



УДК 621.382.002

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.197.201

# КОНТРОЛЬ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ В ПРОЦЕССЕ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА: ВАРИАНТЫ И КРИТЕРИИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА

## MICROELECTRONIC PARTS' RADIATION HARDNESS ASSURANCE WITHIN FABRICATION PROCESS: GUIDELINES TO RATIONAL METHODICAL APPROACH SELECTION CRITERIA

МОСКОВСКАЯ ЮЛИЯ МАРКОВНА<sup>1,2</sup><sup>1</sup>АО «ЭНПО «Специализированные электронные системы»

115409, Россия, г. Москва, Каширское ш., 31

тел.: +7 (495) 984-67-44, +7 (499) 324-04-20

ymmos@spels.ru

www.spels.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский

ядерный университет «МИФИ»

115409, Россия, г. Москва, Каширское ш., 31

Tel.: +7 (495) 788-56-99

MOSKOVSKAYA YULIA M.<sup>1,2</sup><sup>1</sup>JSC "SPECIALIZED ELECTRONIC SYSTEMS" (SPELS)

31 Kashirskoe Highway, Moscow, 115409, Russia

Tel.: +7 (495) 984-67-44, +7 (499) 324-04-20

ymmos@spels.ru

www.spels.ru

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI,

31 Kashirskoe Highway, Moscow, 115409, Russia

Tel.: +7 (495) 788-56-99

Обоснованы критерии выбора рационального объема и методического подхода к контролю соответствия изделий микроэлектроники требованиям в зависимости от категории радиационной стойкости (РС) на основе статистического анализа запасов и разбросов радиационно-чувствительных параметров изделий и реализующих технологических процессов для каждой категории.

**Ключевые слова:** радиационная стойкость; базовый технологический процесс; изделия микроэлектроники; контроль партий пластин; разбраковка.

The approach has been developed for choosing a rational test volume and method to confirm the correspondence of a microelectronic part to the technical requirements, depending on particular radiation hardness category and based on a statistical analysis of radiation-sensitive parameters reserve and range values as well as of technological processes used.

**Keywords:** radiation hardness; basic technological process; microelectronic parts; predictive grading.

### ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей при организации технологического контроля радиационной стойкости (РС) изделий микроэлектроники в процессе производства является обеспечение рационального сочетания информативности и технико-экономической эффективности контроля в целях гарантирования эксплуатационных характеристик при приемлемых временных и финансовых затратах, определяющих стоимость готовой продукции.

Объем контрольных испытаний в наибольшей степени определяется соотношением разброса уровней РС, с одной стороны, и запаса уровней РС относительно уровней требований — с другой.

При этом разбросы уровней РС возможны между отдельными кристаллами на пластине, между кристаллами разных пластин внутри производственной партии и между различными производственными партиями.

Контроль РС в производстве в настоящее время либо не обеспечивается, либо обеспечивается бессистемно. На некоторых предприятиях проводится контроль партий пластин по РС (группа Е ОСТ В 11 0998), в технологическом процессе других внедрена 100 % разбраковка кристаллов по РС. Однако мониторинг стабильности техпроцесса в части РС по параметрам-мониторам практически не применяется.

В целях решения этой задачи предлагается порядок выбора рационального методического подхода к контролю РС в производ-

стве по критерию максимальных «информационности — технико-экономической эффективности» в зависимости от заданных требований назначения изделий микроэлектроники по РС (условных категорий РС — табл. 1) [1], запаса фактических уровней РС изделий относительно заданных требований и разбросов РС изделий.

Контроль РС в производстве обеспечивается в двух видах:

1. Аттестация и мониторинг стабильности техпроцесса.
2. Контроль РС конкретных чипов-полуфабрикатов и/или готовой продукции.

Контроль технологии включает в себя аттестацию и мониторинг стабильности технологического процесса изготовления.

Форматы контроля:

- характеристизация техпроцесса по РС по типовым оценочным схемам (ТОС) и тестовым структурам;
- мониторинг стабильности технологического процесса в части РС по параметрам-мониторам.

Контроль изделий-полуфабрикатов, ТОС и готовой продукции может проводиться на непрерывной (контроль каждой производственной партии пластин) или периодической основах. В оправданных случаях может проводиться 100 % разбраковка кристаллов по РС.

Основные мероприятия по контролю стабильности технологических процессов изделий в части обеспечения радиационной стойкости включают:



Таблица 1. Условная классификация изделий микроэлектроники по категориям РС

Категория по РС	Классификационные признаки отнесения изделия ЭКБ к категории по РС
3 (максимальная)	Изделия с предельным уровнем стойкости — требования РС соответствуют группам исполнения 5Ус...6Ус и являются определяющими для потребителей, даже в ущерб функциональности. Катастрофические отказы, а во многих случаях и кратковременные сбои изделий в процессе и после радиационного воздействия не допускаются. Изделия, как правило, предназначены для применения в «стойком ядре» аппаратуры систем и комплексов стратегических ядерных сил. При создании изделий ЭКБ необходимо использовать весь арсенал методов и средств обеспечения РС, включая специальные технологические процессы и полупроводниковые структуры (кремний на сапфире, кремний на изоляторе, карбид кремния и др.), а также специальные конструкторско-топологические и схемотехнические решения по обеспечению РС. Потребность в таких изделиях — единичная, как по номенклатуре, так и по числу поставляемых изделий.
2	Изделия с повышенным уровнем стойкости — требования РС соответствуют группам 3Ус...4Ус и являются важными для потребителя, но не в ущерб функциональности. Катастрофические отказы изделий в процессе и после радиационного воздействия не допускаются, но возможно наличие у них кратковременных сбоев. Изделия, как правило, предназначены для применения в <b>бортовой</b> аппаратуре ракетно-космической техники и ядерных комплексов. При создании изделий используются базовые технологические процессы с применением специальных библиотек элементов и средств автоматизированного проектирования, в том числе топологических, схемотехнических и алгоритмических решений по обеспечению РС. Потребность в таких изделиях — десятки—сотни штук на один комплекс аппаратуры, номенклатура разнообразная, но ограниченная.
1	Изделия общего оборонного назначения — требования РС соответствуют унифицированным группам 1Ус-2Ус и не являются приоритетными для потребителей. При создании изделий используются <b>базовые технологические процессы</b> без применения специальных конструкторско-топологических и схемотехнических решений по обеспечению РС. Потребность в таких изделиях — десятки—тысячи штук на один комплекс аппаратуры, номенклатура широкая.
0	Изделие общего технического назначения («гражданские») — требования РС предъявляются в виде необходимости определения уровня РС изделий по фактическим результатам испытаний и расчетно-экспериментальных оценок в объеме, эквивалентном сертификационным испытаниям и оценкам, принятым для ЭКБ иностранного производства (ИП). Данная категория изделий является кандидатом на замещение большинства типов ЭКБ ИП для комплектования большинства классов наземной, морской и воздушной оборонной техники, имеет максимально широкую номенклатуру и объем потребности.

- статистический контроль технологического процесса и встроенный в процесс контроль показателей радиационной стойкости;
- идентификация — сопоставление внешнего вида и радиационных откликов кристаллов изделий с «эталонными» (определенными в ходе ОКР);
- контроль радиационной стойкости готовой продукции на непрерывной или на периодической основе.

### ПОРЯДОК ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА К КОНТРОЛЮ РС В ПРОИЗВОДСТВЕ

Обеспечение РС различных категорий определяется выбором методики контроля исходя из условий и задач соответствующего технологического процесса изготовления изделий микроэлектроники.

Основной задачей контроля РС в процессе производства является установление неизменности параметров технологического процесса и контроль за соблюдением и неизменностью правил проектирования. Зоной ответственности производственного контроля партий пластин по подгруппам Е1-Е3 является кристальное производство, так как испытания предполагают, что мы характеризуем пластину как объект аттестованного с точки зрения РС производственного процесса.

Базовый маршрут при аттестации должен был получить оценку, по которой изделие, выпущенное в этом производственном процессе, должно соответствовать группам стойкости.

Таким образом, по сути дела в процессе проведения испытаний производственных партий пластин подвергается аттестации не само изделие, а подтверждается способность базового процесса выпускать изделие с соответствующей группой стойкости.

Поскольку, как было указано выше, все технологические процессы делятся на группы по обеспечиваемой ими категории радиационной стойкости, подход к контролю производственных партий пластин должен иметь различия для каждой категории.

### КРИТЕРИИ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ КАТЕГОРИИ РС0 («ГРАЖДАНСКИЕ ИЗДЕЛИЯ»)

В задачу производственного процесса для изделий категории РС0 не входят вопросы гарантирования РС. Номенклатура таких изделий широкая и потребность в таких изделиях высокая, поэтому производство должно обеспечить ритмичный выпуск продукции с гарантированными электрофизическими характеристиками.

Уровень РС может определяться в процессе ОКР и записывается как справочный параметр в соответствующем разделе ТУ.

В настоящее время проводятся сертификационные испытания и оценки для ЭКБ иностранного производства (ИП), которые, как правило, поставляются в исполнении: «коммерческие как есть (COTS)», при этом гражданские изделия отечественного производства, для которых требования стойкости не были заданы, не могут быть применены для комплектования большинства классов оборонной техники.

В иностранной литературе различают три категории интегральных схем по их уязвимости к радиационному окружению: радиационно-стойкие (rad-hard), «устойчивые» (tolerant) и коммерческие как есть (COTS) [2]. Требования по стойкости для этих трех категорий представлены в табл. 2.

### КРИТЕРИИ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ КАТЕГОРИИ РС1

Потребность в изделиях категории РС1 — десятки—тысячи штук на один комплекс аппаратуры, номенклатура широкая. Задача производства — обеспечить ритмичный выпуск продукции с гарантированными электрофизическими характеристиками, РС не является определяющим свойством (параметром).

Производство должно обеспечить приемлемые технико-экономические показатели для данной категории изделий, поэтому



Таблица 2. Требования по стойкости ИС по их уязвимости к радиационному воздействию

Тип радиационного эффекта	Коммерческие как есть (COTS)	Радиационно-устойчивые (rad-tolerant)	Радиационно-стойкие (rad-hard)
Полная доза (крад, Si)	< 20	20–100	100–1000
Мощность дозы (рад/с, Si)	< $10^7$	$10^7$ – $10^9$	> $10^9$
Возникновение тиристорного эффекта	на усмотрение заказчика	на усмотрение заказчика	не допускается
Пороговое ЛПЭ, МэВ см <sup>2</sup> /мг	< 20	20–80	> 80

для производства может быть выбран базовый технологический процесс без применения специальных конструкторско-топологических и схемотехнических решений по обеспечению РС.

Требования к технологическому процессу:

- аттестация;
- применение статистических методов контроля.

## ПОДХОДЫ К КОНТРОЛЮ РС ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ КАТЕГОРИЙ РС1

Для массовых изделий общеборонного назначения категории РС1 требования РС второстепенны, контроль партий пластин по РС, как правило, не проводится, но может проводиться в обоснованных случаях:

- при существенной нестабильности техпроцесса (по результатам замеров параметрических мониторов (ПМ) и структур контролю технологии (СКТ));
- при наличии возможных недекларируемых коррекций схемно-топологической реализации изделий в ходе серийного производства (при декларируемых коррекциях, потенциально влияющих на РС, проводят типовые испытания).

## КРИТЕРИИ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ КАТЕГОРИИ РС2

Потребность в изделиях категории РС2 — десятки—сотни штук на один комплекс аппаратуры, номенклатура разнообразная, но ограниченная. Задача производства — обеспечить ритмичный выпуск продукции с приемлемыми технико-экономическими показателями, стабильными электрофизическими характеристиками с учетом гарантии требуемого уровня РС для каждой выпускаемой партии.

Изделия категории РС2 могут производиться в базовом технологическом процессе с применением специальных библиотек элементов и средств автоматизированного проектирования, в том числе топологических, схемотехнических и алгоритмических решений по обеспечению РС.

Требования к технологическому процессу:

- аттестация, в том числе и с точки зрения РС;
- применение статистических методов контроля, в том числе и с точки зрения РС;
- контроль радиационной стойкости готовой продукции (контроль производственных партий пластин).

## ПОДХОДЫ К ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ КОНТРОЛЮ РС ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ КАТЕГОРИИ РС2

Производственный контроль изделий с существенными требованиями по РС для бортовой, в том числе космической, аппаратуры рационально организовать в форме и объеме контроля партий пластин по РС, который проводится на сплошной или периодической

основах в зависимости от регулярности выпуска партий, наличия запасов РС относительно требований и стабильности техпроцесса. В случае если уровень РС не имеет необходимого запаса относительно уровня требований (например двукратного), но доказана однородность партии с точки зрения РС по контролю параметрических мониторов (ПМ) и структур контролю технологии (СКТ), то следует проводить контроль РС образцов каждой производственной партии на сплошной основе.

На рис. 1 представлены результаты контроля производственных партий пластин по подгруппе Е2 с момента освоения микросхемы 5503БЦ7 серии БМК 5503 в производстве до настоящего времени.

Разброс значений уровней дозовой стойкости по пластине в пределах партии составил не более 30 %. Уровень дозовой стойкости, определенный в ходе ОКР для микросхем серии 5503БЦ, составил  $60 \cdot 10^3$  рад (показаны результаты определительных испытаний партии 0). Результаты контроля производственных партий с момента освоения изделия в производстве положительны, что говорит о стабильности технологического процесса, однако запас по РС к накопленной дозе в данном случае недостаточен для того, чтобы была возможность перейти к периодическому плану контроля и целесообразно проводить контроль на непрерывной основе.

На рис. 2 представлены результаты контроля производственных партий пластин по подгруппе Е1 с момента освоения микросхемы серии БМК 5507БЦ в производстве и до настоящего времени. В качестве демонстрационной была выбрана микросхема 5507БЦ5. Остальные микросхемы серии 5507БЦ имеют схожие результаты контроля производственных партий за весь период наблюдений.

Результаты контроля производственных партий пластин серии БМК 5507 микросхем 5507БЦ5 по подгруппе Е1 демонстрируют отсутствие запасов, поэтому целесообразно в этом

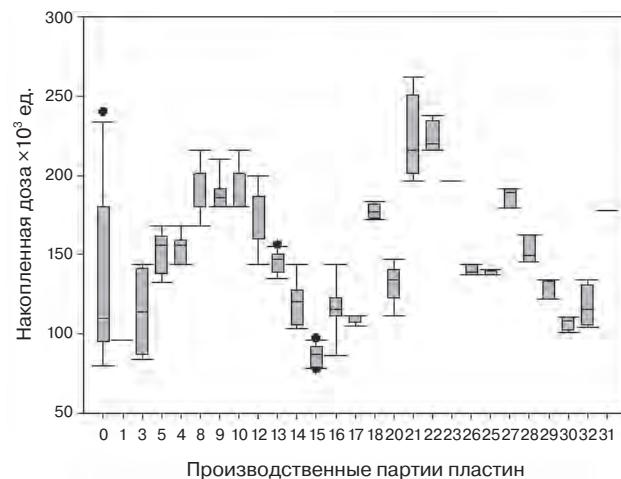


Рис. 1. Результаты контроля производственных партий пластин по подгруппе Е2 с микросхемы 5503БЦ7 серии БМК 5503 (НПК «Технологический центр»)



случае проводить контроль на непрерывной основе.

В тех случаях, когда запас по РС недостаточен (меньше чем двукратный), а при контроле ПМ и СКТ обнаружена неоднородность партии с точки зрения РС, то целесообразно применять процедуру разбраковки:

- при наличии разброса РС от пластины к пластине необходимо проводить контроль образцов от каждой пластины в партии (объем выборки — не менее чем по три микросхемы с каждой пластины — попластинная разбраковка);
- при наличии существенного разброса по пластине следует проводить 100% разбраковку всей партии.

Результаты попластинной разбраковки при контроле производственных партий пластин, изготовленных по КМОП КНС-технологии, приведены на рис. 4.

В случае если имеется значительный (например более чем двукратный) запас по РС и однородность партии по РС доказана по контролю ПМ и СКТ, то в целях улучшения технико-экономических показателей рационально проводить производственный контроль партий пластин на периодической основе при условии, что контроль стабильности производственного процесса с точки зрения радиационной стойкости осуществляется на постоянной основе с помощью ПМ и СКТ.

На рис. 3 представлены результаты контроля производственных партий пластин по подгруппе Е2 с момента освоения микросхем серии БМК 5507 в производстве и до настоящего времени.

Уровень дозовой стойкости, определенный в ходе ОКР для микросхем серии 5507БЦ, составил  $10^3$  рад (показаны результаты определительных испытаний партии 0). Проведенная коррекция технологического процесса в 2012 году позволила поднять уровень стойкости на несколько порядков, и стойкость данной серии БМК при испытаниях по подгруппе Е2 определяется максимально достигнутыми уровнями, при этом ни параметрических, ни функциональных отказов не выявляется. Поэтому в 2017 году были проведены типовые испытания и коррекция ТУ. Уровень стойкости на сегодняшний момент составляет  $50 \cdot 10^3$  рад, и при этом запасы (не менее чем двукратные) сохраняются.

Результаты контроля производственных партий пластин БМК 5507 по дозовой стойкости демонстрируют эффективность периодического контроля.

При выявлении неоднородности партии следует перейти на сплошной план контроля.

### КРИТЕРИИ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ КАТЕГОРИИ РС3

Потребность в изделиях категории РС3 единичная как по номенклатуре, так и по числу поставляемых изделий. Задача



Рис. 2. Результаты контроля производственных партий пластин по подгруппе Е1 микросхем 5507БЦ5 серии БМК 5507БЦ (НПК «Технологический центр»)



Рис. 3. Результаты контроля производственных партий пластин по подгруппе Е2 серии БМК 5507 (НПК «Технологический центр»)

производства — обеспечить гарантированную РС, иногда в ущерб некоторым характеристикам изделий, например быстродействию и/или информационной емкости (для микросхем памяти).

Уровень стойкости изделий категории РС3 обеспечивается применением специальных библиотек элементов и средств автоматизированного проектирования, в том числе топологических, схемотехнических и алгоритмических решений по обеспечению РС, и изготовлением изделий в специальном технологическом процессе, обеспечивающем РС с использованием «стойких» материалов и структур.

Требования к технологическому процессу:

- специальные решения и операции по обеспечению РС;
- аттестация, в том числе и с точки зрения РС;
- применение статистических методов контроля, в том числе и с точки зрения РС;
- контроль радиационной стойкости готовой продукции (контроль производственных партий пластин).

### ПОДХОДЫ К ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ КОНТРОЛЮ РС ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ КАТЕГОРИИ РС3

Производственный контроль изделий с максимальными требованиями по РС рационально организовать в форме и объеме



контроля партий пластин по РС, который проводится на непрерывной основе или в форме 100 % разбраковки изделий исходя из наличия запасов РС относительно требований. Использование специализированных материалов, которые имеют такое свойство, как неоднородность по площади пластины и от пластины к пластине, приводит к неоднородности РС в партии.

При этом разброс уровней стойкости кристаллов по пластине может составлять разы [3–4]. Так, на рис. 4 представлены разбросы значений статического тока потребления при наборе требуемой (6Ус) накопленной дозы ИИ для образцов микросхем СОЗУ КМОП КНС с емкостью 2048 бит, 512×4 от пластины к пластине и по пластине. Объем выборки составлял 3 шт. с каждой пластины [3]. Максимальный разброс по пластине составил 125 %. Максимальный разброс от пластины к пластине составил 300 %.

### КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ НОРМ ИСПЫТАНИЙ И ОБЪЕМА ВЫБОРКИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КОНТРОЛЯ РС ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПАРТИЙ ПЛАСТИН

Задача статистического контроля производственного процесса — показать методами статистического анализа стабильность параметров изделия. Так как задача обеспечения стойкости изделия от партии к партии по сути эквивалентна задаче гарантирования стабильности технологического процесса, то стойкость должна подчиняться законам статистического регулирования.

В целях гарантирования запасов по РС, основанных на теории малых выборок, для гарантирования заданных уровней стойкости в ходе ОКР устанавливается коэффициент нагрузки. Коэффициент нагрузки для партии в ходе ОКР устанавливается из расчета, что объем выборок при испытаниях в ходе ОКР зависит от степени интеграции и составляет не менее шести образцов. В ходе контроля производственных партий пластин объем выборки устанавливается в НД (ОСТ 0998) и составляет не более трех образцов на каждую подгруппу испытаний. При этом коэффициент нагрузки увеличивается в 1,2 раза, что может оказаться существенным в случае, если изделие соответствует НД без запаса по РС.

С другой стороны, выборка образцов из производственной партии для подтверждения РС этой партии и, соответственно, гарантирования стабильности технологического процесса может быть признана принадлежащей генеральной совокупности ранее испытанных изделий, например, в ходе предварительных, приемо-сдаточных или квалификационных испытаний (при условии применения методов статистического контроля технологического процесса). Тогда коэффициент нагрузки может быть снижен за счет увеличения объема выборки.

Таким образом, при обнаружении по результатам испытаний очередной выборки из новой партии пластин несоответствия образцов принятому по совокупности ранее проведенных испытаний статистическому распределению можно сделать вывод об изменениях (коррекциях) либо в производственном процессе, либо в топологии и/или конструкции изделия. В случае обнаружения таких изменений (коррекций) должны проводиться типовые испытания с установлением характера распределения стойкости от пластины к пластине, по пластине и от партии к партии. На рис. 5 красной линией показано снижение коэффициента переоблучения накопленной дозой (нормативного уровня воздействия) за счет увеличения с каждой новой партией и, соответственно, испытательной выборкой общего объема генеральной совокупности изделий от партии к партии.

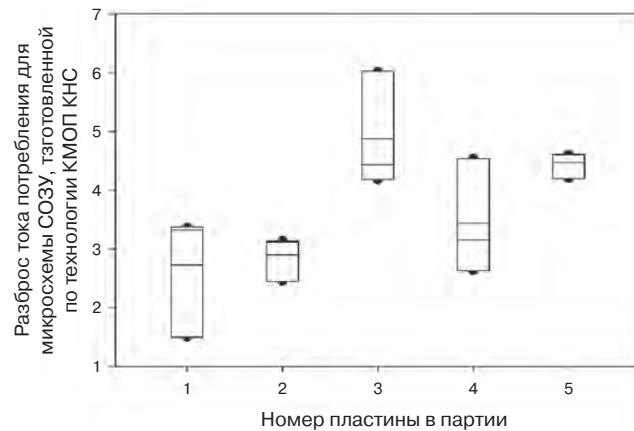


Рис. 4. Разброс тока потребления микросхемы КНС СОЗУ от накопленной дозы ИИ для производственных партий микросхем

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный порядок выбора рационального методического подхода к контролю РС в производстве позволит гарантировать выполнение требований назначения условных категорий изделий микроэлектроники по РС, а также снизить временные и финансовые затраты на проведение контроля производственных партий пластин при условии налаженного мониторинга РС в технологическом процессе.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Требование радиационной стойкости — экзотика для гурманов или гарантia наличия и технического уровня результата разработки для всех категорий потребителей ЭКБ? / Никифоров А. Ю., Телец В. А., Бойченко Д. В. // «Микроэлектроника-2017», Республика Крым, г. Алушта, 2–7 октября 2017 г. — Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2017. — С. 32–36.
2. Hash G. L., Shaneyfelt M. R., Sexton F. W., Winokur P. S. / *Radiation hardness assurance categories for COTS technologies*, Conference Paper Radiation Effects Data Workshop, 1997. — С. 35–40.
3. Чистилин А. А., Романов А. А., Московская Ю. М., Уланова А. В. Влияние имплантации ионов кремния и кислорода в слой гетероэпитаксиального кремния на сапфировой подложке на токи утечки n-канальных транзисторов КМОП ИС КНС-технологии // Микроэлектроника, 2011. — Т. 40. — № 3. — С. 224–229.
4. Давыдов Г. Г. и др. Методы и результаты контроля радиационной стойкости микроэлектронных изделий. Методика оперативного неразрушающего контроля дозовой стойкости КМОП БИС на КНС-структуратах // Электроника, 2008. — Т. 37. — № 1. — С. 67–77.
5. Moskovskaya Y. M., Davydov G. G., Sogoyan A. V., Nikiforov A. Y., Yashanin I. B. *Total ionizing dose hardness nondestructive individual estimation and predictive grading for silicon-on-insulator ICs* // Proceedings of the International Conference on Microelectronics, ICM.
6. Московская Ю. М. Прогнозный контроль радиационной стойкости БИС с учетом стабильности производства // Тезисы докладов 18-й Всероссийской научно-технической конференции по радиационной стойкости электронных систем «Стойкость 2015». Научно-технический сборник.
7. Московская Ю. М. Общий методический подход к оценке радиационной стойкости БМК и полузаказных БИС на их основе // Наноиндустрия, 2017. — № 1. — С. 50–59.