

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ
СТОЙКОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ
НПО «ИНТЕГРАЛ», ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ
УСЛОВИЙ РАБОТЫ В КОСМИЧЕСКИХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ**

РЕФЕРАТ

В настоящем обзоре представлены результаты разработки в НПО «Интеграл» основных теоретических и прикладных проблем создания радиационностойких технологий изготовления интегральных микросхем, предназначенных для космических летательных аппаратов. Данные результаты изложены с соблюдением режимных требований и ограничений.

Показано, что реализация современных тактико-технических требований, предъявляемых к большинству классов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) систем управления ракетно-космической техникой может быть обеспечена только на основе применения радиационно-стойкой элементной базы.

Предложен метод радиационно-термической отбраковки дефектных ТТЛШ ИС с пониженной радиационной стойкостью. Выбраны оптимальные режимы обработки и восстановительного отжига, не ухудшающие надежность характеристики ИС.

Проведенные исследования механизма деградации элементной базы транзисторного уровня позволили определить конструктивно-технологические особенности топологии микрорисунка и способа изготовления КМОП и ТТЛШ элементной базы, обеспечивающих проектирование и изготовление радиационно-стойких изделий. Кроме того, установлены причины случайных отказов ТТЛШ-схем и определены режимы радиационно-термической отбраковки потенциально ненадежных изделий.

Показано, что НПО «Интеграл» разрабатывает и поставляет широкую номенклатуру микросхем, в том числе для применения в аппаратуре военных, космических и других специальных систем, проводит целенаправленное совершенствование конструкции и технологии ИС для повышения радиационной стойкости.

1. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ДЛЯ УСЛОВИЙ РАБОТЫ В КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

1.1. Некоторые проблемы разработки радиационно-стойких микросхем на современном этапе

При решении данной проблемы необходимо особо выделить некоторые вопросы, связанные с необходимостью восстановления и развития радиационно-стойкой элементной базы отечественной микроэлектроники поскольку известно, что реализация современных тактико-технических требований, предъявляемых к большинству классов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) систем управления ракетно-космической техникой может быть обеспечена только на основе применения радиационно-стойкой элементной базы.

Исторически начало исследованиям по проблеме радиационной стойкости изделий электронной техники (ИЭТ) и РЭА космического назначения положено в середине 60-х годов. На протяжении последующих 30 лет эта проблема являлась одной из приоритетных и решалась на основе государственного и межотраслевого планирования. В результате в СССР была создана функционально полная номенклатура радиационно-стойких изделий микроэлектроники, насчитывающая более тысячи типонаименований микросхем и полупроводниковых приборов.

С распадом СССР за пределами Российской Федерации осталось более 50% предприятий электронной промышленности, производивших радиационно-стойкие ИЭТ. Последовавший за этим экономический спад и резкое снижение объемов государственного оборонного заказа привели к сокращению и в большинстве случаев к прекращению производства большей части их номенклатуры.

Актуальность восстановления и развития радиационно-стойких ИЭТ обусловлена и тем обстоятельством, что финансовые и материальные затраты на эти работы несопоставимы с издержками и потерями, которые возникают при разработке, производстве и эксплуатации изделий ракетно-космической техники. Как показывают оценки одного из мировых лидеров в области разработки и производства радиационно-стойких микросхем ф. Harris Semiconductor (США), несмотря на то, что стоимость радиационно-стойких ИС примерно в 100 раз выше стоимости аналогичных изделий общетехнического исполнения, при использовании последних для достижения того же уровня радиационной стойкости РЭА требует несравнимо большие затраты на системном уровне (в 10 раз и более), чем при применении радиационно-стойкой элементной базы. Это связано как с необходимостью введения специального отбора изделий по заданным требованиям, так и с необходимостью использования дополнительной защиты и значительно большего объема испытаний аппаратуры.

Современный этап обеспечения радиационной стойкости изделий микроэлектроники для космических применений характеризуется тем, что тенденция повышения требований к тактико-техническим характеристикам образцов и комплексов ракетно-космической техники требует создания новых типов функционально-сложных больших и сверхбольших интегральных микросхем (БИС и СБИС), которые обладают повышенной чувствительностью к радиационным воздействиям в силу известных физических ограничений.

Кроме того, вынужденное сокращение объемов производства в РФ и СНГ в целом изделий микроэлектроники специального назначения требует создания новых решений в области повышения стабильности и рентабельности технологических процессов, разработки и внедрения высокоэффективных методов обеспечения и контроля радиационной стойкости на всех этапах жизненного цикла изделий.

Радиационная стойкость интегральных схем является важным условием при проектировании систем космического применения. Известно, что в системах военного назначения приборы должны обладать способностью выдерживать облучение нейтронами, гамма-излучением и рентгеновским излучением, а также выдерживать воздействие электромагнитного импульса, создаваемых ядерным взрывом. В

космическом пространстве полупроводниковые устройства также должны функционировать в условиях жесткой радиации, обусловленной облучением ионами, присутствующими в космических лучах и солнечном ветре, а также захваченных в радиационных поясах вокруг Земли.

Повышение требований со стороны разработчиков аэрокосмических систем в 2000г. вызвало очевидный рост активности изготовителей, которые производят электронные системы или устройства для этих областей применения.

В этой связи полезно привести ряд цитат из сообщений средств массовой информации, которые подключены к решению этой проблемы. Так, в интервью программе BBC от 12 сентября 2000г. известный разработчик микросхем специального назначения Джозеф Тирадо (Joseph Tirado), руководитель разработок БИС для космических программ из Отдела Заказных Интегральных Схем известной фирмы Харрис (Custom Integrated Circuits Division) г. Мельбурн, штата Флорида сообщает следующее: «Не проходит и дня без того, чтобы изготовители интегральных схем не делали сообщений о высокой радиационной стойкости производимых ими устройств. Повышение требований к радиационной стойкости интегральных схем со стороны изготовителей космических аппаратов и систем создало избыток информации, которую необходимо осмыслить до того, как можно будет осуществит действительное сравнение различных микроэлектронных устройств».

Интерес к радиационно- стойким приборам в ближайшем будущем может только возрасти. Но Боб Куинн (Bob Quinn), вице-президент по маркетингу фирмы Harris (Отдел комплементарных интегральных схем), заявляет: «Большое количество фирм будет стараться продать приборы, которые на самом деле не являются радиационно-стойкими».

Все, что ранее требовалось знать разработчикам электронных блоков космических аппаратов и космических систем о радиационной стойкости микросхем и полупроводниковых приборов, заключалось в технологии их изготовления. С точки зрения влияния полной дозы облучения, например, было известно, что биполярные приборы были более устойчивыми к отказам, чем приборы, изготовленные по КМОП-технологии. Однако, благодаря последним достижениям в КМОП- технологии различия по величине радиационной стойкости уже не столь явные. Для решения проблемы выбора наиболее приемлемой элементной базы в каждом конкретном случае необходимо рассматривать требования к условиям работы космического аппарата на орбите и учитывать целый ряд специальных факторов.

2. МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ БИПОЛЯРНЫХ СХЕМ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ.

Современные интегральные микросхемы находят все более широкое применение в радиоэлектронной аппаратуре различного рода технических объектов, работающих в условиях воздействия проникающей радиации. Эти условия могут возникать при попадании объекта в зону действия источников ионизирующего излучения техногенного происхождения или при расположении РЭА вблизи ядерных силовых и энергетических установок, а на аппаратуру космических объектов воздействуют ионизирующие излучения космического пространства и радиационных поясов Земли. Из литературных данных известно, что при этом РЭА может подвергаться воздействию следующих уровней радиации:

- от ядерного взрыва - потоку нейтронов до 10^{15} см⁻² и гамма-квантов с экспозиционной дозой до 10^6 Рад ад при мощности дозы до 10^{13} Р/с;
- вблизи ядерных реакторов - потоку нейтронов 10^{12} – 10^{15} и дозе гамма-квантов до 10^7 ;
- при прохождении естественных и искусственных радиационных поясов Земли в течении ,5 лет функционирования космического аппарата на геостационарной синхронной орбите - общей дозе $5\sigma 510^4$ - $2\sigma 610^5$ рад (эквивалентно интегральному потоку электронов 5×10^{14} см⁻² E=1МэВ).

Высокая стоимость подобных объектов обуславливает особо жесткие требования безотказности элементной базы РЭА и в первую очередь микросхемам различного функционального назначения. Действительно, отказ одной микросхемы в условиях воздействия вышеперечисленных дестабилизирующих факторов может повлечь за собой выход из строя всего сложного и дорогостоящего объекта, причем последствия подобного отказа не всегда предсказуемы.

Поэтому задача гарантированного обеспечения радиационной стойкости ИМС и аппаратуры на их основе является исключительно актуальной.

Анализ сравнительных данных по радиационной стойкости различных типов ИМС показывает, что далеко не все типы ИМС способны гарантированно обеспечивать работоспособность аппаратуры в условиях воздействия указанных реальных уровней проникающей радиации. Так, МОП ИМС, обладая стойкостью к потоку нейтронов не хуже $5\sigma 10^{14}$ см⁻², отличаются весьма высокой чувствительностью к общей дозе ионизирующего излучения и лишь отдельные типы ИМС сохраняют работоспособность при уровне общей дозы ионизирующего излучения 10^6 рад.

Наиболее перспективными с точки зрения радиационной стойкости являются ИМС, реализованные по биполярной технологии. Согласно данным ЭСЛ, ТТЛ, ТТЛШ и некоторые типы И²Л-схем сохраняют работоспособность при воздействии потоков нейтронов до 10^{14} см⁻² и общей дозы до 10^6 рад. Причем отдельные типы таких ИМС, в первую очередь ТТЛШ, способны выдержать воздействия потока нейтронов до 10^{15} см⁻² и общей дозы ионизирующего излучения до 10^7 рад. Таким образом, в настоящее время ИМС на основе ТТЛШ являются наиболее перспективной элементной базой для реализации РЭА, работающей в условиях высоких уровней проникающей радиации, поскольку они обеспечивают достаточно высокое быстродействие при сравнительно низком значении потребляемой мощности, могут работать на значительную емкостную нагрузку и длинные линии связи.

Рассматривая этапы совершенствования конструкции и технологии изготовления ИМС ТТЛШ за обозримый период их развития, можно обнаружить существенные колебания их радиационной стойкости. Так, ТТЛШ ИМС малой и средней степени интеграции с изоляцией компонентов р-п-переходом характеризуются достаточно высокой радиационной стойкостью к общей дозе, однако имеют ограничения по быстродействию, стойкости к потоку нейтронов, импульсному ионизирующему излучению. С целью снятия этих ограничений ИМС была применена изопланарная (окисная) изоляция компонентов.

Необходимо отметить, что с ростом степени интеграции БИС и СБИС, характеризующихся сложным и многообразным характером внутрисхемных связей,

могут быть реализованы лишь на основе изолируемых окислом компонентов, имеющих предельно малые размеры и объемы активных и пассивных областей и работающих в электрических режимах, близких к предельно возможным для используемых материалов. В результате этого возникают физические ограничения, снижающие радиационную стойкость БИС и СБИС по сравнению со схемами малой и средней степени интеграции.

2.1. Механизм возникновения отказов в ТТЛШ ИМС под воздействием ионизирующих излучений

Уже первые испытания ТТЛШ ИМС с изопланарной межкомпонентной изоляцией показали резкое ухудшение их радиационной стойкости к общей дозе ионизирующего излучения. Анализ этого явления показал, что причиной отказов являются каналы утечки, возникающие между активными элементами ИМС. При этом величина токов утечки достигает максимума при дозе $1-5\sigma 10^5$ рад (Si) и имеет тенденцию сохраняться, либо снижается при наборе дозы до $1\sigma 10^6$ рад (Si) и более.

Анализ статистического материала по отказам после ионизирующих излучений ТТЛШ ИС серии 1533, а также БИС быстродействующего радиационно-стойкого 8-разрядного умножителя 583ВФ11 и БИС контроллера предварительной обработки информации 583ВГ1 на первых этапах производства этих ИС выявил основные виды отказов ИС: увеличение значений входных токов высокого уровня I_{IH} по отдельным выводам БИС; увеличение тока потребления I_{CC} ; увеличение уровня выходного напряжения логического нуля U_{OL} по отдельным выводам БИС; уменьшение уровня выходного напряжения логической единицы U_{OH} по отдельным выводам БИС.

Устранение каналов утечки, возникающих во входных каскадах ТТЛШ БИС при их облучении в активном режиме работы, обеспечивается техническими решениями, защищенными авторскими свидетельствами СССР 1589957 и 1554688.

Сущность технического решения заключается в том, что эмиттер входного транзистора ТТЛШ БИС выполнен в форме кольца, причем p-область эмиттера окружает коллекторную область входного транзистора, а база этого транзистора также выполнена в форме кольца, расположенного между эмиттерной и коллекторной областями p-скрытых слоев под окислом области изоляции. Такое оригинальное решение исключает условия образования паразитного транзистора (эмиттер-область p-скрытого слоя, база-подложка, а коллектор - скрытый слой других элементов БИС, в том числе резисторов). Предложенная кольцевая конструкция входного транзистора БИС обеспечивает также дополнительный положительный эффект - объемную реализацию резистора, тело которого включено между базой и эмиттером. При входе транзистора в режим лавинного пробоя падение напряжения на нем обеспечивает отпирание входного транзистора и уменьшение (ограничение) рассеиваемой на нем мощности, что уменьшает вероятность отказа БИС при разряде статического электричества.

При изготовлении ИС в условиях серийного технологического процесса значения их электрических и конструктивно-технологических параметров имеют некоторые отклонения от средних значений. Эти отклонения определяются колебаниями толщин слоев и глубин залегания переходов, степени легирования и профилей распределения примесей изменением точности совмещения топологических рисунков различных структурных областей, а также локальными кристаллографическими и примесными дефектами.

Предельно допустимые, с точки зрения обеспечения радиационной стойкости, значения разбросов контролируемых параметров обычно регламентируются соответствующими техническими требованиями и контролируются в ходе изготовления ИМС. Однако в силу групповых методов изготовления и выборочных методов контроля возможна поставка потребителю единичных образцов ИС, у которых значения электрических параметров и электрофизических характеристик областей отдельных компонентов ИС могут выходить за установленные пределы. Можно утверждать, что существующие методы изготовления и контроля обеспечивают отбраковку

потенциально ненадежных в условиях ионизирующих воздействий микросхем с высокой вероятностью, но не гарантируют. Количество таких потенциально радиационно-нестойких ИМС в поставляемых партиях может существенно колебаться. Расчет вероятности отказов невозможен в силу чрезвычайного многообразия факторов, влияющих на возникновение отказов, и сложности учета формализованного описания зависимости отказов от каждого из них, отсутствия достаточно адекватных физико-математических моделей механизмов отказов ИМС вследствие ионизирующих воздействий. Известные конструктивно-технологические и схемотехнические методы повышения радиационной стойкости позволяют гарантировать работоспособность базовых элементов ИС и уменьшают (но не исключают) вероятность появления у потребителя отдельных образцов ИС с флуктуацией параметров за счет пониженной радиационной стойкости.

Естественно, что установление механизма разработки эффективного метода отбраковки на этапе серийного изготовления ИС до отгрузки потребителям ИС с пониженной радиационной стойкостью является актуальной проблемой.

Установление механизма отказов при радиационных повреждениях областей позволило предложить метод эффективной оценки устойчивости ИС к общей дозе ионизирующих излучений.

В результате детального анализа отказавших ТТЛШ ИС были установлены основные механизмы отказов, которые можно разделить на две основные группы:

- локальные разрывы P+-слоя охранного кольца, вводимого по периферии каждого активного и пассивного элемента ИС;

- локальное смыкание p+-области эмиттера отдельных транзисторов Шоттки с областью изолирующего диэлектрика изопланарной изоляции (локальное вырождение конструктивного решения изоляции типа "Изопланар-1" в изоляцию типа "Изопланар-2", известную также под названием конструкции с "пристеночным эмиттером").

Дефекты первой группы являются причиной вышеперечисленных параметрических отказов ТТЛШ БИС, что обусловлено возникновением в процессе облучения каналов утечек между скрытыми слоями компонентов БИС, расположенных в непосредственной близости от дефекта (разрыва в охранном слое). Эти же дефекты в ряде случаев приводят к функциональным (как правило, катастрофическим) отказам.

Дефекты второй группы являются причиной функциональных отказов ТТЛШ БИС из-за образования вертикального канала утечки между эмиттером и коллектором транзистора Шоттки. В отдельных случаях эти дефекты приводят к параметрическим отказам, если поврежденные элементы задействованы в периферийных частях кристалла (согласующие каскады, усилители уровней и т.д.)

2.2. Метод радиационно-термической отбраковки ТТЛШ БИС.

Сущность рассматриваемого метода заключается в введении в технологический процесс изготовления ТТЛШ БИС с повышенной радиационной стойкостью к общей дозе ионизирующих излучений дополнительных операций радиационно-термической отбраковки (РТО).

Использование метода РТО предполагает предварительное облучение всей партии собранных в корпуса ИС дозой гамма-квантов или электронов с последующим контролем, отбором и исключением из партии образцов, показавших наибольшие изменения электрических параметров или отказавших. Для повышения достоверности отбраковки облучение может проводиться дозой, эквивалентной ожидаемой полной поглощенной дозе радиации в реальных условиях применения проектируемой РЭА. Верхний предел дозы облучения в этом случае должен быть ограничен значением, при котором еще не возникает значительных повреждений в объеме кристалла. Для восстановления первоначальных значений параметров ИС после их разбраковки производился восстанавливающий отжиг-выдержка приборов при повышенной температуре.

В ходе создания метода РТО необходимо было определить режимы проведения радиационной обработки:

- выбрать температуру и время восстановительного отжига;
- установить оптимальные межоперационные сроки РТО;
- исследовать влияние операций РТО на электрические и надежность параметры БИС.

С этой целью исследовался характер изменения характеристик ТТЛШ БИС в процессе и после проведения радиационной обработки, изменение электропараметров БИС с течением времени после радиационной обработки, максимально допускаемые сроки хранения между операциями радиационной обработки и отбраковочными измерениями: исследование полноты восстановления параметров микросхем в зависимости от режимов отжига, определение оптимальных значений температуры и времени отжига; исследование параметров БИС после проведения операций отбраковки, оценка влияния операций РТО на параметры ТТЛШ БИС; выбор оптимальных режимов проведения операций РТО.

2.3. Выбор оптимальных режимов операций РТО

Величину поглощенной дозы гамма-излучения при РТО ТТЛШ БИС целесообразно выбирать в пределах $1 \dots 3\sigma 10^6$ рад, так как после набора дозы более 10^6 рад в полупроводниковой структуре происходит насыщение поверхностных эффектов, обусловленных ионизацией. Получены экспериментальные зависимости токов утечки для двух групп дефектов от уровня общей дозы ионизации, подтверждающие насыщение токов утечки, обусловленных ионизацией. Следует особо подчеркнуть, что облучение ТТЛШ БИС необходимо выполнять в активном режиме работы БИС, когда подано питание, на входы - изменяющего во времени управляющие воздействия, к выходам подключена электрическая нагрузка, так как только в этом случае будет проявляться механизм отказа через деградацию характеристик БИС. Естественно это требует разработки специальных средств для обеспечения операции РТО. В частном случае возможно использование стандартных испытательных плат для проведения электротермотренировки (ЭТТ).

Выбор межоперационных сроков также имеет большое значение. Появляющиеся при радиационной обработке утечки могут уменьшаться со временем в силу известного механизма временного отжига. Получена зависимость величины входного тока высокого уровня (I_{jh}) дефектных БИС от времен на облученных ТТЛШ ИМС серии 1533. Параметр I_{jh} наиболее чувствителен к воздействию ионизирующего излучения, поскольку его численное значение определяется в первую очередь состоянием изоляции между соседними скрытыми p+-слоями буферных транзисторов Шоттки большой площади. При нормальных температурных условиях спад величины I_{jh} до уровня нормы технических условий происходит за время от 2 до 96 часов (в зависимости от исходной величины утечки). С целью эффективной отбраковки ИМС с нарушениями типа отбраковочная норма для этого параметра была выбрана равной 3,0 мкА, причем максимально допустимое время между операциями радиационной отбраковки и последующими измерениями электрических характеристик было установлено в диапазоне от 15 до 18 часов. Анализ статистического материала на отказавших ТТЛШ ИМС со стандартными схемотехническими решениями буферных схем показал, что величина радиационно-стимулированного тока утечки за это время никогда не уменьшается до уровня 5... 10 мкА, что обеспечивает эффективное выявление и отбраковку дефектных ТТЛШ ИМС.

При выборе оптимального режима восстановительного отжига отработка режимов производилась на основании анализа характера поведения тока потребления $I_{сс}$, выходного тока высокого уровня $I_{оН}$ и выходного напряжения логической единицы $U_{оН}$, наиболее информативных параметров ТТЛШ ИМС.

Как видно из полученных данных табл. 1, во всех случаях однозначно установлен механизм отказа и локализовано место отказа, что подтверждает корректность выбора указанных параметров.

Таблица 1

Результаты сравнительного анализа микросхем с типовыми отказами

	Параметры		
	Uoh(В)	Iih(мкА)	Icc(мА)
Значение параметров забракованных микросхем	1.7-1.9	30-800	300-1000
Значение параметров годных микросхем	-3.65	~0	-190
Результаты анализа отказавших микросхем	нет зазора эмиттер-разделение	разрыв охранного кольца	нет зазора эмиттер-разделение, разрыв охранного кольца

В таблице 2 представлены основные результаты реализации ряда экспериментов по выбору оптимальных режимов восстановительного отжига (температуры и времени) для выборки N=12000. ТТЛШ БИС 8-разрядного радиационно-стойкого слайдового умножителя 1817ВФ11, выдержавших воздействия ионизирующего излучения с общей дозой $D=10^6$ рад.

Таблица 2

Результаты экспериментов по выбору оптимальных режимов восстановительного отжига

Параметр	Значение параметра						
	Начальный замер	После обработки	После отжига 25°C, 48ч	После отжига 150°C, 6ч	После отжига 260°C, 61ч	После отжига 260°C, 2ч	После отжига 260°C, 3.5ч
Iih (мкА)	10-12	20-50	20-50	20-30^	10-30	10-20	10-20
Icc(мА)	190-208	180-200	180-200	200-205	200-207	200-207	203-207

С учетом степени полноты восстановления электропараметров БИС, предельной температуры кристалла БИС и имеющегося в отрасли стандартного технологического оборудования для ТТЛШ БИС серии 1817 выбран следующий режим отжига: $T_{от}=260C$, $t_{от}=3,5$ часа, обеспечивающий практически полное восстановление электропараметров БИС.

С целью оценки возможных изменений надежностных характеристик радиационно-стойких ТТЛШ ИМС серии 1817, подвергшихся радиационно-термической обработке, в ходе эксперимента были проведены контрольные испытания партии БИС 1817А 11 в количестве 50шт. Микросхемы изготавливались по технологическому маршруту с РТО, после чего на них проверялся цикл испытаний по факторам И1, И2, И3 с последующими испытаниями на надежность по стандартной методике в течение 1000 часов. Средние значения основных параметров контрольной партии БИС на различных этапах изготовления представлены в сводной таблице 3.

Анализ полученных данных показал, что операции РТО не ухудшают надежностные характеристики БИС (отказов на длительных испытаниях не зафиксировано), более того - стабилизируют электропараметры БИС. Повторное облучение БИС дозой равной первоначальной, уменьшает степень деградации электрических параметров БИС и снижает величину разброса параметров (уменьшается среднеквадратичное отклонение).

Следует отметить, что численные значения режимных параметров РТО для различных серий ТТЛШ ИС, СИС, БИС необходимо уточнять по результатам экспериментальных исследований конкретных типов микросхем в силу возможного

влияния конструктивно-технологических особенностей их реализации.

Таблица 3

Средние значения параметров контрольной партии

Параметр	Среднее значение параметра				
	Начальный замер	После обработки	После отжига 260°C, 3.5ч	После испытаний D=2E7 ran(Si)	После испытаний на безотказность 500ч
I _{il} (мкА)	13	28	10	24	28
I _{ih} (мкА)	~0	~0	~0	~0	~0
U _{oh} (В)	3.02	3.0	3.02	3.0	3.01
U _{ol} (В)	0.24	0.25	0.236	0.253	0.257
I _{cc} (мА)	195	187	190	185	190

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Установлены две основные группы механизмов отказов ТТЛШ БИС в условиях воздействия гамма-излучения: образование радиационно-стимулированных каналов тока утечки между скрытыми p⁺-слоями отдельных компонентов БИС из-за наличия локальных дефектов (разрывов в слое охранного p⁺-кольца) и каналов тока утечки между коллектором и эмиттером отдельных транзисторов Шоттки из-за локальных смыканий эмиттерных областей транзистора с областью изолирующего диэлектрика.

2. Предложен метод радиационно-термической отбраковки дефектных ИС с пониженной радиационной стойкостью. Выбраны оптимальные режимы обработки и восстановительного отжига, не ухудшающие надежность характеристики ИС.

3. Применение предложенного метода наиболее эффективно в тех случаях, когда изготавливаемые БИС предназначены для работы в составе РЭА объектов особо ответственного назначения: космических аппаратов, спутников связи и т.д.

3. Особенности технологии изготовления КМОП БИС с повышенной радиационной стойкостью

3.1. Оптимизация технологического маршрута изготовления КМОП БИС с целью повышения стойкости к ионизирующим облучением

При разработке технологии и конструкции интегральных микросхем на основе КМОП элементной базы, устойчивых к воздействию фактора ИЗ, следует учитывать, что для этого класса схем наибольшее влияние на работоспособность схем в условиях ионизирующей радиации оказывает не объемные эффекты в кремнии, а поверхностные эффекты, связанные с границей раздела кремний - диэлектрик. Под действием ионизирующего излучения в кремнии и диэлектрике генерируются электронно-дырочные пары. Значительная их часть подвергается рекомбинации в течении очень короткого промежутка времени. Оставшаяся часть под действием внутренних и внешних электрических полей в окисле начинает двигаться. Электроны, имеющие большую подвижность, перемещаются к аноду, а дырки, имеющие низкую подвижность, захватываются на ловушках в диэлектриках КМОП интегральной схемы. В результате захвата дырок на ловушки происходит изменение характеристик емкость - напряжение и проводимость - напряжение в рабочих и паразитных структурах микросхемы. Плотность захваченного заряда стремится к насыщению по мере увеличения поглощенной дозы и слабо зависит о мощности дозы. Наведенный таким образом положительный заряд в окисле изменяет пороговые напряжения рабочих и паразитных МОП транзисторов в очень широких пределах. Величина изменения пороговых напряжений рабочих и паразитных МОП транзисторов зависит от величины и полярности напряжения на затворе во время облучения и от конструкции и технологии микросхемы. Максимальный сдвиг порогового напряжения происходит у п-канальных транзисторов при положительном напряжении на затворе.

Таким образом, при проектировании и разработке КМОП микросхем, устойчивых к ионизирующему облучению возникают две основные проблемы:

разработка блока изоляции и разработка конструкции и технологии рабочих транзисторов, обеспечивающих высокую стабильность характеристик при воздействии ионизирующего излучения.

Как уже говорилось, под действием ионизирующего излучения в окисле кремния и на границе окисел - кремний захватывается положительный заряд. Рост плотности положительного заряда на границе кремний - окисел приводит к уменьшению порогового напряжения паразитных п канальных транзисторов и увеличению пороговых напряжений паразитных р- канальных транзисторов. Таким образом, проблема состоит в том, чтобы после облучения пороговые напряжения паразитных п канальных транзисторов не уменьшились ниже напряжения питания схемы. Для повышения пороговых напряжений паразитных п канальных транзисторов КМОП схем под слоем локального окисла формируется охранный кольцо Р- типа (рис.1). Так как область охранный кольца р типа располагается встык с областями истока и стока п типа, концентрация примеси в области р охранный кольца не может быть выбрана большей чем 10^{17} см^{-1} . При больших концентрациях примеси пробивные напряжения стока уменьшаются до 8-10В.

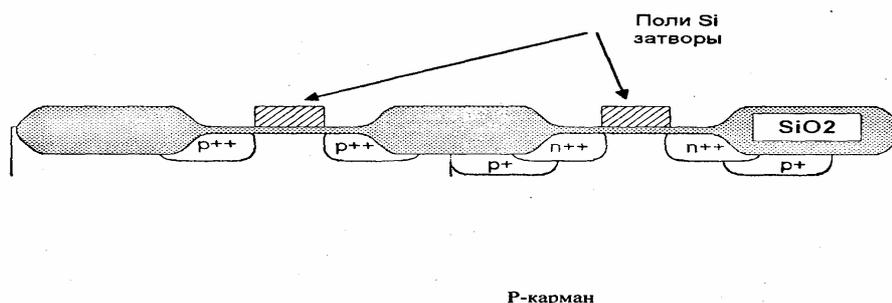


Рис.1 Охранный кольцо Р- типа

Описанная структура позволяет получать пороговые напряжения паразитных p-канальных транзисторов $>50V$, при толщине локального окисла порядка $0.6-0.8\mu m$. Такая структура обеспечивает работоспособность КМОП схем при дозах облучения до 10^3 рад. При облучении дозами 10^4 рад и выше, при положительном напряжении на затворе, в локальном окисле под областью затвора накапливается положительный заряд, достаточный для инверсии типа проводимости кремния и появления утечек между истоком и стоком p-канального транзистора. На рис.2 показана топология p-канального транзистора и показаны области инверсии типа проводимости, возникающие под действием ионизирующего излучения.

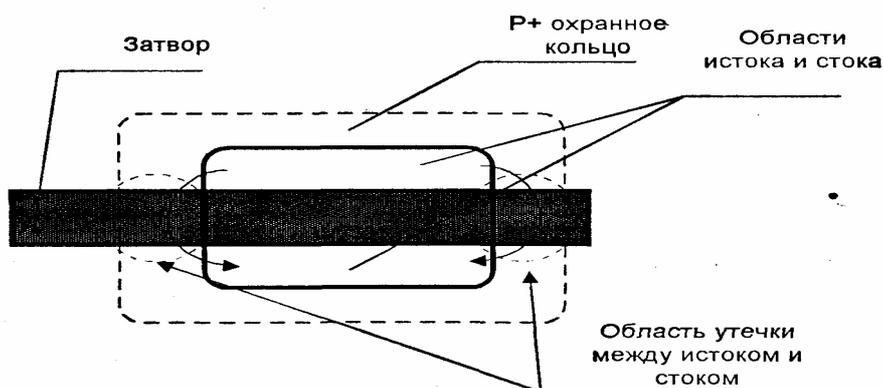


Рис. 2 Топология p-канального транзистора и области инверсии типа проводимости

Для повышения стойкости паразитных p-канальных транзисторов до доз 10^4 рад и выше при разработке данной микросхемы использовалась структура с высоколегированным охранным кольцом p-типа.

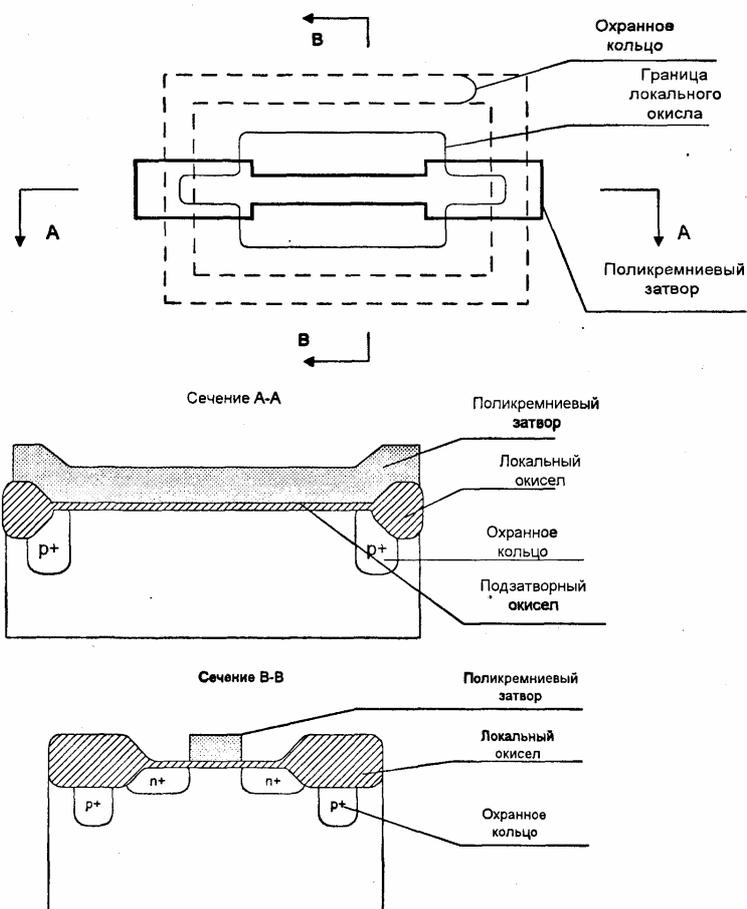


Рис.3 Топология p-канального транзистора и сечения транзистора вдоль и поперек затвора. Охранное кольцо p-типа сформировано под локальным окислом

На рис.3 приведена топология п канального транзистора с охраной, устойчивой к воздействию ионизирующего излучения с дозами $>10^6$ рад. В данной структуре для исключения инверсии поверхности кремния под локальным окислом под действием ионизирующего излучения используется P+ охранное кольцо с концентрацией примеси $>10^{18}$ см⁻³. Такой уровень легирования полностью исключает инверсию типа проводимости при любых дозах облучения. Для исключения снижения пробивных напряжений стока рабочего транзистора охранное кольцо выполнено с зазором от стока 2.5мкм. (сечение В-В). Для исключения утечек исток - сток в области выхода затвора на локальный окисел, затвор выводится на охранное кольцо по тонкому подзатворному окислу (сечение А-А)

На рис. 4 показан другой пример формирования п канального транзистора. В этом варианте охранное кольцо р типа формируется под тонким окислом и легируется одновременно с истоками и стоками р канальных транзисторов.

Рис.3 Топология п-канального транзистора и сечения транзистора вдоль и поперек затвора. Охранное кольцо р- типа сформировано под локальным окислом.

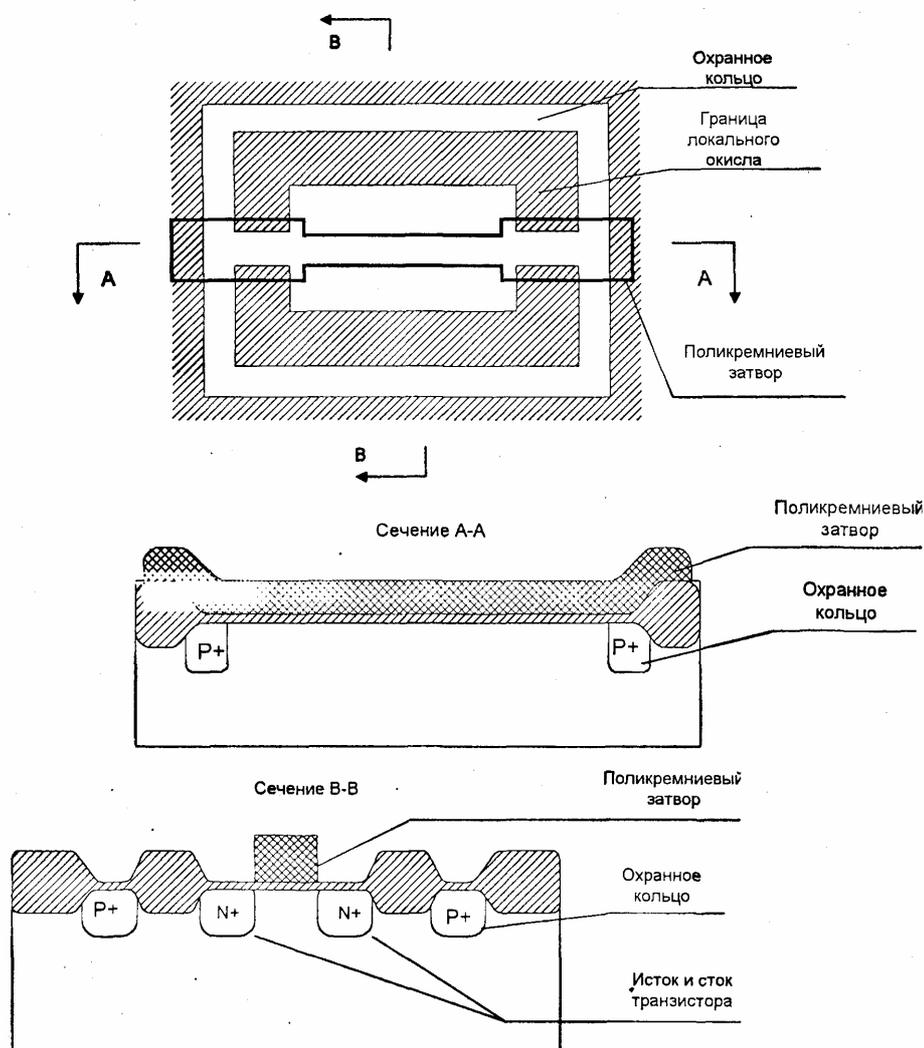


Рис. 4 Топология п-канального транзистора и сечения транзистора вдоль и поперек затвора. Охранное кольцо р- типа сформировано под тонким окислом одновременно с формированием областей истоков и стоков р канальных транзисторов.

Такая конструкция п-канального транзистора обеспечивает высокие >15 В пробивные напряжения стока и отсутствие утечек сток - исток под действием ионизирующего излучения с дозами $>10^6$ рад.

Вторая задача получения КМОП схемы, устойчивой к большим дозам ионизирующего облучения, связана с получением рабочих транзисторов с малым

уходом пороговых напряжений. Величина ухода порогового напряжения связана с величиной и полярностью напряжения, приложенного к затвору во время облучения. При положительном напряжении на затворе величина ухода порогового напряжения максимальна, при нулевом или отрицательном напряжении уход порогового напряжения минимален. Так как в схеме положительное напряжение подается только на p канальные транзисторы, именно p канальные транзисторы наиболее чувствительны к воздействию ионизирующего излучения. Поэтому, при отработке технологии исследовались параметры p канальных транзисторов.

В рамках данной работы проводилась отработка технологии формирования подзатворного диэлектрика, который обеспечивал уход порогового напряжения не более 0.4В при напряжении на затворе +5В и дозе облучения 10^6 рад.

3.2. Методика контроля стойкости МОП структуры

Стойкость подзатворного окисла МОП структуры обычно определяется путем облучения структуры в активном режиме (с приложенным на затвор положительным напряжением). Чувствительность диэлектрика оценивается по сдвигу порогового напряжения МОП транзистора или по сдвигу напряжения плоских зон МОП конденсатора. Изменение этих характеристик МОП структур в сильной степени зависит от множества различных технологических факторов, причем влияние каждого из них не до конца понятно. Поэтому, на этапе отработки технологии необходимо поведение многофакторных экспериментов с большим количеством оценочных измерений. В этом случае испытание МОП с помощью источников на основе Co^{60} не обеспечивают оперативного получения информации на большом количестве образцов. В процессе проведения данной работы для прогнозирования стойкости использовался электрический метод, основанный на лавинной инжекции электронов в окисел. Суть метода состоит в следующем: исследуемый подзатворный окисел подвергается воздействию положительных импульсов высокого напряжения, во время которых происходит тунелирование электронов из подложки в окисел по механизму Фаулера - Нордхейма. Некоторая часть инжектированных электронов посредством ударной ионизации приводит к образованию электронно - дырочных пар в объеме окисла (Рис. 5, 6)

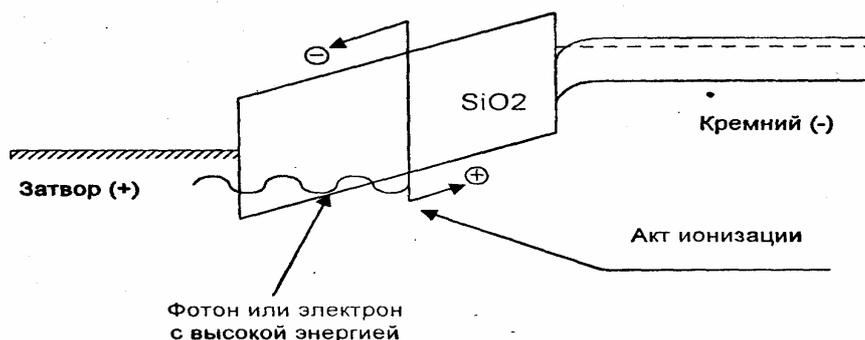


Рис.5 Генерация электронно-дырочных пар при воздействии ионизирующего излучения.

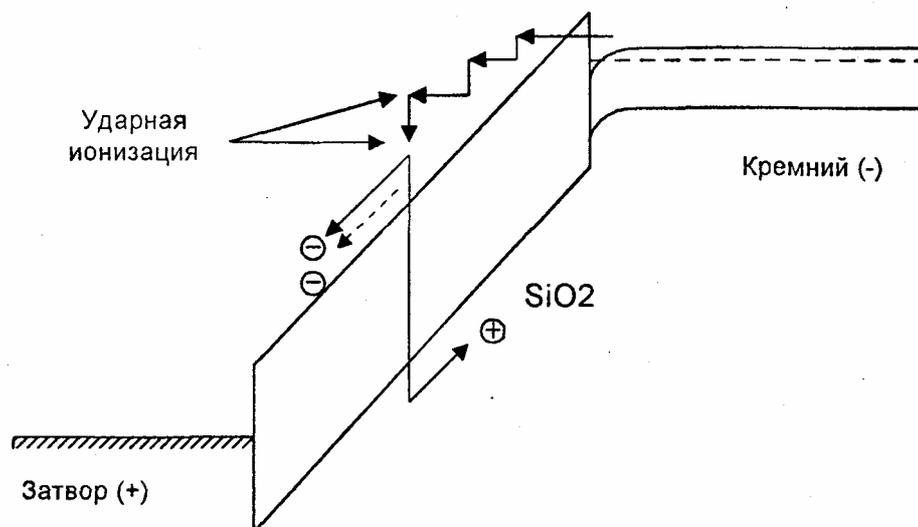
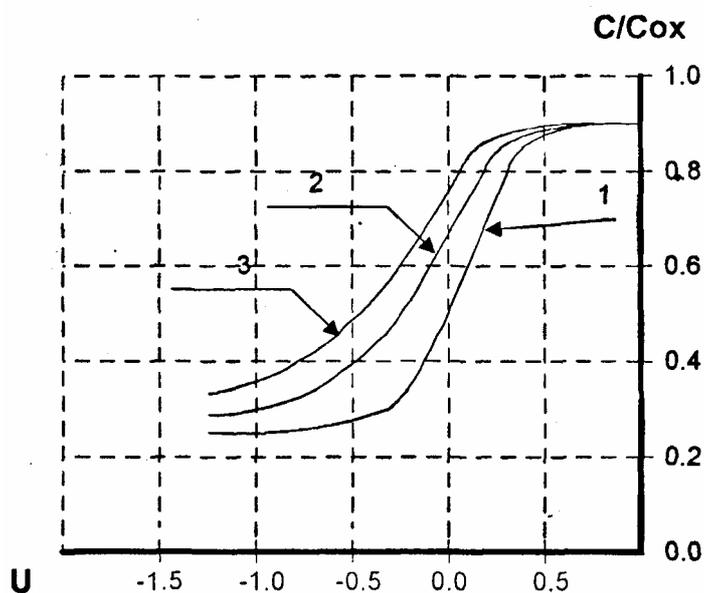


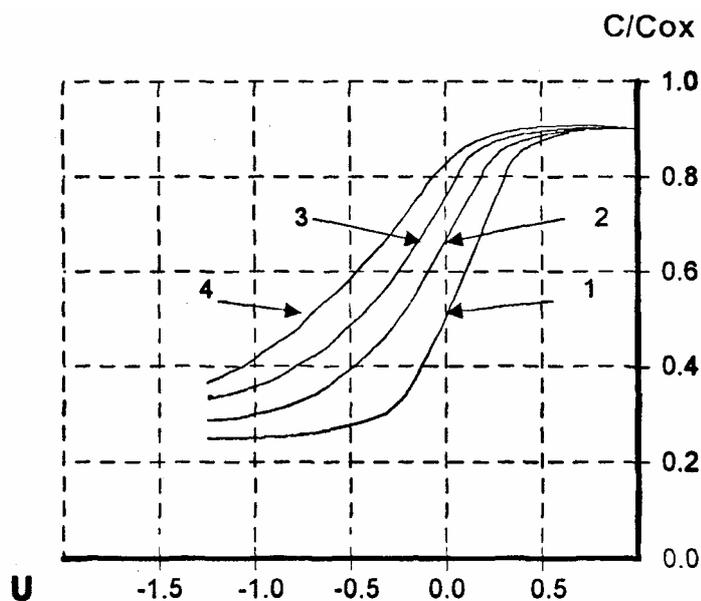
Рис. 6 Генерация электронно-дырочных пар при туннельной инжекции электронов из кремниевой подложки в окисел

Получающиеся в результате этого процесса электроны и дырки ведут себя аналогично электронам и дыркам, которые образуются при воздействии ионизирующего излучения на МОП структуру и при положительном смещении на затворе (наихудший случай). На рис. 7 приведены вольт-фарадные характеристики пирогенного окисла при воздействии облучения (Co^{60}), а на рис.8 приведены вольт-фарадные характеристики пирогенного окисла) при инжекции электронов при $E=9.5\text{MB/cm}$, $t=10\text{мкс}$.



1. Исходная кривая
2. Доза $2 \cdot 10^4$ рад
3. Доза 10^5 рад

Рис.7 Вольт-фарадные характеристики пирогенного окисла ($D_{SiO_2}=700\text{A}$) при воздействии облучения (Co^{60})



1. Исходная кривая
2. После инъекции заряда 10^{-5} Кл/см²
3. После инъекции заряда 10^{-4} Кл/см²
4. После инъекции заряда 10^{-3} Кл/см²

Рис.8. Вольт-фарадные характеристики пирогенного окисла ($D_{SiO_2}=700\text{Å}$) при инъекции электронов при $E=9.5\text{МВ/см}$, $t=10\text{мкс}$.

Приравнивая плотности положительного заряда, формируемого в SiO_2 при облучении и вследствие туннельной инъекции, может быть составлена аналитическая зависимость дозы облучения и суммарной плотности инжектированного в окисел заряда. Установлено, что для МОП структур с подзатворным диэлектриком толщиной 300-400Å инжектированный заряд 10^{-3} кл/см² при напряженности поля 9.3-9.4 МВ/см вызывает приблизительно такое же изменение напряжения плоских зон МОП структуры, что и у облучение Co^{60} дозой 10^6 рад.

Данная методика в силу своей простоты и оперативности позволила провести большой объем экспериментальных работ для отработки технологии формирования радиационно -стойких КМОП микросхем.

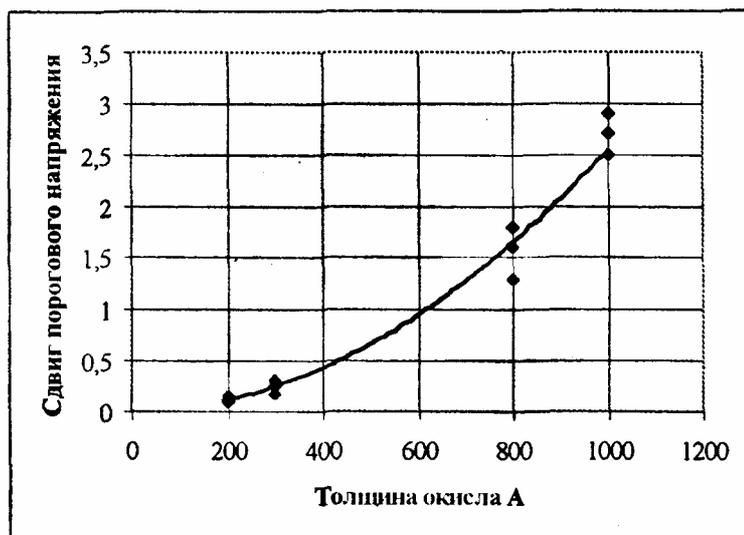
3.3. Особенности технологии формирования подзатворного диэлектрика.

В процессе отработки технологии формирования МОП структуры исследовалась зависимость сдвига напряжения плоских зон от режимов формирования окисла, от толщины окисла, от режимов отжига и от режимов последующих операций формирования микросхемы.

На рис.9 приведена зависимость сдвига напряжения плоских зон после облучения дозой 10 рад для «пирогенных» окислов разной толщины. Видна резкая зависимость напряжения плоских зон от толщины окисла.

На рис. 10 приведена зависимость сдвига напряжения плоских зон после облучения дозой 10^6 рад от температуры отжига подзатворного окисла после формирования. Исследовалось влияние операций нанесения поликремния, плазмохимического травления, нанесения НТФСС, БФСС, напыления алюминия, вжигания алюминия и других операций технологического маршрута. Установлено, что при оптимально выбранной толщине подзатворного окисла и режимов его формирования и отжига, последующие операции формирования микросхемы не влияют на уход пороговых напряжений МОП транзисторов. В результате оптимизации технологических режимов был отработан технологический маршрут, обеспечивающий

получение КМОП схем, устойчивых к ионизирующему облучению.



чению.

Рис. 9. Зависимость сдвига порогового напряжения п канального транзистора с «пирогенным» подзатворным окислом от толщины окисла (для дозы облучения 10^6 рад)

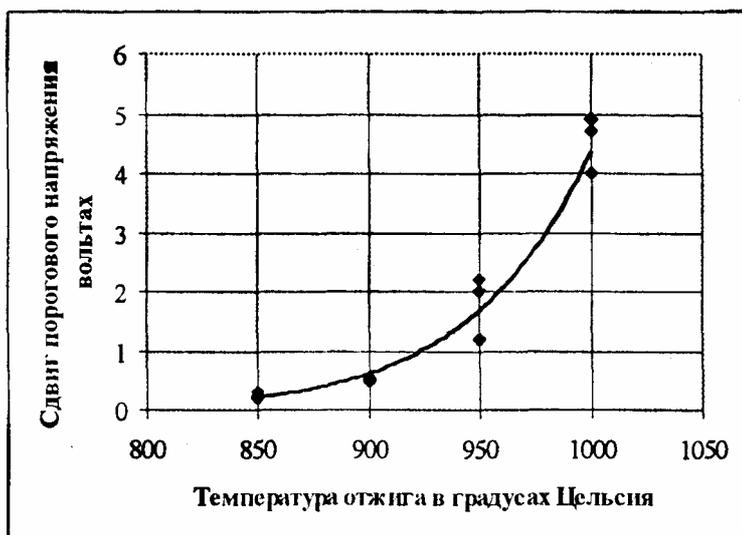


Рис. 10. Зависимость сдвига порогового напряжения п канального транзистора с «пирогенным» подзатворным окислом от температуры отжига. Толщина окисла 300 ангстрем.

3.4. Повышение устойчивости КМОП схем к импульсам ионизирующего излучения большой мощности.

Во время воздействия импульса ионизирующего излучения большой мощности на КМОП интегральную микросхему в объеме кремния генерируется большое количество электронно - дырочных пар. Барьерные свойства р-п переходов на какое-то время исчезают. Схема теряет работоспособность. По мере рекомбинации электронно - дырочных пар барьерные свойства р-п переходов начинают восстанавливаться, но из за высокой концентрации неосновных носителей, включаются паразитные тиристоры (схема «защелкивается»). Если напряжение удержания паразитного тиристора ниже напряжения питания, работоспособность схемы не восстановится, а высокий ток паразитного тиристора приведет к разрушению схемы. В обычных КМОП схемах напряжение удержания паразитных тиристоров ниже напряжения питания и лежит в пределах 3-4 вольт. Для увеличения напряжения удержания паразитного тиристора необходимо значительно уменьшить коэффициент усиления горизонтальных

паразитных биполярных транзисторов. Это достигается введением дополнительных сильнолегированных охранных колец и использованием в качестве подложки для микросхемы тонкой низколегированной эпитаксиальной пленки на высоколегированной подложке.

В данной работе, для обеспечения устойчивости к воздействию импульсов ионизирующего излучения большой мощности, использовалась эпитаксиальная структура с эпитаксиальной пленкой п- типа с концентрацией примеси 10^{15} см^{-3} толщиной 8 мкм, и подложка п- типа с концентрацией примеси $>5 * 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Использование такой эпитаксиальной структуры позволило повысить напряжение удержания паразитного тиристора до величины $> 20\text{В}$.

3.5. Результаты испытаний тестовых танзисторов.

По отработанному маршруту были изготовлены пластины с тестовыми п канальными МОП транзисторами. Транзисторы собирались в металлокерамические корпуса. Были собраны 20 образцов из трех партий по три - четыре прибора с пластины. Испытания проводились на у установке с источником Co при мощности дозы $3*10^6 \text{ рад/сек}$. На затворы транзисторов подавалось положительное напряжение $+5\text{В}$. На рис. 11 приведена гистограмма распределения сдвига пороговых напряжений п канальных транзисторов. Видно, что сдвиг порогового напряжения не превышает 0.3 В при дозе 10^6 рад .

Таким образом, разработанный технологический маршрут обеспечивает получение КМОП микросхем, устойчивых к воздействию ионизирующего излучения с дозами до 10^6 рад .



Рис. 11 Гистограмма распределения сдвига пороговых напряжений п канальных транзисторов для дозы облучения 10^6 рад .

4. Разработка радиационно-стойких интегральных схем на НПО «Интеграл»

В настоящее время НПО «Интеграл» разрабатывает и поставляет широкую номенклатуру микросхем, в том числе для применения в аппаратуре военных, космических и других специальных систем. Проводится целенаправленное совершенствование конструкции и технологии ИС, направленное на повышение радиационной стойкости. В ходе отработки новых конструктивно-технологических решений проведены испытания трех групп изделий:

1. ИС, изготовленные ранее (до модернизации) с приемкой «5» по «стойкой» эпитаксиальной КМОП технологии с проектными нормами 2 мкм и высоколегированными защитными областями (далее - "защита"), предотвращающими возникновение радиационно-индуцированных токов утечки (типовой представитель 1554ТМ2).

2. ИС, серийно выпускаемые в настоящее время с приемкой «1» по масштабированной эпитаксиальной технологии без "защиты" (1554ЛН1, 1594ЛН1, 1554АП5, 1594АП5, 1594ТМ9).

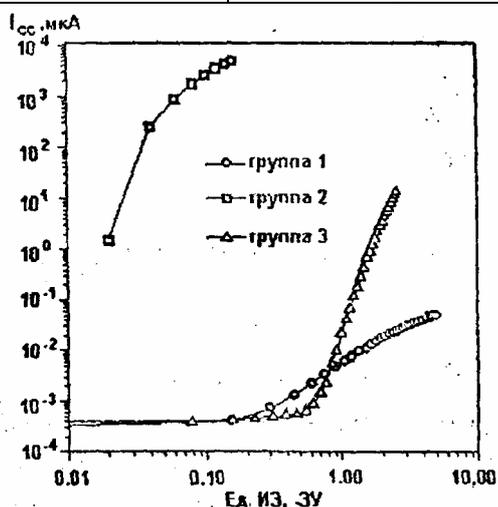
3. ИС, разработанные в 1999 г с приемкой «5» по «стойкой» эпитаксиальной КМОП технологии с "защитой" (типовой представитель 1554ЛН1).

Полученные результаты лазерных и рентгеновских имитационных испытаний представлены в таблице 4

Таблица 4.

Обобщенные результаты оценки спецстойкости ИС

		Группа 1 (до 1995)	Группа 2(1996-1998)	Группа 3(1999)
Типовой уровень стойкости		2У	менее 1У	3У
И2	Катастрофический отказ	нет до 3У	нет до 3У	нет до 3У
	Тиристорный эффект	нет до 3У	0,01 1У	нет до 3У
	УБР	0,06 1У	0,02 1У	0,06 1У
	ВПР	12 мкс	20 мкс	0,3 мкс
И3	Активные Л ^А ОПТ	2...3У	2...3У	более 2 3У
	Утечки	нет до 3 У	2 1У	нет до 3У

Рис.12. Зависимость тока потребления $I_{сс}$ ИС1554ЛН1 от уровня ИЗ.

Из данных табл. 4 видно, что уровень спецстойкости ИС серии 1554 существенно зависит от конструктивно-технологической реализации, принятой в различные годы. В результате испытаний установлено, что доминирующим механизмом отказа ИС серий 1554, 1594 при воздействии стационарного ИИ является рост тока потребления. Типовая зависимость $I_{ср}$ от уровня стационарного ИИ для ИС серии 155 групп 1- 3 представлена на рис. 13. Видно, что ИС группы 2 имеют значительно меньший уровень стойкости.



Рис. 13. Изменение выходного напряжения в динамическом режиме и тока потребления при воздействии импульсного излучения с уровнем 1,2-3У.

Слева: по горизонтали - 1 мкс/дел, по вертикали - 1 В/дел. Справа: по горизонтали - 250 нс/дел, по вертикали - 500 мА/дел.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Выпускаемые в настоящее время серийно с приемкой «I» ИС серий 1554 и 1594 соответствуют группе стойкости менее 1У (по фактору И). Масштабирование и исключение "защиты", проведенные ранее в рамках модернизации ИС, привело к существенному снижению уровня спецстойкости ИС.

2. Испытанные изделия (1554ЛН1) с восстановленной "защитой", разработанные в 1999 году в ОКР «Дукат-ПЗ» с приемкой «5», соответствуют уровню 3У (по фактору И). Разработанный элементно-технологический базис может быть рекомендован для создания широкой номенклатуры спецстойких ИС.

5. ЭФФЕКТ СВЕРХГЛУБОКОГО ПРОНИКАНИЯ, ПРОБИВАНИЯ ПРЕГРАД И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА РАБОТУ ЭЛЕКТРОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Впервые установили эффект влияния на рабочие параметры микросхем, размещенных за толстостенной преградой, воздействия потока высокоскоростных частиц в режиме сверхглубокого проникания. Выдвигается предположение о том, что данный эффект возможен при соударении потока микрометеоритов с космическими аппаратами, что может отражаться на работе их компьютерного оборудования.

Эффект сверхглубокого проникания (СГП) заключается в проникании потока высокоскоростных частиц при соударении их с металлической преградой на глубину преграды в сотни миллиметров.

Скорости частиц составляют величину ≈ 1000 м/с, диаметры - до сотен микрон. Плотность потока и размеры (длина) критичны. Образующий в преграде "след" ("трек") является частично или полностью схлопнувшимся каналом. В случае полного схлопывания он выявляется в виде зон материала преграды, обладающего повышенной травимостью. На стенках каналов или внутри них в определенных местах фиксируется материал частиц. Открытой пористости, а следовательно, проницаемости преграды не образуется. Диаметр канала в десятки и сотни раз меньше диаметра частиц. Эффект присущ как металлическим частицам, так и керамическим (металлокерамическим). При соударении с потоком частиц рентгеновской пленкой, размещенной в толще преграды, фиксируется возникновение периодического узкозонного рентгеновского излучения.

Можно предположить, что эффект СГП будет существовать и при столкновении металлических тел, в том числе элементов конструкции космических аппаратов (КА), со сгустками микрометеоритов (частиц), существующих в космосе. В этом случае должно происходить пробивание обшивки аппаратов (без их разгерметизации) и осуществляется воздействие на электронное оборудование, в частности, что более существенно, компьютерное, отличающееся высокой степенью интегрированности. Воздействие может быть как механическое - материала частиц, так и импульсное - рентгеновское. Возможен вариант не полного отказа, а изменения режимов и дальнейшего сбоя в работе оборудования. Появляющиеся сообщения о неполадках в работе бортовых компьютеров космической станции, на наш взгляд, являются подтверждением проявления эффекта СГП при соударении с потоками не регистрируемых микрометеоритов.

Для подтверждения или отрицания предположения была проведена качественная проверка возможности воздействия на работу электронных приборов (микросхем быстродействующей КМОП логики) материала частиц после пробивания ими стальных преград толщиной 100 и 200 мм (т. е. микросхемы защищались от потока частиц стальным корпусом толщиной 100 и 200 мм).

Сравнение тестируемых¹ параметров микросхем до и после воздействия потока частиц показало изменение некоторых из них на величины до 25-80%.

Полученные экспериментальные данные могут служить первым доказательством высказанных выше предположений, что делает весьма актуальной задачу исследования физического механизма деградации электропараметров интегральных микросхем КА в условиях воздействия потоков микрочастиц и разработку методов повышения устойчивости и защиты электронной элементной базы КА. В настоящее время УП «Белмикросистемы» разработан ряд технических решений, направленных на повышение устойчивости микросхем к воздействию эффекта сверхглубокого проникновения.

6. ВЫВОДЫ

1. Актуальность восстановления производства радиационно-стойких ИЭТ и разработки новых ИЭТ обусловлена тем обстоятельством, что и финансовые и материальные затраты на эти работы оказываются значительно ниже издержек и потерь, которые возникают при разработке и эксплуатации изделий ракетно-космической техники, эксплуатация которых проходит в условиях повышенной радиации.

2. За рубежом рынок радиационно-стойких ИЭТ заполняется фирмами, специализирующимися по разработке и изготовлению таких изделий, например, фирмы HARRIS, RCA (США). Другие фирмы организуют специализированные технологические линии, например, ф. GENERAL ELECTRIC, ухудшающим именно устойчивость к радиации.

3. К радиационно-стойким приборам, эксплуатируемым в собственно космических системах и предназначенным для эксплуатации в условиях воздействия ядерного взрыва, должны применяться разные требования. Это связано как с резко отличающейся мощностью дозы облучения, так и со специфическим нестационарным воздействием. Кроме того, сам процесс проверки (тестирования) устойчивости микросхем к ионизирующему воздействию, а именно: в каком электрическом состоянии находится микросхема в момент облучения и тестирования, какая мощность тестирующего облучения, температура выдержки (отжига)? Нужно ли оценивать результаты тестирования и по общей поглощенной дозе, и по нестационарному воздействию, и по нейтронам одновременно. Эти вопросы не являются разрешенными полностью и требуют соответствующих исследований при разработке и конкретном применении радиационно-стойких приборов.

4. В настоящий момент для применения в космических системах коммерческих микросхем используется процесс тестирования выборок годных приборов с одной пластины (путем последовательных наборов облучения при смещении), функциональному контролю, «отжигу» при комнатной температуре, и так несколько раз. В некоторых случаях вместо годных приборов с пластины подвергают воздействию тестовые элементы с данной пластины с целью увеличения процента выхода годных приборов. По результатам тестирования выборки с пластины можно сделать вывод о пригодности всей пластины к использованию в условиях космоса.

5. Очевидно, что если при изготовлении микросхемы ее единичные элементы, такие как транзисторы и изолирующие их области, слабо подвергаются деградации при ионизирующем воздействии, то схема, построенная на таких элементах, будет также слабо подвергаться деградации. Проведенные исследования механизма деградации элементной базы транзисторного уровня позволили определить конструктивно-технологические особенности топологии микрорисунка и способа изготовления двухмикронной КМОП и ТТЛШ элементной базы, обеспечивающих проектирование и изготовление радиационно-стойких изделий уровня не хуже запоминающих устройств. Кроме того, установлены причины случайных отказов ТТЛШ-схем и определены режимы радиационно-термической обработки для отбраковки потенциально ненадежных изделий. Данные наработки защищены соответствующими авторскими свидетельствами.

6. Переход на субмикронный уровень технологии создания СБИС требует новых серьезных исследований деградации элементной базы в более сильных электрических полях в условиях радиации и, возможно, новых конструктивно-технологических решений для создания радиационно-стойкой субмикронной элементной базы. Однако, очевидно, что необходимо создавать схемы в более широком температурном диапазоне, чем коммерческие. В таком случае, вероятность получения более стойких к радиации изделий повышается.