

Корреляция ионизационной реакции в чувствительных точках и параметров чувствительности к воздействию тяжелых заряженных частиц при лазерном тестировании интегральных схем*

А.В.Гордиенко, О.Б.Маврицкий, А.Н.Егоров, А.А.Печенкин, Д.В.Савченков

На основе выборок из больших партий образцов интегральных схем (ИС) двух типов набрана статистика поведения ионизационной реакции в отдельных точках чувствительных областей и в их ближайших окрестностях при их облучении сфокусированным излучением фемтосекундного лазера. Установлена корреляция результатов обработки этих данных с результатами сканирования ИС каждого типа по всей площади кристалла. Обсуждаются критерии экспресс-отбора ИС по параметрам чувствительности к воздействию тяжелых заряженных частиц на основании замеров ионизационной реакции в выбранных точках.

Ключевые слова: одиночные радиационные эффекты, фемтосекундные импульсы, ионизационная реакция.

1. Введение

Проблеме радиационной стойкости интегральных схем (ИС), используемых в бортовой аппаратуре космических аппаратов, уделяется большое внимание. Анализ причин возникновения отказов в работе космических аппаратов сделал задачу тестирования радиационной стойкости всех электронных компонентов, предназначенных для эксплуатации в условиях космического пространства (КП), особенно актуальной. Одной из основных причин отказов считается использование в бортовой аппаратуре электронных компонентов, не соответствующих требованиям по стойкости к воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) КП.

Наиболее адекватным в наземных условиях средством для оценки параметров чувствительности ИС к воздействию ТЗЧ являются ускорители ионов и протонов. Однако на сегодняшний день из-за возросшего количества ИС, нуждающихся в испытаниях на радиационную стойкость, а также из-за трудоемкости и высокой стоимости таких испытаний на ускорителях необходим поиск более доступных методов, позволяющих оперативно тестировать большой объем ИС различных типов. Один из таких альтернативных подходов [1] заключается в использовании метода импульсного лазерного излучения.

В основе лазерных испытаний лежит принципиальная возможность генерирования избыточного заряда в локальном объеме элемента ИС, эквивалентного заряду, генерируемому при прохождении ТЗЧ. Воздействие бу-

дет адекватным, если к началу формирования электрической реакции пространственные распределения сгенерированных электронов при воздействии ТЗЧ и импульса лазерного излучения будут достаточно близки. Такое условие выполняется при использовании лазерных ультракоротких импульсов с пучком излучения, сфокусированным до микронных размеров. Показано [2], что таким лазерным излучением можно создать практически любую плотность заряда, характерную для существующих ТЗЧ, а значит, вызывающую последствия, аналогичные одиночным радиационным эффектам от пролета ТЗЧ космического пространства.

При таком подходе может быть снято одно из ограничений, характерных для испытаний с помощью ионизирующих частиц, а именно невозможность исследований ИС с «перевернутым» кристаллом (по технологии flip-chip). Более того, методы, основанные на применении сфокусированного лазерного излучения пикосекундной длительности, дают принципиально новые возможности [3]. Так, обеспечиваемое лазерными установками пространственное разрешение позволяет локализовать чувствительные элементы ИС с микронной точностью, а временное разрешение – изучать динамическую чувствительность к одиночным сбоям в различных режимах работы ИС.

Следует подчеркнуть, что при использовании лазерных установок для исследования эффектов от пролета ТЗЧ через ИС моделируется не воздействие заряженных частиц, а электрические эффекты, возникающие при их попадании в чувствительные области ИС. Действительно, при воздействии реальных ТЗЧ и сфокусированного лазерного излучения на ИС пространственные распределения генерируемого заряда и ионизационные потери энергии существенно различаются.

Во-первых, поперечные размеры зарядового трека, возникающего в полупроводнике сразу после пролета частицы, много меньше диаметра фокальной области сфокусированного гауссова пучка лазерного излучения, ограниченного, в свою очередь, дифракционной расходимостью. Во-вторых, потери энергии ТЗЧ при прохождении тонкого слоя полупроводника пренебрежимо малы,

* Доложена на III Международной конференции по фотонике и информационной оптике, Россия, Москва, январь 2014 г.

А.В.Гордиенко, О.Б.Маврицкий, А.Н.Егоров, А.А.Печенкин, Д.В.Савченков. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: alexgordya@gmail.com, oleg.mavr@gmail.com

Поступила в редакцию 7 апреля 2014 г.; после доработки – 4 июня 2014 г.

сирующую систему (микроскоп с телецентрическим осветителем), ПЗС-видеокамеру, трехкоординатную систему позиционирования объекта и управляющий ПК со всеми необходимыми интерфейсами. Особо следует отметить, что тщательный подбор параметров лазерного пучка, включая согласование его расходимости и эффективного диаметра со входным зрачком откорректированного на бесконечность микрообъектива (Mitutoyo Plan Apo NIR 20 \times с увеличенным рабочим расстоянием) дал возможность получить диаметр пятна фокусировки 1.2 мкм по уровню 1/e, что близко к дифракционному пределу.

Параметры данной установки позволяют обеспечить достаточно равномерное поглощение лазерного излучения веществом по глубине чувствительной области, что аналогично равномерным потерям энергии ТЗЧ при пролете через полупроводниковые материалы ИС.

Регистрация электрических сигналов с исследуемой ИС осуществлялась с помощью быстродействующего цифрового осциллографа TDS-3034С, подключенного к соединенной с управляющим ПК системе функционального контроля.

3. Карты ионизационной реакции ИС

Результаты лазерных исследований ОПЭ от воздействия ТЗЧ удобно отображать в виде карт различных параметров реакции кристалла ИС, сопоставляя их с топологией микросхемы (или с фотографией кристалла, полученной оптическими методами). Особое место среди получаемых карт занимают карты ионизационной реакции (ИР). В общем случае под ионизационной реакцией ИС понимают электрический импульс, который возникает на токоємном резисторе в цепи питания ИС при облучении чувствительной области лазерным импульсом.

При выборе номинала токоємного резистора следует учитывать, что, с одной стороны, увеличение сопротивления повышает амплитуду сигнала ионизационной реакции и тем самым увеличивает отношение сигнал/шум, однако, с другой стороны, увеличивает RC интегрирующей цепи, образованной им и собственной емкостью кристалла микросхемы и измерительной оснастки. При избыточном увеличении RC интегрирующей цепи форма импульса ионизационной реакции будет в большей степени характеризовать интегрирующую цепь, а не динамику ионизационных процессов.

В настоящей работе для получения карт регистрировались импульсы ИР микросхемы, работающей в режиме фотодиода без смещения. На рис.2 приведены зарегистрированная на лазерной установке ФЕМТО-Т карта ИР при облучении со стороны приборного слоя ИС BU61580 и панорамная фотография этой же ИС. Представленная карта всей площади кристалла снималась с шагом и размером пятна фокусировки, равными 30 мкм. Даже при таком разрешении хорошо видны различия в амплитудах импульса ИР в областях с различной плотностью технологических элементов, прослеживаются шины металлизации. При уменьшении шага сканирования и размера пятна фокусировки возрастает пространственное разрешение, ограниченное в используемой установке минимальным размером пятна. При этом, однако, увеличивается и время, затрачиваемое на сканирование. При шаге 5 мкм оно может достигать 5–6 ч.

По аналогии с методами лазерной дефектоскопии [9] карты ИР можно применять и для изучения конкретной

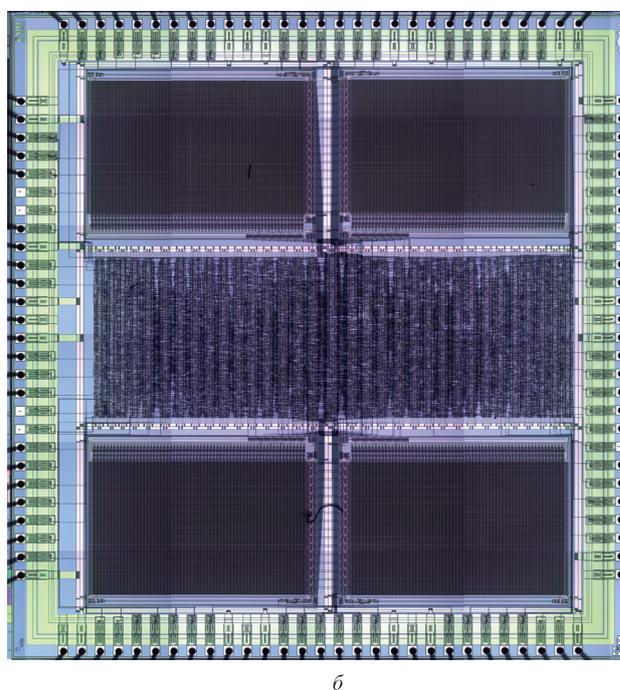
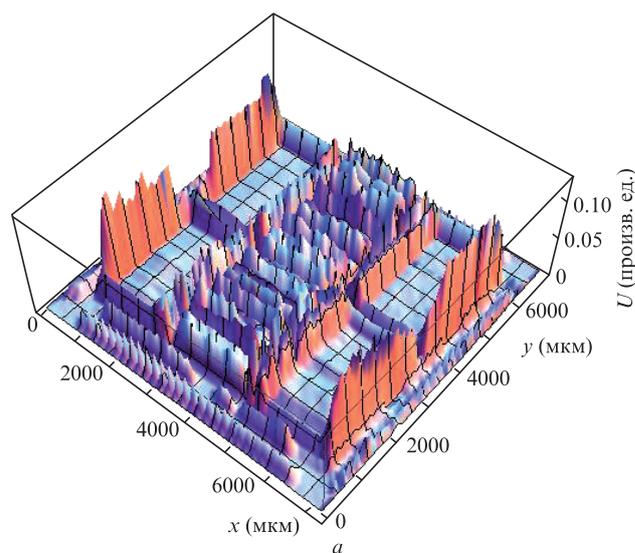


Рис.2. Карта ИР при облучении ИС со стороны приборного слоя (а) и панорамная фотография этой же ИС, полученная на той же установке (б).

микрообласти, получая дополнительную информацию о топологических особенностях микросхемы, которые влияют на энергетические пороги возникновения эффектов в окрестностях конкретной точки. При проведении подобных измерений во многих случаях была замечена корреляция между энергетическими порогами возникновения эффектов и амплитудой сигнала ионизационной реакции в отдельных областях ИС.

В ряде экспериментов можно ограничиться получением карт высокого разрешения для малых областей (микрочарт). Проведенные измерения показали, что для микросхем одного типа с одинаковым уровнем стойкости к воздействию ТЗЧ микрокарты ИР оказываются схожими. Более того, различия в картах ИР для ИС одной партии дают основания говорить о существовании какого-либо локального дефекта в микросхеме или о ее принадлежности к другой партии.

Эти наблюдения позволили предложить методику экспресс-отбраковки ИС, призванную значительно сократить время проведения тестирования больших партий микросхем. В ее основе лежит предположение о том, что при совпадении амплитуд ИР для выборочных областей ИС в пределах одной партии их параметры чувствительности к воздействию ТЗЧ по ОРЭ также будут одинаковыми. Следует отметить, что применение данной методики могло бы сократить время, необходимое для тестирования одной партии микросхем, более чем в 10 раз.

4. Методика экспресс-отбраковки ИС

Кратко данная методика состоит из следующих этапов.

1. Проводится сканирование нескольких ИС партии и определяются области, чувствительные к сбоям из-за возникновения ОРЭ. При наличии нескольких таких областей выбираются три-четыре области, по возможности с различной плотностью технологических элементов. В каждой выбранной области задаются координаты точки, в которой и будет контролироваться амплитуда импульса ИР.

2. Для получения микрокарт окрестностей выбранных точек на установленном образце выполняется последовательное сканирование квадратных областей с центром в выбранных точках и размером стороны ~ 10 мкм. Диаметр сфокусированного лазерного пучка при этом выбирается равным 10–15 мкм, шаг сканирования составляет 1–3 мкм. Амплитуда ИР, усредненная по нескольким импульсам лазерного излучения (до достижения погрешности, не превышающей 2%), в каждой точке сканирования регистрируется и сохраняется в массиве данных микрокарт.

3. Этап 2 повторяется для всех ИС тестируемой партии по единому шаблону квадратных областей вокруг выбранных точек.

4. По результатам математической обработки массива данных микрокарт ИР (см. ниже) для каждого из образцов партии проводится корректировка координат выбранных точек, в которых и находятся значения амплитуды ИР. Определяется разброс значений в каждой из выделенных точек по всем образцам партии.

5. Если амплитуды ИР для образцов отличаются от среднего значения не более чем на заданную величину (например, 10%), считается, что вся партия имеет одинаковые параметры чувствительности к данному виду ОРЭ. В случае выхода амплитуд ИР образцов за указанные пределы считается, что их параметры чувствительности отличаются от аналогичных параметров остальных образцов партии, и эти образцы требуют дополнительных исследований.

Необходимость корректировки координат выбранных точек (этап 4) связана с тем, что на практике ручное закрепление образцов, а также технологические допуски при их помещении в корпус не позволяют однозначно попасть в аналогичную выбранную точку на каждом последующем образце партии. Поэтому была разработана дополнительная методика корректировки координат, которая позволила значительно снизить погрешность, обусловленную неточностью позиционирования. Для этой цели ионизационная реакция определялась не в отдельных точках, а в пределах микрообласти в их окрестности. Отметим, что данная методика представляет собой математическую процедуру и не требует дополнительного времени на повторные сканирования. Принцип коррек-

тировки аналогичен хорошо известному способу, применяемому при шивании панорамных изображений. Микрокарта одного из образцов выбирается в качестве базовой, а для каждого следующего образца подбираются значения сдвига и поворота координат, при которых наблюдается наилучшее частичное совпадение карт. Процедура повторяется для каждого образца по отношению к базовому. Запоминается область пересечения областей для каждого из образцов, а также коэффициенты поворота и сдвига. Далее проводится математическая корректировка координат, и в точке, принадлежащей общей для всех области пересечения, находится значение амплитуды ИР и определяется разброс.

Эффективность работы методики корректировки координат была проверена при многократной переустановке одного из образцов и снятии микрокарт в выбранной точке. После корректировки разброс амплитуд ИР снизился до 5%. Также был оценен статистический разброс, наблюдавшийся при многократном повторении сканирования без переустановки закрепленного образца. Он составил $\sim 4\%$, что, видимо, обусловлено нестабильностью энергии лазерного излучения и механической точностью работы системы позиционирования.

5. Результаты экспериментов

Апробация данной методики была проведена на двух выборках тестовых партий (по 12 образцов в каждой). Образцы партии I представляли собой тестовые КМОП-структуры, построенные по схеме быстродействующей логики: четыре селектора-мультиплексора 2 в 1 с тремя состояниями на выходе. Данная партия тестировалась на одиночные сбои – кратковременные переходные процессы. Критерием чувствительности к данному типу ОРЭ считалось достижение определенных критических амплитуд импульсов напряжения на выходах, вызванных этими переходными процессами.

Образцы партии II являлись тестовыми структурами, построенными по схеме восьмиразрядного регистра с параллельным вводом-выводом данных. В них исследовались одиночные сбои, приводящие к переключению логического состояния триггеров регистров.

Для оценки параметров чувствительности ИС к воздействию ТЗЧ по ОРЭ при испытаниях на источниках ионов результаты измерений принято представлять в виде зависимости сечения ОРЭ от линейных потерь энергии (ЛПЭ) ионов в полупроводниковом материале ИС. Результаты лазерных испытаний также удобно представить в виде зависимости сечений ОРЭ от энергии лазерного импульса (рис.3), пропорциональной ЛПЭ ионов [2]. Для этого проводится последовательное сканирование всего кристалла ИС с различными фиксированными энергиями лазерных импульсов. Каждая точка на зависимости $\sigma(J)$ соответствует отношению числа точек ИС, в которых произошел сбой, к полному числу произведенных импульсов, умноженному на площадь сканирования. Аналогичная процедура с последовательным уменьшением энергии проводилась и при поиске чувствительных областей ИС.

На микросхеме из партии I были выбраны четыре области (рис.4). Перекрестие крестообразной метки с радиусом внешней окружности 20 мкм отмечает положение лазерного пучка диаметром 10 мкм в центре исследуемой области. Для каждой из выбранных точек базового об-

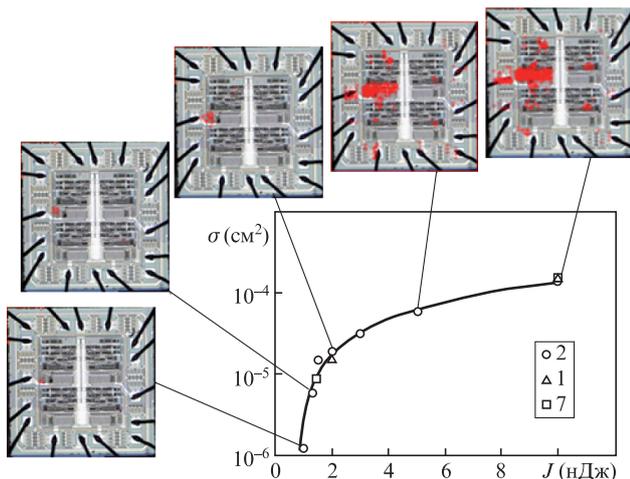


Рис.3. Зависимость сечения одиночных сбоев σ от энергии лазерного излучения J для базового образца (2) и двух других (1 и 7) из партии I.

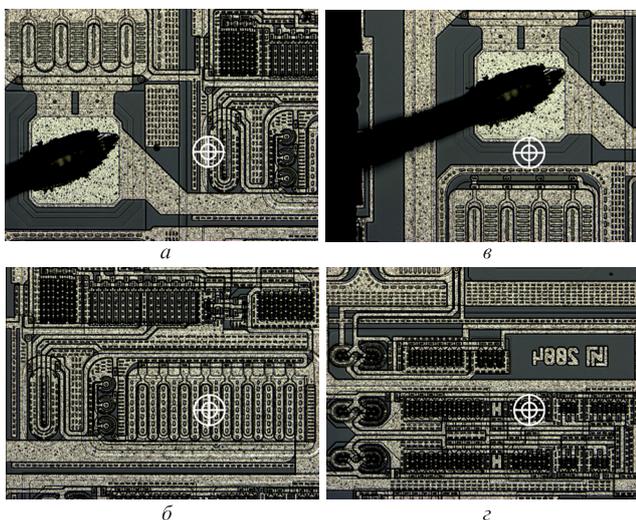


Рис.4. Фотографии участков в окрестности выбранных точек на образце из партии I. Перекрестие крестообразной метки отмечает положение лазерного пучка диаметром 10 мкм в выбранной точке.

разца предварительно определялась область линейности зависимости амплитуды ионизационного отклика от энергии лазерного излучения. В дальнейшем все сканирования окрестностей точек проводились при фиксированных значениях энергии из области линейности.

На рис.5 показаны результаты сканирования первой области до и после математической корректировки координат. Отметим, что амплитуды импульсов ИР, измеренные до корректировки координат в точке, различаются более чем на 50%. Однако после корректировки разброс амплитуд значительно снижается. Измерения показали, что в отобранных из партии в 12 микросхем образцах разброс амплитуд ИР не превышает 10%, а значит, можно ожидать, что по уровню стойкости к ОРЭ они относятся к одной группе.

Для проверки этого были дополнительно проведены полные сканирования всех образцов при двух энергиях лазерного импульса – минимальной, вызывающей возникновение сбоя, и близкой к области насыщения зависимости $\sigma(J)$. Каждая из точек, приведенных на рис.3, представляет собой результат сканирования всего кристалла

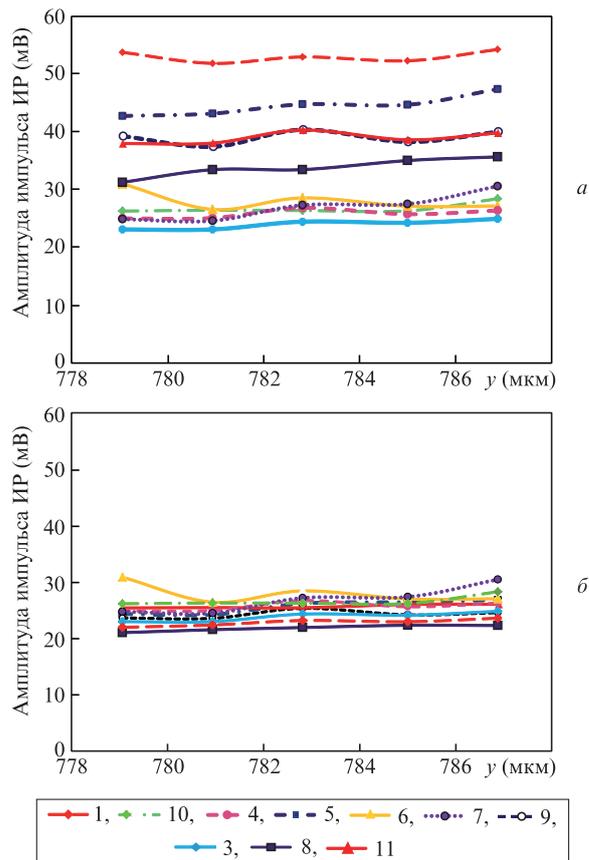


Рис.5. Зависимости амплитуд импульсов ИР от сдвига по координате y от контрольной точки до (а) и после (б) корректировки координат для образца из партии I. Погрешность усредненного значения амплитуды импульса ИР в каждой точке не превышает 2%.

ИС с определенным значением энергии. Видно, что все пары точек хорошо совпадают с зависимостью сечения сбоев от энергии лазерного излучения для базового образца.

Аналогичные измерения в трех чувствительных точках были проведены и для образцов из партии II. На рис.6 показаны зависимости амплитуд импульсов ИР от сдвига по координате x от контрольной точки после корректировки координат для некоторых образцов. Эти результаты интересны тем, что для образцов 9 и 2 амплитуды импульсов ИР отличаются от амплитуд импульсов остальных образцов партии примерно на 40% во всех трех выбранных для исследования точках. Результаты полного

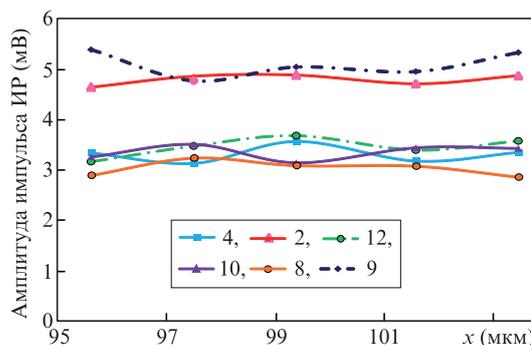


Рис.6. Зависимости амплитуд импульсов ИР от сдвига по координате x для образцов из партии II. Погрешность усредненного значения амплитуды импульса ИР в каждой точке не превышает 2%.

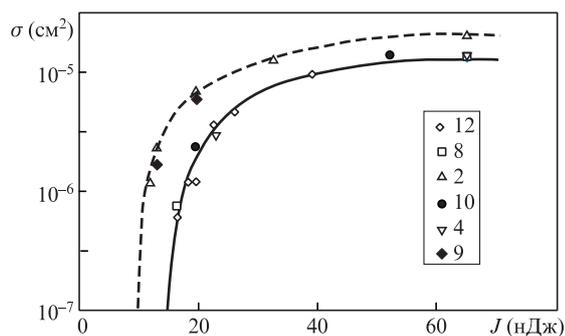


Рис.7. Зависимости сечения одиночных сбоев σ от энергии лазерного излучения J для образцов из партии II.

сканирования всех ИС партии показали (рис.7), что и сечения ОРЭ в данных образцах значительно (более чем на 70%) отличаются от сечений остальных образцов партии при тех же энергиях лазерного излучения, а следовательно, и параметры чувствительности к ТЗЧ по ОРЭ выделенных образцов отличаются от аналогичных параметров остальных образцов партии II. Для объяснения этих отличий требуется дополнительное исследование образцов 2 и 9 на наличие дефектов или отклонений в производственной партии, однако уже сейчас есть основания говорить о возможности выявления отдельных ИС партии с отличающимися уровнями стойкости к ОРЭ с помощью предложенной методики.

Таким образом, предложенная методика экспресс-отбраковки была проверена экспериментально на небольших партиях микросхем различных типов. Результат

апробации можно считать положительным, однако, до уверенного применения данной методики, этот результат необходимо подтвердить на других типах ИС. Данный эксперимент можно рассматривать как шаг на пути к совершенствованию методов проведения массовых лазерных испытаний ИС и полупроводниковых приборов на их основе.

Работа выполнена в соответствии с Государственным заданием Министерства образования и науки РФ №3.1540.2014/К.

1. Buchner S.P., Wilson D., Kang K., Gill D., Mazer J.A. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **34** (4), 1228 (1987).
2. Чумаков А.И. *Действие космической радиации на интегральные схемы* (М.: Радио и связь, 2004).
3. Buchner S.P., Miller F., Pouget V., McMorrow D.P. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **60** (3), 1852 (2013).
4. Чумаков А.И., Васильев А.Л., Козлов А.А., Кольцов Д.О., Крилицкий А.В., Печенкин А.А., Тарараксин А.С., Яненко А.В. *Микроэлектроника*, **39** (2), 85 (2010).
5. Яненко А.В., Чумаков А.И., Печенкин А.А., Савченков Д.В. и др. *Спецтехника и связь*, **4-5**, 4 (2011).
6. Егоров А.Н., Маврицкий О.Б., Чумаков А.И., Никифоров А.Ю., Телец В.А., Печенкин А.А., Яненко А.В., Кольцов Д.О., Савченков Д.В. *Спецтехника и связь*, **4-5**, 8 (2011).
7. Чумаков А.И. *Микроэлектроника*, **35** (3), 184 (2006).
8. Гордиенко А.В., Маврицкий О.Б., Егоров А.Н., Печенкин А.А., Савченков Д.В. *Сборник научных трудов Научно-технической конференции-семинара «Фотоэтика и информационная оптика- 2013»* (М.: НИЯУ МИФИ, 2013, с. 207).
9. Essely F., Guitard N., Darracq F., Pouget V., Bafleur M., Perdu P., Touboul A., Lewis D. *IEEE Trans. Device Materi. Reliability*, **7** (4), 617 (2007).