

УДК 544.541

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ ПРИ СОВМЕСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НА ЭТАПЕ КОНСТРУИРОВАНИЯ

© 2023 г. П. И. Дидык¹ *, А. А. Жуков¹

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

*Felix_engine@mail.ru

Поступила в редакцию 10.07.2022 г.

После доработки 26.12.2022 г.

Принята к публикации 27.12.2022 г.

Представлена оценка совместного действия дестабилизирующих факторов космического пространства на типовые микроэлектронные компоненты в конструкции бортовой аппаратуры космического аппарата, показана оценка характеристик микроэлектронных компонентов в условиях воздействия радиации.

DOI: 10.31857/S0023420622600209, EDN: BVDRNL

ВВЕДЕНИЕ

Задача обеспечения радиационной стойкости бортовой микроэлектронной аппаратуры, применимой в космических аппаратах (КА), является одной из наиболее важных задач, напрямую влияющей на работоспособность и срок активного существования КА в целом.

Целью работы является оценка радиационной стойкости микроэлектронных приборов в условиях воздействия нескольких факторов на этапе проектирования бортовой аппаратуры космического аппарата.

Для подтверждения работоспособности бортовой микроэлектронной аппаратуры космического аппарата (БО КА) в условиях воздействия дестабилизирующих факторов космического пространства (ДФКП) в части радиационного воздействия проводится только оценка стойкости БО КА к воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) и ионизирующего излучения КА по дозовым эффектам, что является недостаточным реальным условиям функционирования БО КА. Для получения наиболее приближенных данных по влиянию ДФКП на приборы, эксплуатируемые в космическом пространстве, необходимо учитывать совместное влияние нескольких внешних воздействующих факторов на электрические характеристики микроэлектронной аппаратуры и на радиационную стойкость в целом.

УСЛОВИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Изначально определяется назначение БО, условия ее функционирования, расположение внутри или снаружи КА. Определяется орбита, время активного функционирования аппаратуры и возможное прохождение над районом Южно-атлантической аномалии (ЮАА), представляющей собой область с пониженной силой магнитного поля планеты, распространяющуюся над Южной Америкой и южной частью Атлантики (http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/rosat/gallery/misc_saad.html). Поток протонов естественного радиационного пояса Земли (ЕРПЗ) максимален в районе прохождения ЮАА. В этой области величина магнитного поля на уровне океана такая, как на высоте порядка 1000 км вне аномалии. ЮАА представляет собой снижение уровня магнитосферы в этой зоне, вследствие чего КА на низкой орбите Земли, проходя через ЮАА, выходит из-под защитного поля естественной защиты Земли (магнитосферы) и подвержен воздействию потоков протонов и электронов из космического пространства. Известно, что из-за ослабленного магнитного поля Земли и появления на низких орбитах высокоэнергетических потоков заряженных частиц, находящихся в околоземном пространстве (<https://www.nasa.gov/feature/nasa-researchers-track-slowly-splitting-dent-in-earth-s-magnetic-field>),

при прохождении КА фиксируют сбои и отказы бортовой аппаратуры. В [1] рассмотрен эффект влияния пространственной ориентации *Международной космической станции (МКС)* на мощность дозы при прохождении станции ЮАА. Недавний прогноз показывает, что Южно-атлантическая магнитная аномалия мигрирует на запад [2].

Радиационная обстановка на борту КА, в основном, определяется следующими источниками ионизирующего излучения (ИИ): электроны и протоны естественных радиационных поясов Земли, протоны Солнечных космических лучей (СКЛ), галактические космические лучи (ГКЛ) [3]. Протоны и тяжелые заряженные частицы ГКЛ представляют опасность, как правило, с точки зрения генерации эффектов одиночных событий в ИС высокой степени интеграции и их вклад в интегральные дозовые эффекты в дальнейшем не учитывается. Околоземное космическое пространство (КП) с точки зрения формирования радиационной обстановки в объеме КА можно условно разделить на две основные зоны. Внешняя зона состоит из захваченных электронов с максимальной энергией ≈ 7 МэВ; внутренняя зона содержит захваченные электроны и протоны с энергиями до 400 МэВ. Интенсивность и энергетический спектр электронного и протонного излучений КП сильно зависят от высоты орбиты и, в меньшей степени, от угла наклона. Отказы и функциональные сбои радиоэлектронной аппаратуры КА в значительной степени определяются радиационными эффектами в современной электронной компонентной базе (ЭКБ). Наиболее радиационно-критичная ЭКБ БО КА – изделия микроэлектроники, твердотельные СВЧ и оптоэлектроника. Доминирующие механизмы отказов – дозовые и одиночные эффекты.

Микроэлектронные устройства, подверженные влиянию радиации можно подразделить на типовых представителей: статические оперативные запоминающие устройства (СОЗУ), микропроцессоры (МП), перепрограммируемые постоянные запоминающие устройства (ППЗУ, flash), вторичные источники питания (ВИП), ПЛИС, приемопередатчики, буфера, дискретные диоды, твердотельные СВЧ приборы, оптоэлектронные устройства. Общее количество сбоев и отказов ЭКБ БО КА из-за радиационных факторов составляет 35–40%, из них 2/3 приходится на эффекты от воздействия высокоэнергетичных протонов (ВЭП) и тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ). Уровень радиационных воздействий в каждой зоне зависит от используемых материалов и толщины конструкционной защиты, а также от параметров орбиты. В настоящее время эффекты, вызываемые в изделиях микроэлектронной техники одиночными заряженными частицами космического пространства, являются одной из главных причин, ограничивающих стойкость радио-

электронной аппаратуры на борту космического аппарата.

При воздействии на активные ЭК ИИ космического пространства вызывает дозовые эффекты, как результат воздействия электронов и протонов (частицы низких энергий до 1 МэВ), и одиночные события радиационных эффектов, как результат воздействия СКЛ и ГКЛ – ТЗЧ и протонов (частицы с энергий более 1 МэВ) [4].

Эффекты воздействия полной дозы связаны с накоплением положительного заряда в диэлектриках и проявляются в КМОП-схемах несколькими основными путями (<https://habr.com/ru/post/452128>).

ОЦЕНКА СОВМЕСТНОГО ВЛИЯНИЯ НЕСКОЛЬКИХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ

На бортовую аппаратуру и материалы, входящие в состав КА одновременно воздействуют ДФКП, к которым относят атомарный кислород, вакуум, УФ-излучение, радиационное, микрометеоритное, термоциклическое, плазменное воздействие и другие [5]. Наиболее известны и изучены эффекты от воздействия факторов космического пространства на материалы. Например, набегающий поток атомарного кислорода в вакууме на полиимидные пленки приводит к образованию анизотропии [6]. Об эффектах при одновременном воздействии ДФКП на материалы и аппаратуру, усиливающих или, наоборот, ослабляющих электрические характеристики сообщалось ранее в работах НИИЯФ МГУ [7, 8].

Оценка стойкости аппаратуры на соответствие требований по сбое-отказоустойчивости под воздействием потоков и тяжелых заряженных частиц проводится в соответствии с [9] с использованием спектров. Метод [9] основан на расчете частоты сбоев микроэлектронной аппаратуры за счет действия заряженных частиц космического пространства и проводится по математической модели согласно [10]. Частота сбоев составных частей аппаратуры (микроэлектронных компонентов) определяется отдельно для заряженных частиц СКЛ, ГКЛ и радиационного поля земли (РПЗ) с учетом толщины защитного экрана. Суммарная частота сбоев за счет действия заряженных частиц РПЗ, ГКЛ и СКЛ численно равна сумме частот сбоев за счет действия заряженных частиц РПЗ, ГКЛ и СКЛ. Вероятность возникновения катастрофического отказа БО КА за счет действия ТЗЧ космического пространства рассчитывается согласно [10]. В зависимости от требуемой вероятности безотказной работы определяется необходимая толщина внешней защиты. Оценка стойкости микроэлектронной аппаратуры к воздействию электронного и протонного излучений

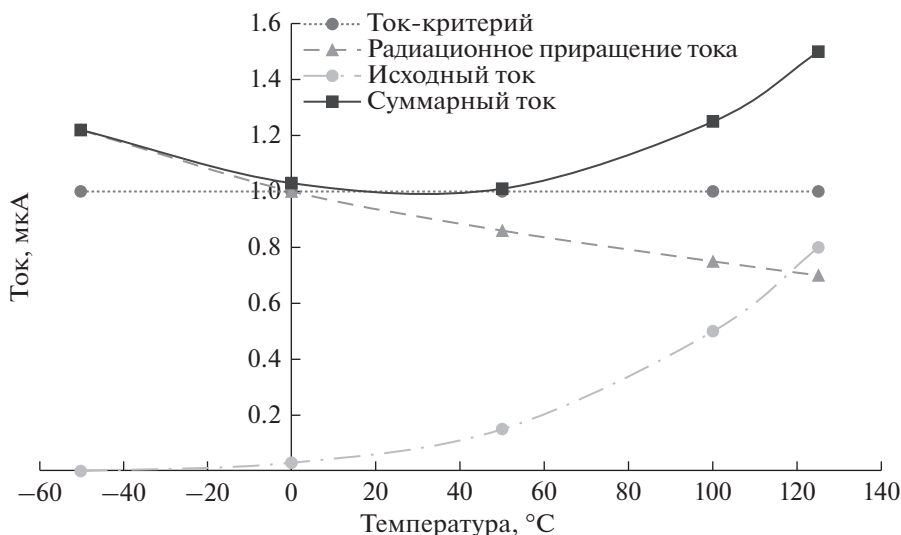


Рис. 1. Пример температурного и радиационного влияния на диодную структуру.

космического пространства по дозовым эффектам проводится в соответствии с [11]. Расчет уровня стойкости блока микроэлектронной аппаратуры проводится поэлементным методом и заключается в сравнении уровня стойкости каждого типа ЭК с уровнем радиационного воздействия на него (поглощенных доз электронов, протонов и суммарной дозы), определенного расчетным путем. Результатом оценки является коэффициент запаса по радиационной стойкости [4]. С ростом высоты орбиты накопленная доза растет, а с увеличением толщины защиты — уменьшается. Исключение: радиационные пояса Земли, где радиационный фон выше, чем вне их.

При оценке радиационной стойкости БО КА также необходимо учитывать влияние других внешних воздействующих факторов на радиационную стойкость ЭКБ, например, влияние температуры. Проблема температурных эффектов: исходные значения параметров-критериев могут гораздо сильнее зависеть от температуры, чем радиационные приращения. На рис. 1 представлен пример совместного температурного и радиационного влияния на дискретный полупроводниковый диод, выполненный по биполярной технологии на кремниевом основании. Известно, что при увеличении температуры возрастает концентрация неосновных носителей в кристалле полупроводника. Это приводит к росту обратного тока перехода, а также уменьшению объемного сопротивления области базы. При увеличении температуры обратный ток насыщения увеличивается примерно в 2 раза у германиевых и в 2.5 раза у кремниевых диодов на каждые 10°C. Радиационное приращение тока утечки связано с ионизацией структуры при облучении ионами с определенным значением интегрального потока (флюенса). Ток

утечки диода при совместном воздействии двух факторов равен сумме токов утечки при воздействии каждого фактора.

Еще один пример — изменение температуры окружающей среды приводит к более сильной деградации пороговых напряжений в низковольтных MOS транзисторах для BCD (bipolar-CMOS-DMOS) и SOI (silicon on insulator) в условиях набора дозы радиации (рис. 2 и 3) [12]. Эту зависимость можно объяснить тем, что с увеличением температуры окружающей среды увеличивается подвижность носителей заряда. Причем в противодействие вступают 2 эффекта: обладающие большей подвижностью заряды имеют больше шансов достичь центры захвата до рекомбинации, и одновременно повышается вероятность рекомбинировать с другими носителями по пути к центрам захвата.

Оценка совместного влияния нескольких факторов при оценке радиационной стойкости на этапе проектирования и предварительных испытаний сводится к:

- расчетному анализу совместных влияний двух и более факторов на аппаратуру;
- экспериментальному исследованию конкретного прибора на совместное воздействие всех факторов.

В результате чего возможно сформировать базу совместного действия различных факторов на радиационную стойкость различных микроэлектронных приборов, что позволит в дальнейшем упростить разработку новой аппаратуры и избежать возможных отказов ее на этапе эксплуатации.

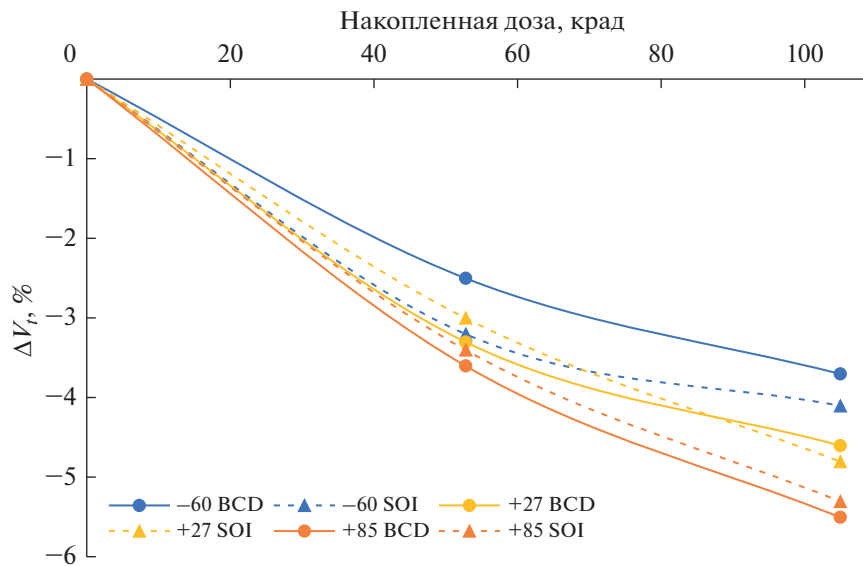


Рис. 2. Изменение пороговых напряжений ΔV_t низковольтных NMOS транзисторов для BCD и SOI от температуры окружающей среды в условиях набора дозы радиации [12].

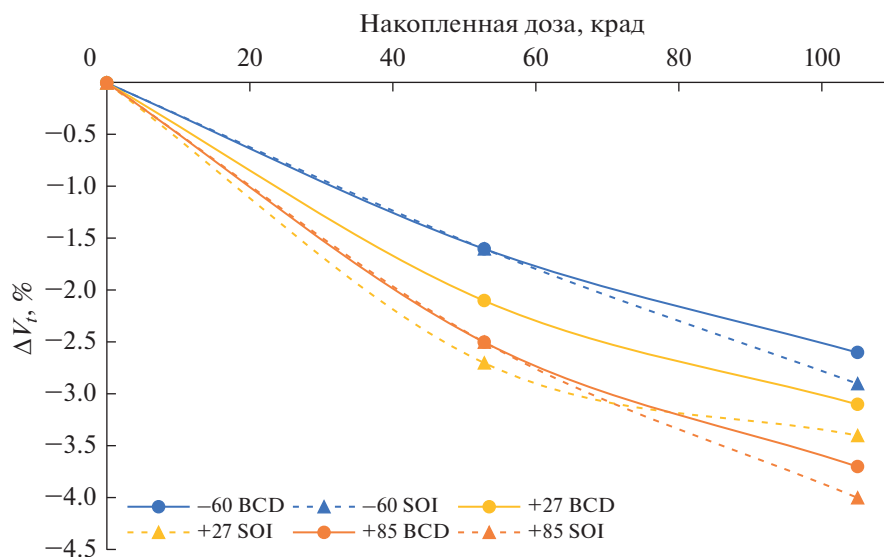


Рис. 3. Изменение пороговых напряжений ΔV_t низковольтных PMOS транзисторов для BCD и SOI от температуры окружающей среды в условиях набора дозы радиации [12].

КОНСТРУКТИВНЫЕ МЕРЫ ЗАЩИТЫ ОТ РАДИАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Задача по обеспечению стойкости БО КА к ДФКП состоит в подборе микроэлектронных компонентов, обеспечивающих требуемую радиационную стойкость, а также разработку конструкции и корпуса БО КА, позволяющих снизить энергетическое воздействие на ЭК за счет поглощения или снижения части энергии. Для предварительной оценки локальных дозовых нагрузок в элементах КА и защитных свойств кон-

струкционных материалов нужно рассмотреть изменение дозы ИИ КП от толщины защиты в стандартной геометрии. Связанность дозы электронного излучения от толщины барьера из алюминия имеет характерную двугорбую зависимость с максимумами вблизи 4000 и 20000 км. Максимальная доза протонного излучения достигается на высоте примерно 3000 км [13].

Рассмотрение основных результатов расчетных исследований по оптимизации состава и структуры защитных экранов для элементов мик-

роэлектроники КА следует начать с анализа эффективности ослабления дозовых характеристик ИИ КП однородными барьерами из материалов с различным атомным номером Z . Вольфрам обладает лучшими защитными свойствами для электронов КП, алюминий — для протонов. Полная доза электронов и протонов КП в диапазоне толщин до 2.0 г/см^2 эффективнее ослабляется защитным барьером из вольфрама [13]. Дальнейшая оптимизация локальной радиационной защиты заключается в том, чтобы при заданной массовой толщине защитного экрана подобрать комбинацию однородных слоев из доступных компонентов, обеспечивающую максимальное ослабление дозовых характеристик ИИ КП для заданных спектрально-энергетических характеристик и флюенсов электронов и протонов КП.

В многочисленных исследованиях [14–19] показано, что радиационная защита наиболее эффективна тогда, когда материал с высоким атомным номером Z располагается между слоями материала с низким атомным номером. При фиксированной массовой толщине защитного экрана в диапазоне от 0.5 до 1.5 г/см^2 такая композиция позволяет снизить полную дозу электронов и протонов КП от трех до пяти раз по сравнению с однородной защитой, например, из алюминия.

Оптимальные защитные свойства представленной выше трехслойной структуры определяются рассмотренными выше зависимостями тормозных способностей материалов от их атомного номера Z . Внешний слой алюминия ослабляет высокоэнергетические электроны, но в то же время является источником тормозного излучения. Средний слой из тяжелого материала (вольфрам) эффективно ослабляет тормозное излучение (ТИ) благодаря высокому сечению фотоэффекта, однако генерирует фотокомптоновские электроны. Генерация ТИ в среднем слое незначительна. Кроме того, вольфрам эффективно замедляет выходящие из первого слоя первичные электроны. Наконец, третий слой (алюминий) полностью отсекает вторичные фотокомптоновские электроны, а также ослабляет ТИ, выходящее из первого слоя.

Начиная с толщин защиты от 1.5 – 2.0 г/см^2 при воздействии электронного и протонного излучений космического пространства (ионизирующего излучения) накопленная доза, приводящая к дозовым (необратимым параметрическим) эффектам в микроэлектронике, возрастает значительно медленнее, поскольку определяется вторичным тормозным излучением [13]. Электроны не проходят слои более 3 г/см^2 . Для протонов, начиная с толщин 1.0 – 1.5 г/см^2 , спад дозы также замедляется, поскольку в спектре протонов после отсечки низкоэнергетической части остаются высокоэнергетические протоны с большой проника-

ющей способностью. Отсюда следует, что массовые толщины защитных экранов (включая толщину корпуса изделия), лежат в диапазоне до 2.0 г/см^2 . Поэтому применение дополнительных защитных экранов при суммарной толщине конструктивных материалов КА (включая толщины корпусов приборов и отдельных ИС) более указанной величины не приводит к заметному снижению локальных дозовых нагрузок в объеме КА.

КОНСТРУКТИВНЫЕ МЕРЫ ЗАЩИТЫ ОТ ЛОКАЛЬНЫХ ПЕРЕГРЕВОВ

Так как на электрические характеристики оказывает влияние температура функционирования, то обеспечение допустимого температурного диапазона является также актуальным.

Для обеспечения теплоизоляции аппаратуры используется многослойная внешняя теплоизоляция, в частности, на основе таких материалов как:

- стеклоткань ТСОН-СОТМ-БЦ [20];
- экранно-вакуумная теплоизоляция ЭВТИ-2Б-М-21 [21];
- экранно-вакуумная теплоизоляция ЭВТИ-2И1-4 [21].

Наружный облицовочный слой стеклоткани ТСОН-СОТМ-БЦ выполнен из отражающего поток солнечной радиации материала. При этом наружная облицовочная стеклоткань пропускает примерно 40% потока солнечной радиации.

Внутренние слои ЭВТИ — это набор экранов, состоящих из материалов с высокой отражающей способностью, разделенных прокладками из материалов с низкой теплопроводностью.

В ЭВТИ-2Б-М-21 в качестве экранов применяется пленка полиэтилентерефталатная (ПЭТ) металлизированная алюминием, формованная на металлической сетке. В ЭВТИ-2И1-4 в качестве экранов применяется пленка полиимидная ПМ-1ЭУ-ДА, толщиной 20 мкм . В качестве прокладок используется холст стекловолокнистый ХСВН-7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен пример оценки радиационной стойкости микроэлектронной аппаратуры, эксплуатируемой в составе космического аппарата. Рассмотрены факторы воздействия радиации космического пространства на БО КА, показано влияние других факторов на радиационную стойкость ЭКБ, в частности, влияние температуры. Выявлена взаимозависимость нескольких факторов на электрические характеристики микроэлектронной аппаратуры, определена необходимость комплексной защиты от совместного действия радиации и температуры в БО КА. Совместное действие радиации и повышенной температуры может приводить как к ускоренной

деградации, так и к уменьшению количества структурных дефектов за счет отжига, что необходимо учитывать на этапе конструирования. Представлены конструктивные меры защиты от радиационного излучения и от локальных перегревов, позволяющие минимизировать влияние каждого воздействующего фактора на изменение характеристик микроэлектронных приборов в целом. Инженерная реализация защиты зависит от орбиты нахождения КА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дробышев С.Г., Бенгин В.В. Мощность дозы в служебном модуле станции при прохождении области Южно-атлантической аномалии // Космические исследования. 2011. Т. 49. № 5. С. 411–418.
2. Григорян О.Р., Петров А.Н. Дрейф Южно-атлантической магнитной аномалии по данным спутника SAMPEX за период с 1993 по 2004 год // Конференция молодых ученых “Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы” / Труды. Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. 2007. С. 109–112.
3. Таперо К.И., Улимов В.Н., Членов А.М. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012.
4. Жаднов В.В., Полесский С.Н., Артюхова М.А., Прохоров В.П. Обеспечение радиационной стойкости аппаратуры космических аппаратов при проектировании // Компоненты и технологии. 2010. Т. 110. № 9. С. 93–98.
5. Панасюк М.И., Новиков Л.С. Модель космоса: Научно-информационное издание: В 2 томах. М.: Книжный дом “Университет”, 2007.
6. Пасевич О.Ф. Исследование свойств и структуры полиимидных пленок после воздействия факторов космического пространства низких земных орбит: Дис. ... канд. хим. наук: 02.00.09 Обнинск, 2006. 113 с. РГБ ОД, 61:06-2/401.
7. Новиков Л.С. Настоящее и будущее космического материаловедения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2010. № 4. С. 25–32.
8. Новиков Л.С. Взаимодействие космических аппаратов с окружающей плазмой. М.: Университетская книга, 2006.
9. РД 134-0139-2005. Нормативный документ по стандартизации РКТ. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы оценки стойкости к воздействию заряженных частиц космического пространства по одиночным сбоям и отказам. М.: ЦНИИмаш. 2005.
10. Парамонов И.Б., Мазин А.В., Ливенцев В.А. Повышение надежности средств защиты информации при работе в условиях ионизирующих излучений космического пространства // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 6. С. 105–112.
11. ОСТ 134-1034-2012. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического пространства к воздействию электронного и протонного излучения космического пространства по дозовым эффектам. М.: Госстандарт, 2012.
12. Нагорнов А.Ю. Исследование и разработка методики повышения стойкости высоковольтных КМОП микросхем к накопленной дозе радиации [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.27.01 / Нагорнов Алексей Юрьевич. М., 2022. 116 с. <https://e-catalog.nlb.by/Record/BY-NLB-br0001759268>
13. Вилков Ф.Е. Разработка композитного радиационно-защитного покрытия для радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.06 / Вилков Федор Евгеньевич. М., 2018. 122 с.
14. Källén G. Elementary particle physics. MA: Addison-Wesley, 1964.
15. Джур Е.А., Санин А.Ф., Божко С.А. Композиционный материал для защиты радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов от ионизирующего излучения // Вест. СибГАУ. 2013. № 6.
16. Андрианов А.Ю., Белоус В.А. Ослабление гамма-излучения многослойными полимерными дисперсно-наполненными структурами // Вопросы атомной науки и техники. 2010. № 5. С. 73–75.
17. Lohmeyer W.Q., Cahoy K. Space Weather: Intern // J. Res. Appl. 2013. V. 11. P. 476.
18. Аккерман А.Ф. Моделирование траекторий заряженных частиц в веществе. М.: Энергоатомиздат. 1981. 200 с.
19. Заболотный В.Т., Старостин Е.Е., Кочетков А.В. Оптимальные составы для локальной защиты бортовой электроники от космической радиации // Физика и химия обработки материалов. 2008. № 5. С. 8–14.
20. ТУ 5952-001-17547599-94. Ткань стеклянная марки ТСОН и лента стеклянная марки ЛСОН.
21. ОСТ 92-1380-83. Изоляция тепловая экранно-вакуумная. Марки и технические требования.