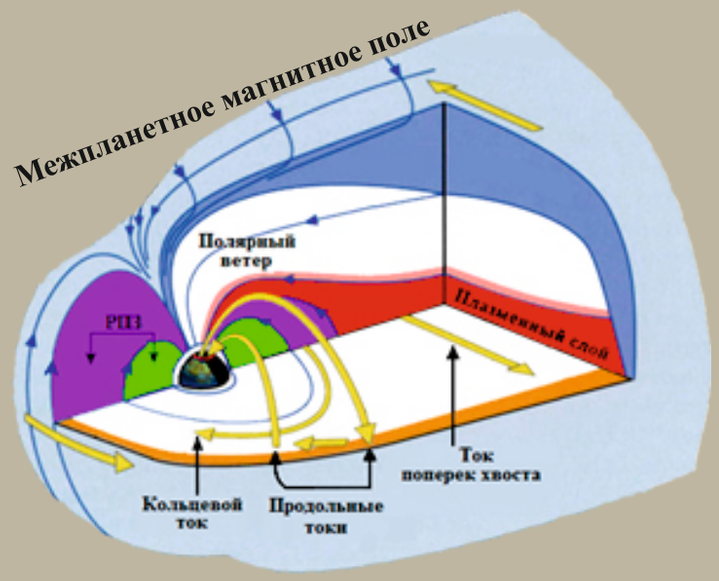
И.П. Безродных
А.П. Тютнев
В.Т. Семёнов

РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В КОСМОСЕ

ЧАСТЬ 3. ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИЗДЕЛИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ



РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В КОСМОСЕ



И. П. Безродных (1949 г. р.) окончил в 1973 г. Якутский государственный университет, защитил диссертацию на соискание ученой степени к. ф.-м. н. в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн АН СССР (1985 г.). С 1973 по 2001 гг. работал в Институте космофизических исследований и аэрономии СО РАН (г. Якутск). С 2001 по 2003 гг. работал в компании Wave systems (г. Москва), с 2003 по 2010 гг. – в Московском авиационном институте. С 2010 г. по настоящее время сотрудник Института космических исследований РАН (по совместительству сотрудник АО «Корпорация «ВНИИЭМ»). Научные интересы: влияние солнечной активности на динамику ионизирующих излучений в межпланетной среде и в магнитосфере Земли. Соавтор более 100 публикаций. К части опубликованных работ имеется электронный доступ: http://www.cosmic-rays.ru и http://www.d54x.ru.



А. П. Тютнев (1940 г. р.) окончил в 1964 г. Московский физико-технический институт, защитил диссертацию на соискание ученой степени к. х. н. в Институте электрохимии АН СССР (1977 г.), а степени д. ф.-м. н. в Институте химической физики АН СССР (1988 г.). С 1969 г. и по настоящее время работает в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» (с 2012 г. по совместительству). С 2012 г. – профессор НИУ ВШЭ на кафедре Физической химии и экологии. Научные интересы: радиационная электропроводность полимеров, объемное заряжение внешних покрытий космических аппаратов, прыжковый транспорт носителей заряда в молекулярно допированных полимерах, полуэмпирические модели этих явлений. Соавтор 6 книг по этим направлениям, более 200 статей в рецензируемых журналах РФ и 42 работ в ведущих зарубежных журналах. К части опубликованных работ имеется электронный доступ: http://www.cosmic-rays.ru и http://www.d54x.ru.



В. Т. Семёнов (1941 г. р.) окончил в 1970 г. Томский политехнический институт по специальности «электрооборудование летательных аппаратов». С 1970 г. по настоящее время работает в АО «Корпорация «ВНИИЭМ». С 1986 г. начальник лаборатории технической физики. Научные интересы: обеспечение радиационной стойкости электронной аппаратуры и оборудования космических аппаратов при воздействии космических ионизирующих излучений, исследования и испытания широкого круга изделий и материалов электротехники, использование методов математического моделирования для анализа влияния ионизирующих излучений на работу электронных схем. Соавтор более 70 публикаций. К части опубликованных работ имеется электронный доступ: http://www.cosmic-rays.ru и http://www.d54x.ru.

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ
«КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА,
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ И
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ» имени А.Г. Иосифьяна»
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

**И. П. Безродных, А. П. Тютнев,
В. Т. Семёнов**

РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В КОСМОСЕ

ЧАСТЬ 3. ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИЗДЕЛИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

**Москва
2017**

УДК 537.591

Ответственный редактор д-р физ.-мат. наук А. П. Тютнев
Рецензент д-р хим. наук, заслуженный деятель науки РФ А. В. Ванников

Радиационные эффекты в космосе. Часть 3. Влияние ионизирующего излучения на изделия электронной техники / И. П. Безродных, А. П. Тютнев, В. Т. Семёнов. – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – 64 с.

В третьей части книги представлены результаты экспериментальных исследований влияния ионизирующего излучения на изделия электронной техники.

Книга предназначена для конструкторов и разработчиков электронной аппаратуры космических аппаратов, она также может быть полезна для научных работников и инженеров, специализирующихся в области электроники и радиационной физики.

УДК 537.591

© И.П. Безродных, А.П. Тютнев,
В.Т. Семёнов, 2017
© АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017

Оглавление

Предисловие.....4

Введение.....6

1. ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПОВРЕЖДЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАДИАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ.....11

2. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ОБЛУЧЕНИЯ И ДРУГИХ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ.....23

3. ОБОБЩЕННЫЕ ДАННЫЕ ПО РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ ИНОСТРАННОГО ПРОИЗВОДСТВА, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В АППАРАТУРЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.....32

Литература.....61

Предисловие

АО «Корпорация «ВНИИЭМ» имеет большой опыт в разработке и создании космических аппаратов в интересах метеорологии, исследования природных ресурсов и дистанционного зондирования Земли. ВНИИЭМ осуществил более 80-ти запусков, среди них: КА серии «Метеор», КА «Ресурс-О1», КА «Электро», КА «Канопус-В». В ближайшей перспективе АО «Корпорация «ВНИИЭМ» создание космических комплексов дистанционного зондирования Земли и околоземного пространства, космических комплексов для проведения фундаментальных научных исследований, а также электромеханического оборудования, комплексов и систем служебного назначения для космических аппаратов.

Для разработки аппаратуры, способной устойчиво и длительно работать в условиях высокого уровня радиации, необходимы знания состава ионизирующего излучения, его энергетического, пространственного распределения и механизмов воздействия на электронные компоненты, а также конструкционные и электроизоляционные материалы.

Авторы, сотрудники лаборатории технической физики АО «Корпорации «ВНИИЭМ» и отдела физики плазмы ИКИ РАН, Департамента электронной инженерии НИУ ВШЭ, предлагают читателю книгу, посвященную вопросам динамики потоков ионизирующих излучений в околоземном космическом пространстве, вопросам влияния ионизирующих излучений на физико-химические свойства электротехнических материалов и на работоспособность электронных систем космических аппаратов.

Особенность данной книги состоит в том, что в ней впервые, в полном объеме, приведены экспериментальные данные, свидетельствующие о связи интенсивности потоков ионизирующих излучений внешнего радиационного пояса Земли с состоянием межпланетной среды. Существование этой связи делает возможным разработать более надежную методику прогнозирования радиационных условий в околоземном космическом пространстве. Актуальность такого прогноза особенно очевидна при полетах за пределы магнитосферы Земли, когда космический аппарат пересекает радиационные пояса, в которых интенсивность ионизирующих излучений со временем изменяется в десятки и сотни раз.

Кроме того, в данной книге обобщены результаты многолетних экспериментальных исследований по радиационной электропроводности полимерных материалов, используемых на внешней поверхности космических аппаратов, и по влиянию космической радиации на надежность функционирования электронных систем. Рассмотрены важные вопросы, связанные с влиянием температуры на радиационную стойкость электротехнических материалов, а также вопросы, связанные с электризацией космических аппаратов и повышением их стойкости к воздействию этого поражающего фактора. Приведены результаты экспериментальных ис-

следований влияния ионизирующих излучений на работоспособность электронных компонент.

Книга будет полезна для конструкторов и разработчиков электронной аппаратуры космических аппаратов, она также представляет интерес для студентов и аспирантов технических вузов, научных работников и инженеров, специализирующихся в области геофизики, радиационной физики и химии полимеров.

Генеральный директор,
д-р техн. наук. Л. А. Макриденко

Введение

Обеспечение надежной эксплуатации космических аппаратов в космосе сопряжено с решением целого комплекса научно-технических вопросов, связанных с особенностями внешней обстановки в открытом космосе. Основные факторы этой обстановки хорошо известны. Это глубокий вакуум, невесомость, мощные потоки теплового, ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца, высокоэнергичные электроны и ядра химических элементов галактических космических лучей, частицы солнечных космических лучей и радиационных поясов Земли, частицы микрометеоритов и космического мусора. Каждый из этих факторов требует специального подхода и по каждому из них существует обширная литература.

В данной книге мы коснемся вопросов: динамики ионизирующих излучений в околоземном космическом пространстве; радиационной стойкости электронных радиоизделий и материалов, использующихся в космической индустрии; природы электростатических разрядов, возникающих на внешней поверхности космических аппаратов. При рассмотрении всех этих вопросов основное внимание уделено научному анализу физических процессов, лежащих в основе подобных явлений. Книга состоит из трех отдельных частей.

В первой части книги рассмотрены физические процессы, определяющие динамику и распределение потоков ионизирующих излучений в околоземном космическом пространстве. Представлены экспериментальные данные, подтверждающие наличие периодических магнитогидродинамических структур в солнечном ветре перед фронтами межпланетных ударных волн, и обсуждается их влияние на эффективность ускорения заряженных частиц в межпланетной среде. Представлены обобщенные экспериментальные данные, подтверждающие тесную связь с состоянием межпланетной среды: геомагнитной активности, потоков высокоэнергичных частиц, захваченных в геомагнитном поле, и потоков частиц, высыпающихся из радиационного пояса Земли. Рассматривается особая роль рекуррентных (повторяющихся) высокоскоростных потоков солнечного ветра в динамике энергичных частиц в межпланетной среде и в магнитосфере Земли. Подчеркивается важный экспериментальный факт, состоящий в том, что в отсутствии солнечных вспышек всем существенным возрастаниям потока релятивистских электронов в магнитосфере Земли предшествует возрастание скорости солнечного ветра. При этом не отрицается, что некоторое влияние на радиационные условия внутри магнитосферы оказывают множество других факторов, например, величина и знак Bz компоненты вектора межпланетного магнитного поля.

Кроме данных, характеризующих степень зависимости динамики ионизирующих излучений в магнитосфере Земли от динамики параметров солнечного ветра, приводятся данные потерь энергии частиц при прохождении через вещество и данные об эффективности снижения интенсивности потоков ионизирующих излучений и поглощенной дозы радиации за защитными экранами.

Вторая часть книги состоит из трех глав. В первой главе второй части книги дается всесторонний теоретический анализ радиационной электропроводности полимеров, излагаются новейшие экспериментальные данные по радиационной электропроводности полимеров и прыжковому транспорту носителей заряда в молекулярно допированных полимерах.

Воздействие ионизирующих излучений (быстрых электронов, гамма-квантов, протонов, быстрых и медленных нейтронов и др.) на полимерные диэлектрики (в дальнейшем – полимеры) приводит к образованию заряженных частиц в объеме материала. В результате концентрация носителей заряда в облучаемом полимере резко возрастает, что приводит к появлению радиационной электропроводности.

За время, прошедшее с момента выхода монографии А. П. Тютнева, В. С. Саенко, Е. Д. Пожидаева, Н. С. Костюкова «Диэлектрические свойства полимеров в полях ионизирующих излучений», появились новые результаты. Они рассеяны в периодической научной литературе и трудах конференций и явно недостаточно отражены и систематизированы в монографиях. Мы предполагаем восполнить этот пробел. Большое внимание будет уделено дальнейшему развитию модели Роуза – Фаулера – Вайсберга с целью охвата дозовых эффектов и прыжкового транспорта, но при условии сохранения формализма модели квазизонного транспорта.

Субъективизм авторов состоит в том, что, стараясь сохранить идейное единство глав, они отдают предпочтение модели многократного захвата, используя ее в качестве универсального инструмента при обсуждении и сравнительном анализе экспериментальных и теоретических результатов, полученных исследователями, принадлежащими к различным научным школам.

Дело в том, что указанная модель, в зависимости от выбранного энергетического распределения локализованных состояний (ловушек), может достаточно точно моделировать кинетику переходных процессов в самых различных неупорядоченных материалах. Этот подход позволяет обеспечить удивительную физическую прозрачность при описании широкого круга явлений переноса, отсутствующую в большинстве других теорий.

Трудности исследования неупорядоченных материалов обусловлены сложностью самого объекта исследования. На данном этапе изучения не представляется возможным строго контролировать состав и структуру некристаллических материалов. Существует значительная сложность и математического описания систем без трансляционной инвариантности. В частности, для учета дефектной структуры материала (пространственного и энергетического беспорядка, наличия пустот свободного флуктуационного объема при возможном влиянии различного рода технологических примесей) необходимо использовать модельные аппроксимации.

Формирование новых представлений в области электронного транспорта неупорядоченных систем не завершено. Появившиеся в последнее время результаты позволили углубить наши представления о природе локализации, зоне переноса и кинетических свойствах полимерных матриц. Особого упоми-

нания заслуживает изменение наших взглядов на природу и величину эффективного частотного фактора, фигурирующего в модели многократного захвата.

В связи с бурным развитием электрографии были проведены обширные исследования, направленные на изучение переноса носителей заряда в фотопроводящих неупорядоченных системах (полимерах и халькогенидных стеклах).

В этой связи привлечение данных, полученных при изучении радиационной электропроводности полимерных диэлектриков, а также фундаментальных результатов из области радиационной химии, представляет несомненный интерес. Более того, на базе этих исследований предложена универсальная методика для изучения подвижности носителей заряда в полимерных системах, позволяющая судить о правильности той или иной теоретической концепции.

Общий объем информации по подвижности носителей заряда в полимерах, как и вообще в неупорядоченных твердых телах, чрезвычайно велик, но достаточно противоречив. По нашему мнению, сложившаяся неудовлетворительная ситуация в обсуждаемой области связана с упорным нежеланием ряда ведущих специалистов расширить методическую базу экспериментальных исследований и наряду с приповерхностным способом генерации носителей заряда использовать однородную по объему фотогенерацию, на что уже неоднократно указывалось в литературе, начиная с 1970 г.

Таким образом, назрела необходимость критического пересмотра экспериментальных и теоретических результатов по транспорту носителей заряда во всей их совокупности. В течение последних 30 лет нами проводятся систематические исследования как самой радиационной электропроводности, так и подвижности носителей заряда в полимерах, в том числе и методом времени пролета. Объекты изучения включают поливинилкарбазол и молекулярно допированные полимеры. Все это позволяет надеяться на то, что предлагаемый в настоящей монографии анализ окажется в меру объективным и достаточно продуктивным в том смысле, что укажет подходы к разрешению сложившейся кризисной ситуации путем постановки специально поставленных экспериментов.

Вторая глава второй части книги посвящена непосредственно радиационной стойкости полимеров. Показано принципиальное отличие этой характеристики для полимеров и керамических материалов. Так как основная доля (90–98 %) поглощенной энергии расходуется на ионизацию и возбуждение атомов и молекул среды и только незначительная часть на смещение атомов и создание структурных дефектов, то ионизационные потери энергии (поглощенная доза) полностью определяет повреждающий эффект в органических материалах. В неорганических материалах деградация свойств вызывается структурными дефектами решетки, т. е. энергией излучения, расходуемой на смещение атомов облучаемого вещества. Показано влияние условий облучения на радиационную стойкость полимеров.

Поскольку по-прежнему остаются нерешенными многие вопросы постановки и проведения ускоренных испытаний полимеров по определению надежности их эксплуатации в полях ионизирующих излучений в

аппаратуре атомных электростанций и космических аппаратов, то в монографии проведен критический анализ возможности использования для этой цели существующих справочных данных, полученных, как правило, в нормальных условиях в ходе проведения сильно ускоренных испытаний по фактору мощности дозы, интегральной дозе и условиям облучения (газовая среда, влажность, агрессивные компоненты и др.), имитирующим аварийные ситуации на АЭС.

Третья глава второй части книги посвящена проблеме электризации материалов внешней поверхности космических аппаратов в открытом космосе, лабораторному моделированию и научному исследованию этих вопросов, а также природе и методам борьбы с электростатическими разрядами на борту космических аппаратов. С середины 1970-х годов начинается интенсивное изучение электризации диэлектрических слоев под воздействием пучков моноэнергетических электронов с энергией в несколько десятков килоэлектронвольт. Этот интерес был обусловлен запросами космической техники, в первую очередь, необходимостью борьбы с электризацией космических аппаратов, эксплуатируемых на геостационарной или высокоэллиптических орбитах. В этом явлении радиационная электропроводность служит основным каналом сброса объемного заряда на «заземленный» электрод (корпус космического аппарата), ограничивая внутренние электрические поля.

В третьей части книги рассмотрены основные механизмы воздействия ионизирующих излучений на электронные компоненты приборов космических аппаратов, приводящие к нарушению их нормальной работы. Дается краткий обзор результатов исследования влияния радиации на характеристики кремния, основного материала, из которого изготавливаются электронные компоненты для приборов различного назначения. В большинстве своем материалы обобщены из ранее опубликованных научных изданий, которые сейчас трудно найти, а частично взяты из неопубликованных источников. Особое внимание уделяется вопросам, связанным с изменением под воздействием радиации таких параметров полупроводников, как время жизни неосновных носителей заряда, удельное электрическое сопротивление, подвижность носителей заряда. Отмечается, что влияние ионизирующих излучений на свойства полупроводниковых приборов существенно зависит от плотности потока и спектрального состава ионизирующих излучений, температурного режима, как во время облучения, так и после облучения, а также электрического режима работы полупроводников. Большая часть материалов одной из глав посвящена вопросам радиационной стойкости комплектующих электронных компонент иностранного производства различного назначения. Приведенные в данной главе результаты анализа радиационной стойкости электронной компонентной базы иностранного производства, выполненные ведущими специалистами Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», показывают уровень достижений современных технологий при создании электронной элементной базы класса Military и Space. Этот материал, безусловно, будет интересен широкому кругу разработчиков аппаратуры космических аппаратов.

Книга рассчитана не только на теоретиков – в ней отсутствуют сложные расчеты, и основное место занимает изложение основных физических идей и результатов. В предлагаемой книге возможны упущения, и поэтому авторы с благодарностью примут все критические замечания и советы.

Авторы выражают свою искреннюю признательность целому ряду коллег, без помощи которых появление данной книги оказалось бы невозможным. Авторы благодарны А. П. Галееву, Н. А. Ухину, А. И. Чумакову, часть материалов научных исследований которых была использована при написании данной книги. Авторы также выражают благодарность за помощь в редактировании и критическом обсуждении изложенного материала книги канд. техн. наук М. В. Кожухову.

1. ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПОВРЕЖДЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАДИАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ

При воздействии радиации на полупроводниковые приборы (ПП), в зависимости от типа и характеристик излучения, в их структуре происходят такие процессы, как накопление заряда в диэлектрике, образование ловушек на границе раздела «диэлектрик – полупроводник» и образование термостабильных радиационных центров (точечные дефекты, разупорядоченные области), что приводит к изменению основных электрофизических параметров ПП. К основным электрофизическим параметрам ПП относятся: время жизни неосновных носителей заряда, подвижность, концентрация и скорость поверхностной рекомбинации носителей заряда. Изменение подвижности и концентрации носителей заряда характерно для мощных биполярных ПП. Для ПП, изготовленных по МОП-технологии, наиболее чувствительными эффектами являются накопление заряда в оксиде и изменение подвижности носителей заряда в канале транзистора. Далее будут рассмотрены изменения основных электрофизических параметров ПП при воздействии проникающей радиации.

Изменение времени жизни носителей заряда. При воздействии таких частиц, как нейтроны и протоны, происходит образование радиационных центров, которые являются эффективными центрами рассеивания и рекомбинации. В результате накопления радиационных центров в объеме ПП происходит изменение времени жизни носителей заряда при облучении, которое описывается следующим соотношением [1, 2]:

$$\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right) = \frac{1}{\tau_{\phi}} - \frac{1}{\tau_0} = K_{\tau}\Phi, \qquad (1)$$

где τ_{ϕ} – время жизни после облучения интегральным потоком Φ; τ_0 – исходное время жизни; K_{τ} – эмпирический коэффициент аппроксимации, описывающий изменение времени жизни неосновных носителей заряда в объеме полупроводника при радиационном воздействии.

Основным параметром, характеризующим изменение времени жизни неосновных носителей заряда в (1), является K_{τ}, который в общем случае зависит от уровня инжекции и от концентрации легирующей примеси [3]. Кроме того, K_{τ} имеет различные значения в зависимости от вида ионизирующих излучений, а также зависит от свойств материалов ПП.

Изменение удельного сопротивления. При облучении кремния и других полупроводниковых материалов наблюдается компенсация их проводимости – вплоть до значения, соответствующего их собственной проводимости. При облучении увеличивается удельное сопротивление полупроводникового материала.

Зависимость удельного сопротивления от потока излучения описывается следующей эмпирической зависимостью [1, 4] при условии $K_\rho\Phi > 1$:

$$\rho_\phi = \rho_0 \exp\left(K_\rho \Phi\right), \tag{2}$$

где ρ_ϕ, ρ_0 – удельное сопротивление полупроводникового материала до и после облучения интегральным потоком Ф; K_ρ – коэффициент, характеризующий скорость роста удельного сопротивления при облучении.

Если значение $K_\rho\Phi \le 1$, то выражение (2) принимает вид:

$$\rho_\phi = \rho_0 \left(1 + K_\rho \Phi\right). \tag{3}$$

Коэффициент K_ρ обратно пропорционален исходной концентрации носителей заряда и пропорционален скорости их удаления при облучении, т. е.:

$$K_\rho = \frac{1}{n_0}\frac{\Delta n}{\Phi}, \tag{4}$$

где n_0 – исходная концентрация носителей заряда, Δn – изменение концентрации носителей заряда при облучении; $\Delta n/\Phi$ – скорость удаления носителей заряда при облучении.

Удельное сопротивление кремния при облучении растет вне зависимости от типа проводимости и стремится к значению, характерному для собственного (не легированного) кремния (~ $2\cdot10^5$ Ом · см при 300 К) [4, 5]. Выражения (3) и (4) для разных видов излучений справедливы для ограниченных значений интегральных потоков частиц, что связано с механизмами их взаимодействия с полупроводниковыми материалами.

Изменение концентрации неравновесных носителей заряда в биполярных и МОП-транзисторах от структурных эффектов в современных транзисторах незначительно в практически интересующих диапазонах флюенсов нейтронов, протонов и доз гамма-излучения. На рис. 1 [6] показано изменение концентрации носителей заряда в зависимости от величины флюенса нейтронов с различными уровнями легирования ПП.

Изменение подвижности. Другой важной особенностью полупроводниковых материалов при облучении является изменение подвижности и скорости поверхностной рекомбинации носителей заряда за счет образования заряженных радиационных центров (РЦ) в объеме полупроводника и на границе раздела «диэлектрик – полупроводник». Образование точечных РЦ, вызванных низкоэнергетическими электронами или γ-излучением при достаточно больших значениях интегральных потоков частиц отвечают за образование дефектов в полупроводнике.

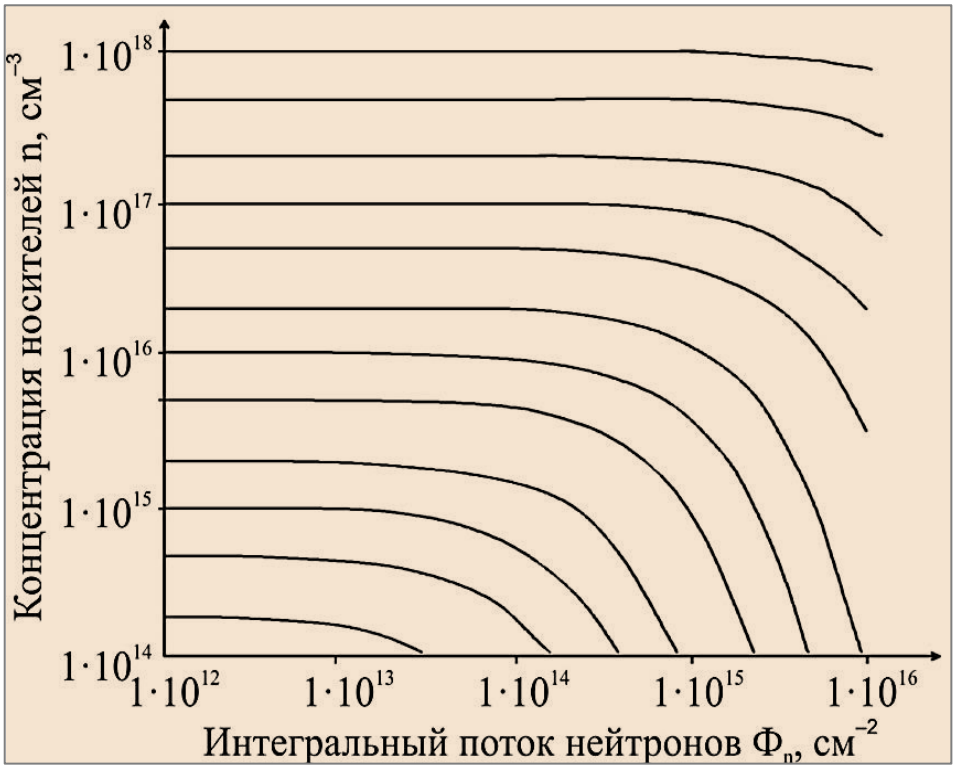


Рис. 1. Зависимость концентрации носителей заряда от интегрального потока нейтронов [6]

Протонное и нейтронное излучения образуют в полупроводниковых материалах разупорядоченные области кристаллической структуры, что также приводит к изменению подвижности носителей заряда. Это происходит при значительно больших значениях воздействующих интегральных потоков частиц [2, 7] по сравнению с изменением удельного сопротивления полупроводниковых материалов, т. е. при воздействии ионизирующих излучений на полупроводниковые материалы наблюдается эффект опережающего снижения времени жизни неосновных носителей заряда по сравнению с ростом удельного сопротивления при средних потоках излучения и уменьшением подвижности носителей заряда.

Систематизация влияния различных видов радиации. Систематизация влияния радиации на электрофизические свойства полупроводниковых материалов, с точки зрения их зонной структуры, приведена в работах [2, 8]. Как было описано ранее, основными электрофизическими характеристиками полупроводниковых материалов, определяющими электрические параметры ПП, являются: концентрация носителей заряда (n), подвижность (μ), время жизни (τ) и скорость поверхностной рекомбинации носителей заряда (S). При этом важность того или иного параметра из выше перечисленных определя-

ется типом и конструкцией ПП, а также электрическим режимом его работы и природой и энергией бомбардирующих частиц.

Такие излучения, как протонное и нейтронное, образуют в полупроводниковых материалах разупорядоченные области кристаллической структуры, что и приводит к изменению подвижности носителей заряда. И это происходит при значительно меньших значениях воздействующих интегральных потоков частиц [2, 7] по сравнению с изменением удельного сопротивления полупроводниковых материалов, т. е. при воздействии ионизирующих излучений на полупроводниковые материалы наблюдается эффект опережающего снижения времени жизни неосновных носителей заряда по сравнению с ростом удельного сопротивления при средних потоках излучения, в основном за счет изменения концентрации носителей заряда (захвата носителей заряда на точечных дефектах и разупорядоченных областях).

Если энергия, передаваемая атому решетки налетающей частицей E_a, незначительно превышает пороговую энергию E_d, то следует ожидать в основном образования простых изолированных дефектов типа пар Френкеля (вакансий и междоузельных атомов) и сложных комплексов «простой дефект + химическая примесь». Когда же эта энергия достаточно велика ($E_a >> E_d$), то первично смещенный атом способен создать целый каскад вторичных, третичных и т. д. смещений. Ряд экспериментов действительно показывает, что при облучении полупроводниковых материалов быстрыми нейтронами и тяжелыми заряженными частицами высоких энергий наряду с изолированными дефектами, которые в основном создаются электронами с энергией до 10 МэВ и γ-квантами, могут образовываться скопления простых дефектов в ограниченном объеме кристалла, так называемые разупорядоченные области или кластеры.

Указанные дефекты кристаллической решетки полупроводниковых материалов, обусловленные воздействием радиации, приводят к образованию уровней рекомбинации в запрещенной зоне, которые и определяют изменение всех электрофизических характеристик полупроводникового материала.

Радиационные дефекты, имеющие глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника, приводят к возрастанию темпа объемной рекомбинации, т. е. к снижению времени жизни неосновных носителей заряда в полупроводнике. Это связано с тем, что рекомбинация происходит не прямозонно, а через введенные глубокие ловушки.

Носители заряда, попавшие на рекомбинационные энергетические уровни (центры захвата), могут быть инжектированы в зону проводимости под действием тепловой энергии, что наиболее вероятно. Для захваченных носителей заряда происходит их рекомбинация с носителями противоположного знака. Таким образом, получается, что центры захвата делятся на два типа: центры прилипания и рекомбинационные центры.

Причем эффективность рекомбинации через такой центр определяется в первую очередь вероятностью захвата электрона или дырки этим центром.

Влияние первого типа центров захвата приводит к возрастанию эффективного времени жизни пары носителей заряда, а второго типа – к снижению времени жизни носителей заряда.

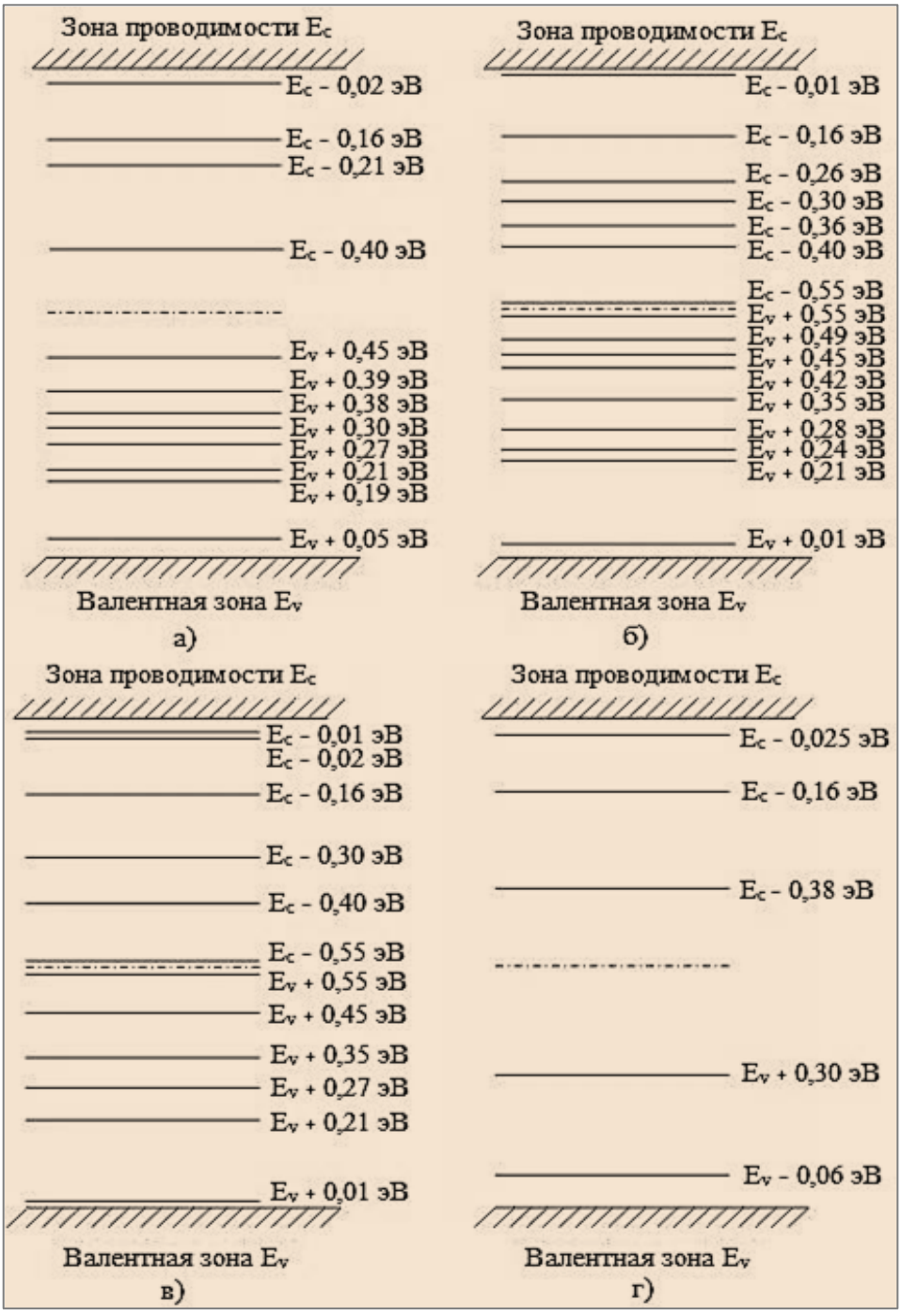


Рис. 2. Энергетический спектр радиационных дефектов в кремнии при различных видах облучения: *а* – быстрыми электронами; *б* – быстрыми нейтронами; *в* – γ-квантами; *г* – протонами и дейтонами [8]

Число работ, посвященных изучению спектра радиационных дефектов в кремнии, весьма значительно. На сегодняшний день глубоко исследована электронная структура ряда центров и определены их составы и энергетические уровни в запрещенной зоне. При этом оказалось, что подавляющая часть уровней в кремнии принадлежит сложным дефектам типа «первичный дефект + примесь». Энергетический спектр уровней радиационных дефектов в кремнии достаточно сложный с большим числом идентифицированных уровней.

На рис. 2 приведена схема уровней радиационных дефектов в кремнии, облученном различными видами ядерных частиц и γ-квантами [8].

Кремний, облученный протонами и дейтонами, изучался намного интенсивнее, чем другие полупроводниковые материалы. Как видно из рис. 2, в результате облучения образуется большое количество энергетических уровней. При облучении кремния с наибольшей скоростью вводятся уровни: E_c – 0,16 эВ; E_c – 0,40 эВ; E_υ + 0,45 эВ; E_υ + 0,30 эВ и E_υ + 0,01 эВ.

В основном этими уровнями и определяются электрофизические свойства облученного кремния и, прежде всего, подвижности неосновных носителей заряда.

Согласно данным исследований [1, 8 – 10] идентификация уровней в облученном кремнии такова: E_c – 0,16 ± 0,02 эВ – комплекс «вакансия + кислород»; E_c – 40 эВ – комплекс «вакансия + атом донора»; E_υ + 0,45 эВ – комплекс «вакансия + атом акцепторной примеси»; E_υ + 0,35 эВ – сложный дефект, в состав которого входит атом кислорода; E_c – 0,4 эВ, E_υ+0,28 эВ и E_c – 0,55 эВ (или E_υ + 0,55 эВ) – уровни, принадлежащие дивакансии, которая может являться как сложным первичным, так и вторичным дефектом, возникающим при взаимодействии двух вакансий.

Предельное положение уровня Ферми в облученном Si, что характерно для различных видов излучений, стремится к одному значению, которое составляет $E_g/2$ (где E_g – ширина запрещенной зоны, эВ). Сверхчистый кремний является исключением, и в нем предельное положение уровня Ферми может находиться в нижней половине запрещенной зоны.

Как показывают многочисленные работы [1, 2, 8 – 10], при облучении в запрещенную зону полупроводника вводится большое количество энергетических уровней, которые создают целую систему уровней, через которые могут проходить рекомбинационные процессы. Однако время жизни в облученном кристалле, как показывают эксперименты, определяется лишь одним-двумя доминирующими рекомбинационными центрами. Согласно рекомбинационной статистике Шокли – Рида – Холла [11, 12], если концентрация рекомбинационных центров достаточно мала, по сравнению с концентрацией равновесных носителей заряда, то время жизни носителей заряда может быть вычислено из следующего выражения:

$$\tau = \frac{\left(\frac{1}{c_p}\right)\cdot\left(n_0 + n_1\right) + \left(\frac{1}{c_n}\right)\cdot\left(p_0 + p_1\right)}{N_r\left(n_0 + p_0\right)}, \qquad (5)$$

где $c_n = \sigma_n \upsilon_n$; $c_p = \sigma_p \upsilon_p$ – постоянные захвата электронов и дырок соответственно; σ_n, σ_p – сечения захвата электронов и дырок; υ_n, υ_p – тепловые скорости

электронов и дырок; n_0, p_0 – равновесные концентрации электронов и дырок; N_r – концентрация рекомбинационных центров; n_1, p_1 – равновесные концентрации электронов и дырок, когда уровень Ферми совпадает с рекомбинационным центром, т. е.

$$n_1 = N_c \beta \exp \frac{\left(E_r - E_c\right)}{kT}; \tag{6}$$

$$p_1 = N_\upsilon \beta^{-1} \exp \frac{\left(E_\upsilon - E_r\right)}{kT}, \tag{7}$$

где β – фактор спинового вырождения; E_r – энергетическое положение рекомбинационных центров; N_c, N_υ – эффективные плотности состояний в зоне проводимости и в валентной зоне; E_c – нижняя граница энергии свободных электронов в зоне проводимости; E_υ – верхняя граница энергии свободных дырок в валентной зоне.

Из уравнения (5) видно, что в случае одного доминирующего уровня обратное время жизни 1/τ будет пропорционально концентрации рекомбинационных центров N_r. Поэтому при постоянной температуре изменение 1/τ может характеризовать собой изменение вводимых облучением рекомбинационных центров. Тогда уравнение (5) для интересующего нас случая может быть представлено в виде [13, 14]:

$$\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right) = \frac{1}{\tau_F} - \frac{1}{\tau_0} = \Delta\left(E_b\right)\sigma_c \upsilon f_b\left(E_r - E_F\right), \tag{8}$$

где τ_0 – время жизни неосновных носителей заряда до облучения; τ_F – время жизни неосновных носителей заряда после облучения; $\Delta(E_b)$ – вероятность образования рекомбинационного центра бомбардирующей частицей; $f_b(E_r - E_F)$ – вероятность того, что рекомбинационный центр занят основным носителем; E_F – уровень Ферми; $\sigma_c\upsilon$ – константа скорости захвата рекомбинационным центром неосновных носителей заряда.

Таким образом, из выражения (8) видно, что изменение обратного времени жизни неосновных носителей заряда $\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)$ при облучении пропорционально концентрации рекомбинационных центров или интегральному потоку облучения, как в (1):

$$\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right) = \frac{1}{\tau_\Phi} - \frac{1}{\tau_0} = K_\tau \Phi, \tag{9}$$

где K_τ – коэффициент радиационного изменения времени жизни неосновных носителей заряда, зависящий от концентрации основных носителей заряда, скорости введения РЦ, их рекомбинационных свойств (сечений захвата электронов и дырок), а также от их эффективности (степени заполнения их электронами,

зависящей от положения уровня Ферми по отношению к энергетическим уровням этих центров). Как видно из приведенных соотношений, на K_τ существенное влияние оказывает величина E_F, а также целый ряд других параметров. Характерный вид зависимостей τ(Ф) для кремния *p*- и *n*-типов [8], облученного нейтронами, приведен на рис. 3 и для кремния *n*-типа, облученного гамма-квантами, электронами и нейтронами, представлен на рис. 4.

В целом ряде работ [1, 9, 10, 15, 16] было показано, что облучение любыми видами ядерных частиц приводит в полупроводниках к уменьшению времени жизни неравновесных носителей заряда (рис. 3 и 4). Скорость этого уменьшения, согласно статистике Холла – Шокли – Рида, отношение (9) определяется величиной K_τ. Используя данные работы [8], можно получить параметры, показывающие зависимость между эффективностью воздействия различных видов излучений, принимая в качестве основной константу для нейтронов спектра деления (K_{τ_n}).

Так для протонного излучения различных энергий ниже приведены эмпирические соотношения (10) и (11), а для гамма-излучения Co^{60} (12).

$$\frac{K_{\tau_n}}{K_{\tau_p}}\left(E_p = 68{,}9\text{МэВ}\right) \approx 0{,}55; \tag{10}$$

$$\frac{K_{\tau_n}}{K_{\tau_p}} = \left(E_p = 96{,}5\ \text{МэВ}\right) \approx 0{,}7; \tag{11}$$

$$\frac{K_{\tau_n}}{K_{\tau_\gamma}} \approx 7 \cdot 10^3. \tag{12}$$

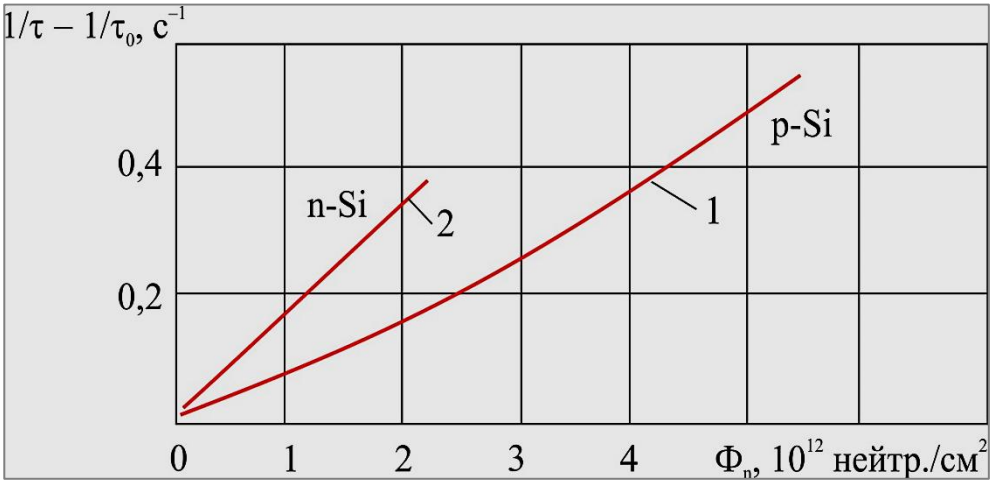


Рис. 3. Изменение времени жизни неосновных носителей заряда в образцах кремния *p*- и *n*-типов в процессе облучения нейтронами: *1* – бор, ρ_0 = 6,21 Ом·см, $n_0 = 2{,}63 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$; *2* – фосфор, ρ_0 = 11,75 Ом·см, $n_0 = 7{,}7 \cdot 10^{14}$ см$^{-3}$ [8]

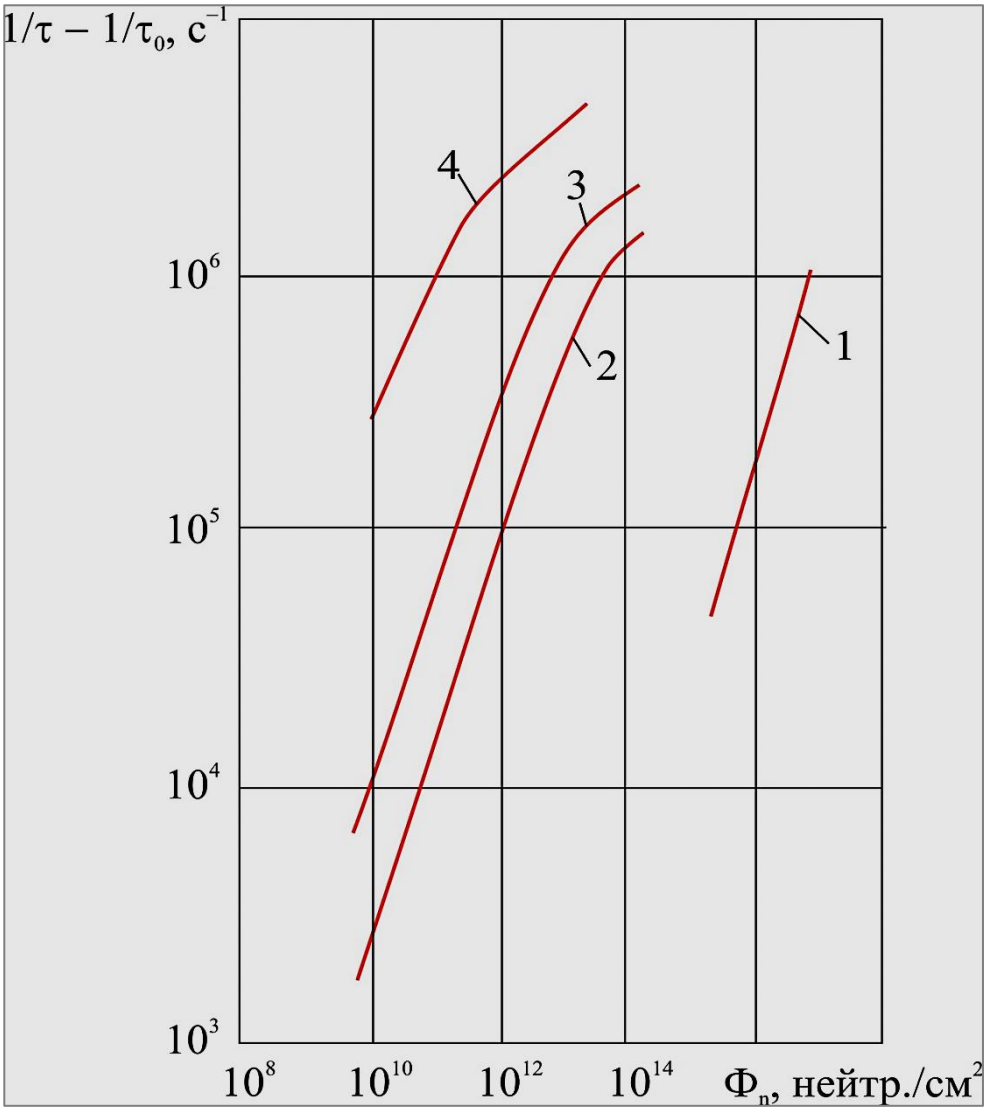


Рис. 4. Зависимость времени жизни носителей заряда от потока облучения зонного и тигельного кремния *n*-типа (ρ_0 = 50–100 Ом·см): *1* – гамма-квантами; *2* – электронами 2,5 МэВ; *3* – электронами 30 МэВ; *4* – быстрыми нейтронами 14 МэВ [8]

Параметром корреляции можно считать также величину скорости удаления неосновных носителей заряда $-\Delta n/\Phi$. С использованием этой константы можно рассчитывать скорость изменения удельного сопротивления при облучении и проводить сравнения эффективности различных видов излучений. Можно утверждать, что такая эквивалентность воздействия различных видов излучений на полупроводниковые материалы будет иметь место и на ПП.

На практике часто удобно пользоваться коэффициентом радиационного изменения диффузионной длины носителей заряда – K_L. Как известно, τ и L

связаны соотношением – $L = \sqrt{D\tau}$, где D – коэффициент диффузии неосновных носителей заряда.

Тогда выражение (9) можно представить в виде

$$\frac{1}{L^2} = \frac{1}{L_0^2} + K_L \Phi, \tag{13}$$

где L_0 – диффузионная длина носителей заряда до облучения.

Универсальной функции, описывающей изменение удельного электрического сопротивления от потока ионизирующих излучений для всех полупроводниковых материалов, не существует. Для кремния константа $K_\rho = \left(\frac{1}{n_0}\right)\left(\frac{\Delta n}{\Phi}\right)$ так же, как и K_τ, является функцией исходных свойств материала Si и зависит от вида излучения.

Константа K_ρ существенно зависит от исходной концентрации легирующих примесей и при нейтронном облучении может принимать значения 10^{-16} – 10^{-13} см^2/нейтр. На рис. 5 показаны зависимости изменения удельного сопротивления кремния *n*- и *p*-типа с различными исходными свойствами в процессе облучения нейтронами.

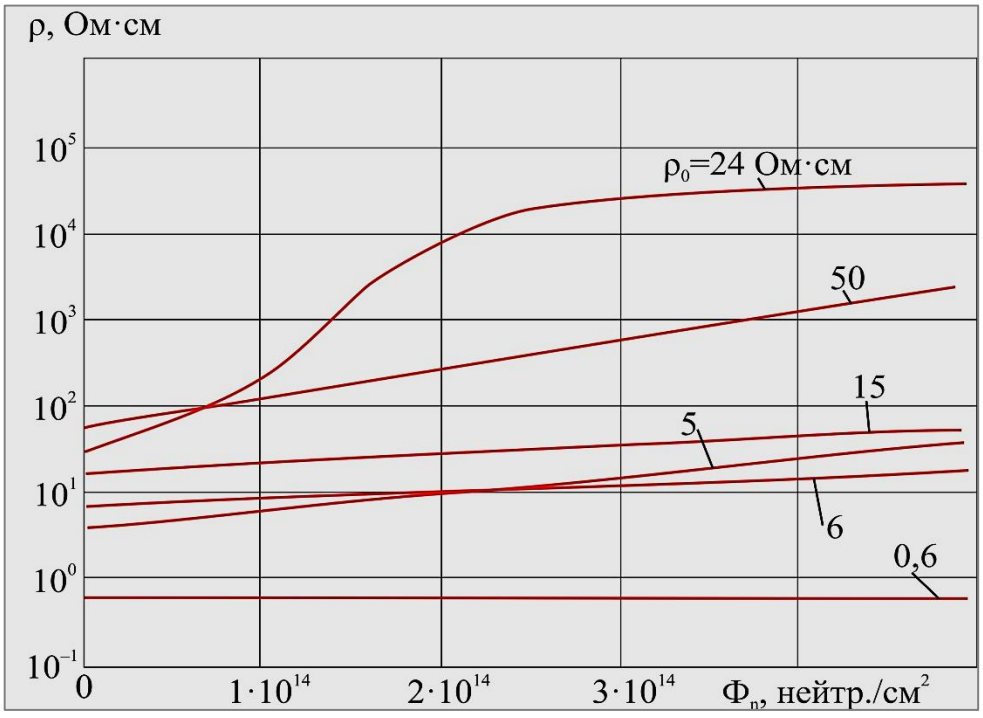


Рис. 5. Изменение удельного сопротивления кремния с различными исходными свойствами в процессе облучения нейтронами: *n*-типа (ρ_0 = 0,6, 5, 6, 50 Ом·см) и *p*-типа (ρ_0 = 15, 24 Ом·см) [14]

В работе [17] делается предположение, что вакансиям соответствуют акцепторные уровни, а междоузельным атомам – донорные уровни. Согласно зонной теории, облучение приводит к образованию дефектов типа пар Френкеля, которые создают в запрещенной зоне донорные и акцепторные уровни.

В работах [1, 2, 8, 17], которые описывают результаты исследований изменения удельного сопротивления кремния *p*- и *n*-типов от интегрального потока быстрых нейтронов, было показано, что при облучении вводятся сложные дефекты различного типа. При таком введении сложных компенсирующих центров происходит компенсация основной легирующей примеси. Вид зависимости изменения удельного сопротивления от интегрального потока ρ(Φ) при облучении в основном определяется характером изменения концентрации основных носителей заряда, а не подвижности, поскольку подвижность при высокой температуре (порядка 300 К) при облучении изменяется незначительно. Исключение составляет облучение быстрыми нейтронами, которые создают разупорядоченные области, вследствие чего подвижность даже в области температур, где преобладает рассеяние на колебаниях решетки, может значительно изменяться.

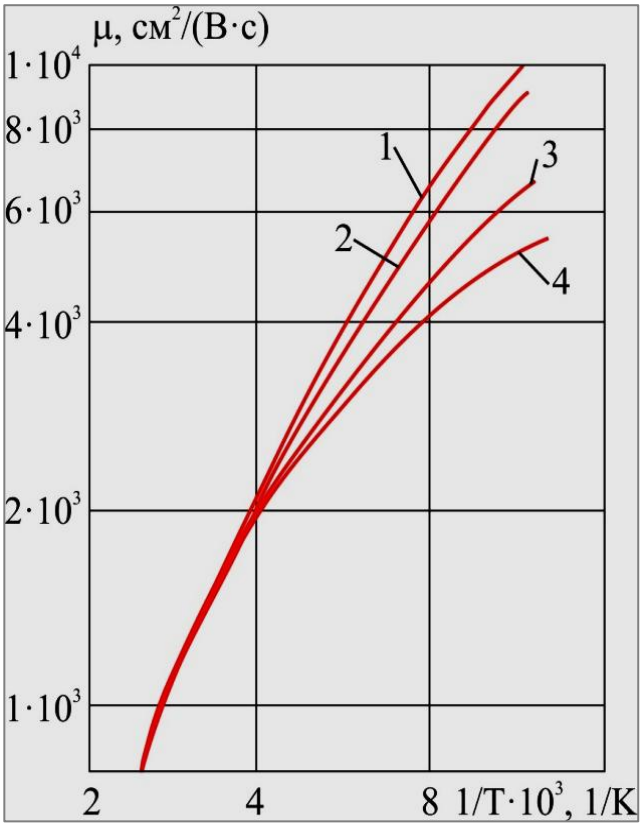


Рис. 6. Температурная зависимость подвижности в кремнии *n*-типа, облученном потоками нейтронов и электронов: *1* – Φ = 0; *2* – $Φ_n = 5{,}3·10^{13}$ нейтр./см²; *3* – $Φ_n = 1{,}6·10^{14}$ нейтр./см²; 4 – $Φ_e = 9{,}7·10^{15}$ эл./см² [8]

Одной из важных характеристик полупроводниковых материалов *p*- и *n*-типов, которые исследуются при воздействии ионизирующих излучений, является подвижность носителей заряда [2, 8], зависящая от температуры, степени легирования, вида и уровня облучения. На рис. 6 приведены температурные зависимости подвижности в образцах кремния *n*-типа, облученных нейтронами и электронами.

На рис. 7 приведены зависимости подвижности носителей заряда для кристаллов кремния, облученных быстрыми нейтронами, электронами (10 МэВ) и гамма-квантами ^{60}Co.

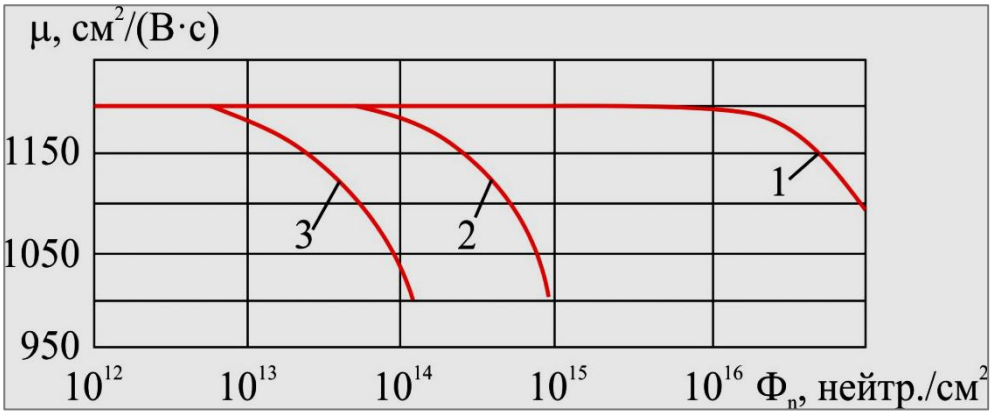


Рис. 7. Зависимость подвижности электронов в зонном кремнии (ρ_0 = 3 Ом·см) от потока облучения при *T* = 300 К: *1* – гамма-квантами; *2* – электронами 10 МэВ; *3* – быстрыми нейтронами [8]

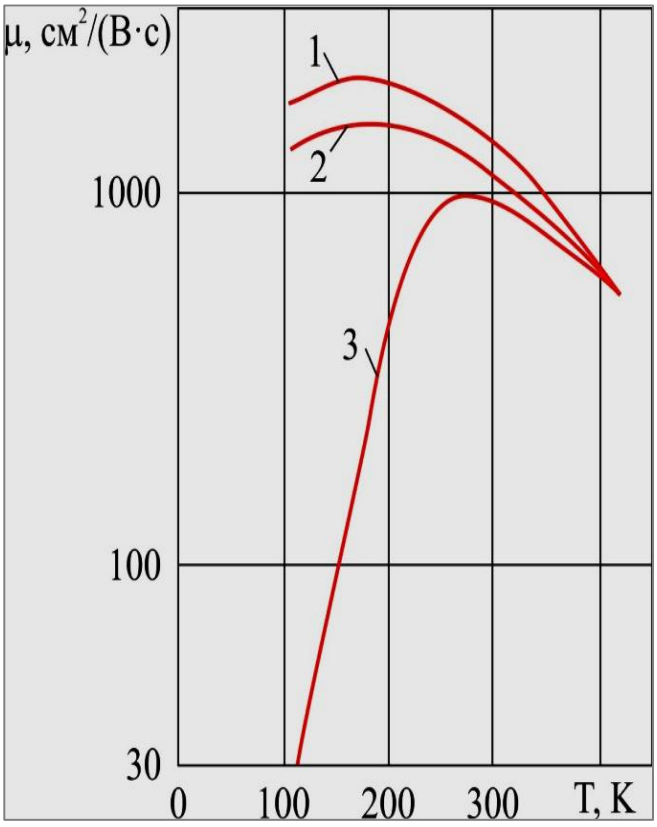


Рис. 8. Температурная зависимость подвижности электронов в кремнии *n*-типа (ρ_0 = 15 Ом·см), облученном потоками протонов с энергией 660 МэВ: *1* – Φ_p = 0; *2* – $\Phi_p = 10^{14}$ пр./см²; *3* – $\Phi_p = 6 \cdot 10^{14}$ пр./см² [8]

На рис. 8 приведены температурные зависимости подвижности электронов при облучении протонами кремния *n*-типа (кривые *2* и *3*) и для сравнения – необлученного (кривая *1*).

Из рис. 8 видно, что подвижность носителей заряда после воздействия облучения на образцы сильно чувствительна к температуре (до 250 К). Расчеты показывают, что подвижность изменяется с температурой по закону $\mu = T^{5,5}$. По мнению автора [2], такая зависимость, скорее всего, объясняется рассеянием на сложных дефектах типа разупорядоченных областей, вводимых протонами с энергией 660 МэВ.

На основе современных теорий, описывающих закономерности работы диодов и тран-

зисторов, может быть точно определена физическая связь между параметрами материала полупроводника и самого полупроводникового прибора. Однако надо не забывать и того факта, что специфические различия ядерных излучений и технологические особенности различных типов транзисторов и диодов могут привести и к ряду эффектов, неодинаковых для различных излучений. Так, излучения, способные сильно ионизировать среду, окружающую активный элемент ПП (электронное и гамма-излучение), могут привести к аномальному возрастанию роли состояния поверхности кристалла.

2. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ОБЛУЧЕНИЯ И ДРУГИХ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Воздействие ионизирующих излучений (ИИ) на изделия электронной техники вызывает в полупроводниковых материалах, наряду с ионизационными эффектами, характеризующимися появлением свободных носителей зарядов, появление структурных повреждений – смещение атомов из узлов кристаллической решетки.

Степень влияния ИИ на свойства ПП зависит не только от этих механизмов, но и от многих других факторов, в частности:

– плотности потока ИИ при облучении;

– спектрального состава ИИ с учетом сопутствующих излучений;

– температурного режима как во время облучения, так и после облучения;

– электрического режима работы ПП при облучении;

– механического воздействия во время облучения и после облучения в сочетании с влажностью, оптическими и другими факторами;

– базовой технологии изготовления ПП.

Исследованиям ПП при воздействии выше приведенных факторов, как по отдельности, так и в сочетании с другими дестабилизирующими факторами, посвящено большое количество работ, в частности [18–21].

Так, в работе [18] рассматриваются экспериментальные результаты радиационных испытаний интегральных схем (ИС) типа 564ЛА9 и результаты ускоренных испытаний, где показана возможность использования воздействующего ИИ для получения данных по надежности и хранению МОП ИС.

Одним из механизмов процесса старения ИС является разрыв напряженных валентных связей между атомами вблизи границы раздела «оксид кремния – кремний», что характерно, как для МОП-технологии ПП, так и для биполярных ИС. Основной причиной образования поверхностных состояний (ПС) в структуре «оксид кремния – кремний» при облучении является взаимодействие электронов с уровнями напряженных валентных связей в приповерхностной области кремния и на границе раздела «оксид кремния – кремний».

В настоящее время для определения срока службы ИС используются ускоренные испытания в форсированных электрических и тепловых режимах, а для определения сроков хранения ИС – длительные испытания при нормальных условиях. При этом для сокращения времени ускоренных испыта-

ний применяется температура, физически допустимая конструкцией ИС, которая достигает 200–300 °С [21]. Однако при высоких температурах, близких к предельным, наблюдаются механизмы отказов, которые редко проявляются при рабочих температурах. Поэтому представляет интерес поиск других ускоряющих факторов, в частности ИИ.

В работе [22] обсуждаются вопросы по влиянию ИИ разной интенсивности и температуры для КМОП-технологии ИС, где одновременно рассматриваются проблемные вопросы надежности и старения. При воздействии ИИ процесс старения значительно ускоряется. На основании экспериментальных данных, полученных для КМОП ИС типа 564ЛА9, проводился поиск соответствия результатов ускоренных испытаний при повышенной температуре и при воздействии ИИ. Поскольку образование поверхностных состояний (ПС) в реальных условиях происходит во времени, то для его определения использовалось отношение предельной поглощенной дозы к средней мощности дозы на орбите космического аппарата.

Зависимости плотности ПС от времени для *n*-канальных транзисторов приведены на рис. 9: при ускоренных испытаниях (температура (T = 150 °С) без облучения в течение 392 ч – кривая *1*); при облучении электронами с мощностью дозы P = 0,08 и 0,74 рад/с (облучение было при нормальной температуре T = 20 °С). Нижняя зависимость показывает изменение плотности ПС *n*-канальных транзисторов в пассивном режиме при хранении в течение 13 лет.

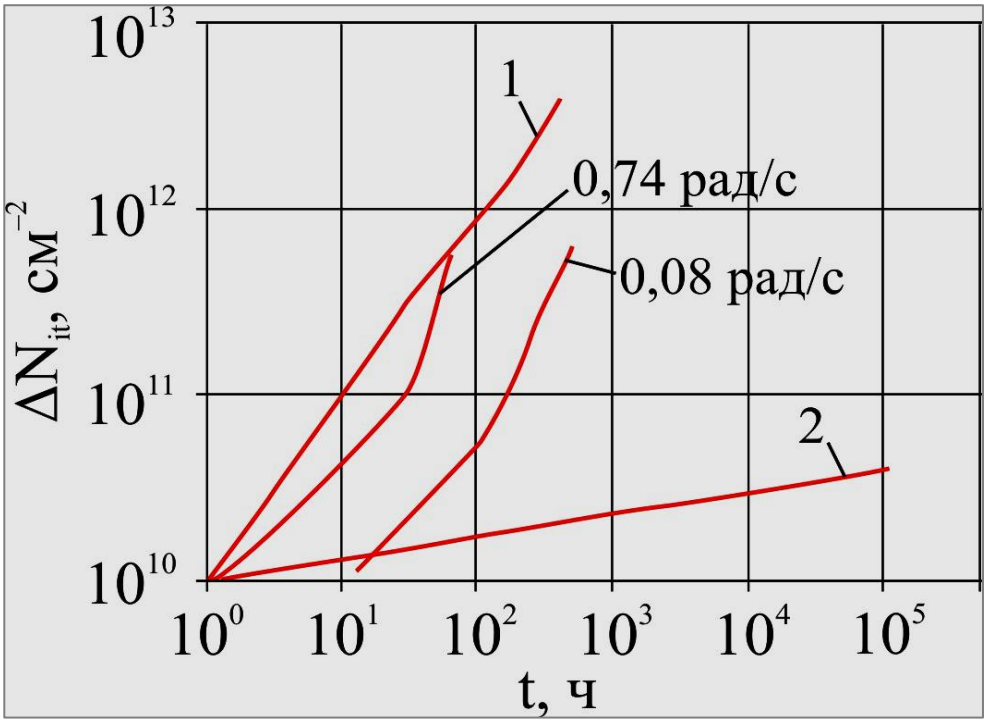
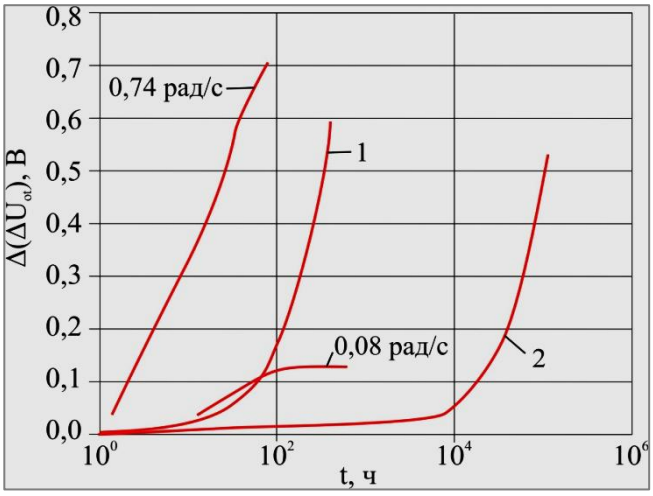


Рис. 9. Зависимость плотности ПС для МОП-транзисторов с *n*-каналом в случае испытаний: *1* – при температуре T = 150 °С; *2* – при нормальной температуре T = 20 °С (в течение 13 лет) и при облучении электронами с мощностью дозы P = 0,08 и 0,74 рвд/с

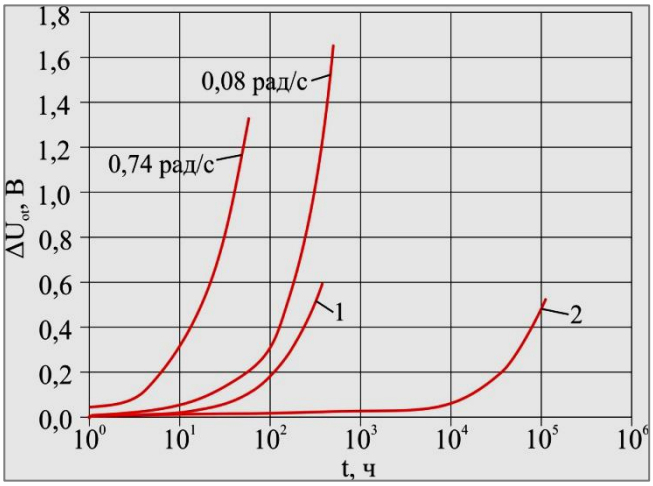
Для определения плотности ПС в облученных МОП-транзисторах использовалась методика, которая заключается в расчете сдвига порогового напряжения МОП-транзисторов ΔU_{0t}, вызванным накоплением заряда в объемных оксидных ловушках, и в вычитании его из измеренного значения порогового напряжения ΔU_0, т. е. $\Delta U_{it} = \Delta U_0 - \Delta U_{0t}$.

На основе полученного значения ΔU_{it} определялось изменение плотности ПС ΔN_{it} для толщины подзатворного диэлектрика $d_{0x} = 100$ нм.

При ускоренных испытаниях при повышенной температуре использовалась методика подпороговых токов, изложенная в [23], и осуществлялась в том же электрическом режиме, что и в эксперименте, описанном в [24].



а



б

Рис. 10. Изменение заряда в оксиде для МОП-транзисторов с *n*-каналом (*а*) и с *p*-каналом (*б*) в случае испытаний при температуре $T = 150$ °С (*1*), при нормальной температуре (*2*) при облучении электронами с мощностями дозы $P = 0{,}08$ и $0{,}74$ рад/с [22]

Что касается изменения сдвига порогового напряжения ΔU_{0t}, то, как и при ускоренных испытаниях при повышенной температуре, так и при низко интенсивном воздействии ИИ, наряду с ростом плотности ПС, происходит отжиг заряда в оксидных ловушках. Зависимости изменения сдвига порогового напряжения ΔU_{0t}, вызванного зарядом в оксидных ловушках, показаны на рис. 10. Из рис. 10 видно, что уменьшение сдвига ΔU_{0t} с ростом времени при повышенной температуре (кривая *1*) соответствует облучению при мощности дозы $P = 0{,}08$ рад/с, т. е. при более низкоинтенсивном облучении. При мощности дозы $P = 0{,}74$ рад/с происходит меньшее изменение

падения ΔU_{0t}, чем при ускоренных испытаниях при температуре T = 150 °С. Но для случая дефектообразования, вызывающего старение микросхем, изменение ΔU_{0t} не имеет принципиального значения.

Таким образом, в работе [22] сделан вывод и показана возможность применения ИИ для проведения ускоренных испытаний на старение ИС, поскольку основным эффектом является образование ПС.

Использование облучения низкой интенсивности позволяет значительно сократить длительность испытания МОП ИС как на срок функционирования, так и на срок хранения ИС, а также существенно уменьшить энергозатраты на проведения испытаний.

В работе [25] изучалось влияние режима и условий облучения ИС 564ЛЕ5 по изменению пороговых напряжений *n*- и *p*-канальных транзисторов и передаточных характеристик логических элементов. Облучение проводилось электронами с энергией 6 МэВ до интегральных потоков 10^{12} эл./см^2 с различной интенсивностью: 10^9, 10^{10} и 10^{11} см$^{-2}\cdot$с$^{-1}$. В эксперименте с ИС типа 564ЛЕ5, подвергавшимся электронному облучению, были выбраны две партии. Одна партия этих ИС облучалась в пассивном, а другая – в активном режиме. Напряжение питания составляло $U_{\text{ПИТ}}$ = 9 В. Кроме того часть ИС 564ЛЕ5 облучалась при повышенной температуре (673 К).

Изменение пороговых напряжений *n*-канальных транзисторов, в зависимости от потока облучения при различных интенсивностях, представлены на рис. 11. Исходные значения пороговых напряжений для *n*- и *p*-канальных транзисторов составляли соответственно величины: $U_{\text{пор}}{}^{n}$ = 1,26 В и $U_{\text{пор}}{}^{p}$ = –1,36 В. Зависимости изменения пороговых напряжений *p*-канальных транзисторов от величины интегрального потока электронов при различной интенсивности облучения представлены на рис. 12.

При возрастании интенсивности облучения изменения пороговых напряжений как для *n*-, так и для *p*-канальных транзисторов, оказываются меньше, причем степень проявления данного эффекта увеличивается с ростом интегрального потока облучения.

Измерения пороговых напряжений транзисторов, облученных в активном режиме, показали, что изменение данного параметра, как для *n*-, так и для *p*-канальных транзисторов, оказываются больше по сравнению с облучением в пассивном режиме, что видно из рис. 13 и 14. При этом скорость изменения порогового напряжения у *p*-канальных транзисторов оказывается существенно выше, чем у *n*-канальных транзисторов.

Зависимости изменения порогового напряжения ($U_{\text{пор}}$) ИС 564ЛЕ5 при увеличении интенсивности облучения для *n*- и *p*-канальных транзисторов представлены на рис. 15 и 16 соответственно. Тенденция изменения порогового напряжения от интенсивности излучения при этом сохраняется, однако для *n*-канальных транзисторов она менее выражена.

Облучение структур ИС при повышенной температуре (673К) показало, что после интегрального потока электронов $\Phi_в$ = 10^{12} см$^{-2}$ средние значения пороговых напряжений практически совпали с исходными значениями (как и до облучения) и составили: +1,25 В и – 1,36 В для *n*- и *p*-канальных транзисторов соответственно.

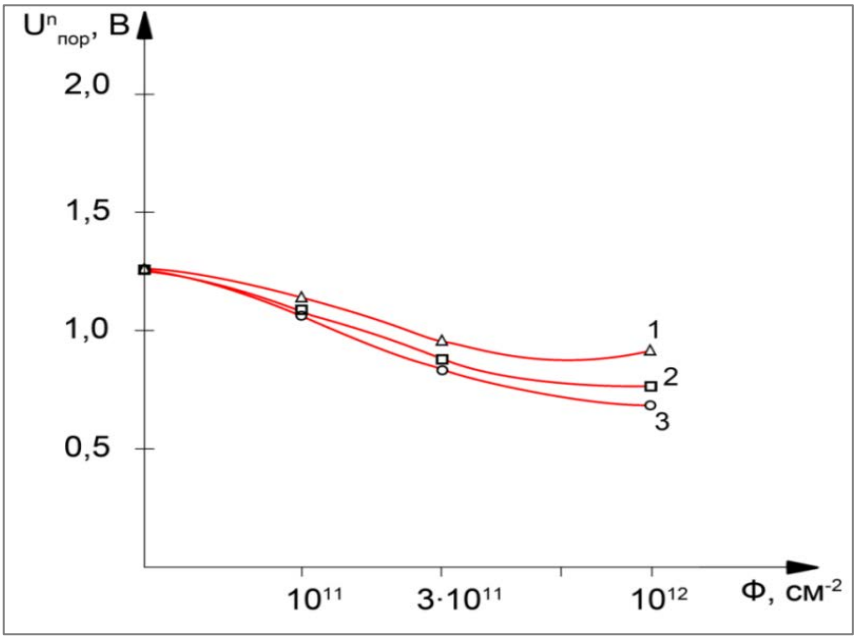


Рис. 11. Зависимости изменения пороговых напряжений $U_{\text{пор}}^{n}$ *n*-канальных транзисторов ИС 564ЛЕ5 от величины интегрального потока электронов при различной интенсивности облучения: *1* – 10^{11}; *2* – 10^{10}; *3* – 10^{9} ($см^{-2}\cdot с^{-1}$) [25]

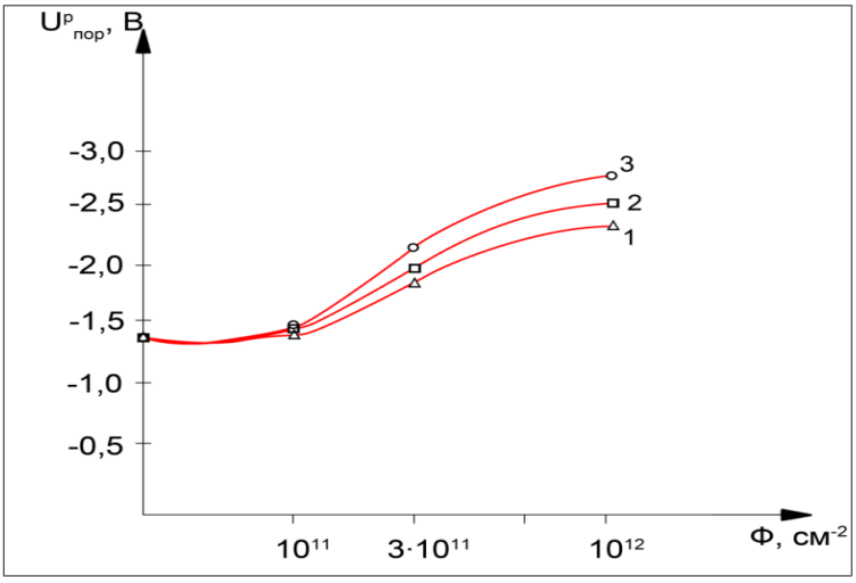


Рис. 12. Зависимости изменения пороговых напряжений $\Upsilon_{пор}^{v}$ *p*-канальных транзисторов ИС 564ЛЕ5 от величины интегрального потока электронов при различной интенсивности облучения: *1* – 10^{11}; *2* – 10^{10}; *3* – 10^{9} ($см^{-2}\cdot с^{-1}$) [25]

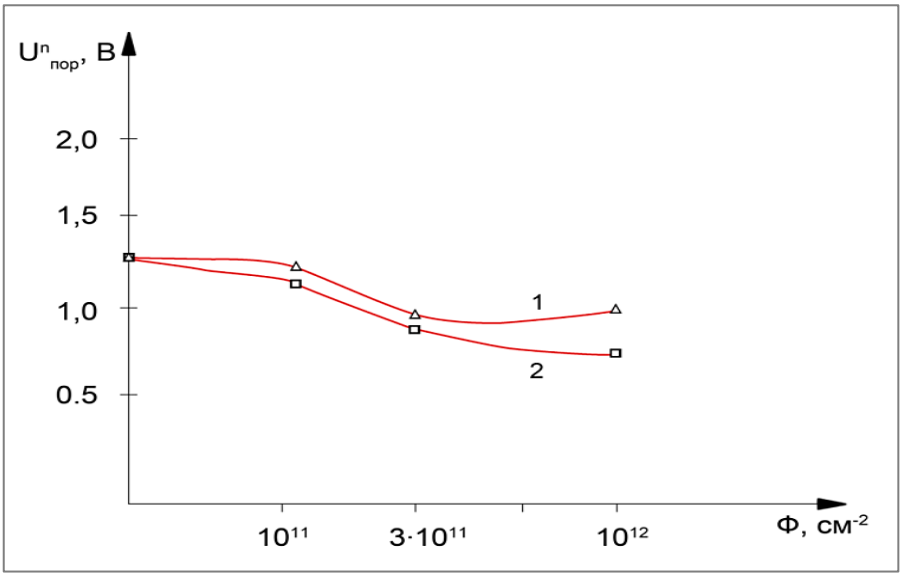


Рис. 13. Зависимости изменения пороговых напряжений $U_{пор}^{n}$ для *n*-канальных транзисторов ИС 564ЛЕ5 от величины интегрального потока электронов при пассивном (*1*) и активном (*2*) режимах (интенсивность облучения – 10^{10} см$^{-2}\cdot$с$^{-1}$) [25]

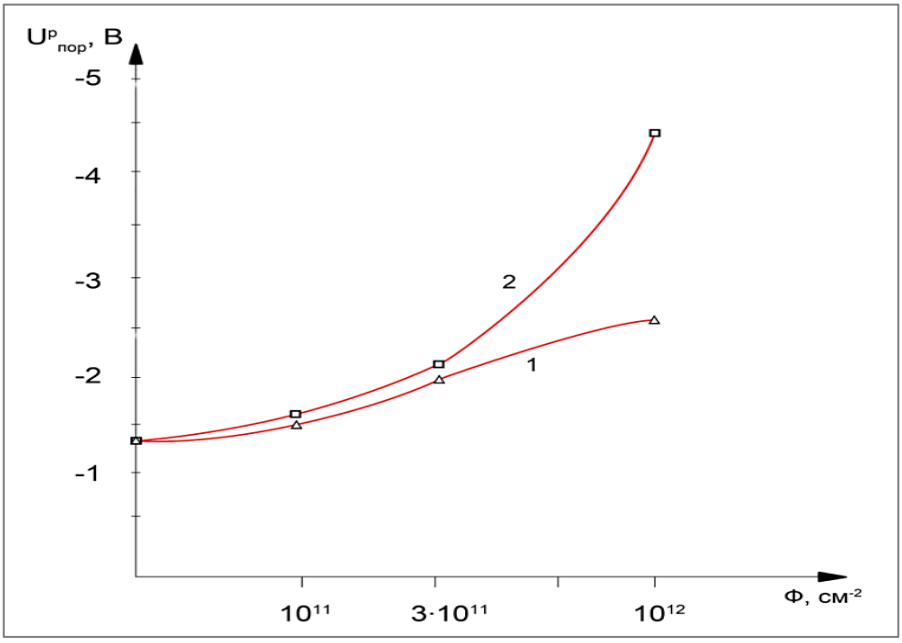


Рис. 14. Зависимости изменения пороговых напряжений $U_{пор}^{n}$ для *p*-канальных транзисторов ИС 564ЛЕ5 от величины интегрального потока электронов при пассивном (*1*) и активном (*2*) режимах (интенсивность облучения – 10^{10} см$^{-2}\cdot$с$^{-1}$) [25]

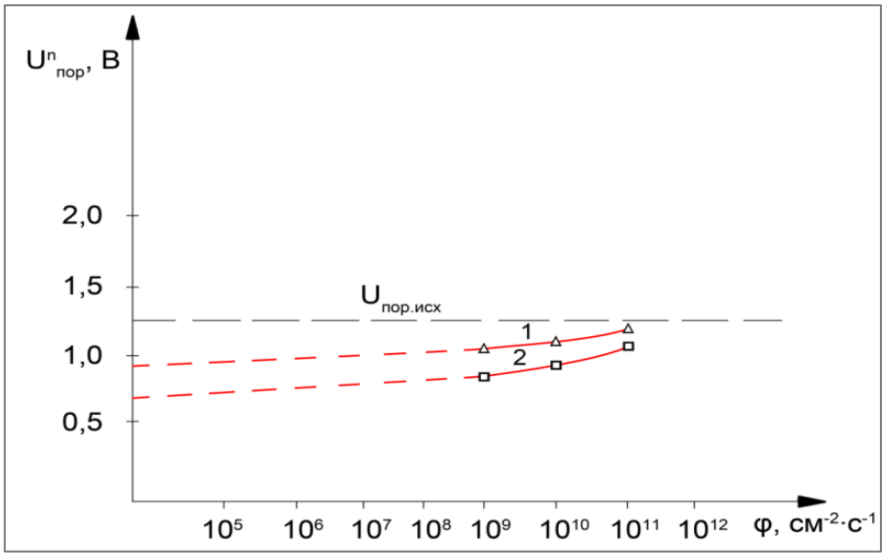


Рис. 15. Зависимости изменения пороговых напряжений $U^n_{\text{пор}}$ для *n*-канальных транзисторов ИС 564ЛЕ5 от величины плотности потока электронов при пассивном (*1*) и активном (*2*) режимах (интегральный поток электронов при облучении составлял 10^{12} см$^{-2}$) [25]

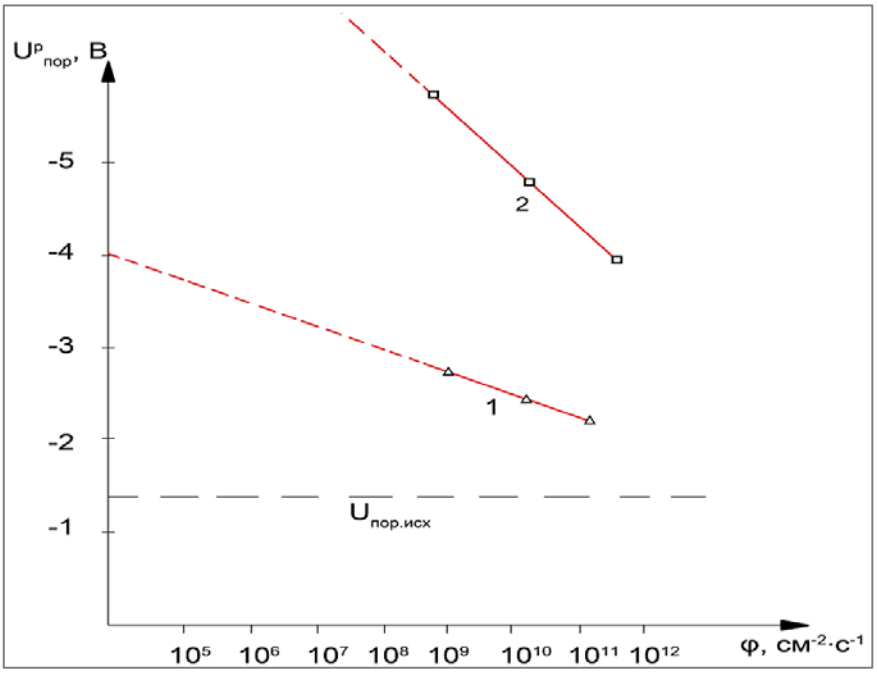


Рис. 16. Зависимости изменения пороговых напряжений $U^p_{\text{пор}}$ *p*-канальных транзисторов ИС 564ЛЕ5 от величины плотности потока электронов при пассивном (*1*) и активном (*2*) режимах (интегральный поток электронов при облучении составлял 10^{12} см$^{-2}$) [25]

Физическая картина наблюдаемых эффектов не всегда однозначна, и не все выявленные закономерности удается объяснить в рамках существующих моделей.

С ростом плотности потока электронного излучения степень изменения параметров металл-диэлектрик-полупроводник (МДП)-структур оказывается, как правило, выше, чем сделаны в выводах в работе [19], что противоречит полученным результатам. Однако в ряде работ, посвященных исследованию процессов радиационного дефектообразования в биполярных структурах, также приводятся противоречивые сведения относительно скорости введения радиационных центров при электронном облучении с различной интенсивностью [26, 27].

Вероятно, в значительной степени количественные проявления эффекта низкой интенсивности обусловлены конструктивно-технологическими особенностями изготовления структур ИС. Чтобы утверждать об общей закономерности влияния интенсивности облучения на деградацию параметров ПП, было бы целесообразно подвергнуть электронному облучению низкой интенсивности различные серии микросхем и некоторые типы МДП-транзисторов, а также провести более детальные экспериментальные их исследования с использованием более совершенных комплексов методик, таких как подпороговые вольт-амперные характеристики (ВАХ), низкочастотные и высокочастотные вольт-фарадные характеристики (ВФХ), а также релаксационная спектроскопия, что позволило бы выявить физическую природу данного эффекта. В настоящее время можно лишь заключить, что различная радиационная чувствительность КМОП-микросхем к электронному облучению с различной интенсивностью обусловлена процессами радиационного дефектообразования в подзатворном диэлектрике, так как кинетика изменения порогового напряжения *n*- и *p*-канальных транзисторов аналогична. Что касается физического механизма, то, вероятно, с ростом числа электронно-дырочных пар, возникающих в подзатворном диэлектрике при облучении, повышается вероятность их непосредственной рекомбинации, и степень изменения параметров микросхем при этом оказывается меньше.

При облучении микросхем в активном режиме изменения пороговых напряжений МОП-транзисторов хорошо согласуется с общепринятыми моделями [28], согласно которым наличие напряжения на выводах структур в процессе облучения приводит к росту их радиационной чувствительности. Этот эффект обусловлен спецификой процессов дефектообразования в подзатворном окисле, связанным с захватом дырок на уровнях ловушек.

Облучение структур при повышенной температуре сопровождается одновременным отжигом радиационных дефектов, в результате чего электрофизические параметры МОП-структур практически не изменяются.

При воздействии излучения низкой интенсивности, когда время облучения становится достаточно большим, часть радиационных дефектов аннигилирует до момента измерения параметров структур. Если для технологического использования радиационно-термических процессов, а также для проведения радиационной отбраковки, этот факт не имеет принципиального значения, то при исследованиях по определению уровня стойкости микросхем это необходимо учитывать. При этом становится целесообразным проводить измерения параметров микросхем непосредственно в процессе облучения, однако эти исследования сопряжены с рядом технических сложностей, в частности, с созданием надежной системы экранировки от наводок и помех.

Изменения передаточных характеристик логических элементов ИС при облучении с различной интенсивностью (при интегральном потоке $\Phi_в = 10^{12}$ см$^{-2}$) представлены на рис. 17.

При этом наблюдается та же закономерность, что и при исследовании влияния излучения на пороговое напряжение структур: с ростом интенсивности излучения сдвиг передаточных характеристик в область меньших входных напряжений уменьшается. Наличие электрического напряжения на выводах микросхем в процессе облучения вызывает более сильное смещение передаточных характеристик независимо от интенсивности излучения.

С ростом потока облучения передаточные характеристики смещаются в область меньших входных напряжений, причем при облучении в активном режиме – более существенно (рис. 18).

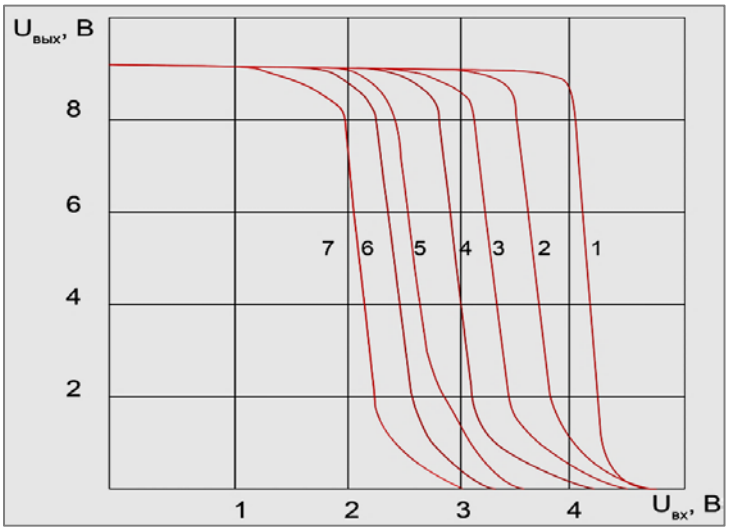


Рис. 17. Изменение передаточных характеристик ИС 564ЛЕ5 после облучения с интегральным потоком 10^{12} см$^{-2}$ (*1* – необлученные структуры; *2 – 4* – пассивный режим с интенсивностью облучения: 2 – 10^{11}, 3 – 10^{10}, 4 – 10^{9} см$^{-2}\cdot$с$^{-1}$; *5 – 7* – активный режим с интенсивностью облучения: 5 – 10^{11}, *6* – 10^{10}, 7 – 10^{9} см$^{-2}\cdot$с$^{-1}$) [24]

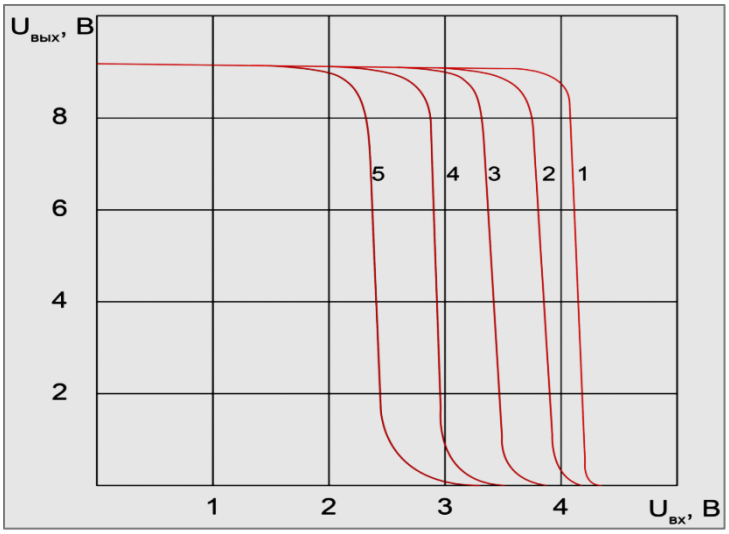


Рис. 18. Изменение передаточных характеристик ИС 564ЛЕ5 после облучения с интенсивностью 10^{10} см$^{-2}\cdot$с$^{-1}$ (*1* – необлученные структуры; *2, 3* – облученные структуры в пассивном режиме с интегральным потоком $3\cdot10^{11}$ см$^{-2}$ и $1\cdot10^{12}$ см$^{-2}$ соответственно; *4, 5* – облученные структуры в активном режиме с интегральным потоком $3\cdot10^{11}$ см$^{-2}$ и $1\cdot10^{12}$ см$^{-2}$ соответственно) [25]

Облучение микросхем при повышенной температуре (673 К) практически не приводит к изменению положения характеристик после облучения с интегральным потоком $1 \cdot 10^{12}$ см$^{-2}$.

Наблюдаемые изменения передаточных характеристик логических элементов при облучении полностью коррелируют с изменением пороговых напряжений МОП-транзисторов. При этом смещение характеристик в область меньших входных напряжений обусловлено одновременным уменьшением порогового напряжения *n*-канальных транзисторов и увеличением порогового напряжения *p*-канальных транзисторов.

В целом представленные выше результаты позволяют заключить, что:

– степень изменения электрофизических и электрических параметров микросхем при облучении зависит от интенсивности излучения, температуры объекта и наличия электрического смещения на выводах структур;

– с ростом интенсивности электронного излучения от 10^9 см$^{-2}\cdot$с$^{-1}$ до 10^{11} см$^{-2}\cdot$с$^{-1}$ изменения пороговых напряжений *n*- и *p*-канальных транзисторов при облучении эквивалентными потоками оказываются меньше и вызывают меньшее смещение передаточных характеристик вдоль оси входных напряжений;

– при облучении структур микросхем в активном режиме при различных интенсивностях излучения степень изменения пороговых напряжений КМОП-структур и передаточных характеристик логических элементов оказывается выше по сравнению со случаем облучения в пассивном режиме;

– облучение микросхем при повышенной температуре (673 К) не приводит к существенной деградации их параметров по сравнению с исходными значениями.

3. ОБОБЩЕННЫЕ ДАННЫЕ ПО РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ ИНОСТРАННОГО ПРОИЗВОДСТВА, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В АППАРАТУРЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Радиационная стойкость отечественной электронной элементной базы, используемой в аппаратуре космической техники, как правило, определяется в технических условиях на те или иные типы полупроводниковых электрорадиоизделий, а также их можно получить из специализированных баз данных. В случае отсутствия каких-либо данных проводятся их испытания на моделирующих радиационные факторы космического пространства (КП) электрофизических установках.

В последние годы в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» выполнен большой объем работ коллективом авторов: У. Ф. Ветров, Е. Ф. Зарудский, Н. А. Ухин, А. А. Шапкин, посвященных анализу состояния радиационной стойкости изделий электронной техники (ИЭТ) различного назначения [28–33] как иностранного, так и отечественного производства, предназначенных для использования в бортовой аппаратуре космических аппаратов. Ими было показано, что для разработки бортовой аппаратуры космических аппаратов с длительными сроками активного существования (САС) на околоземных орбитах, питание которой осуществляется с ис-

пользованием солнечных батарей, необходимо использование элементной базы, обладающей высокой радиационной стойкостью, обеспечивающей заданные САС космического аппарата.

Обеспечение длительных ресурсов космического аппарата с питанием бортовой аппаратуры от ядерных энергетических установок (ЯЭУ) достаточно сложно без применения в ней комплектующих изделий с предельно достижимой радиационной стойкостью как по отношению к быстрым нейтронам, так и особенно по отношению к такому ионизирующему виду воздействия, как гамма-излучение в совокупности с ИИ КП. В книге использованы материалы отчетов [28–32] с некоторыми несущественными изменениями, и ожидается, что эти материалы будут полезны разработчикам аппаратуры космических аппаратов.

Из всей номенклатуры современных полупроводниковых изделий наибольшей чувствительностью к воздействию ионизирующих видов излучений обладают элементы, используемые в вычислительной технике и приборы с зарядовой связью (ПЗС). И если последние используются, как правило, лишь в специализированных космических аппаратах, то создание современной управляющей и функциональной бортовой аппаратуры современных космических аппаратов немыслимо без применения бортовых вычислительных устройств. А состояние радиационной стойкости ИС, определяемое фактической радиационной стойкостью промышленных микросхем класса Industrial, широко используемых в вычислительной технике с высокой степенью интеграции, является одним из основных препятствий для создания длительно функционирующих на орбите космических аппаратов с ЯЭУ. Помимо микросхем вычислительной техники, необходимы также и другие полупроводниковые комплектующие элементы с предельно высокой радиационной стойкостью.

Разработка изделий полупроводниковой электроники с повышенной радиационной стойкостью для нужд оборонных и космических ведомств (Military или Space) была начата в конце прошлого столетия в США. В 1999 году, например, появились сообщения фирмы Lockheed Martin о разработке микросхем оперативной и программируемой постоянной памяти, а также микропроцессоров и одноплатных вычислительных устройств с архитектурой RISK, сохраняющих свою работоспособность при воздействии на них гамма-излучения с поглощенной дозой в диапазоне от 200 крад до 1 Мрад.

В этих сообщениях указывался диапазон уровней радиационного воздействия, в пределах которого изделие должно было сохранять свою функциональную работоспособность. Вместе с тем известно, что в полупроводниковых изделиях и в первую очередь в микросхемах, используемых в вычислительной технике, параметрические отказы, например по току потребления, могут наступить раньше, чем функциональные отказы. С другой стороны, какой бы высокой радиационной стойкостью не обладали изделия, уровни радиационного воздействия, при которых наступают параметрические или функциональные отказы, характеризуются статистическим разбросом. Величина этого разброса по радиационной стойкости может быть весьма значительной, если используются приборы из разных партий, и несущественной для изделий из одной партии.

В сообщениях о той или иной величине радиационной стойкости какого-либо изделия (ИС или ПП) иностранного производства часто не указывается, что у изделия при его облучении в пределах указанного уровня критериальные параметры не выйдут за допустимые пределы и оно сохранит свою работоспособность.

Количество образцов, подлежащих испытанию на радиационную стойкость к ионизирующим воздействиям, равно как объем выборки при испытании полупроводниковых изделий на стойкость к воздействию быстрых нейтронов, определяется документом MIL-PRF-38535F министерства обороны США.

Для изделий на одной и той же кремниевой пластине, в соответствии с рекомендацией этого стандарта MIL-PRF-38535F, облучаются два образца с этой пластины. Для одной и той же партии пластин выбираются по пять образцов с каждой пластины, а для квалификационной оценки радиационной стойкости готовых изделий одной и той же партии облучению подвергаются 11 образцов, случайно отобранных из этой партии.

Точно так же поступают, в соответствии с MIL-PRF-38535F, и при оценке величины радиационной стойкости микросхем на стадии их производства: два образца с одной пластины, по пять образцов с пластины одной и той же партии. Если же оценивается величина радиационной стойкости партии готовых изделий, то в случае ионизирующего воздействия рекомендуется подвергать испытанию не менее 22-х образцов.

Во всех этих случаях изделия признаются годными для применения в условиях такого радиационного воздействия (нейтронов или гамма-излучения), при котором все подвергаемые облучению изделия полностью сохраняют свою функциональную работоспособность, а их параметры не вышли за допустимые пределы. Если же при квалификационном испытании партии изделий после облучения отобранных соответственно 11-ти или 22-х образцов в одном из них произошел функциональный или параметрический отказ, то облучению до того же уровня радиационного воздействия подвергаются еще 16 экземпляров. Партия изделий будет при этом признана соответствующей той величине радиационной стойкости, до уровня воздействия которой проводилось облучение, если в этих дополнительных 16-ти образцах не наступит ни одного функционального или параметрического отказа. Такая методика квалификационной оценки величины радиационной стойкости получила название LTPD (Lot Tolerance Percent Defective). Математической основой этого метода является представление о биномиальном распределении доли дефектных изделий в партии.

Таким образом, можно предполагать, что указываемые в информационных сообщениях фирм США величины радиационной стойкости полупроводниковых комплектующих изделий получены в результате их облучения до приведенных в этих сообщениях уровней радиационного воздействия и последующей обработки по методу LTPD.

Микропроцессоры и микроконтроллеры. Радиационностойкие микропроцессоры для бортовых вычислительных систем космических аппаратов

начали разрабатываться в США в конце прошлого столетия после того, как вычислительные системы с применявшимися вначале процессорами Intel 80386 и с сопроцессорами Intel 80387 достаточно быстро прекращали свое функционирование в условиях воздействия на космический аппарат излучений радиационных поясов Земли. Они также обладали невысокой устойчивостью к сбоям от одиночных событий, обусловленных воздействием высокоэнергичных протонов и тяжелых ионов галактического происхождения.

Следующим микропроцессором, который был предназначен для вычислительных систем космических аппаратов, являлся 1750A с архитектурой RISC. На одном кристалле этой микросхемы размещались собственно 16-битный микропроцессор, 40-битный процессор с плавающей запятой, счетчики, таймер и интерфейсная логика. Он использовался в вычислительных системах достаточно многих КА, в том числе Cassini, Cluster (ESA), Rosetta (ESA) и других, хотя особой радиационной стойкостью не отличался.

Одним из первых радиационно-стойких микропроцессоров явился разработанный на фирме BAE System сравнительно недорогой 32-битный микропроцессор RAD6000 с архитектурой RISC и радиационной стойкостью свыше 1 Мрад. Если производительность микропроцессора 1750A не превышала 5 MIPS (миллион инструкций в секунду), то производительность микропроцессора RAD6000 составляла 35 MIPS. Вероятность появления в нем одиночных сбоев на геостационарной орбите не превышала в среднем $7{,}4 \cdot 10^{-10}$ ошибок/бит за сутки.

Этот процессор успешно применялся в вычислительных системах многих космических проектов, таких как Deep Space-1, MARS 98, Swift, Gravity Probe B, Spirit и Opportunity.

Логическим продолжением разработок микропроцессоров на фирме BAE Systems явился микропроцессор RAD750. В предварительной информации конца 90-х годов фирмы Lockheed Martin об этом процессоре и о бортовом компьютере с его использованием сообщалось, что микропроцессор RAD750 изготавливается по 0,25 мкм КМОП-технологии и может работать на частотах от 133 до 200 МГц. Бортовой компьютер с его использованием должен был обладать вычислительной производительностью до 300 MIPS, т. е. почти на порядок быстрее своего предшественника RAD6000. Предполагалась разработка двух вариантов, отличающихся своей радиационной стойкостью: коммерческого с радиационной стойкостью до 200 крад и стратегического с радиационной стойкостью до 1 Мрад. В настоящее время выпускается и используется в космических проектах коммерческий вариант микропроцессоров с радиационной стойкостью до 200 крад. Сведения о производстве стратегического варианта микропроцессора с радиационной стойкостью до 1 Мрад отсутствуют. Вероятность появления одиночных сбоев в микропроцессоре RAD750 не превышает $1{,}9 \cdot 10^{-4}$ ошибок/микросхемы за сутки.

Одновременно с разработкой высокопроизводительных радиационностойких процессоров RAD6000 и RAD750 в США проводились работы по повышению радиационной стойкости процессоров 1750A. Так, например, фирма Honeywell разработала микропроцессор HX1750, практически полностью аналогичный по своим электрическим характеристикам и вычислитель-

ным параметрам микропроцессору 1750A. Эта фирма подразделяет изделия электронной техники, предназначенные работать в условиях воздействия ИИ, на три группы: радиационно-устойчивые (Radiation Tolerant), радиационно-стойкие (Radiation Hardened) и радиационно-стойкие для стратегических задач (Strategic Rad-Hard). Радиационно-устойчивые микропроцессоры характеризуются радиационной стойкостью по отношению к ИИ меньше 300 крад, к радиационно-стойким относятся изделия с радиационной стойкостью в пределах от 300 крад до 1 Мрад, а радиационно-стойкие для стратегических задач должны иметь радиационную стойкость, превышающую 1 Мрад. По отношению к нейтронному излучению эти группы отличаются соответственно по интегральным потокам нейтронов: меньше 10^{12} нейтр/см^2, 10^{12} нейтр./см^2 – 10^{14} нейтр./см^2 и более.

Процессор HX1750, обладающий радиационной стойкостью до 100 крад, относится к группе радиационно-стойких. По предварительной оценке, вероятность появления в нем одиночных сбоев не должна превышать 10^{-11} ошибок/бит за сутки. О фактической радиационной стойкости к нейтронному излучению сообщений нет. Но в связи с тем, что этот процессор изготовлен по технологии КМОП SOI IV (кремний на изоляторе), то по отношению к нейтронному воздействию он должен относиться к группе радиационно-стойких.

Фирма Dynex Electronics производит радиационно-стойкий микропроцессор MAS281, изготавливаемый по технологии SOS (кремний на сапфире), который по своим параметрам и вычислительным возможностям аналогичен микропроцессору 1750A, но обладает более высокой стойкостью к импульсному воздействию гамма-излучения. В соответствии с информацией фирмы, этот микропроцессор гарантированно функционирует при облучении до уровня 300 крад, сохраняет информацию при импульсном воздействии с мощностью дозы 10^{11} рад/с, сохраняет свою работоспособность после импульсного воздействия до уровня более 10^{12} рад/с, остается работоспособным при облучении быстрыми нейтронами до уровня более 10^{15} нейтр./см^2, а вероятность появления одиночных сбоев от космического излучения галактического происхождения не превышает 10^{-10} ошибок/бит за сутки. В усовершенствованном варианте этого микропроцессора – микропроцессоре MA31750 используется 32-битная внутренняя шина, 24×24 бит умножитель и 32-битное арифметико-логическое устройство. Этот микропроцессор также гарантированно функционирует при ионизирующем воздействии до уровня 300 крад, но несколько менее стоек к импульсному воздействию. Информация в нем не теряется при воздействии с уровнем $5 \cdot 10^{10}$ рад/с. Он также сохраняет свою работоспособность после импульсного воздействия с уровнем более 10^{12} рад/с, при облучении быстрыми нейтронами с уровнем 10^{15} нейтр./см^2 и обладает такой же, как и MAS281, стойкостью к одиночным событиям.

Для работы микропроцессора в составе компьютера или какой-либо другой вычислительной системы необходим набор микросхем (chipset), обеспечивающий связь микропроцессора с оперативной и постоянной памятью, с внешними устройствами, а также для выполнения других функций, обеспечивающих работоспособность вычислительного устройства в целом. Фирма Dynex Semiconductor производит в радиационно-стойком варианте совместимые с микропроцессорами MAS281 и MA31750 программируемый перифе-

рийный интерфейс МА28155, исполнительное устройство МА17501, контрольное устройство МА17502, устройство прерывания МА17503, устройство управления памятью МА31751, контроллер прямого доступа к памяти МА31753, а также блок обнаружения и исправления ошибок МА31755. Все они сохраняют свою работоспособность при облучении ИИ до уровня не менее 300 крад, быстрыми нейтронами до уровня не менее 10^{15} нейтр./см^2, сохраняют информацию при импульсном облучении до уровня 10^{11} рад/с и работоспособность после облучения до уровня более 10^{12} рад/с, а вероятность одиночных сбоев не превышает 10^{-10} ошибок/бит за сутки в условиях воздействия тяжелых ионов галактических излучений на высоких орбитах и в межпланетном космическом пространстве. Гарантированная же радиационная стойкость блока обнаружения и исправления ошибок по отношению к ионизирующим излучениям достигает 500 крад, а программируемого периферийного интерфейса – не менее 1 Мрад.

В свою очередь фирма Aeroflex сообщает о микропроцессоре UT1750AR, способном функционировать при ионизирующем облучении до 1 Мрад. Вероятность появления одиночных сбоев в нем от тяжелых ионов на геостационарной орбите не превышает $2 \cdot 10^{-11}$ ошибок/бит за сутки. Он включает в себя 21 доступных пользователю 16- битных регистров, 20 из которых могут объединяться в 10 32-битных регистров. Кристалл микропроцессора включает в себя также универсальный асинхронный приемопередатчик со скоростью обмена информацией 9600 бод. Микропроцессор способен работать в двух режимах RISC Mode и 1750A Mode Operation (по инструкциям MIL-STD-1750A).

Другая микросхема этой фирмы – микроконтроллер UT69R000 представляет собой по существу микроЭВМ, предназначенную для управления процессами в реальном времени. Ряд функций, обычно внешних по отношению к процессору, интегрирован в эту микросхему. Этими функциями являются UART (универсальный асинхронный приемопередатчик), датчик временных интервалов, 10 внешних векторов прерывания и 8-битная обособленная шина. Процессор этого микроконтроллера поддерживает гарвардскую организацию памяти, т. е. имеет раздельные порты и шины адреса и данных. Он поддерживает до 64К×16 данных и до 1М×16 инструкций. В нем имеется 20 16-битных регистров общего назначения. Все его внутренние элементы имеют статическую структуру. Внутренние регистры, счетчики и триггеры не требуют регенерации, присущей динамическим структурам. Поэтому микроконтроллер UT69R000 может функционировать как на постоянном токе, так и на частотах до 16 МГц. Он полностью поддерживает мультипроцессорные системы, обладает прямым доступом к памяти и обладает способностью арбитража шин, а скорость обмена данными приемопередатчика составляет 9600 бод.

Этот микроконтроллер отличается высокой радиационной стойкостью: он способен функционировать в условиях воздействия ИИ до 1 Мрад, устойчив по отношению к внутренним «защелкиваниям» (LET > 100 МэВ·см^2/мг), пороговое значение LET = 60 МэВ·см^2/мг, а сечение насыщения одиночных событий равно $1{,}2 \cdot 10^{-7}$ см^2/бит. Вероятность появления ошибок на геостационарной орбите составляет $2{,}3 \cdot 10^{-11}$ ошибок/бит за сутки.

Фирма Aeroflex сообщает также о разработке двух микроконтроллеров: UT80CRH196KDS и UT69RH051. Первый из них, обладая радиационной

стойкостью по отношению к ИИ до уровня 300 крад и достаточно высокой устойчивостью сверхоперативной памяти и триггеров к воздействию высокоэнергичных протонов и тяжелых заряженных частиц (с пороговым значением LET = 25 МэВ·см^2/мг, и сечением насыщения $6 \cdot 10^{-7}$ см^2/бит), работает на частоте 20 МГц. 16-битная шина позволяет микроконтроллеру оперировать со 128-Кбайтной памятью инструкций и данных. Он имеет также программируемый и встроенный таймеры, высокоскоростные порты ввода-вывода, схему модуляции ширины импульсов и приемопередатчик с последовательным портом. Арифметико-логическое устройство процессора этого микроконтроллера обеспечивает суммирование и вычитание байтов и слов, позволяет выполнять умножение 8- и 16-битных слов, деление 32/16 бит и 16/8 бит, а также увеличение и уменьшение чисел, изменение их знака, сравнение и другие логические операции. В этом микроконтроллере предусмотрено 18 векторов прерывания, включая нормальные и специальные прерывания.

Второй микроконтроллер UT69RH051 способен функционировать в условиях ионизирующего воздействия до уровня в 1 Мрад. Он включает в себя 16-битные таймеры/счетчики, 256-битную оперативную память, модулятор ширины импульсов, 32 программируемые линии входа-выхода, 7 источников прерывания, программируемый последовательный канал с определением ошибок синхронизации и автоматическим опознаванием адреса. Микроконтроллер способен работать на частотах от 1 МГц до 20 МГц от внешнего генератора или на частотах от 2 МГц до 20 МГц от встроенного генератора с внешним кварцем. Процессор этого микроконтроллера допускает обращение к внешним данным с объемом 64 Кбайт и к такому же объему программ. В табл. 1 приведены данные по радиационной стойкости микропроцессоров и микроконтроллеров различных фирм-изготовителей.

Таблица 1

Радиационная стойкость микропроцессоров и микроконтроллеров [29]

Тип изделия	Функциональное назначение изделия	Фирма-изготовитель	Радиационная стойкость, Мрад
RAD6000	Микропроцессор	BAE Systems	>1,0
RAD750	Микропроцессор	BAE Systems	0,2
HX1750	Микропроцессор	Honeywell	0,1
MAS281	Микропроцессор	Dynex Electronics	0,3
MAS1750	Микропроцессор	Dynex Electronics	0,3
MA17501	Исполнительное устройство	Dynex Electronics	0,3
MA17502	Контрольное устройство	Dynex Electronics	0,3
MA17503	Устройство прерывания	Dynex Electronics	0,3
MA31751	Устройство управления памятью	Dynex Electronics	0,3
MA31753	Контроллер прямого доступа к памяти	Dynex Electronics	0,3
MA31755	Блок обнаружения и исправления ошибок	Dynex Electronics	0,3
MA28155	Периферийный интерфейс	Dynex Electronics	0,3
UT1750AR	Микропроцессор	Aeroflex	1,0
UT69R000	МикроЭВМ	Aeroflex	1,0
UT80CRH 196KDS	Микроконтроллер	Aeroflex	0,3
UT60RH051	Микроконтроллер	Aeroflex	1,0

Микросхемы оперативной памяти (RAM). Микросхемы оперативной памяти, обладающие высокой радиационной стойкостью в первую очередь к воздействию ИИ, производятся в США несколькими фирмами. Так, например, фирма Honeywell сообщает о микросхемах оперативной статической (Static RAM) памяти HX6228, HX6256, HX6408 и HX6464, радиационная стойкость которых по отношению к ИИ составляет 1 Мрад. Все они изготавливаются по технологии RICMOS IV SOI 0,75 Process (Радиационно нечувствительная КМОП-технология кремния на изоляторе с размером базового элемента структуры 0,75 мкм). Отличаются они между собой объемом и организацией памяти, а также напряжением питания. Микросхема HX6464 с объемом 64К с организацией 64К×1 выпускается с начала 90-х годов прошлого столетия. Опубликованные результаты по облучению пяти образцов этой микросхемы гамма-излучением ^{60}Co свидетельствуют о том, что эти микросхемы, проверяемые в процессе их испытания по различным функциональным тестам, сохранили свою работоспособность до 1 Мрад.

Объем памяти микросхем HX6256 составляет 256 кбит (32К×8), а отличается она от микросхем HX6228 и HX6408 не только меньшим объемом памяти (объем памяти микросхем HX6228 и HX6408 составляет соответственно 1 Мбит (128К×8) и 4 Мбита (512×8)), но и напряжением питания: 3,3 В у HX6256 и 5 В у HX6228 и HX6408. Поэтому микросхема HX6256 считается как экономичная: она потребляет 10 мВт/Мгц при записи-считывании и менее 2 мВт в режиме ожидания.

Кроме указанных микросхем фирма Honeywell производит 5-мегабитный модуль памяти HX84050 и три микросхемы памяти FIFO: HX6409, HX6218, HX6136 с объемом 36К и с организацией 1К×36, 2К×18 и 4К×9. Все они, как и микросхемы оперативной памяти, кроме HX6408, гарантированно сохраняют свою работоспособность при ионизирующем облучении до 1 Мрад. Микросхема HX6408 гарантированно сохраняет свою работоспособность до уровня 300 крад, но может функционировать и до уровня 1 Мрад.

Фирма Honeywell гарантирует также сохранение работоспособности для всех упомянутых микросхем памяти, включая и модуль памяти HX84050, при облучении быстрыми нейтронами до уровня 10^{14} нейтр./см^2, статическую и динамическую устойчивость к импульсному ионизирующему воздействию до уровня 10^9 рад/с, сохранение работоспособности по завершении переходного процесса при импульсном воздействии до уровня 10^{11} рад/с и вероятность появления одиночных сбоев менее 10^{-10} ошибок/бит за сутки на геостационарной орбите.

Фирма Aeroflex сообщает о трех типах статических радиационностойких микросхем оперативной памяти, изготовленных по технологии КМОП с размером базового элемента 0,18 мкм. Работают они на частотах до 66 Мгц, требуют двойного питания: 1,8 ± 0,1 В для питания основной части и 3,0 В (3,0 В – 3,6 В) для питания цепей входа и выхода. Шина данных двунаправленная и имеет три состояния. У двух из них объем памяти составляет 4 Мбит с организацией 512К×8 у микросхемы UT8R512K8 и с организацией 128К×32 у микросхемы UT8R128K32, а у третьей – UT8CR512K32 объем памяти достигает 16 Мбит с организацией 512×32.

Эта последняя микросхема организована как модуль, состоящий из четырех индивидуальных микросхем 512К×8 с общим выходом.

И если у всех этих микросхем радиационная стойкость по отношению к нейтронному излучению составляет $3 \cdot 10^{14}$ нейтр./см^2, то по отношению к ИИ она не превышает 300 крад. Они устойчивы к сбоям при импульсном облучении до уровня 10^9 рад/с, а тиристорный эффект может проявиться при мощностях дозы, превышающих 10^{11} рад/с. Для расчета вероятности появления одиночных сбоев в условиях воздействия высокоэнергичных протонов и тяжелых ионов приводятся пороговое значение линейной передачи энергии LET = 53 МэВ·см^2/мг и поперечное сечение насыщения ячейки памяти, равное $1{,}67 \cdot 10^{-7}$ см^2/бит.

Фирма Aeroflex сообщает еще об одной микросхеме статической оперативной памяти с двумя портами и флажком занятости, сигнализирующим о той ситуации, когда несколько процессоров обращаются к одним и тем же ячейкам памяти. Эта микросхема UT7C138/139, в отличие от остальных микросхем фирмы Aeroflex, способна сохранять свою работоспособность при ионизирующем облучении до уровня 1 Мрад, а пороговое значение LET для ее ячеек памяти составляет 85 МэВ·см^2/мг. Ее ячейки памяти устойчивы к «защелкиванию» от одиночных событий до значений пороговой передачи энергии LET > 100 МэВ·см^2/мг.

Фирма BAE Systems North America сообщает еще о трех радиационностойких микросхемах оперативной памяти Magnum 4Mb Radiation Hardened SRAM, Millennium 4Mb Radiation Hardened SRAM и Quantum 4Mb Radiation Hardened SRAM. Они представляют собой статические микросхемы оперативной памяти (RAM), изготовляемые по КМОП эпитаксиальной технологии с размером базового элемента 0,25 мкм. Их радиационная стойкость по отношению к ИИ составляет 200 крад, а вероятность одиночных сбоев оценивается величиной 10^{-10} ошибок/бит в сутки без указания орбиты КА.

Та же фирма BAE Systems North America дала информацию о 4-мегабитной микросхеме с организацией 512К×8, изготовляемой по технологии объемного КМОП процесса с халькогенидной ячейкой памяти. Фирма информирует, что эта микросхема способна сохранять свои функциональные возможности при ионизирующем воздействии свыше 1 Мрад и при нейтронном облучении до уровня свыше 10^{13} нейтр./см^2. В ней не наблюдается сбоев при импульсном гамма-воздействии до уровня более 10^9 рад/с, а после такого же воздействия до уровня не менее 10^{12} рад/с ее работоспособность полностью восстанавливается по завершении переходного процесса рекомбинации, наведенного воздействием неравновесного заряда.

Отличительной особенностью этой микросхемы является использование в качестве ячейки памяти халькогенида – сплава $Ge_2Sb_2Te_5$. Шайба из этого сплава диаметром 100 нм между двумя электродами, в зависимости от длительности и амплитуды тока через нее, может находиться в двух состояниях: аморфном с высоким сопротивлением току и в поликристаллическом с низким сопротивлением. Состояние с высоким сопротивлением соответствует логическому «0», состояние с низким сопротивлением – логической «1».

Эта микросхема требует не более 1 мА/бит при программировании и питается от источника с напряжением 3,3 В. Несмотря на то, что изменение логического состояния ячейки памяти определяется изменением агрегатного состояния халькогенидной шайбы, эта микросхема характеризуется достаточно высоким быстродействием: 70 нс на чтение и 500 нс на запись.

Испытаниям на радиационную стойкость к гамма-излучению ^{60}Co подвергались 4 образца с объемом памяти 64К, изготовленные по радиационностойкому КМОП-процессу с размером базового элемента 0,5 мкм. Мощность дозы составляла 61,4 рад/с. Облучение проводилось ступенями до суммарной поглощенной дозы 2 Мрад. Такое облучение никоим образом не повлияло на сохранение записанной информации. Не было зафиксировано и функциональных отказов. В дискретной ячейке памяти не было обнаружено каких-либо изменений ни в программируемом сопротивлении халькогенидной шайбы, ни в величине тока, требуемого для записи «1».

В предварительной информации указывалось также, что радиационная стойкость такой ИС по отношению к нейтронному излучению превышает 10^{13} нейтр./см^2, гарантируется сохранение информации при импульсном гамма-облучении до уровня более 10^9 рад/с, а ее работоспособность полностью восстанавливается после импульсного воздействия, превышающего 10^{12} рад/с. Испытания на ускорителе ионов в Беркли показали, что ячейки памяти оказались устойчивыми к одиночным сбоям до максимально достижимой линейной передачи энергии LET – 98 МэВ·см^2/мг. «Защелкивания» же в ячейках памяти не наблюдалось до максимально достижимой LET на ускорителе ионов Брукхейвенской национальной лаборатории – 123 МэВ·см^2/мг. В табл. 2 приведены данные по радиационной стойкости микросхем оперативной памяти (RAM) различных фирм-изготовителей.

Таблица 2

Радиационная стойкость микросхем оперативной памяти (RAM) [29]

Тип изделия	Функциональное назначение изделия	Фирма-изготовитель	Радиационная стойкость, Мрад
HX6228	Оперативная память 128К×8	Honeywell	1,0
HX6256	Оперативная память 32К×8	Honeywell	1,0
HX6408	Оперативная память 512К×8	Honeywell	1,0
HX6464	Оперативная память 64К×1	Honeywell	1,0
HX6409	Память FIFO 32K (1K×36)	Honeywell	1,0
HX6218	Память FIFO 32K (2K×18)	Honeywell	1,0
HX6136	Память FIFO 32K (4K×9)	Honeywell	1,0
HX84050	Модуль оперативной памяти 5 Мбит	Honeywell	1,0
UT8R512K8	Оперативная память 512×8	Aeroflex	0,3
UT8R128K32	Оперативная память 128×32	Aeroflex	0,3
UT8CR512K32	Модуль оперативная памяти 512×32	Aeroflex	0,3
UT7C138/139	Оперативная память 4К×8/9	Aeroflex	1,0
Magnum 4Mb	Оперативная память 4 Мбит	BAE Systems	0,2
Millennium 4Mb	Оперативная память 4 Мбит	BAE Systems	0,2
Quantum 4 Mb	Оперативная память 4 Мбит	BAE Systems	0,2

Программируемые микросхемы постоянной памяти (PROM). Сохранение записанной информации в микросхемах постоянной программируемой памяти (PROM) в условиях воздействия на них проникающих излучений и небольшая вероятность появления сбоев от одиночных событий, обусловленных высокоэнергичными протонами и тяжелыми ионами, являются необходимыми условиями обеспечения работоспособности вычислительных систем космических аппаратов. Радиационно-стойкие микросхемы постоянной памяти, как и микросхемы оперативной памяти, производятся несколькими фирмами США.

Фирма Intersil Corporation, например, сообщает о двух микросхемах PROM – HS9-6617RH и HS9-6664RH. Первая ИС, выполненная по технологии КМОП, с объемом памяти всего 16К (2К×8) способна сохранять свою работоспособность в условиях воздействия гамма-излучения в пределах поглощенных доз не более 100 крад. Радиационная стойкость другой ИС – HS9-6664RH, также выполненной по технологии КМОП, с объемом памяти 64К (8К×8) достигает уже 300 крад.

Данные по стойкости микросхем PROM фирмы Intersil к импульсному гамма-излучению и по оценке вероятности появления одиночных сбоев практически отсутствуют. Нужно отметить, что фирма Harris Semiconductor производит микросхемы PROM с подобными обозначениями и с таким же уровнем радиационной стойкости.

С большим объемом памяти, а именно 256К (32К×8), микросхему 238A790 PROM, выполненную по радиационно-стойкой ONO- (оксид – нитрид– оксид) технологии с прожигаемыми перемычками (antfuse), производит фирма BAE Systems North America. Объявленная радиационная стойкость ее к ИИ составляет 200 крад, а к нейтронному излучению – 10^{12} нейтр./см^2, что представляется явно заниженной оценкой по меньшей мере на порядок к ее реальной стойкости к этим излучениям. Данные по ее устойчивости к импульсному гамма-излучению и по оценке вероятности появления одиночных сбоев отсутствуют.

Большей радиационной стойкостью по отношению к ИИ (до 300 крад) обладает микросхема W28C64 фирмы Northrop Grumman Corporation. Однако объем ее памяти равен всего лишь 64К (8К×8). В информационном сообщении по радиационной стойкости к нейтронному излучению данные отсутствуют, однако указываются данные по стойкости к импульсному гамма-излучению: сбои ожидаются при мощностях доз, превышающих 5×10^7 рад/с, а потеря записанных данных может произойти после импульсного воздействия с мощностями доз, превышающих 10^{12} рад/с. Интересной ее особенностью являются разные пороговые значения LET в момент чтения (LET = 60 МэВ·см^2/мг) и LET «защелкивания» адресов и данных (LET = 35 МэВ·см^2/мг).

Наибольшей радиационной стойкостью к ионизирующим видам излучений, достигающей уровня 1 Мрад, обладают микросхема PROM фирмы Honeywell HX6656 с объемом памяти 256 кбит (32К×8) и три микросхемы фирмы Aeroflex: UT28F64LV, UT28F256 и UT28F256LV.

Фирма Honeywell специализируется на изготовлении микросхем по технологии SOI (кремний на изоляторе). Поэтому все ее микросхемы, предназначенные для работы в аппаратуре, подвергающейся радиационному воздействию, включая импульсное, отличаются высокой устойчивостью к импульсному ионизирующему воздействию и высокой радиационной стойкостью к нейтронному воздействию. Так же, как и ее микросхемы оперативной памяти, микросхема HX6656 устойчива в отношении динамических и статических сбоев при импульсном облучении до мощностей доз 10^9 рад/с. Работоспособность микросхемы восстанавливается после воздействия гамма-импульса с мощностью дозы 10^{11} рад/с. При нейтронном облучении гарантируется ее работоспособность до интегрального потока 10^{14} нейтр./см^2.

Микросхема UT28F64 с организацией памяти 8К×8, изготовляемая по радиационно-стойкой технологии КМОП с двумя карманами, обладает достаточно высоким быстродействием и хорошей помехоустойчивостью по отношению к одиночным событиям. Для микросхемы в целом пороговое значение LET появления сбоев составляет ≈ 100 МэВ·см^2/мг, а сечение насыщения равно 10^{-11} см^2/бит. Эти параметры обеспечивают вероятность появления сбоев на геостационарной орбите за счет тяжелых ионов не более $1{,}2 \cdot 10^{-8}$ ошибок на всю микросхему за сутки. Пороговое же значение LET для самих элементов памяти еще выше и превышает 128 МэВ·см^2/мг.

Объем памяти микросхем UT28F256 и UT28F256LV одинаков и составляет 256 кбит. Параметры, определяющие их помехоустойчивость к воздействию тяжелых ионов, совпадают с такими же параметрами микросхемы UT28F64. Отличаются они между собой лишь напряжением питания: у UT28F256 напряжение питания 5 В ± 10 %, а у UT28F256LV оно может изменяться в пределах от 3,0 до 3,6 В. В табл. 3 приведены данные по радиационной стойкости программируемых микросхем постоянной памяти (PROM) различных фирм-изготовителей.

Таблица 3

Радиационная стойкость программируемых микросхем постоянной памяти (PROM) [29]

Тип изделия	Функциональное назначение изделия	Фирма-изготовитель	Радиационная стойкость, Мрад
HS9-6617RH	Программируемая память 16К (2К×8)	Intersil Corporation	0,1
HS9-6664RH	Программируемая память 64К (8К×8)	Intersil Corporation	0,3
238A790	Программируемая память 256К (32К×8)	BAE Systems	0,2
W28C64	Программируемая память 64К (8К×8)	Northrop Grumman Corporation	0,3
HX6656	Программируемая память 256К (32К×8)	Honeywell	1,0
UT28F64LV	Программируемая память 64К (8К×8)	Aeroflex	1,0
UT28F256	Программируемая память 256К (32К×8)	Aeroflex	1,0
UT28F256LV	Программируемая память 256К (32К×8)	Aeroflex	1,0

Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) – FPGA. В последнее время в электронной аппаратуре широкого применения, включая и бортовую аппаратуру космических аппаратов, активно используются программируемые пользователем вентильные матрицы FPGA (Field Programmable Gate Array). Их применение позволяет достичь принципиально нового уровня интеграции цифровых электронных систем управления для бортовых приложений космических аппаратов и практически реализовать подход «Система на кристалле» на платформе программируемой логики высокой надежности. Но используемые в бортовой аппаратуре FPGA, как и другие комплектующие элементы, должны обладать соответствующей радиационной стойкостью. В бортовой аппаратуре космических аппаратов, в том числе и с ЯЭУ, они должны по возможности обладать максимально достижимой радиационной стойкостью по отношению к воздействию ИИ.

Разработкой и производством ПЛИС занимаются многие фирмы США, Европы, Японии и Южной Кореи, однако только небольшое число фирм производят такие микросхемы с той или иной гарантированной величиной радиационной стойкости. Это Atmel Corporation, Actel Corporation, Xilinx и Aeroflex.

Одна из таких микросхем фирмы Atmel (AT17LV010-DP) представляет собой организованную как 1048576×1 бит электрически стираемую последовательную память. Радиационная стойкость ее к ИИ не высока и составляет всего лишь 20 крад в режиме чтения, будучи запитанной, и 60 крад в режиме чтения в обесточенном состоянии.

Другая микросхема – AT40KEL040 – представляет больший интерес. Она включает в себя до 50К вентилей, которые могут быть использованы пользователем для выполнения набора специальных функций, 18К×1 бит конфигурируемую пользователем оперативную память с одним или двумя портами, способную работать в синхронном и асинхронном режиме с временем обмена информацией 18 нс и до 364-х совместимых с 32-разрядной шиной входных-выходных элементов. Радиационная стойкость ее по отношению к ИИ составляет уже 200 крад. Пороговое значение LET «защелкивания» выше, чем 70 МэВ·см^2/мг, а частота появления сбоев от одиночных событий не превышает $3 \cdot 10^{-6}$ ошибок на микросхему за сутки для самых худших условий на околоземных орбитах.

Фирма Actel является одной из ведущих фирм, выпускающих широкую гамму разнообразных ПЛИС, в том числе предназначенных для работы в условиях воздействия излучений. Фирма Actel, как и фирма Honeywell, подразделяет их на две группы: радиационно-устойчивые (radiation tolerance), имеющие в своем обозначении сочетание букв RT, и радиационно-стойкие (radiation hardened), обозначаемые буквами RH. Для первых гарантируется сохранение функциональной работоспособности при ионизирующем облучении до 300 крад, а для вторых – до 1 Мрад. При этом допускается деградация некоторых параметров, в том числе тока потребления и времени передачи сигналов.

Две микросхемы из семейства RT54SX-S, RT54SX32S и RT54SX72S, изготавляемых по КМОП-технологии с размером базового элемента 0,25 мкм, отличаются между собой количеством вентилей: в первой ИС типовых вентилей – 32 000, а

во второй – 72 000. В первой ИС логических модулей 2880, в том числе 1800 комбинаторных элементов и 1080 устойчивых к одиночным событиям регистровых элементов, предназначенных для триггеров. Во второй микросхеме всего логических модулей 6036, в том числе 4024 комбинаторных и 2012 регистровых элементов. В первой схеме максимальное количество триггеров достигает 1980, а во второй – 4024. А вот элементов входа-выхода, способных обмениваться сигналами с напряжениями 2,5 В, 3,3 В и 5,0 В, в первой больше, чем во второй, соответственно 227 и 212. Обе ИС включают в себя по 3 простых счетчика, а во второй ИС имеется также счетверенный счетчик.

Обе эти микросхемы относятся к радиационно-стойким и обеспечивают гарантированную работоспособность при облучении до поглощенных доз 100 крад. Устойчивые к одиночным событиям триггера (пороговая величина LET > 40 МэВ·см^2/мг) обеспечивают вероятность появления одиночных событий не более 10^{-10} сбоев/бит за сутки на геостационарной орбите, что практически исключает необходимость применения тройного модульного резервирования (TMP).

Радиационные испытания четырех микросхем RT54SX32S в поле гамма-излучения с мощностью дозы 1,0 крад/мин показали, что функциональная работоспособность у них полностью сохранилась после облучения вплоть до 100 крад. Ток потребления оставался в допустимых пределах требований при облучении до 77 крад, а при поглощенной дозе 100 крад ток возрос примерно в 2,5 раза. Деградация времени задержки сигнала составила 10 % после 80 крад и не более 15 % после 100 крад. Радиационные испытания пяти экземпляров микросхемы RT54SX72S и пяти экземпляров микросхемы RT54SX72SU также показали полное сохранение их функциональной работоспособности при облучении до уровня 100 крад и примерно такую же деградацию времени задержки сигнала. Ток потребления после облучения до 100 крад увеличился от 2-х до 3-х раз. И хотя фирма указывает на то, что гарантированная радиационная стойкость микросхем RT54SX32S и RT54SX72S составляет 100 крад, схемы эти можно применять и в условиях, когда максимальная поглощенная доза окажется в полтора раза выше.

Появившиеся в 2004 году микросхемы ПЛИС фирмы Actel семейства RTAX[...]S позволяют достичь принципиально нового уровня интеграции цифровых электронных систем управления для бортового применения в аппаратуре космических аппаратов и практически реализовать подход на платформе программируемой логики высокой надежности: «Система на кристалле». Шесть изделий этого семейства RTAX250S, RTAX1000S и RTAX2000S в корпусах CQFR и CCGA выпускаются в исполнениях MIL-STD-883 Class B и E-flow (MIL-STD-883 Class S). Все эти микросхемы обладают системной производительностью до 300 МГц, мажоритарирование (TMP) в них реализовано на аппаратном уровне, эффект «защелкивания» не проявляется, вероятность сбоев на геостационарной орбите не превышает 10^{-10} ошибок/бит за сутки. Вероятность сбоев во встроенной оперативной памяти с системой восстановления ошибок также не превышает 10^{-10} ошибок/бит в сутки, а гарантированная радиационная стойкость по отношению к ИИ составляет 200 крад. Отличаются они лишь количеством имеющихся в них элементов. В табл. 4 приведены их технические характеристики.

Таблица 4

Характеристики микросхем семейства RTAX-S [29]

Технические характеристики ПЛИС	RTAX250S	RTAX1000S	RTAX2000S
Количество вентилей	250 000	1 000 000	2 000 000
Встроенных регистров	1408	8048	10 752
Всего регистров	2816	12 096	21 504
Оперативная память, Кбит	54К	162К	288К
Выводов вход/выход	248	516	684
Корпуса	CQ208; CQ352	CQ352; CG624	CQ352; CG624

Их гарантированная радиационная стойкость, равная 200 крад, подтверждается радиационными испытаниями. Так, например, все шесть микросхем RTAX250S, три из которых облучались в гамма-поле с мощностью дозы 2 крад/мин до уровня 200 крад, другие три – с мощностью дозы 3 крад/мин до уровня 300 крад, полностью сохранили свою функциональную работоспособность. Как и у микросхем семейства RT54SX-S, при максимальных уровнях облучения наблюдалась лишь частичная деградация таких параметров, как ток потребления и время задержки сигнала. Ток потребления у микросхем, облученных до уровня 200 крад, возрос в среднем почти в пять раз, а у микросхем, облученных до 300 крад, – примерно в четыре раза. Время задержки сигнала увеличилось не более чем на 10 % от предельного значения до облучения.

Были проведены радиационные испытания шести микросхем RTAX1000S: три из которых облучались в гамма-поле с мощностью дозы 2 крад/мин, а три другие – с мощностью дозы 3 крад/мин. Эти испытания показали практически те же результаты, которые имели место у микросхем RTAX250S, а их функциональная работоспособность сохранилась у всех экземпляров, в том числе и у тех трех, которые были облучены до 300 крад. Приращение тока потребления составило в среднем 11,7 мА после 200 крад и в среднем 37,3 мА после 300 крад.

Точно такие же результаты радиационных испытаний наблюдаются и у микросхем RTAX2000S. Испытанию было подвергнуто всего 17 микросхем, из которых 8 облучалось с мощностью дозы 2 крад/мин до уровня 200 крад и 9 микросхем – с мощностью дозы 3 крад/мин до уровня 300 крад. Все 9 микросхем, облученные до уровня 300 крад, полностью сохранили свою функциональную работоспособность, ток потребления у разных групп увеличивался от 2-х до 5-ти раз, а время задержки сигнала после облучения до 300 крад увеличилась не более чем на 10 % от предельного значения до обучения.

Все рассмотренные микросхемы ПЛИС фирмы Actel относятся к группе радиационно-устойчивых. Но эта фирма производит и радиационно-стойкие программируемые полем вентильные матрицы (FPGA). К таким схемам относятся микросхемы RH1020 и RH1280. Отличаются они между собой количеством вентилей в матрице. Их технические характеристики приведены в табл. 5.

Таблица 5

Технические характеристики микросхем RH1020 и RH1280 [29]

Технические характеристики ПЛИС	RH1020	RH1280
Количество типовых вентилей	2000	8000
Эквивалентных программируемых логических вентилей	6000	20 000
ТТЛ эквивалентных микросхем	50	200
S-логических модулей (последовательных)	0	624
С-логических модулей (комбинаторных)	547	608
Максимальное количество триггеров	273	998
Максимальное количество элементов входа-выхода	69	140

Изготовлены они по 0,8 мкм эпитаксиальной КМОП-технологии с двухуровневой металлизацией. Гарантированная их радиационная стойкость составляет 300 крад, однако функциональная работоспособность микросхемы RH1280 достигает 2 Мрад при температуре кристалла в пределах 0–70 ºС. Вероятность одиночных событий на геостационарной орбите не превышает 10^{-6} ошибок/бит в сутки для S-модулей и 10^{-7} ошибок/бит в сутки для С-модулей. Указывается также, что их радиационная стойкость по отношению к нейтронному излучению превышает 10^{12} нейтр./см^2. В действительности можно ожидать, что их фактическая радиационная стойкость к нейтронному излучению достигает 10^{14} нейтр./см^2, поскольку они выполнены по КМОП-технологии.

ПЛИС фирмы Xilinx семейства QPro™ Virtex™-II не отличаются высокой радиационной стойкостью по отношению к ИИ. Объявленная фирмой гарантированная радиационная стойкость составляет 200 крад. Однако практически отсутствующая вероятность «защелкивания» от одиночных событий (LET > 160 МэВ·см^2/мг), малая вероятность сбоев (менее $1{,}5 \cdot 10^{-6}$ ошибок/микросхемы в сутки) и, главное, широкие функциональные возможности являются теми факторами, которые могут представлять интерес для разработчиков бортовой аппаратуры космических аппаратов.

В указанное семейство входят также три микросхемы: XQR2V1000, XQR2V3000 и XQR2V6000, отличающиеся количеством системных вентилей. Внутренняя тактовая частота для них превышает 300 Мгц, а скорость обмена данными – 622 Мбит/с. Микросхемы содержат до 144-х независимых блоков двухпортового оперативного запоминающего устройства емкостью 18 Кбит каждый, что позволяет использовать их в различных высокопроизводительных приложениях – от системных интерфейсов и локальных буферов пакетов до цифровой обработки сигналов. Кроме того, микросхемы этого семейства содержат 144 блока умножителей 18×18 бит, до 67 584 регистров-защелок с разрешением тактирования и 67 584 функциональных генератора или каскадируемых 16-битовых сдвиговых регистра. А также до 1104-х программируемых пользователем блоков ввода-вывода, 19 однополюсных и 6 дифференциальных стандартов ввода-вывода поддерживают большинство цифровых сигнальных стандартов. Встроенные же входные и выходные реги-

стры с удвоенным быстродействием обеспечивают передачу сигналов по стандарту LVDS (низковольтный дифференциальный сигнал) со скоростью 840 Мбит/с. Одним из главных преимуществ микросхем этого семейства является возможность частичного реконфигурирования и неограниченного репрограммирования. Именно эта последняя возможность радиационно-устойчивых по терминологии фирмы Actel микросхем предыдущего поколения серии QPro, использовавшихся в «главном мозге» запущенного на Марс аппарата Mars Expioration Rover, позволила своевременно до старта внести изменения и корректировки в конструкцию.

В связи с возможностью репрограммирования микросхем семейства QPro Virtex-II следует обратить внимание на следующее обстоятельство. Электрически репрограммируемая флеш-память способна функционировать в условиях воздействия ИИ до уровней порядка $(1\div3)\cdot10^4$ рад. Репрограммируемая память микросхем семейства QPro Virtex-II с радиационной стойкостью до 200 крад может явиться возможной заменой флеш-памяти для устройств, предназначенных функционировать в радиационных условиях, в которых флеш-память неприменима. К сожалению, пока нет возможности ознакомиться с фактическими результатами по испытанию микросхем семейства QPro Vitex-II в части радиационной стойкости. Однако опираясь на сведения по технологии этих микросхем: 0,15 мкм КМОП-технология с 8-кратной металлизацией и быстродействующими транзисторами, можно предполагать, что эти микросхемы могут сохранять свои функциональные возможности при облучении до уровня по крайней мере до 300 крад.

Наконец, следует остановиться на двух ПЛИС фирмы Aeroflex UT6325 и UT6250, объявленная радиационная стойкость которых по отношению к ИИ составляет 300 крад. «Защелкивания» от одиночных событий в них не наблюдалось до LET > 120 МэВ·см^2/мг, Пороговые значения LET превышают для переключаемых элементов 42 МэВ·см^2/мг и 64 МэВ·см^2/мг для встроенных ячеек оперативной памяти. Сечения насыщения на бит, соответственно, составляют $5\cdot10^{-7}$ см^2 для переключаемых элементов и $2\cdot10^{-7}$ см^2 для встроенных ячеек оперативной памяти.

Информация, представленная самой фирмой Aeroflex, свидетельствует о том, что радиационная стойкость этих микросхем превышает 1 Мрад. В табл. 6 представлены данные по радиационной стойкости ПЛИС.

Аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП). В отличие от микропроцессоров, микросхем памяти и ПЛИС выбор радиационно-стойких АЦП и ЦАП очень ограничен. Лишь фирма Honeywell представляет АЦП HMXADC9225 как радиационно-стойкий вариант. Это монолитный 12-разрядный преобразователь с производительностью 20 MSPS (20 миллионов преобразований в секунду). Он выполнен по традиционной для Honeywell радиационно-стойкой КМОП SOI-IV (кремний на изоляторе) технологии и гарантированно сохраняет свою функциональную работоспособность и основные функциональные параметры в условиях воздействия ИИ до уровня, превышающего 1 Мрад. Важно отметить, что указанная радиационная стойкость обеспечивается тестированием сдвига порогового

напряжения затвора контрольных транзисторов на кремниевых пластинах при их облучении рентгеновским излучением с энергией 10 кэВ. Внутреннее «защелкивание» при воздействии тяжелых заряженных частиц и высокоэнергичных протонов практически исключено, а вероятность появления сбоев от одиночных событий и радиационная стойкость по отношению к нейтронам еще подлежат определению.

Таблица 6

Радиационная стойкость ПЛИС [29]

Тип изделия	Функциональное назначение изделия	Фирма-изготовитель	Радиационная стойкость, Мрад
AT17LV010-DP	1Мбит последовательная память PROM	Atmel Corporation	0,06
AT40KEL040	ПЛИС 50К вентилей, 18К RAM	Atmel Corporation	0,2
RT54SX32S	ПЛИС 32К вентилей	Actel Corporation	0,1
RT54SX72S	ПЛИС 72К вентилей	Actel Corporation	0,1
RTAX250S	ПЛИС 250К вентилей	Actel Corporation	0,2
RTAX1000S	ПЛИС 1М вентилей	Actel Corporation	0,2
RTAX2000S	ПЛИС 2М вентилей	Actel Corporation	0,2
RH1020	ПЛИС 2К вентилей	Actel Corporation	0,3
RH1280	ПЛИС 8К вентилей	Actel Corporation	0,3
XQR2V1000	ПЛИС 1М вентилей, репрограммирование	Xilinx	0,2
XQR2V3000	ПЛИС 3К вентилей, репрограммирование	Xilinx	0,2
XQR2V6000	ПЛИС 6К вентилей, репрограммирование	Xilinx	0,2
UT6325	ПЛИС 320К вентилей	Aeroflex	>1,0
UT6250	ПЛИС 320К вентилей	Aeroflex	>1,0

К группе радиационно-стойких АЦП могут быть отнесены микросхемы AD571 фирмы Analog Devices и AS1419A фирмы Austin.

Выполненная по биполярной технологии микросхема AD571 (отечественным аналогом ее является микросхема 1113ПВ1) представляет собой 10-разрядный АЦП, состоящий из ЦАП, источника опорного напряжения, счетчика импульсов, регистра последовательного приближения и выходных буферов, совмещенных в одном кристалле. По данным работы, радиационная стойкость AD571 составляет 200 крад. Это заключение сделано на основании ее радиационных испытаний в поле гамма-излучения с мощностью дозы 0,33 рад/с. Ступенчатое облучение 8-ми образцов до уровня 200 крад показало, что все микросхемы сохранили свою работоспособность без каких-либо значительных изменений их параметров.

Микросхема AS1419 (AS1419A) представляет собой 14-разрядный АЦП с быстродействием 800KSPS (800К преобразований/с). Она отличается тем, что имеет 14-разрядный совместимый с микропроцессором параллельный

порт, что существенно сокращает время обработки преобразованных в цифровую форму аналоговых сигналов. Ее радиационная стойкость к ИИ составляет не менее 150 крад. Фирмой представлены детальные результаты радиационных испытаний пяти экземпляров этого АЦП в поле гамма-излучения с мощностью дозы 29,7 рад/с. При облучении до уровня 150 крад у всех микросхем функциональная работоспособность полностью сохранялась. Наблюдалось лишь монотонное снижение отрицательного питающего тока, который уменьшился в среднем на 9,7 мА от начального значения 30 мА. А опорное напряжение изменилось на 0,0018 В от начального значения 2,5 В.

Информация о микросхемах ЦАП, которые можно было бы применить в аппаратуре, подвергающейся радиационному воздействию, еще более скудная по сравнению с информацией об АЦП. Микросхемы ЦАП, которые характеризовались бы как радиационно-стойкие, вообще отсутствуют. Можно указать лишь на микросхему DAC08A фирмы Analog Devices, выполненную по биполярной технологии и представляющую собой высокоскоростной умножающий ЦАП. Результаты радиационных испытаний 5-ти ее экземпляров в поле гамма-излучения с мощностью дозы 0,04 рад/с показали, что все микросхемы выдержали все функциональные тесты до максимального в данном эксперименте уровня 50 крад.

В табл. 7 представлены данные по радиационной стойкости АЦП и ЦАП.

Таблица 7

Радиационная стойкость АЦП и ЦАП [29]

Тип изделия	Функциональное назначение изделия	Фирма-изготовитель	Радиационная стойкость, Мрад
HMXADC9225	12-разрядный АЦП	Honeywell	>1,0
AD571	10-разрядный АЦП (аналог 1113ПВ1)	Analog Devices	0,2
AS1419A	14-разрядный АЦП	Austin	0,15
DAC08A	Высокоскоростной 8-разрядный ЦАП	Philips	0,05

Микросхемы обеспечения обмена информацией по стандарту LVDS. LVDS – метод передачи цифровых данных дифференциальными сигналами с малыми перепадами уровня напряжения со скоростью до сотен и даже тысяч мегабит в секунду. Он получает широкое распространение в силу своих явных преимуществ, заключающихся в обеспечении малого уровня шумов и малой потребляемой мощности во всем диапазоне скоростей передачи за счет малых перепадов уровня напряжения и токового режима выхода передатчиков. Поскольку среда распространения LVDS-сигналов состоит из кабеля (витой пары) или двухпроводной линии на печатной плате с легко контролируемым дифференциальным импедансом, кабель или двухпроводная линия

заканчиваются, как правило, простым сопротивлением, равным по величине дифференциальному сопротивлению витой пары или двухпроводной линии.

Общий мультисистемный LVDS-стандарт ANSI/TIA/EIA-644 разработан комитетом TIA (Data Transmission Interface TR30.2). Данный стандарт определяет выходные характеристики передатчиков и входные характеристики приемников, т. е. он определяет только электрические характеристики, но не ограничивает функциональные спецификации, протоколы, характеристики кабелей и соединений. Тем самым он независим от конкретных приложений.

В настоящее время многие фирмы разрабатывают и выпускают микросхемы, обеспечивающие передачу информации по стандарту LVDS, однако только фирма Aeroflex производит такие микросхемы с гарантированной радиационной стойкостью.

Счетверенные передатчики UT54LVDSC03 и UT54LVDM031LV изготовлены по КМОП-технологии и обладают радиационной стойкостью к ИИ не менее 300 крад. Напряжение питания первого из них 5В, он обеспечивает передачу сигналов ТТЛ уровня в дифференциальные токовые сигналы стандарта LVDS со скоростью, превышающей 155,5 Мбит/с (77,7 Мгц). Напряжение питания второго передатчика 3,3 В. Он обеспечивает передачу сигналов ТТЛ уровня стандарта LVDS со скоростью, превышающей 400 Мбит/с (200 Мгц).

Обладающие точно такими же электрическими и скоростными параметрами передатчики UT54LVDS031 и UT54LVD031LV/E отличаются от первых более высокой радиационной стойкостью, достигающей 1 Мрад.

Микросхема UT54LVDM055LV представляет собой сдвоенный передатчик и приемник токовых сигналов стандарта LVDS. Питается она от низковольтного источника (3,3 В) и обеспечивает передачу сигналов со скоростью, превышающей 400 Мбит/с (200 Мгц). Входными сигналами передатчиков являются сигналы с уровнем ТТЛ, а выходными – сигналы с уровнем КМОП (3 В). Радиационная стойкость ее составляет 300 крад.

Наряду с четырехканальными передатчиками, фирма Aeroflex производит и счетверенные приемники токовых сигналов стандарта LVDS.

Один из таких – приемник UT54LVDSC032, обладающий радиационной стойкостью 300 крад, питается от источника с напряжением 5 В и обеспечивает прием сигналов стандарта LVDS со скоростью 155,5 Мбит/с. А вот приемник UT54LVDS032 с точно такими же электрическими и скоростными характеристиками имеет радиационную стойкость до 1 Мрад.

Низковольтный (3,3 В) приемник UT54LVDS032LV/E обеспечивает преобразование дифференциальных сигналов стандарта LVDS в сигналы с уровнем ТТЛ со скоростью свыше 400 Мбит/с и имеет радиационную стойкость до 1 Мрад. В отличие от этого приемника, UT54LVDSS032LVT, обладая идентичными электрическими и скоростными характеристиками на каждом из своих четырех входов, имеет встроенное входное сопротивление, равное 100 Ом. Его радиационная стойкость также достигает 1 Мрад.

К радиационно-стойким (со стойкостью до 1 Мрад) микросхемам, оперирующим с сигналами стандарта LVDS, относятся также микросхемы UT54LVDS217, UT54LVDS218, UT54LVDM328 и UT54LVDM228.

Первая UT54LVDS217 – является сериалайзером, преобразующим параллельный код в последовательный. Эта микросхема конвертирует последовательный 21-битовый код данных с уровнями КМОП или ТТЛ в три потока параллельных кодов с уровнями LVDS со скоростью 525 Мбит/с на каждый из LVDS-каналов. Тактирующий входной ТТЛ-сигнал преобразуется в LVDS-сигнал четвертого тактирующего LVDS-канала.

Микросхема UT54LVDS218, являясь десериалайзером, выполняет обратную функцию, конвертируя три потока параллельных кодов LVDS-данных в 21-битный последовательный код с уровнями КМОП или ТТЛ с той же скоростью 525 Мбит/с.

Микросхема UT54LVDM328 используется в качестве «мостиков» между отдельными LVDS-шинами в системах. В частности, она может использоваться для сбора сигналов с разных шин и передачи их в локальную шину.

Микросхема UT54LVDM228 является 2×2 узловым переключателем LVDS-сигналов, который может использоваться как переключатель между двумя LVDS-шинами, как 2:1 мультиплексор или 1:2 демультиплексор, как повторитель или расщепитель сигналов. Функции мультиплексора и демультиплексора оказываются полезными при переключении между основным и дублирующим устройствами, когда основное устройство теряет свою работоспособность.

Важно подчеркнуть, что все LVDS-микросхемы устойчивы в отношении внутреннего «защелкивания», в случае одиночных событий от высокоэнергичных протонов или тяжелых заряженных частиц, поскольку LET «защелкивания» превышает 100 МэВ·см^2/мг. В табл. 8 представлены данные по радиационной стойкости микросхем обеспечения обмена информацией по стандарту LVDS.

Таблица 8

Радиационная стойкость микросхем обеспечения обмена информацией по LVDS [29]

Тип изделия	Функциональное назначение изделия	Фирма-изготовитель	Радиационная стойкость, Мрад
UT54LVDSC031	Счетверенный LVDS-передатчик	Aeroflex	0,3
UT54LVDSC031LV	Счетверенный LVDS-передатчик	Aeroflex	0,3
UT54LVDS031	Счетверенный LVDS-передатчик	Aeroflex	1,0
UT54LVDS031LV/E	Счетверенный LVDS-передатчик	Aeroflex	1,0
UT54LVDM055LV	Сдвоенный LVDS-приемопередатчик	Aeroflex	0,3
UT54LVDSC032	Счетверенный LVDS-приемник	Aeroflex	0,3
UT54LVDSC032LV/E	Счетверенный LVDS-приемник	Aeroflex	1,0
UT54LVDSS032LVT	Счетверенный LVDS-приемник	Aeroflex	1,0
UT54LVDS217	Сериалайзер	Aeroflex	1,0
UT54LVDS218	Десериалайзер	Aeroflex	1,0
UT54LVDSM328	Мостик между шинами LVDS	Aeroflex	1,0
UT54LVDSM228	2×2 узловой переключатель	Aeroflex	1,0

Логические микросхемы. Логические микросхемы средней степени интеграции, несмотря на широкое внедрение ПЛИС, являются пока еще неотъемлемыми элементами цифровой аппаратуры различных систем управления и обработки цифровой информации. К ним относятся микросхемы, выполняющие такие логические функции, как И, ИЛИ, НЕ, D и J-K триггеры, триггеры Шмитта, компараторы, мультиплексоры и демультиплексоры, двоичные счетчики, сдвиговые регистры, преобразователи уровня, сумматоры, арифметико-логические устройства и многие другие.

Иностранные логические микросхемы производятся очень многими фирмами, однако радиационную стойкость в 1 Мрад по отношению к ИИ и не менее 10^{14} нейтр./см^2 по отношению к нейтронному излучению гарантирует лишь фирма Aeroflex, которая выпускает микросхемы серий 54ACSXX и 54ACTSXX. Пороговое значение LET для появления сбоев от одиночных событий составляет не менее 80 МэВ·см^2/мг, а в отношении внутреннего «защелкивания» – не менее 120 МэВ·см^2/мг. К такого рода микросхемам следует отнести и микросхему фирмы Aeroflex UT22VP10, представляющую собой программируемую прожиганием логическую матрицу. Радиационная стойкость ее к ИИ составляет 1 Мрад, пороговое значение LET-сбоев превышает 50 МэВ·см^2/мг, а внутренние «защелкивания» практически исключены (LET>109 МэВ·см^2/мг). В табл. 9 представлены данные по радиационной стойкости логических микросхем фирмы Aeroflex.

Таблица 9

Радиационная стойкость логических микросхем фирмы Aeroflex [29]

Тип изделия	Функциональное назначение изделия	Фирма-изготовитель	Радиационная стойкость, Мрад
UT54ACSXX	Набор различных логических микросхем	Aeroflex	1,0
UTACTSXX	Набор различных логических микросхем	Aeroflex	1,0
UT22VP10	Программируемая логическая матрица	Aeroflex	1,0

Вторичные источники питания. Напряжение питания бортовой сети космических аппаратов может значительно различаться в зависимости от типа первичного источника питания, каковым могут быть солнечные батареи или ЯЭУ. Чаще всего величина этого постоянного напряжения составляет 27 В. Вместе с тем абсолютное большинство микросхем, используемых в бортовой аппаратуре, требует низковольтного питания: 5 В или даже 3,3 В. Поэтому в состав отдельных функциональных бортовых систем входят, как правило, вторичные источники питания (ВИП), преобразующие постоянное напряжение бортовой сети космического аппарата в низковольтные напряжения, питающие микросхемы бортовой аппаратуры. Нередко к выходным напряжениям ВИП предъявляются достаточно жесткие требования по стабильности величины выходного напряжения при колебаниях напряжения бортовой сети, при изменении токовой нагрузки или окружающей температуры, а также длительного ресурса космического аппарата. А поскольку ап-

паратура космического аппарата подвергается и радиационному воздействию излучений радиационных поясов Земли, а также гамма- и нейтронному излучению реактора ЯЭУ, если таковая входит в состав космического аппарата, то жесткие требования по стабильности выходных напряжений ВИП относятся и к радиационной деградации параметров полупроводниковых элементов, входящих в состав ВИП. Радиационная стойкость ВИП должна быть не ниже, а желательно и выше тех микросхем, которые питаются от ВИП.

Мировым лидером среди производителей электронных компонент для преобразования электроэнергии является фирма International Rectifier. Ее продукция включает, помимо широкой номенклатуры силовых полевых транзисторов с *n*- и *p*-каналами с напряжением до 500 В: широкую номенклатуру IGBT (биполярный транзистор с изолированным затвором) транзисторов и модулей; различные типы диодов, включая диоды Шоттки для преобразователей напряжения постоянного тока; микросхемы драйверов (приводов) для IGBT и МОП-приборов; микросхемы управления питанием, в том числе ШИМ и LDO контроллеры; различные тиристоры и тиристорно-диодные модули. В последнее время эта фирма анонсировала серию INTERO программируемых интеллектуальных модулей, включающих в одном корпусе силовой модуль с драйверами затворов, программируемый контроллер DSP (цифровой сигнальный процессор) и интерфейсы обратной связи и управления. Такие устройства имеют наивысшую степень интеграции и предлагают завершенное техническое решение для управления асинхронными электродвигателями или бесконтактными двигателями постоянного тока мощностью до 15 кВт. Естественно, что эта фирма не осталась в стороне от разработки и производства радиационно-стойких компонент для преобразователей напряжения постоянного тока в интересах министерства обороны и космической техники США. Радиационно-стойкая продукция фирмы International Rectifier включает высоконадежные мощные *n*- и *p*-канальные КМОП-транзисторы с напряжением сток-исток от 30 до 500 В и радиационной стойкостью по отношению к ИИ до 1 Мрад, преобразователи постоянного напряжения 28 В в одно из низковольтных напряжений с величиной от 3,3 до 15 В (3,3, 5, 5,2, 12 и 15 В), преобразователи постоянных напряжений 28, 50 и 70 В в двуполярные напряжения ±5, ±12 и ±15 В и преобразователи постоянных напряжений 28, 50 и 70 В в положительные напряжения 3,3 и 5 В, а также в двуполярные напряжения ±5, ±12 и ±15 В.

Преобразователи серии ART28XXT конвертируют постоянное напряжение 28 В в положительное напряжение 5 В с максимальным током нагрузки до 3 А и в двуполярные напряжения ±12 и ±15 В с токами нагрузки до 0,5 А. Их гарантированная радиационная стойкость к ИИ составляет 200 крад, а одиночные события не наблюдались при облучении тяжелыми ионами до LET = 83 МэВ·см^2/мг. Преобразователи серии ARH28XXS на одно напряжение также имеют гарантированную радиационную стойкость к ИИ до 200 крад, но типовая их радиационная стойкость составляет 500 крад.

Преобразователи G-серии (M3G28XX, M3G50XX и M3G70XX) рассчитаны на преобразование первичных напряжений 28, 50 и 70 В в положительные напряжения 3,3, 5, 12 и 15 В и в двуполярные напряжения ±5, ±12 и ±15 В. Их

гарантированная радиационная стойкость составляет 200 крад, а типовая – 1 Мрад. Устойчивость к импульсному воздействию оценивается величинами 10^8 рад/с в отношении сохранения выходных напряжений и $4 \cdot 10^{10}$ рад/с в отношении восстановления работоспособности после прекращения переходного процесса. Радиационная стойкость по отношению к нейтронному излучению составляет 10^{13} нейтр./см^2, а одиночные события также не наблюдались при облучении тяжелых заряженных частиц до LET = 83 МэВ·см^2/мг.

Преобразователи серии ARM28XXT, предназначенные для конвертирования постоянного напряжения 28 В в положительное напряжение 5 В с максимальным выходным током 3А и в двуполярные напряжения ±12 и ±15 В с токами нагрузки до 0,5 А способны безотказно функционировать при облучении ИИ до уровня, превышающего 1 Мрад. Что касается других воздействий, то допустимые уровни по ним аналогичны таковым для преобразователей G-серии. Следует также обратить внимание на результаты радиационных испытаний преобразователей первичного напряжения 28 В в низковольтные – 3,3, 5 и 15 В (S-серии: S28XXS и S28XXD), а также в 2,5 и 1,5 В (Z-серии: Z28XXR5S). У преобразователей S-серии после облучения до уровня 150 крад выходные напряжения при половинной от максимума нагрузке снизились не более, чем на 10 %. У преобразователя Z-серии Z2802RS5 с выходным напряжением 2,5 В и максимальным током до 20 А после облучения до уровня 300 крад выходное напряжение упало на 7 %, а у преобразователя Z2801RS5 с выходным напряжением 1,5 В выходное напряжение упало всего лишь на 4 % после облучения до поглощенной дозы, равной 550 крад.

В 2005 году фирма International Rectifier представила новую линию радиационно-стойких приборов с максимальным током 3 А – регуляторов напряжения с ультранизким перепадом напряжения между входом и выходом. Были представлены четыре прибора IRUH33P183X1M, IRUH33P253X1M, IRUH50P253X1M и IRUH50P333X1M с фиксированными выходными напряжениями 1,8, 2,5 и 3,3 В и два прибора IRUH33PA13X1M и IRUH50PA13X1M с регулируемыми выходными напряжениями. Для приборов с фиксированными выходными напряжениями 1,8 и 2,5 В входное напряжение может быть в диапазоне от 2,9 до 6,5 В, а для прибора с выходным напряжением 3,3 В – от 4,5 до 6,5 В.

В приборах с регулируемыми выходными напряжениями выходное напряжение может изменяться в пределах от 1,265 В до ($U_{\text{вход}}$ – 0,4) В, при этом входное напряжение $U_{\text{вход}}$ не должно превышать 6,5 В. Вся эта линейка регуляторов напряжения характеризуется радиационной стойкостью по отношению к ИИ до уровня, превышающего 1 Мрад, если приборы облучались в активном состоянии при мощности дозы в диапазоне от 50 до 300 рад/с, и не более 750 крад, если проводилось облучение обесточенных приборов. При малой мощности дозы (0,1 рад/с) приборы сохранили свои функциональные характеристики (изменение выходного напряжения в допустимых пределах (±3 %)) до уровня 1,476 Мрад. Приведенные данные

для одного из приборов с регулируемым напряжением результаты испытания их на радиационную стойкость к быстрым нейтронам показали, что его полный функциональный отказ произошел при значении интегрального потока в диапазоне между 10^{12} нейтр./см^2 и 10^{13} нейтр./см^2. Указывается также, что для одиночных событий LET = 84 МэВ·см^2/мг.

Фирма International Rectifier, помимо преобразователей напряжения на фиксированные величины выходных напряжений, производит драйверы мощных полевых транзисторов, позволяющие создавать преобразователи напряжения, удовлетворяющие заданным требованиям разработчика аппаратуры по выходным напряжениям, токам нагрузки, стабильности выходных напряжений и другим параметрам. В качестве примера приведены следующие драйверы: RIC7113A4, RIC7113E4 и RIC7113L4, предназначенные для управления высоковольтными быстродействующими МОП- или IGBT-транзисторами. Радиационная стойкость их такова, что после облучения их до уровня 100 крад токи утечки выходных цепей в запертом состоянии (величина которых до облучения составляла десятки и сотни мкА), остались неизменными. Различаются эти драйверы между собой лишь величинами выходной мощности и теплового сопротивления между кристаллом и окружающей средой.

Драйверы для полной мостовой и полумостовой схем из *n*-канальных МОП-транзисторов выпускает и фирма Intersil. Драйвер для полумостовой схемы IS-2100ARH (на максимальное выходное напряжение до 130 В) обеспечивает при емкости в цепи нагрузки 1000 пф и работе преобразователя на частоте 1 МГц времена нарастания и спада выходного напряжения не более 30 нс. Эта микросхема имеет встроенную схему определения и коррекции ошибок, которая к тому же обеспечивает и дополнительную защиту от одиночных событий. Микросхема практически свободна от внутренних «защелкиваний» и обладает максимальной радиационной стойкостью к ИИ, равной 300 крад.

Другой драйвер этой же фирмы, HS-4080ARH, предназначен для управления мостом из четырех *n*-канальных МОП-транзисторов. Эта микросхема может быть использована не только в преобразователях напряжения, но и для управления двигателями постоянного тока с напряжением не выше 95 В. Максимальная радиационная стойкость ее к ИИ составляет 300 крад и она, как и предыдущая, практически свободна от внутренних «защелкиваний».

От производства преобразователей напряжения с повышенной радиационной стойкостью не осталась в стороне и фирма Aeroflex. Однако ее преобразователи напряжения не отличаются, к сожалению, подобно многим ее радиационно-стойким электронным компонентам, высокой радиационной стойкостью. Четыре ее преобразователя ACT8631, ACT8632, ACT8633 и ACT8634 обладают радиационной стойкостью к ИИ, не превышающей всего лишь 100 крад. Первый из них ACT8631 предназначен для преобразования входного постоянного напряжения в диапазоне от 20 до 80 В в 10 выходных напряжений: два напряжения +7,8 В, два напряжения –7,8, +12, –12, +15, –15 В и два независимых от остальных напряжения +5,1 В. Токи нагрузки невелики и не превышают 200–300 мА для напряжений 5,1 В. По остальным выходам они составляют десятки мА. Второй преобразователь ACT8632 рассчитан на 8

выходных напряжений: по два напряжения +12 В и –12 В, +15 В, –15 В и два независимых напряжения +5,1 В. Допустимые токи нагрузки также невелики: максимальный для одного из напряжений 5,1 В составляет 367 мА.

Третий преобразователь (ACT8633) по своим выходным данным полностью аналогичен первому и отличается от него лишь величиной входного преобразуемого напряжения. Для него он может колебаться в диапазоне от 13 до 52 В. Выходные токи также невелики и не превышают 300 мА для одного из напряжений 5,1 В. Четвертый преобразователь, подобно третьему, повторяет выходные характеристики второго и рассчитан на преобразование входных напряжений также в диапазоне от 13 до 52 В.

Фирма Aeroflex производит также и микросхемы, осуществляющие функцию регулирования положительного и отрицательного напряжения VRG8601 и VRG8602. Радиационная стойкость их так же, как и преобразователей напряжения, невелика и составляет 100 крад. Они позволяют по входному регулируемому напряжению устанавливать на выходе напряжения в диапазоне от +1,2 до +37 В и от –1,2 до –22 В. При этом для регулятора положительных напряжений разность между входным и выходным напряжениями должна превышать 3 В, но быть не более 40 В. Для регулятора отрицательных напряжений разность между входным и выходным напряжениями также должна превышать 3 В, но быть не более 30 В. Оба регулятора рассчитаны на выходной ток до 1,5 А.

Из радиационно-стойких электронных компонентов фирмы Aeroflex, которые могут быть использованы в преобразователях напряжения, следует указать на высокоскоростной широтно-импульсный модулятор PWM5031. Эта микросхема, обладая радиационной стойкостью к ИИ в 1 Мрад, может функционировать в токовом режиме по выходу или в режиме напряжения, что позволяет использовать ее в разнообразных топологиях конвертеров напряжения. Она устойчива и в отношении одиночных событий: LET>100 МэВ·см^2/мг. В табл. 10 представлены данные по радиационной стойкости вторичных источников питания.

Микросхемы различного назначения. Фирма Aeroflex производит, кроме выше рассмотренных, еще целый ряд микросхем с достаточно высокой радиационной стойкостью к ИИ, которые применяются, в частности, в бортовой аппаратуре космических аппаратов. Так, например, в печати сообщается о шести аналоговых коммутаторных модулях ACT8500, ACT8501, ACT8502, ACT8503, ACT850 и ACT8505. Все они способны функционировать при ионизирующем облучении до уровня 300 крад и устойчивы к внутреннему «защелкиванию» и к одиночным событиям (LET ≈ 120 МэВ·см^2/мг), а отличаются между собой количеством 16-канальных коммутаторов в одном модуле.

Микросхемы ACT5108/ACT5109, радиационная стойкость которых к ИИ по предварительной информации составляет 300 крад, представляют собой трехканальные драйверы бесщеточных двигателей постоянного тока. Сообщается также, что их радиационная стойкость к нейтронному излучению не ниже $3\cdot10^{12}$ нейтр./см^2, а устойчивость к импульсному воздействию с длительностью 20 нс не ниже $3{,}5\cdot10^{10}$ рад/с.

Таблица 10

Радиационная стойкость вторичных источников питания [29]

Тип изделия	Функциональное назначение изделия	Фирма-изготовитель	Радиационная стойкость, Мрад
IRHXXX8ZXX	*n*-канальный транзистор с напряжением пробоя сток-исток 30 В	International Rectifier	1,0
IRHXX80XX	*n*-канальный транзистор с напряжением пробоя сток-исток 60 В	International Rectifier	1,0
IRHX81XX	*n*-канальный транзистор с напряжением пробоя сток-исток 100 В	International Rectifier	1,0
IRHX82XX	*n*-канальный транзистор с напряжением пробоя сток-исток 200 В	International Rectifier	1,0
IRHM8360	*n*-канальный транзистор с напряжением пробоя сток-исток 400 В	International Rectifier	1,0
IRHX8450	*n*-канальный транзистор с напряжением пробоя сток-исток 500 В	International Rectifier	1,0
IRHXXXX930XX	*p*-канальный транзистор с напряжением пробоя сток-исток 60 В	International Rectifier	0,3
IRHXXX931XX	*p*-канальный транзистор с напряжением пробоя сток-исток 100 В	International Rectifier	0,3
IRHXXX932XX	*p*-канальный транзистор с напряжением пробоя сток-исток 200 В	International Rectifier	0,3
IRHG58110	Счетверенный *n*-канальный транзистор с напряжением пробоя сток-исток 100 В	International Rectifier	1,0
IRHQ8214	Счетверенный *n*-канальный транзистор с напряжением пробоя сток-исток 250 В	International Rectifier	1,0
IRHG593110	Счетверенный *p*-канальный транзистор с напряжением пробоя сток-исток 100 В	International Rectifier	0,3
ART28XXT Series	Гибридный DC/DC преобразователь с тремя выходными напряжениями 5, ±12 и ±15 В	International Rectifier	0,2
ARH28XXT Series	Гибридный DC/DC преобразователь с одним выходным напряжением в диапазоне от 3,3 до 15 В	International Rectifier	0,2
ARM28XXT Series	Гибридный DC/DC преобразователь с тремя выходными напряжениями 5, ±12 или ±15 В	International Rectifier	>1,0
G-Series	DC/DC преобразователь с двумя выходными напряжениями ±5, ±12 или ±15 В	International Rectifier	0,3
S28XXS Series	Импульсный преобразователь 28 В в одно выходное напряжение 3,3 В, 5 В, 12 В или 15 В	International Rectifier	0,15
Z-Series	Импульсный преобразователь 28 В в одно выходное напряжение 1,5 или 2,5 В с током до 20А	International Rectifier	до 0,55

Окончание таблицы 10

Тип изделия	Функциональное назначение изделия	Фирма-изготовитель	Радиационная стойкость, Мрад
IRUH33P183X1M	Регулятор напряжения с ультрамалым напряжением между входным и фиксированным выходным напряжением 1,8 В и током до 3 А	International Rectifier	>1,0
IRUH33P253X1M	Регулятор напряжения с ультрамалым напряжением между входным и фиксированным выходным напряжением 2,5 В и током до 3 А	International Rectifier	>1,0
IRUH50P333X1M	Регулятор напряжения с ультрамалым напряжением между входным и фиксированным выходным напряжением 3,3 В и током до 3 А	International Rectifier	>1,0
IRUH33PA13X1M	Регулятор напряжения с ультрамалым напряжением между входным и фиксированным выходным от 1,3 до 6,1 В напряжением и током до 3 А	International Rectifier	>1,0
IRUH50PA13X1M	Регулятор напряжения с ультрамалым напряжением между входным и фиксированным выходным от 1,3 до 6,1 В напряжением и током до 3 А	International Rectifier	>1,0
RIC7113A4 RIC7113E4 RIC7113L4	Высоковольтные (до 400 В) и высокоскоростные драйверы МОП- и IGBT-транзисторов	International Rectifier	0,1
IS-2100ARH	Высокочастотный полумостовой драйвер *n*-канальных МОП-транзисторов	Intersil	0,3
HS-4080ARH	Высокочастотный мостовой драйвер *n*-канальных МОП-транзисторов	Intersil	0,3
ACT8631	Преобразователь входного (20–80 В) напряжения в 10 выходных напряжений от 5,1 до двуполярных 15 В	Aeroflex	0,1
ACT8632	Преобразователь входного (20–80 В) напряжения в 8 выходных напряжений от 5,1 до двуполярных 15 В	Aeroflex	0,1
ACT8633	Преобразователь входного (13–52 В) напряжения в 10 выходных напряжений от 5,1 до двуполярных 15 В	Aeroflex	0,1
ACT8634	Преобразователь входного (13–52 В) напряжения в 10 выходных напряжений от 5,1 до двуполярных 15 В	Aeroflex	0,1
VRG8601	Регулятор положительного напряжения в диапазоне от 1,2 до 37 В.	Aeroflex	0,1
VRG8602	Регулятор отрицательного напряжения в диапазоне от 1,2 до 22 В.	Aeroflex	0,1
PWM5031	Широтно-импульсный модулятор	Aeroflex	1,0

Таблица 11

Радиационная стойкость микросхем различного назначения [29]

Тип изделия	Функциональное назначение изделия	Фирма-изготовитель	Радиационная стойкость, Мрад
ACT8500–ACT8505	16-канальные коммутаторы с различным количеством каналов	Aeroflex	0,3
ACT5108/5109	Драйверы бесщеточных двигателей постоянного тока	Aeroflex	0,3
UY200SpWPHY01	Приемопередатчик последовательной связи между отдельными системами космического аппарата	Aeroflex	1,0
UT7R995/995C	Формирователь синхроимпульсов	Aeroflex	до 1,0
PM139	Компаратор	Analog Devices	0,2
CMP01	Компаратор	Analog Devices	0,2
LF198H	Прецизионный усилитель	Analog Devices	0,2

По последней предварительной информации фирма Aeroflex готовится выпустить микросхему приемопередатчика UT200SpWPHY01, осуществляющую последовательную связь между отдельными системами космического аппарата. Она устойчива к внутренним «защелкиваниям», радиационная стойкость к ИИ достигает 1 Мрад. Этот приемопередатчик включает в себя 2-битные преобразователи параллельного кода в последовательный и последовательного кода в параллельный. Выходные сигналы приемника и входные передатчика имеют уровень LVDS. Он обеспечивает скорость передачи сигналов до 200 Мбит/с.

Также фирма Aeroflex разработала радиационно-стойкие (до 1 Мрад к ИИ) и устойчивые к одиночным событиям (LET ≈ 109 МэВ·см^2/мг) формирователи синхроимпульсов, имеющие восемь низковольтных ТТЛ-выходов UT7R995 и UT7R995C. Диапазон частот выходных сигналов: от 6 до 200 МГц. Имеется также возможность ступенчатой регулировки фазы или сдвига синхроимпульсов.

Наконец следует отметить два компаратора CMP01 и PM139 фирмы Analog Devices, выполненные по биполярной технологии, и прецизионный усилитель LF198H, также выполненный по биполярной технологии, радиационная стойкость которых к гамма-излучению достигает 200 крад. В табл. 11 представлены данные по радиационной стойкости микросхем различного назначения.

Литература

1. Вавилов В.С., Ухин Н.А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. – М.: Атомиздат,1969. – 312 с.
2. Ладыгин Е.А. Радиационная технология твердотельных электронных приборов. – М.: ЦНИИ «Электроника», 1976. – 112 с.
3. Вологдин Э.Н., Лысенко А.П. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах и методы испытаний изделий полупроводниковой электроники на радиационную стойкость. – М.: НОЦ МГИЭМ, 2002. – 46 с.
4. Основы радиационной технологии микроэлектроники. Механизмы образования и физическая природа радиационных центров в полупроводниковых структурах / Е.А. Ладыгин, А.В. Паничкин, Н.Н. Горюнов и др. – М.: МИСиС, 1994. – 174 с.
5. Основы радиационной технологии микроэлектроники. Первичные процессы образования радиационных центров в полупроводниковых кристаллах / Е.А. Ладыгин, А.В. Паничкин, Н.Н. Горюнов и др. – М.: МИСиС, 1994. – 192 с.
6. Radiation effects on electronic components and circuits / Martin Dentan // European Organization for Nuclear Research CERN Training, April 10–12, 2000 «Radiation effects on electronic components and systems for LHC», First course: Radiation Effects on Electronic Components.
7. Watkin's G. Radiation Damage in Semiconductors. N. Y.: Akad. Press, 1965. – 81 p.
8. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / В. М. Кулаков, Е.А. Ладыгин, В.И. Шаховцев и др. – М.: Сов. Радио, 1980. – 224 с.
9. Вавилов В.С., Кекелидзе Н.П., Смирнов Л.С. Действие излучений на полупроводники. – М.: Наука, 1988. – 192 с.
10. Исследование радиационных нарушений в монокристаллах кремния, германия и арсенида галлия / В.Д. Ткачев: Дисс. На соиск. степ. д-ра физ.-мат. наук. – Минск, БГУ, 1967. – 225 с.
11. Electron – Hole Recombination in Germany / R.N Hall // Phys. Rev., 1952. – V. 87. – № 2. – P. 387.
12. Statistics of Recombination of Holes and Electrons / W. Shockley, W. T. Read // Phys. Rev., 1952. – V. 87. – № 5. – P. 835–842.
13. The Interaction of Point Defects with Impurities in Silicon / M. Hirata, H. Saito // J. Phys. Soc. Jap., 1969. – V. 27. – № 2. – P.. 405–414.
14. Studies of Recombination Centers in Gamma-Irradiated p-Type Silicon / K. Nakashima, Y. Inuishi // J. Phys. Soc. Jap., 1970. – V. 29. – № 6. – P. 1500–1512.
15. Особенности радиационного повреждения полупроводников частицами высоких энергий / Р.Ф. Коноплева, В.Л. Литвинов, Н.А. Ухин. – М.: Атомиздат, 1971. – 76 с.
16. К вопросу о характере нарушений, возникающих в бездислокационном кремнии при облучении быстрыми нейтронами / С. Х. Кушнир, Л. Г. Николаева // ФТТ, 1966. – Т.8. – № 3. – С. 982–984.

17. Дефекты, созданные в кремнии облучением быстрыми нейтронами при 77 К / Р.Ф. Коноплева, С.Р. Новиков, Э.Э. Рубинова // ФТТ, 1966. – Т. 8. – Вып. 2. – С. 674–679.
18. Анализ изменения параметров МОП-транзисторов при длительном хранении КМОП ИМС / Г.Ф. Белова, В.Д. Попов, Т.А. Селуянова // Научная сессия МИФИ. – М.: МИФИ, 2004. – Т. 1. – С. 91–92.
19. Першенков В.С., Попов В.Д., Шальнов А.В. Поверхностные радиационные эффекты в элементах ИМС. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 256 с.
20. Данилин Н.С., Белослудцев С.А. Отбраковка современной космической электронной компонентной базы. – М.: МАКС Пресс, 2006. – 86 с.
21. Горлов М., Строгонов А. Геронтология кремниевых интегральных схем. Часть 1. Chip News, 2000. – № 3. – С. 22–25.
22. Сравнение радиационного и термического старения МОП интегральных микросхем / Г.Ф. Белова, В.Д. Попов, Чжо Ко Вин // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2012. – Вып. 2. – С. 51–58.
23. Simple technique for separating the effects of interface traps and charge metal – oxide – semiconductor transistors / P. J. McWhorter, P.S. Winokur // J. Appl. Phys. Lett., 1986. – V. 48. – № 1. – P. 133–135.
24. Моделирование радиационных эффектов в КМОП ИС при воздействии электронного облучения различной интенсивности / В.В. Емельянов, О.В. Мещуров, В.Ш. Насибуллин, Р.Г. Усеинов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру,. 1995. – Вып. 1–2. – С. 51–58.
25. Моделирование и экспериментальные исследования воздействия спецфакторов на ИС с целью их классификации по стойкости: отчет НИР / Е.А. Ладыгин. – М.: МИСиС, 1989. – 115 с.
26. Радиационное дефектообразование в диодных структурах при облучении электронами с различной интенсивностью / К.П. Абдурахманов,Т. Шеримбетов, Ю.М. Добровинский, Х.У. Сагдуллаев // ФТП, 1988. – Т. 22. – Вып. 3. – С. 510–512.
27. Влияние интенсивности облучения электронами на накопление А-центров в области пространственного заряда в кремнии / О.В. Бобрикова, Н.Н. Герасименко, В.Ф. Стась // ФТП, 1988. – Т. 22. – Вып. 12. – С. 2236–2239.
28. Коршунов Ф.П., Богатырев Ю.В., Вавилов В.А. Воздействие радиации на интегральные микросхемы. – Минск: Наука и техника, 1986. – 233 с.
29. Ветров Е.Ф., Зарудский В.Ф., Ухин Н.А., Шапкин А.А. Анализ отечественной и зарубежной элементной базы, необходимой для разработки бортовой аппаратуры КА с ЯЭУ: отчет НИЦ «Курчатовский институт». – М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2005. – 66 с.
30. Ветров Е.Ф., Зарудский В.Ф., Ухин Н.А., Шапкин А.А. Принципиальные возможности создания радиационно-стойкой аппаратуры: отчет НИЦ «Курчатовский институт». – М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2005. – 46 с.

31. Ветров Е.Ф., Зарудский В.Ф., Ухин Н.А., Шапкин А.А. Анализ состояния радиационной стойкости зарубежной электронной базы вычислительной техники: отчет НИЦ «Курчатовский институт». – М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2004. – 38 с.
32. Ветров Е.Ф., Зарудский В.Ф., Ухин Н.А., Шапкин А.А. Анализ развития радиационно-стойкой отечественной элементной базы аппаратуры: отчет НИЦ «Курчатовский институт». – М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2009. – 31 с.
33. Ветров Е.Ф., Зарудский В.Ф., Ухин Н.А., Шапкин А.А. Анализ развития радиационно-стойкой зарубежной элементной базы аппаратуры за пятилетие с 2004 по 2009 гг.: отчет НИЦ «Курчатовский институт». – М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2009. – 26 с.

Научное издание

Безродных Иннокентий Петрович, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник отдела физики плазмы ИКИ РАН.
Тютнев Андрей Павлович, д-р физ.-мат. наук, профессор НИУ ВШЭ.
Семёнов Владимир Тимофеевич, начальник лаборатории АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В КОСМОСЕ

ЧАСТЬ 3. ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИЗДЕЛИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Монография

Редакторы *А. Б. Алабужева, Т. Б. Панкратова*
Корректор *Е. В. Фаррахова*

Подписано в печать.2.10.2017.
Формат 70 × 100 1/16.
Печ. л. 5,16. Тираж 300 экз.

Адрес редакции:
АО «Корпорация «ВНИИЭМ»,
105187, г. Москва, ул. Вольная, дом 30.
Телефон: 8(495) 365-30-63.
E-mail: redactori@mail.ru.

Отпечатано в ООО «САМ-ПОЛИГРАФИСТ»
Москва, Волгоградский просп., д. 42, корп. 5.
8 (495) 547-37-10