

АНАЛИЗ КОРПУСОВ ДЛЯ РАДИАЦИОННО-УСТОЙЧИВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

А.А. Миронов

maa21u872@student.bmstu.ru

В.И. Хлебников

khvi21u717@student.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Рассмотрена проблема обеспечения радиационной стойкости интегральных микросхем (ИМС) за счет их специального корпусирования. Подчеркивается актуальность разработки радиационно-устойчивых компонентов для ключевых отраслей, таких как космическая и атомная промышленность. Проанализированы факторы радиационного воздействия на ИМС, методы их защиты и существующих решений на мировом рынке. Выявлены ключевые преимущества специализированных корпусов, включая снижение массы и размеров защитных элементов, а также использование коммерческих компонентов для адаптации к специальным требованиям. В работе выделены направления перспективных исследований, включая использование новых материалов и технологий экранирования. Практическая значимость заключается в рекомендациях по выбору защитных корпусов для ИМС, повышающих их надежность и долговечность в условиях радиационного облучения.

Ключевые слова: радиационная стойкость, интегральные микросхемы, корпусирование, радиационное воздействие, радиационная защита, радиационно-стойкая электроника, космическая промышленность, атомная энергетика, радиационно-защитные экраны, композитные материалы

Введение. Корпусирование радиационно-стойких микросхем является актуальной проблемой в современной электронике. Благодаря широкому распространению микросхем в космической, ядерной и других отраслях требования к радиационной стойкости микросхем также возрастают. Радиационные воздействия могут вызывать различные дефекты в микросхемах, что приводит к снижению их надежности и долговечности.

Важность радиационно-стойких микросхем заключается в их способности функционировать в условиях высоких доз радиации, которые могут привести к выходу из строя обычных микросхем. Это особенно актуально для атомных реакторов, где существует постоянный нейтронный поток (а также вызванное им тормозное рентгеновское излучение внутри конструкционных материалов), и для космических применений радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), где возможно взаимодействие со всеми видами высокоэнергетических частиц, а также излучений.

Потребность в расширении выпуска радиационно-устойчивых интегральных схем на территории РФ связана с желанием достичь автономии в секторе передовых технологий. Важно развивать внутреннее производство подобных компонентов для гарантирования защиты ключевых объектов и систем от внешних угроз, а также для укрепления экспортного потенциала страны в домене инновационной продукции.

Для стратегически важных отраслей национальной экономики, таких как космическая и атомная промышленность, критически необходима поставка отечественных радиационно-устойчивых микросхем. В сфере космонавтики, развивающейся согласно стратегии по расширению орбитальных группировок для обеспечения связи, задач дистанционного зондирования Земли и орбитально-военных задач, чрезвычайно важны надежность и продолжительность службы электроники для гарантированного успеха космических программ. В атомной энергетике, где системы контроля и управления занимают ключевую позицию в обеспечении безопасности, их функциональная исправность является страховкой против непредвиденных инцидентов и катастроф.

Следовательно, микросхемы с высокой радиационной устойчивостью становятся ключевым элементом в арсенале современных технологических решений, играя важную роль в поддержании функционирования и безопасности критически важных систем при воздействии интенсивного радиационного излучения. Расширение производства соответствующей электронно-компонентной базы (ЭКБ) в России способствует наращиванию стратегической технологической автономии и повышает уровень суверенности ключевых секторов экономики.

Также отметим, что в Стратегии развития микроэлектронной отрасли РФ до 2030 года особо отмечается критическая зависимость по ЭКБ для космической (т. е. радиационно-стойкой) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), отставание общих микроэлектронных технологий в диапазоне от 10 до 20 лет, трудности в создании радиационно-стойких компонентов с техпроцессом, меньшим уровня 210...180 нм.

Таким образом, тема корпусирования радиационно-стойких интегральных микросхем (ИМС) чрезвычайно актуальна для микроэлектронной промышленности РФ. Отметим, что несмотря на широкое изучение процессов радиационного воздействия на микросхемы, а также методов защиты ИМС, тема специального корпусирования ИМС для защиты от радиационных факторов редко присутствует в литературе.

Цель работы — анализ корпусов для ИМС с улучшенной устойчивостью к радиации, исследование реализации этих технологий в областях микро-

и нанoeлектроники и определение их роли в разработке и изготовлении электронных устройств.

Для достижения поставленной цели в работе решен следующий комплекс задач:

- проанализировать основные факторы воздействия радиации на микросхемы,
- исследовать область применения радиационно-стойких микросхем,
- рассмотреть методы защиты ИМС,
- проанализировать имеющиеся на международном рынке решения.

Методы исследований. Исследование построено на анализе различных научных литературных источников с помощью методов сравнения и обобщения, а также методов абстрагирования и формализации.

Используемые источники. При выполнении данной работы были использованы различные источники информации: как теоретические работы, касающиеся физических механизмов взаимодействия радиации на микросхемы (например, «Основы проектирования субмикронных микросхем» [1], «Ионизирующее космическое излучение и его эффекты на бортовые системы космических кораблей» [2]), так и научные работы, основанные на исследованиях серийно изготавливаемых изделий («Радиационно-защитные корпуса для изделий микроэлектроники компании «Тестприбор» [3], «Специализированные радиационно-защитные корпуса для изделий микроэлектроники» [4]).

Научная новизна работы заключается в создании классификации воздействующих на интегральные микросхемы радиационных факторов.

Практическая значимость состоит в выработке рекомендаций для выбора защитных корпусов для интегральных микросхем.

Анализ факторов радиационного воздействия на интегральные структуры. Проанализируем основные факторы радиационного воздействия на микросхемы.

Ключевые механизмы влияния ионизирующего излучения на материалы субстанции можно подразделить на две главные категории. Первая категория включает упругие столкновения ионизирующих частиц с атомными ядрами, которые приводят к сдвигам и изменениям в ядерной структуре, известным как ядерные потери. Вторая категория охватывает неупругие столкновения с оболочечными электронами атомов, результатом которых являются ионизационные потери. Этот процесс значительно активизируется в случаях, когда частицы, обладающие относительно невысокими скоростями, например, ионы, вступают в упругие столкновения с атомами вещества, эффективно передавая свою энергию атомным ядрам через упругие взаимодействия.

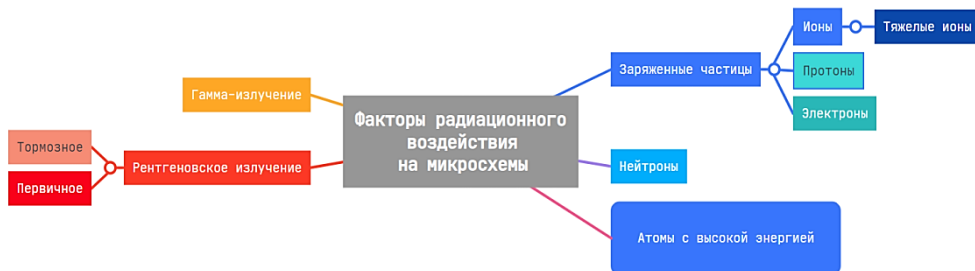


Рис. 1. Классификация факторов радиационного воздействия на интегральные структуры

При исследовании эффектов, вызванных высокоэнергетическими частицами и гамма-излучением на материалы, важнейшую роль занимает электронный механизм взаимодействия (рис. 1). Этот процесс характеризуется в основном торможением электронов в атомах с дальнейшей их ионизацией.

При столкновении с данным видом частиц атом в целевом материале может выйти из своего стабильного состояния, результатом чего является формирование междоузельного атома и вакансии, формирующие так называемые пары Френкеля. Процесс создания таких дефектов продлится до того момента, когда энергия частицы окажется недостаточной для дальнейшего смещения атомов. Учет воздействия этих дефектов важен, поскольку они серьезно влияют на характеристики материалов и их поведение при высокоэнергетическом воздействии.

При замедлении электронов, протонов и космических лучей на поверхности электронных устройств генерируются рентгеновское и гамма-излучения, а также высвобождаются тяжелые ионы. Такое облучение воздействует на CMOS-технологии (Complementary metal-oxide-semiconductor — комплементарные структуры «металл — оксид — полупроводник», КМОП), вызывая разнообразные эффекты [1]. К ним относятся накопление индуцированного положительного заряда в подзатворной области оксида и создание неосновного проводящего канала на интерфейсе «оксид — полупроводник». Пример процесса накопления индуцированного положительного заряда в подзатворной области показан на рис. 2.

Повышение мощности облучающего потока приводит к увеличению концентрации возникающих дефектов в материале, что способствует формированию определенного количества пар дефектов типа дефекта Френкеля. Данный процесс влияет на эффективность генерации пар Френкеля, которая усиливается с ростом интенсивности излучения.

Когда электроны и ионы проникают в компоненты КМОП, они провоцируют ионизационные процессы в затворной области и слое подзатворного

диоксида кремния (SiO_2), ведущие к аккумулярованию положительного электрического заряда внутри оксидного слоя. Это, в свою очередь, приводит к формированию электропроводного канала у границы с кремниевой подложкой. Такое взаимодействие разнообразных частиц с электронными компонентами играет важную роль в изменении характеристик устройства, затрагивая его функциональность и надежность. В качестве примера изменения характеристик на рис. 3 показано изменение эквипотенциальных поверхностей внутри n -канального транзистора. Данное изменение приведет к существенному изменению режимы работы транзистора в сторону ухудшения электрических характеристик [1].

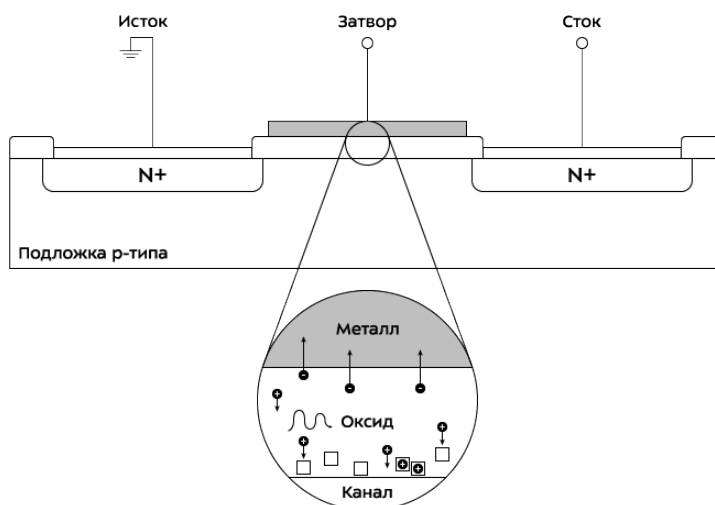


Рис. 2. Влияние ионизирующего излучения на КМОП-транзистор n -типа

Радиационное воздействие на интегральные структуры вызывает их ускоренное старение, что может приводить к значительным нарушениям их функциональности. Ключевыми последствиями такого воздействия служат изменение порогового напряжения и рост уровня токов утечки в полупроводниковых устройствах, преимущественно в транзисторах [5]. Степень этих изменений прямо пропорциональна как общей дозе радиации, полученной схемой, так и скорости ее облучения. К тому же, избыточный фотонный ток, индуцированный неожиданным потреблением высоких уровней радиации, способен вызвать критическое повышение напряжения в системах питания. Это может стать причиной появления непредвиденных ошибок в работе электронных компонентов, включая ошибки переключения (Single Event

Transients, SET, единичное ошибочное переключение), явление самоблокировки транзисторов (Latch-up, защелкивание) и дефекты в электропитании. Подобные явления могут оказать сильное воздействие на работоспособность и долговечность полупроводниковых устройств [5]. Таким образом, необходимо принимать в расчет влияние радиационного излучения на функциональность электроники, используя эффективные меры защиты для нивелирования вредного воздействия. Разработчикам и инженерам следует акцентировать внимание на подборе компонентов и технологий, направленных на снижение чувствительности интегральных схем к радиационным эффектам.

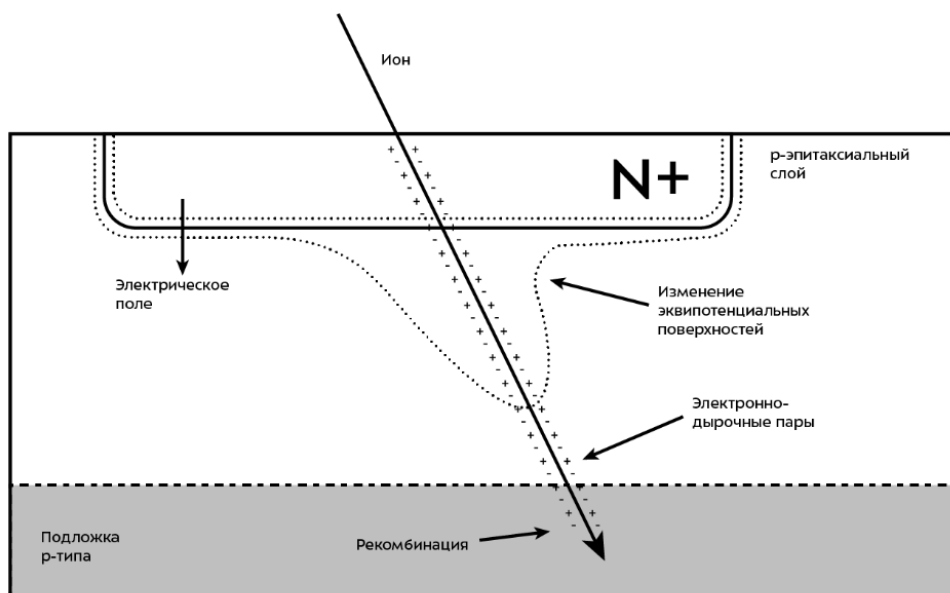


Рис. 3. Пример воздействия иона на *n*-канальный транзистор

Повреждения в функционировании полупроводниковых приборов (в частности, транзисторов) часто происходят из-за возрастания токов утечки, что влияет на уменьшение контраста между активным и пассивным состояниями. Это ведет к повышенному энергопотреблению и увеличению тепловыделения. Такие дефекты, индуцированные единичными ионными воздействиями (SEE, Single Event Effects), возникают в результате взаимодействия с тяжелыми ионами, включая космическое излучение — протонами, электронами и другими заряженными частицами, влияющими на работоспособность интегральных схем.

Когда данные частицы проникают в структуру полупроводника, они создают треки, состоящие из мобильных электрических зарядов. В контексте стандартных КМОП-устройств это ведет к формированию электронно-дырочных пар в области под затворным диэлектриком. Следствием может стать колебание характеристик транзисторов, влекущее за собой нарушения в функционировании электроники.

Понимание механизмов, возникающих в результате воздействия ионизирующих тяжелых частиц на структуру полупроводников, — ключевое для повышения эффективности и продолжительности службы электронных систем. Важно принимать в расчет потенциальные неисправности, спровоцированные внешними воздействиями, для усовершенствования производительности и надежности современной электроники.

Анализ потенциальных проблем, вызванных эффектом ионизации. Учитывая многообразие способов воздействия на интегральные структуры, особое внимание следует уделить специфическим инцидентам, связанным с ионизационными эффектами, известными как события с элементами ионизации (Single Event Effects, SEE). В их числе примечателен инцидент, называемый одиночным сбоем элемента (Single Event Upset, SEU), который, хоть и является наиболее распространенным, традиционно считается сравнительно безвредным. Такие сбои обычно происходят вследствие проникновения ионов в микросхемы памяти или в статические запоминающие устройства. Это приводит к временному изменению в логическом состоянии элемента, вызванному рекомбинацией электронов и ионизированных дырок, что генерирует токовый импульс и может привести к изменению бита с 1 на 0. Хотя в большинстве случаев правильное состояние может быть восстановлено посредством перезагрузки, под влиянием ионизирующего излучения логический элемент способен ошибочно идентифицировать токовый импульс как полноценный сигнал, что в определенных обстоятельствах может закрепить неверное состояние и допускать дальнейшее его распространение между устройствами [5].

Благодаря повышенной производительности современное оборудование эффективно откликается на радиационные всплески, недоступные для анализа более ранними версиями микросхем. Увеличение тактовой частоты повышает риск возникновения эффектов одиночных переходных процессов (Single Event Transient, SET), что может привести к непреднамеренной модификации данных в хранилище. Хотя затронутый логический блок может восстановить корректное состояние, ошибочный сигнал, распространившийся в системе хранения, имеет потенциал нанесения значительного вреда функционированию системы.

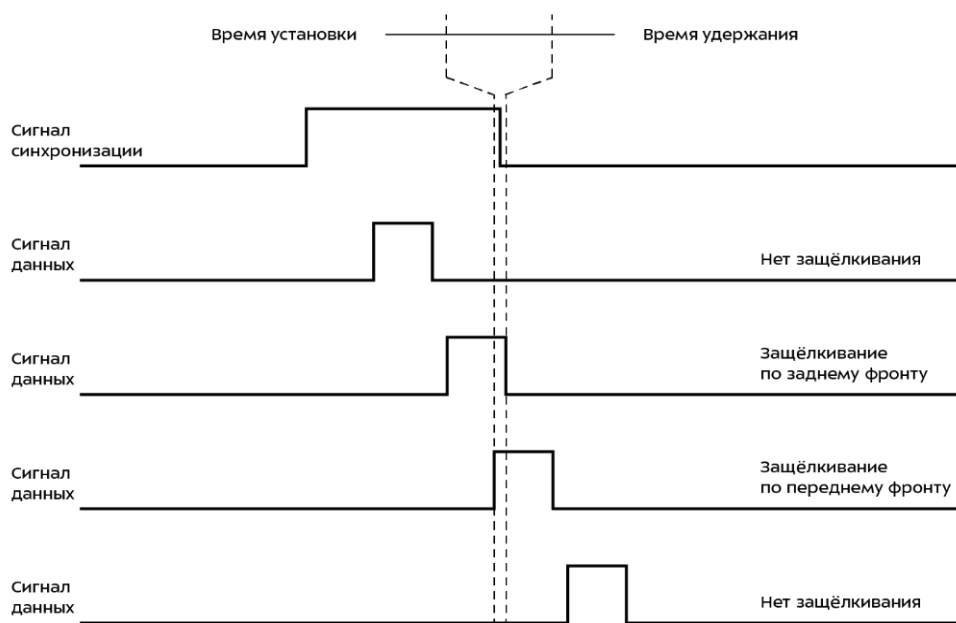


Рис. 4. Возникновение сбоя переключения

Latchup, или защелкивание транзисторов в проводящем состоянии, является одним из наиболее рискованных эффектов одиночных ионных событий (SEE), которые могут нанести вред полупроводниковым устройствам. Это явление может быть вызвано высоким уровнем потенциала, спровоцированным радиационными воздействиями, а также интеграцией паразитных элементов, свойственных КМОП-технологиям, включая неумышленное образование $p-n-p$ и $n-p-n$ -транзисторных структур, создающих условия, аналогичные работе тиристора. Такие условия могут привести к неожиданным сбоям в работе микросхем и, как следствие, к критическим отказам в системах электроники. Пример такого события показан на рис. 4, где представлена цифровая система, состоящая из сигнала данных и сигнала синхронизации, разрешающего обработку сигнала данных. На рис. 4 видно, как незначительное изменение в синхроимпульсе может привести к многочисленным сбоям в обработке сигнала как по переднему, так и по заднему фронту.

Исключительно важно отметить, что множество неполадок, свойственных КМОП-транзисторам, напрямую связаны с активацией латентного SCR (Silicon Controlled Rectifier — полупроводниковое устройство с обратимым замыканием, т. е. паразитного тиристора), вызванной чрезмерным уровнем напряжения на входе. Это состояние способствует формированию проводимого канала с заниженным уровнем сопротивления между выводами стока и истока, инду-

цируя в нем поток интенсивного тока. Согласно закону Джоуля — Ленца, такой ток может вызвать критический нагрев компонента и повлечь за собой его выход из строя. Кроме того, интересно, что даже после устранения первопричины «защелкивания» самоподдерживающийся ток сохраняется, создавая угрозу для рабочего состояния.

В общих чертах последствия радиационного воздействия, электротехнические результаты и источник — среду воздействия удобно представить с помощью таблицы.

Наличие продуманных систем управления и защиты, способных предупредить подобные аварийные ситуации, служит ключом к обеспечению долговечности и безопасности электронных схем.

Радиационное воздействие на микросхемы

Частица	Физический эффект	Электротехнический результат	Окружающая среда
Фотон	Образование заряда в оксиде полупроводника (для КМОП-микросхем)	Смещение порогового напряжения	Космос, радиация
	Фототок при больших дозах	Включение устройств, тепловое разрушение от протекающего тока	Концентрированные источники, например ядерная бомба
	Образование поверхностных соединений	Ухудшение подвижности электронов и снижение подпорогового напряжения	Космос, радиация
Тяжелый ион	Образование пар «электрон — дырка»	Единичные сбои	Космос
Нейтрон	Смещение атома	Ухудшение стабильности характеристик транзисторов	Радиация
	Отскок атома	Единичные сбои	Космос
Протон	Ядерное взаимодействие	Единичные сбои	Солнечные вспышки
	Заряд в оксиде	Смещение порогового напряжения	Радиационные пояса планет
Электрон	Создание заряда окиси	Смещение порогового напряжения	Космос
	Смещение атома	Сбои	Космос

Анализ областей применения интегральных структур, устойчивых к радиационным воздействиям. Классификация областей применения интегральных структур, устойчивых к радиационным воздействиям. Интегральные структуры, устойчивые к радиации, используются в разнообразных сферах, связанных с воздействием ионизирующих лучей или заряженных частиц. В целом можно выделить четыре основных области технического применения радиационно-защищенных ИМС (рис. 5): 1) космическая аппаратура; 2) атомная промышленность; 3) специальные военные применения РЭА; 4) отдельные области медицины. В каждой из этих областей существуют свои преимущественные факторы облучения, связанные со спецификой работы РЭА, и соответственно, различные цели и методы защиты микросхем.

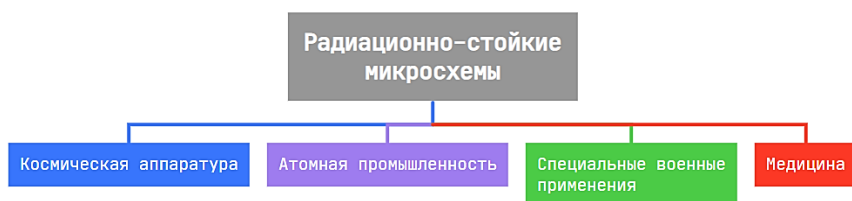


Рис. 5. Классификация областей применения интегральных структур, устойчивых к радиационным воздействиям

Космическая микроэлектроника. Применение радиационно-стойких ИМС способствует значительному повышению надежности и отказоустойчивости электронных устройств в среде с высоким радиационным фоном, что характерно для космического пространства. Это становится особенно критичным для осуществления долгосрочных миссий беспилотных аппаратов в космосе, где использование такой ЭКБ является единственно возможным решением для обеспечения долгосрочной отказоустойчивой работоспособности космических аппаратов [6].

Атомная промышленность. Микросхемы, устойчивые к радиации, критичны для работы электронных устройств, эксплуатируемых в условиях ионизационных излучений, которые генерируются во время функционирования атомных энергетических установок или радиоизотопных термоэлектрических генераторов [1].

Такие же критерии применяются к аппаратуре, предназначенной для функционирования в экстремальных условиях, включая аварии с выбросом радиоактивных элементов на атомных энергетических установках [7].

Специальное применение. Радиационное излучение, являясь одним из ключевых поражающих аспектов при ядерном взрыве, вместе с контами-

нацией территории продуктами радиоактивного распада серьезно влияет на функциональность незащищенной электроники. Чтобы обеспечить надежную работу электронных устройств в таких условиях, критически важно применять микросхемы, спроектированные с учетом требований радиационной устойчивости.

Медицина. Радиационные источники активно применяются в сфере медицины не только для обнаружения заболеваний (например, при проведении флюорографии или специальных видов компьютерной томографии), но и в терапии онкозаболеваний, где наблюдается рост использования различных типов ионизирующего излучения в сфере онкохирургии. Высокая концентрация ионизации, характерная для этих методов, требует использования высокопрочных компонентов при изготовлении медицинского оборудования, устойчивых к радиационным воздействиям [8].

Обзор видов корпусирования радиационно-стойких интегральных структур. Разработка радиационно-устойчивых микросхем включает в себя применение корпусов ИМС особой конструкции, оснащенных встроенными экранами из различных материалов для радиационной защиты, известных как экраны радиационной защиты (ЭРЗ).

Способность обеспечивать надежную защиту кристаллов от радиационного воздействия тесно связана с конкретными условиями орбитального полета, так как различные параметры орбиты значимо влияют на уровень радиационной опасности. На геостационарной орбите (GEO) на высоте приблизительно 36 000 км, применение защитных корпусов с электростатическими разгрузочными устройствами повышает риск увеличения накопленной дозы радиации до 600 раз. Это обстоятельство позволяет элементам выдерживать общую дозу облучения более 100 крад [6].

В контексте низкоорбитальных (LEO) и среднеорбитальных (MEO) высот, охватывающих диапазон от 500 до 10000 км, где основным источником радиации служат протоны, использование защит, интегрирующих ЭРЗ, может увеличить эффективность защиты кристалла в 4 раза². Дополнительно применение данных корпусов обеспечивает повышенную защищенность от воздействия рентгеновских лучей, улучшая защитные характеристики в 1,3–1,5 раза по сравнению с обычными корпусами. Следовательно, разработка и подбор технологий защиты для кристаллов требуют детализированного учета как орбитальных параметров эксплуатации, так и специфики радиационного спектра, характерного для конкретной зоны, с целью гарантирования адекватного уровня защиты от космической радиации [6].

При производстве дисплеев используются композитные материалы, состоящие из многослойных гетерогенных металлических конструкций, кото-

рые различаются по атомному номеру [9]. Эти материалы обладают свойствами, оптимальными для создания экранов, способных выдерживать разнообразные внешние воздействия. Примеры применения таких инновационных материалов можно найти в продукции ведущих компаний-производителей электронных компонентов и устройств, среди которых американские Actel и Maxwell, а также французская 3DPlus [9]. Эти предприятия разрабатывают корпуса с электромагнитной защитой, используя упомянутые материалы для обеспечения высокой степени надежности и функциональности своей продукции.

Включение в единую гетероструктуру металлических элементов с разнообразными значениями атомного номера (Z) способствует созданию условий, при которых происходит многократное отражение частиц и гамма-фотонов от границ раздела этих материалов, что обеспечивает возвращение фотонов в слой материала с высокой поглощательной способностью без их выхода за внешние границы структуры.

На рис. 6 демонстрируются стандартные дизайны встроенных защитных панелей, предлагаемые разнообразными международными компаниями.

В ассортимент продукции, выпускаемой компанией Maxwell, входят изделия, устойчивые к радиационным воздействиям: это микропроцессоры, устройства для хранения данных, элементы для построения логических схем, а также компактные компьютеры, предназначенные для использования в оборонной промышленности и космонавтике. Изготовление этих компонентов следует принципам концепции COTS (Commercial Off-The-Shelf — адаптация массовой гражданской продукции к исключительным требованиям), подразумевающей адаптацию и применение инноваций и достижений из коммерческого сектора в производстве техники специального и военного назначения [9]. Данная стратегия позволяет в целом снизить расходы на НИОКР за счет стандартизации и повторного применения уже использованных коммерческих исполнений ИМС.

Необходимо уделить пристальное внимание аспекту, что в изделиях компаний Actel, 3D Plus, Maxwell, оснащенные интегрированными защитными экранами для обеспечения герметичности внутреннего пространства, используется исключительно метод пайки. Это позволяет повысить технологичность создания ЭКБ в серийном производстве. В соответствующих технологиях применяются недорогие кремниевые элементы микросхем из коммерческого и промышленного сегментов взамен высокоценных радиационно-устойчивых аналогов. Это способствует уменьшению стоимости производства радиоэлектронных устройств для космической отрасли и увеличивает спектр доступных для использования компонентов.

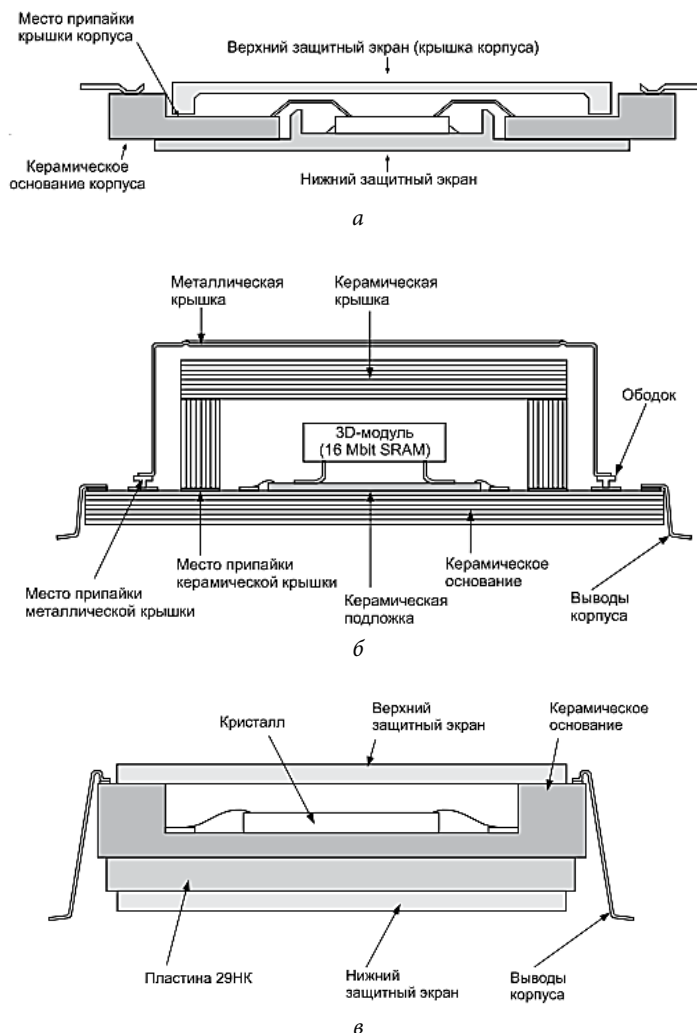


Рис. 6. Типовые конструкции защитных панелей на международном рынке:
а — конструкция с двусторонним расположением металлических экранов; *б* — конструкция с керамической защитой модуля; *в* — конструкция, комбинирующая керамическую верхнюю защиту и металлическую нижнюю

Применение интегральных структур в сферах военной и космической техники стало реальностью после экспериментального подтверждения эффекта экранирования с помощью защитных материалов. Концепция целенаправленного экранирования интегральных микросхем была предложена в 1979 году, в то время как в 1980-х годах в США были проведены научные исследования, которые подтвердили эффективность экранирования [10].

Анализ направлений перспективных исследований в области радиационно-стойких интегральных структур. Разработкой материалов и технологий для использования в электронных радиационно-защитных компонентах активно множество производителей среди разных стран [10]. В частности, широко известны: RAD-COAT от Space Electronics Inc (США), X-RAY от Actel (США) и WALOPACK от 3D Plus (Франция). Для обеспечения надежной защиты от воздействия ионизирующего излучения интегральных микросхем, включенных в состав оборудования космических аппаратов, ведущие мировые компании разрабатывают ряд специализированных конструкций корпусов. Технологическое решение RAD-PAK гарантирует радиационную защиту на уровне не менее 100 крад по показателю поглощенной дозы излучения. Важно, что степень защищенности напрямую коррелирует с характеристиками орбиты, дизайном и периодами функционирования космического аппарата.

Согласно данным последних научных работ, комплексная защита от радиации достигается за счет использования многослойных оболочек и композитных материалов. Эти технологии способствуют значительному уменьшению радиационного облучения на бортовые системы космических аппаратов, позволяя одновременно сокращать массу и размеры защитных элементов.

К материалам для эффективного ЭРЗ относится WALOPACK — комплекс, который состоит из чередующихся слоев оксида алюминия (Al_2O_3) и порошкового вольфрама. Согласно последним исследованиям, для обеспечения защиты на геостационарных орбитах наиболее результативной является конструкция из трех слоев, где материал с высоким атомным номером (в данном случае вольфрам) заключен между двумя слоями с низким атомным номером (алюминий), т. е. конфигурация Al-W-Al[10].

Типоразмеры ЭКБ должны соответствовать стандартным, таким как DIP (dual in-line package, корпус с выводами в две линии), PGA (pin grid array, корпус с матрицей выводов), SSOP (Shrink Small Outline Package, корпус с уменьшенным расстоянием между выводами), QFP (Quad Flat Package, четырехсторонний плоский корпус) и проч.

Технология RAD-COAT обладает универсальностью в применении множества защитных покрытий, в то время как для реализации методов RAD-PAK и WALOPACK необходимы специфические конструкции стандартного корпуса интегральных микросхем. Покрытия RAD-COAT производятся путем встраивания порошкообразного вольфрама в ламинированную матрицу. Учитывая плотность этих покрытий на уровне 13 г/см^3 , можно заключить, что они менее эффективны по сравнению с защитными слоями типов RAD-PAK и WALOPACK.

В 2014 г. разработчики из московской компании «Тестприбор» начали разработку уникальных конструкций корпусов, в которых будут интегриро-

ваны системы радиационной защиты. Первый этап проектной работы включал в себя тщательный анализ и выбор инновационных материалов для создания ЭРЗ. Эти материалы должны были не только гарантировать высокую защиту от радиации, но и соответствовать определенным требованиям по массогабаритным характеристикам. Кроме того, особое внимание было уделено их совместимости по температурному коэффициенту расширения с традиционно используемыми в производстве корпусов для интегральных микросхем, такими как сплав 29НК и алюминиевая керамика [9].

Результаты проведенных компьютерных анализов по ослаблению потоков протонов и электронов земных радиационных поясов для разнообразных траекторий орбит были сравнены с экспериментальными данными.

Разрабатывали пробы электропроводящих материалов различной массы, состоящих из несмешанных элементов (меди, алюминия, вольфрама, тантала), композиций «вольфрам — медь», никелевого сплава 29НК, висмутово-алюминиевого сплава, а также алюминиевой оксидной керамики.

Экспериментальная оценка экранов проведена на специализированных симуляторах. Воздействие электронными пучками выполнялось при помощи линейных ускорителей У-31/У-33 с энергией 2,2 МэВ и «РЭЛУС» с энергией 3,6 МэВ, расположенных в АО «ЭНПО СПЭЛС» в Москве, а также на устройстве ЭЛУ-4 с энергией 4 МэВ, находящемся в Научно-производственном центре Национальной академии наук Беларуси по исследованию материалов в Минске.

Процедура облучения протонами осуществлялась с использованием протонного ускорителя с возможностью регулировки энергии в Протвино. Эксперимент включал облучение при различных уровнях энергии протонов: 50, 70, 100, 150, 200 МэВ. Для определения поглощенной дозы использовались детекторы типа ИС7 [9].

В ходе научного анализа, процентируя разнообразие материалов с точки зрения размерных параметров и экономической доступности, определено, что вольфрам выделяется как оптимальный выбор. Для коррекции коэффициента температурного расширения вольфрам легируют, добавляя в его состав металлы, например, медь. Таким образом, синтезированный композитный материал W-Cu обретает специфические свойства, что делает его идеально подходящим для создания электрорадиационных элементов, которые встраиваются в металлокерамические корпуса интегральных микросхем.

Было выполнено аналитическое исследование для оценки защитных характеристик экранов, изготовленных из различных материалов: алюминиевой оксидной керамики Al_2O_3 , сплава на основе никеля 29НК, и инновационного композитного материала, состоящего из вольфрама и меди (W-Cu).

Результаты показали, что для обеспечения адекватного уровня защиты керамическими экранами на основе Al_2O_3 их толщина должна составлять 3 мм, в то время как экраны, изготовленные из сплава 29НК, достигают необходимых защитных характеристик при толщине 1,5 мм. Композиты на основе W–Cu превосходили оба материала, демонстрируя впечатляющие защитные качества и эффективный теплоотвод при значительно меньшей толщине экрана — всего 0,6 мм. Дополнительные исследования позволили установить, что идеальная толщина экранов, выполненных из композита W–Cu, колеблется в пределах 0,9...1,2 мм, предоставляя превосходное сочетание защиты и функциональности по сравнению с экранами из других рассмотренных материалов [9].

Заключение. Интегральные структуры, устойчивые к радиации, находят применение в различных сферах экономики, играя ключевую роль в обеспечении надежности РЭА под воздействием радиационного излучения.

Использование спецкорпусирования как метода увеличения радиационной стойкости ИМС позволяет:

- уменьшить массогабаритные характеристики РЭА по сравнению с традиционными способами защиты,
- использовать имеющийся задел по ИМС коммерческого исполнения для изготовления ИМС специального и космического исполнения в условиях санкций и ограничения импорта,
- увеличить ассортимент ИМС для конструирования РЭА и уменьшить расходы на сборку микросхем при изготовлении приборов для космической отрасли.

Результаты данного исследования отражают ключевые аспекты влияния радиационного облучения на интегральные схемы в виде классификации, произведен обзор современных методов корпусирования радиационно-стойких ИМС, их недостатков и преимуществ, и сведения, касающиеся их производства и применения в специальной РЭА, проанализированы последние научные разработки и предложения на мировом рынке.

Литература

- [1] Белоус А.И., Красников Г.Я., Солодуха В.А. *Основы проектирования субмикронных микросхем*. Москва, Техносфера, 2020.
- [2] Анашин В.С. и др. *Ионизирующее космическое излучение и его эффекты на бортовые системы космических кораблей*. Москва, Физматлит, 2013, 256 с.
- [3] Василенков Н., Максимов А. Радиационно-защитные корпуса для изделий микроэлектроники компании «ТЕСТПРИБОР». *Компоненты и технологии*, 2014, № 8, с. 158–160.

- [4] Василенков Н., Максимов А., Грабчиков С., Ластовский С. Специализированные радиационно-защитные корпуса для изделий микроэлектроники. *Электроника: наука, технология, бизнес*, 2015, № 4 (144), с. 50–57.
- [5] Безродных И.П., Тютнев А.П., Семенов В.Т. *Влияние космического излучения на материалы в электротехнике. Часть 2*. Москва, ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2014, с. 43–56.
- [6] Кузнецов Н.В. *Риск радиационного воздействия на космические аппараты в низкоземных орбитах и на путях между планетами*. Москва, Изд-во НИИЯФ, 2006, с. 111–129.
- [7] Костомаха Д.Е. Радиационная стойкость эпитаксиальных структур на основе нитрида галлия. *Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине. XXIV Межвуз. молодеж. науч. конф.: сб. тез.* Москва, КДУ, 2023, с. 83–84.
- [8] Желтоножская М.В., Ленивкин М.В., Черняев А.П. Исследование возможности получения изотопов рения для медицинских целей в фотоядерных реакциях. *Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине. XXIV Межвуз. молодеж. науч. конф.: сб. тез.* Москва, КДУ, 2023, с. 112–113.
- [9] Богатырев Ю., Василенков Н., Грабчиков С. и др. Разработка экранов для местной радиационной защиты в устройствах микроэлектроники. *Вопросы атомной науки и техники*, 2014, № 4, с. 53–56.
- [10] Заболотный В., Старостин Е., Кочетков А. Эффективные смеси для защиты встроенной электроники в космосе от радиационного воздействия. *Физика и химия обработки материалов*, 2008, № 5, с. 50–56.

Поступила в редакцию 04.02.2025

Миронов Александр Антонович — студент кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Хлебников Владислав Игоревич — студент кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Жалнин Владимир Петрович, преподаватель кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация. E-mail: zhalnin@mail.ru

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Миронов А.А., Хлебников В.И. Анализ корпусов для радиационно-устойчивых интегральных микросхем. *Политехнический молодежный журнал*, 2025, № 3 (98). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/iemim/sta/1053.html>

ANALYSIS OF RADIATION-RESISTANT INTEGRATED MICROCIRCUITS CASES

A.A. Mironov

maa21u872@student.bmstu.ru

V.I. Khlebnikov

khvi21u717@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

The problem of ensuring radiation resistance of integrated circuits (ICs) due to their special packaging is considered. The relevance of developing radiation-resistant components for key industries, such as the space and nuclear industries, is emphasized. The analysis of radiation impact factors on ICs, methods of their protection and existing solutions on the world market is carried out. The key advantages of specialized packages are revealed, including a decrease in the weight and size of protective elements, as well as the use of commercial components for adaptation to special requirements. The work highlights areas of promising research, including the use of new materials and shielding technologies. The practical significance lies in the recommendations for the selection of protective housings for integrated circuits, increasing their reliability and durability under radiation exposure.

Keywords: radiation resistance, integrated circuits (IC), casing, radiation exposure, radiation protection, radiation-resistant electronics, space industry, nuclear power, radiation protection screens (RPS), composite materials

Received 04.02.2025

Mironov A.A. — Student of Department of Design and Technology of Electronic Equipment Production, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Khlebnikov V.I. — Student of Department of Design and Technology of Electronic Equipment Production, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Zhalnin V.P., Lecturer of Department of Design and Technology of Electronic Equipment Production, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation. E-mail: zhalnin@mail.ru

Please cite this article in English as:

Mironov A.A., Khlebnikov V.I. Analysis of radiation-resistant integrated microcircuits cases. *Politekhnikheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2025, no. 3 (98). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/iemim/sta/1053.html>