

Д. т. н. А. И. БЕЛОУС, С. А. ЕФИМЕНКО,
д. т. н. Э. П. КАЛОШКИН, И. Н. КАРПОВ,
к. ф.-м. н. В. Н. ПОНОМАРЬ, к. т. н. А. В. ПРИБЫЛЬСКИЙ

Республика Беларусь, г. Минск, НИКТП «БелМикроСистемы»
E-mail: belms@belms.belpak.minsk.by

Дата поступления в редакцию
07.12 2000 г.

Оппонент д. т. н. В. А. ПИЛИПЕНКО

НОВЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ БИПОЛЯРНЫХ МИКРОСХЕМ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ

Предложены конструктивные решения, позволяющие исключить наиболее вероятные механизмы отказов БИС, а также метод их радиационно-термической отбраковки.

Современные интегральные микросхемы (ИС) находят все более широкое применение в радиоэлектронной аппаратуре, работающей в условиях воздействия проникающей радиации различного уровня [1]:

- при ядерном взрыве — поток нейтронов до 10^{15} см⁻² и гамма-квантов с экспозиционной дозой до 10^6 рад при мощности дозы до 10^{13} Р/с;
- вблизи ядерных реакторов — поток нейтронов $10^{12} - 10^{15}$ см⁻² и дозе гамма-квантов до 10^7 Р/с;
- при прохождении естественных и искусственных радиационных поясов Земли в течение пяти лет функционирования космического аппарата на геостационарной синхронной орбите — общая доза $(0,5 - 2) \cdot 10^5$ рад (эквивалентно интегральному потоку электронов $5 \cdot 10^{14}$ см⁻² с энергией 1МэВ).

Высокая стоимость подобных объектов обуславливает особо жесткие требования к безотказности элементной базы РЭА и, в первую очередь, к микросхемам различного функционального назначения. Поэтому задача гарантированного обеспечения радиационной стойкости ИС и аппаратуры на их основе является исключительно актуальной.

Из [1, 2] видно, что далеко не все типы ИС обеспечивают работоспособность аппаратуры в указанных выше условиях. Так, МОП ИС, обладая стойкостью к потоку нейтронов не слабее $5 \cdot 10^{14}$ см⁻², очень чувствительны к общей дозе ионизирующего излучения и лишь отдельные типы ИС сохраняют работоспособность при уровне 10^6 рад [3].

Наиболее перспективными с точки зрения радиационной стойкости являются ИС, реализованные по биполярной технологии. Согласно [1, 2], 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. Более того, отдельные типы ИС, в первую очередь ТТЛШ, способны выдержать воздействие потока нейтронов до 10^{15} см⁻² и общей дозы ионизирующего излучения до 10^7 рад.

Таким образом, в настоящее время ИС на основе ТТЛШ наиболее перспективны для реализации РЭА, работающей в условиях высокого уровня проникающей радиации, поскольку обеспечивают достаточ-

но 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 ИС ТТЛШ, можно обнаружить существенные колебания их радиационной стойкости. Так, ТТЛШ ИС малой и средней степени интеграции с изоляцией компонентов *p-n*-переходом характеризуются достаточно высокой радиационной стойкостью к общей дозе, однако имеют недостаточное быстродействие, стойкость к потоку нейтронов и импульсному ионизирующему излучению. В связи с этим была применена изопланарная (окисная) изоляция компонентов.

Необходимо отметить, что с ростом степени интеграции БИС и СБИС, характеризующиеся сложным и многообразным характером внутрисхемных связей, могут быть реализованы лишь на основе изолируемых окислом компонентов. Последние имеют предельно малые размеры и объемы активных и пассивных областей и работают 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 [4, 5].

МЕХАНИЗМЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОТКАЗОВ В ТТЛШ ИС ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Уже первые испытания ТТЛШ ИС с изопланарной межкомпонентной изоляцией показали резкое ухудшение их радиационной стойкости к общей дозе ионизирующего излучения [3, 6]. Анализ показал, что причиной отказов являются каналы утечки, возникающие между активными элементами ИС. При этом величина токов утечки достигает максимума при дозе $(1 - 5) \cdot 10^5$ рад (Si) и имеет тенденцию сохраняться, либо снижается при увеличении дозы до 10^6 рад (Si) и более.

Исследовались ТТЛШ ИС серии 1533, БИС быстродействующего радиационно стойкого 8-разрядного умножителя 583ВФ11 и БИС контроллера предварительной обработки информации 583ВГ1. Анализ статистического материала по отказам после ионизирующих излучений на первых этапах производства этих ИС выявил основные виды отказов: увеличение значений входных токов высокого уровня

(I_{ih}) по отдельным выводам БИС, увеличение тока потребления (I_{cc}), увеличение уровня выходного напряжения логического нуля (U_{0l}) по отдельным выводам БИС, уменьшение уровня выходного напряжения логической единицы (U_{0h}) по отдельным выводам БИС.

Устранение каналов утечки, возникающих во входных каскадах ТТЛШ БИС при их облучении в активном режиме работы, обеспечивается техническим решением, схема которого показана на **рис. 1** (а. с. 1589957 и 1554688 СССР).

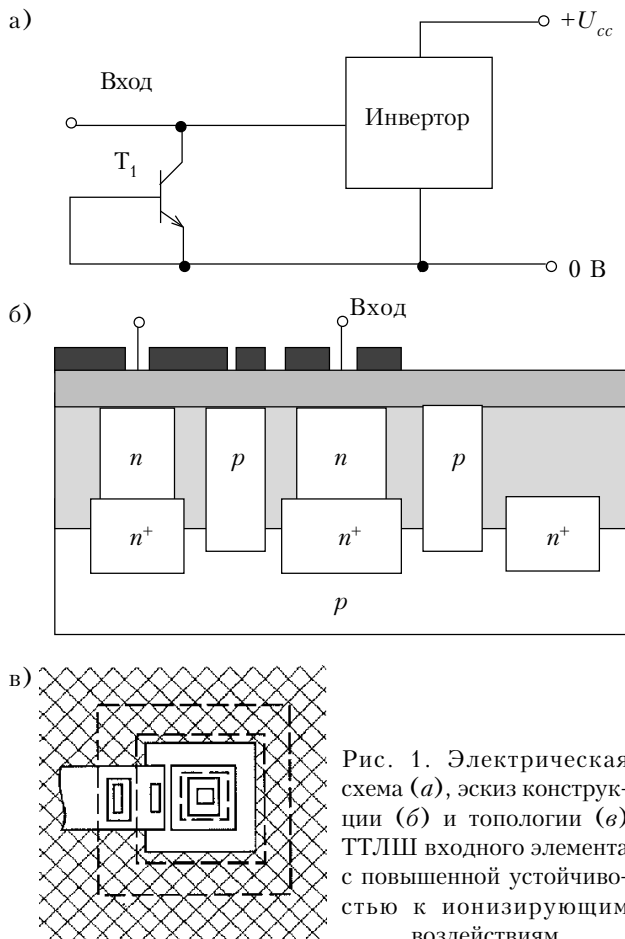


Рис. 1. Электрическая схема (а), эскиз конструкции (б) и топологии (в) ТТЛШ входного элемента с повышенной устойчивостью к ионизирующим воздействиям

Эмиттер входного транзистора ТТЛШ БИС выполнен в форме кольца, причем n -область эмиттера окружает коллекторную область входного транзистора, а база этого транзистора также выполнена в форме кольца, расположенного между эмиттерной и коллекторной областями скрытых n -слоев под окислом области изоляции. Такое оригинальное решение исключает условия образования паразитного транзистора (эмиттером служит область скрытого n -слоя, базой — подложка, а коллектором — скрытый слой других элементов БИС, в том числе резисторов). Предложенная кольцевая конструкция входного транзистора БИС обеспечивает 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 умень-

шает вероятность отказа БИС при разряде статического электричества.

В процессе изготовления ИС значения их электрических и конструктивно-технологических параметров имеют некоторые отклонения от средних значений. Эти отклонения определяются колебаниями толщины слоев и глубины 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 ИС. Однако в силу групповых методов изготовления и выборочных методов контроля возможно поступление потребителю единичных образцов ИС, у которых значения электрических параметров и электрофизических характеристик областей отдельных компонентов ИС могут выходить за установленные пределы. Существующие методы изготовления и контроля с высокой вероятностью обеспечивают, но не гарантируют отбраковку потенциально ненадежных в условиях ионизирующих воздействий микросхем. Количество таких потенциально радиационно нестойких ИС в поставляемых партиях может существенно колебаться. Расчет вероятности отказов невозможен по нескольким причинам: многообразие факторов, влияющих на возникновение отказов, сложность учета зависимости отказов от каждого из факторов, отсутствие достаточно адекватных физико-математических моделей механизмов отказов ИС вследствие ионизирующих воздействий. Известные конструктивно-технологические и схемотехнические методы повышения радиационной стойкости [4] позволяют гарантировать работоспособность базовых элементов ИС, но не исключают (хотя и уменьшают) вероятность появления у потребителя отдельных образцов ИС с флуктуацией параметров за счет пониженной радиационной стойкости.

Естественно, что разработка эффективного метода отбраковки ИС с пониженной радиационной стойкостью до отгрузки потребителям является актуальной проблемой.

В результате анализа отбракованных ТТЛШ ИС были установлены механизмы отказов при радиационных повреждениях областей, которые можно разделить на две основные группы:

- локальные разрывы p^+ -слоя охранного кольца, вводимого по периферии каждого активного и пассивного элемента ИС (**рис. 2, а**);
- локальное смыкание n^+ -области эмиттера отдельных транзисторов Шоттки с областью изолирующего диэлектрика изопланарной изоляции (локальное выхождение конструктивного решения изоляции типа «Изопланар-1» в изоляцию типа «Изопланар-2», известную также под названием конструкции с «пристеночным эмиттером») (**рис. 2, б**).

Дефекты первой группы являются причиной параметрических отказов ТТЛШ БИС, что обусловлено возникновением в процессе облучения каналов утечек между скрытыми слоями компонентов БИС,

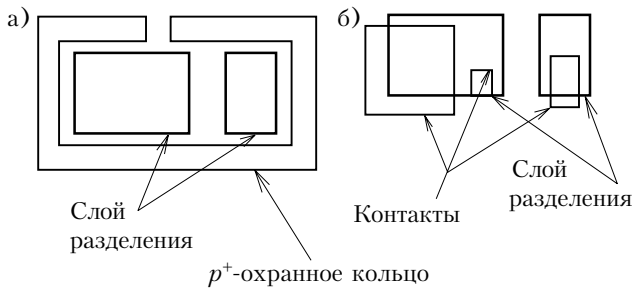


Рис. 2. Виды дефектов, приводящих к отказам ТТЛШ ИС: а – разрыв охранного p^+ -кольца; б – смыкание области эмиттера с изолирующим окислом

расположенных в непосредственной близости от 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 образова-

ния вертикального канала утечки между эмиттером и коллектором транзистора Шоттки. В отдельных случаях, если поврежденные элементы задействованы в периферийных частях кристалла (согласующие каскады, усилители уровней и т. д.), эти дефекты приводят к параметрическим отказам.

Установление этих механизмов отказа позволило предложить метод эффективной оценки устойчивости ИС к общей дозе ионизирующих излучений.

МЕТОД РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОТБРАКОВКИ ТТЛШ БИС

Сущность рассматриваемого метода заключается в введении в технологический процесс изготовления ТТЛШ БИС дополнительных операций радиационно-термической отбраковки (РТО).

Метод РТО предполагает предварительное облучение всей партии собранных в корпуса ИС дозой гамма-квантов или электронов с последующей их отбраковкой (рис. 3). Для повышения эффек-

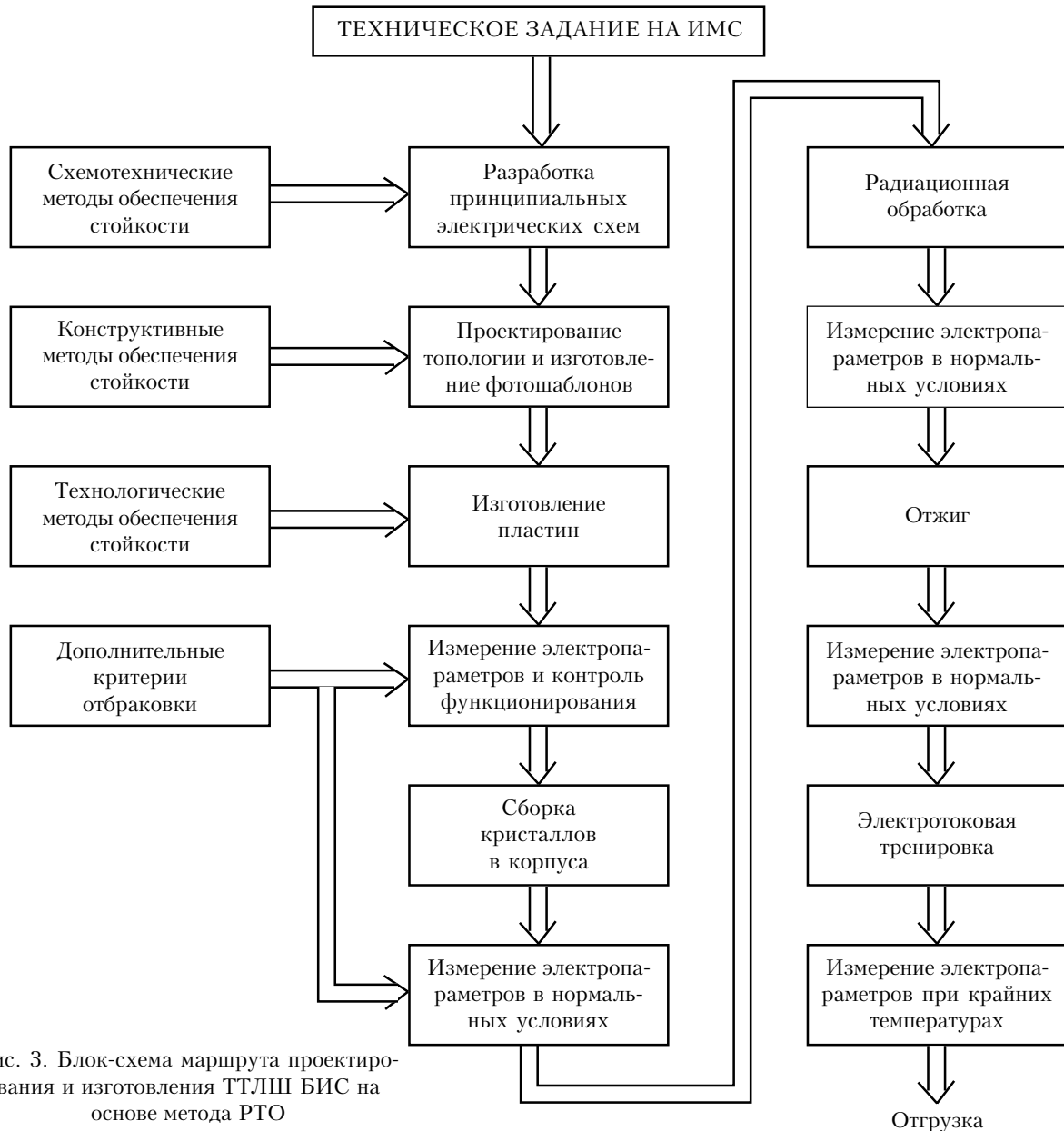


Рис. 3. Блок-схема маршрута проектирования и изготовления ТТЛШ БИС на основе метода РТО

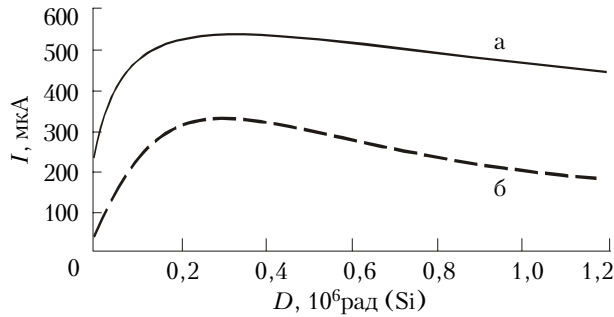


Рис. 4. Зависимость тока утечки от уровня общей дозы для двух групп дефектов:
a — разрыв охранного p^+ -кольца; *б* — смыкание области эмиттера с изолирующим окислом

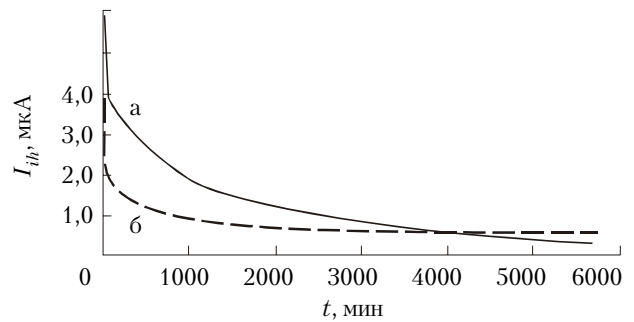


Рис. 5. Зависимость величины входного тока от времени после радиационной обработки для двух групп дефектов:
a — разрыв охранного p^+ -кольца; *б* — смыкание области эмиттера с изолирующим окислом

тивности метода облучение следует проводить дозой, эквивалентной ожидаемой полной поглощенной дозе радиации в реальных условиях применения проектируемой РЭА, но при которой еще не возникает значительных повреждений в объеме кристалла. Для восстановления первоначальных значений параметров ИС после их разбраковки производится восстанавливающий отжиг — выдержка приборов при повышенной температуре.

Для реализации метода РТО необходимо определить оптимальные режимы проведения радиационной обработки и последующих операций восстановления.

Величину поглощенной дозы гамма-излучения при радиационно-термической отбраковке ТТЛШ БИС целесообразно выбирать в пределах $(1...3) \cdot 10^6$ рад, т. к. при дозах более 10^6 рад в полупроводниковой структуре происходит насыщение поверхностных эффектов, обусловленных ионизацией [3, с. 90–92]. На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости токов утечки для двух групп дефектов (рис. 2) от уровня общей дозы ионизации (D), подтверждающие насыщение токов утечки, обусловленных ионизацией. Следует особо подчеркнуть, что облучение ТТЛШ БИС необходимо выполнять в активном режиме работы БИС, когда на входы поданы изменяющиеся во времени управляющие воздействия, а к выходам подключена электрическая нагрузка. 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.

При проведении РТО большое значение имеет выбор межоперационных сроков, т. к. появляющиеся при радиационной обработке утечки могут уменьшаться со временем в силу механизма временного отжига. На рис. 5 представлена зависимость величины входного тока высокого уровня I_{ih} дефектных ТТЛШ ИС серии 1533 от времени, прошедшего после облучения. Параметр I_{ih} наиболее чувствителен к воздействию ионизирующего излучения, поскольку его численное значение определяется, в первую очередь, состоянием изоляции между соседними скрытыми n^+ -слоями буферных транзисторов Шоттки большой площади. Как видно из рис. 5, при нормальных температурных условиях спад величи-

ны I_{ih} до уровня нормы технических условий происходит за время от 2 до 96 ч (в зависимости от исходной величины утечки). С целью эффективной отбраковки ИС с нарушениями, показанными на рис. 2, 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 ч. За это время величина радиационно-стимулированного тока утечки никогда не уменьшается до уровня 5...10 мкА, что обеспечивает эффективное выявление и отбраковку дефектных БИС.

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

В табл. 1 представлены результаты сравнительного анализа микросхем из трех различных партий — годных и с типичными отказами по указанным параметрам. Как видно из полученных данных, во всех случаях однозначно установлен механизм отказа и локализовано место отказа, что подтверждает корректность выбора указанных параметров.

В табл. 2 представлены основные результаты экспериментов по выбору оптимальных режимов (температуры и времени) восстановительного отжига ТТЛШ БИС 8-разрядного радиационно стойкого слайсового умножителя 1817ВФ11 для выборки 120 шт., выдержавших воздействие ионизирующего излучения с общей дозой 10^6 рад. (Здесь I_{il} — входной ток низкого уровня.)

С учетом степени восстановления электропараметров БИС, предельной температуры кристалла БИС и имеющегося в отрасли стандартного технологического оборудования для ТТЛШ БИС серии 1817 выбран режим отжига, обеспечивающий практически полное восстановление электропараметров БИС — 260°C в течение 3, 5 ч. (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 1

Результаты сравнительного анализа микросхем

Параметры ИС	Годные ИС	Отбракованные ИС	Место отказа
U_{oh} , В	-3,65	1,7-1,9	Нет зазора "эмиттер-разделение"
I_{ih} , мкА	~0	30-800	Разрыв охранного кольца
I_{cc} , мА	~190	300-1000	Нет зазора "эмиттер-разделение", разрыв охранного кольца

Таблица 2

Значения электрических параметров ТТЛШ БИС при различных режимах восстановительного отжига

Параметр	Начальный замер	После радиационной обработки	Режим отжига				
			25°C, 48 ч	150°C, 6 ч	260°C, 1 ч	260°C, 2 ч	260°C, 3,5 ч
I_{il} , мкА	10-12	20-50	20-50	20-30	10-30	10-20	10-20
I_{cc} , мА	190-208	180-200	180-200	200-205	200-207	200-207	203-207

Таблица 3

Результаты контрольных испытаний партии БИС 1817ВФ11

Параметры БИС	Начальный замер	После радиационной обработки	После отжига в режиме 260°C, 3,5 ч	После испытаний по И1, И2, И3 дозой облучения $2 \cdot 10^6$ рад (Si)	После испытаний на безотказность (1000 ч)
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

С целью оценки возможных изменений характеристик надежности радиационно стойких ТТЛШ ИС серии 1817, подвергшихся радиационно-термической обработке, были проведены контрольные испытания партии (50 шт.) БИС 1817ВФ11. Микросхемы изготавливались по технологическому маршруту с РТО, после чего на них проводился цикл испытаний по факторам И1, И2, И3 известного стандарта с последующими испытаниями на надежность по стандартной методике в течение 1000 ч. Средние значения основных параметров контрольной партии БИС на различных этапах изготовления представлены в **табл. 3**.

Анализ результатов проведенных испытаний 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).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Чернышев А. А., Голотюк О. Н., Попов Ю. А. и др. Радиационная стойкость интегральных схем, применяемых в специализированных ЭВМ // Зарубежная электронная техника. — 1984. — № 8. — С. 87—112.
2. Агаханян Т. М., Аствацатурьян Е. Р., Скоробогатов П. К., Чумаков А. Н. Физические ограничения на стойкость биполярных полупроводниковых структур в ИС повышенной степени интеграции к дестабилизирующим воздействиям // Микроэлектроника. — 1984. — Т. 13, вып. 5. — С. 392—400.
3. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / Под ред. Е. А. Ладыгина. — М.: Сов. радио, 1980.
4. Buschbom L. M., K. B. Ramana Say, Kleris I. N. Gammatotal dose effects on ALS bipolar oxide side-wall isolated devices // IEEE Transaction on Nuclear Science. — 1990. — Vol. NS-30. — P. 4105—4109.
5. Емельянов В. А., Белоус А. И., Прибыльский А. В. Исследование динамики изменения уровня стойкости цифровых микросхем / В сб.: Радиационная стойкость электронных систем — стойкость-2000. — М.: ПАИМС. — 2000. — С. 41—43.
6. Johnston A. H. The influence of VLSI technology evolution on radiation-induced latchup in space system // IEEE Transaction on Nuclear Science. — 1996. — Vol. NS-43. — P. 505—521.