

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ
В МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ИЗДЕЛИЯХ
НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ

УДК 621.382

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В ИС
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

© 2010 г. А. И. Чумаков, А. Л. Васильев, А. А. Козлов, Д. О. Кольцов, А. В. Крицкий¹,
А.А. Печенкин, А. С. Тарараксин, А. В. Яненко

ОАО “Экспериментальное научно-производственное объединение СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ”,

¹ФГУ “22 ЦНИИИ Минобороны России”

E-mail: Aichum@spels.ru

Поступила в редакцию 14.08.2009 г.

Представлены методика расчетно-экспериментального прогнозирования частоты возникновения локальных радиационных эффектов в изделиях микроэлектроники при воздействии высокоэнергетичных протонов и тяжелых заряженных частиц. Частота локальных радиационных эффектов оценивается исходя из оценки внутренней радиационной обстановки и получения расчетно-экспериментальным способом параметров чувствительности ИС.

За последнее десятилетие электронные системы космических аппаратов качественно изменялись, обусловленные переходом на элементно-технологический базис микроэлектроники, что позволило многократно увеличить их функциональные, технико-экономические и эксплуатационные характеристики. В то же время стоит задача по увеличению сроков активного существования аппаратов с нынешних 3–5 лет до 10–12 лет при размещении радиоэлектронной аппаратуры не в гермоконтейнере, а на открытой платформе космического аппарата. Эта тенденция приводит к тому, что проблема радиационной стойкости интегральных схем (ИС) выходит на первый план, так как во многих случаях именно радиационные отказы и сбои будут определять период активного существования космических аппаратов. При этом по мере увеличения степени интеграции на первый план выходят локальные радиационные эффекты, из-за которых происходят сбои и отказы ИС вследствие воздействия отдельных высокоэнергетичных ядерных частиц [1–3].

В настоящее время в современных ИС экспериментально наблюдаются следующие основные эффекты [1–5]:

- ложные срабатывания (одиночные сбои) триггеров, регистров и ячеек памяти;
- многократные сбои из-за образования одиночных сбоев в нескольких соседних ячейках памяти;
- кратковременные импульсные сигналы (“иголки”) на выходах аналоговых и цифровых ИС;
- тиристорный эффект в четырехслойной паразитной структуре, в основном, в объемных КМОП ИС;
- вторичный пробой $p-n$ переходов, в особенности, для приборов, работающих в предпробойной области;

– долговременные проводящие каналы за счет тепловых эффектов в изолирующих структурах (“проколы”), в частности, локальное разрушение области в подзатворном диэлектрике;

– шунтирование многослойных структур (проводящий канал эмиттер-коллектор в биполярных структурах) и ряд других.

Анализ показывает, что для современных ИС высокой степени интеграции наиболее критичны следующие локальные радиационные эффекты:

- одиночные сбои;
- тиристорные эффекты;
- кратковременные импульсы ионизационной реакции (“иголки”).

Расчетно-экспериментальная оценка радиационной стойкости ИС при воздействии факторов космического пространства разбивается на ряд этапов:

- анализ условий функционирования космического аппарата;
- оценка радиационных воздействий, действующих непосредственно на ИС;
- расчетно-экспериментальная оценка параметров чувствительности ИС к локальным радиационным эффектам;
- прогнозирование показателей радиационной стойкости.

Анализ условий функционирования космического аппарата, исходя из условий его работы (параметров орбиты и времени функционирования), включает в себя оценку внешних радиационных условий. При анализе локальных радиационных эффектов в ИС можно пренебречь влиянием электронного излучения, которое не способно формировать большое энерговыделение в чувствительных

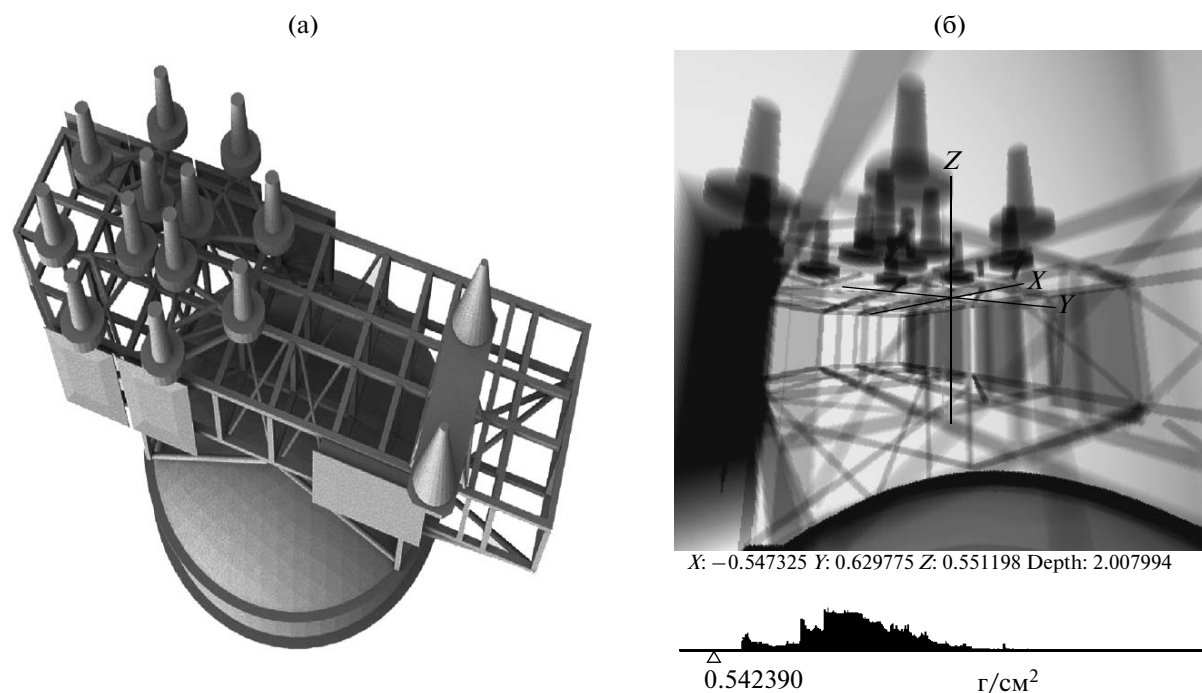


Рис. 1. Конструкция космического аппарата (а) и пример его оптической модели (б).

микрообъемах элементов ИС. Поэтому в рамках поставленной задачи необходимо учитывать протоны радиационных поясов Земли, а также протоны и ионы солнечных и галактических космических лучей. В настоящее время существуют достаточное количество моделей и методик, которые позволяют производить подобные оценки [1–5].

На следующем этапе производится оценка радиационных воздействий, действующих непосредственно на чувствительные области ИС. Расчетная оценка радиационных воздействий должна учитывать реальные конструктивные особенности как самого космического аппарата, так и электронной аппаратуры и самих ИС в электронном блоке. Этим целям служит разработанное специализированное программное обеспечение 3D_SPACE [6, 7]. Расчетное моделирование, реализованное в среде 3D_SPACE, проводится на основе оптической модели для анализируемого изделия, полученное лучевым методом (рис. 1). Степень затенения показывает количественную картину радиационной защиты по всему телесному углу. С целью принятия правильных технических решений по реализации возможной локальной защиты для наиболее радиационно-чувствительных ИС в среде 3D_SPACE реализованы специальные опции, показывающие распределение толщины эффективной защиты и наиболее критичные направления. Итогом этих расчетов являются характеристики радиационных полей, действующих в заданной внутренней точке космического аппарата, непосредственно на кристалл ИС.

Расчетная оценка параметров чувствительности ИС по локальным радиационным эффектам даже при известных технологических параметрах элементов ИС крайне затруднительна из-за сложности происходящих нелинейных и нестационарных процессов формирования ионизационной реакции от отдельной ядерной частицы [1]. Поэтому оптимальным решением является определение некоторых параметров чувствительности ИС экспериментально, а затем “восстановление” их характеристик расчетными методами.

Оптимальным набором параметров чувствительности, который необходимо определить в процессе расчетно-экспериментальных исследований, является сечение насыщения локального радиационного эффекта и пороговое значение линейных потерь энергии для ионов или энергии для протонов. При оценке параметров чувствительности по эффектам типа одиночных сбоев и/или тиристорных можно обойтись двумя независимыми параметрами: например, сечениями насыщения при воздействии ионов и протонов [8].

Наиболее просто оценить сечения насыщения одиночных сбоев ИС с субмикронными проектными нормами, в силу относительно небольшой энергии возникновения ИС (единицы МэВ). Экспериментальные значения сечений насыщения одиночных сбоев могут быть получены при энергиях протонов выше 200 МэВ и при линейных потерях ионов выше 10 МэВ мг/см². В первом случае не возникает особых проблем при проведении экспериментальных исследований на ускорителях протонов.

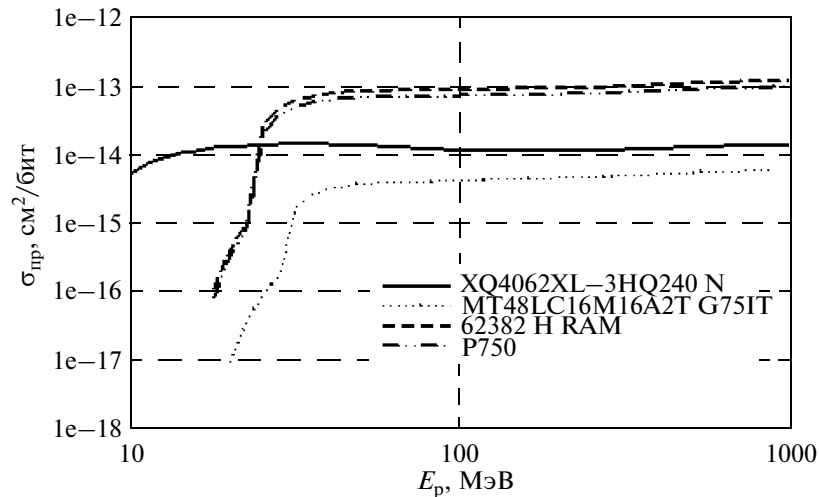


Рис. 2. Расчетные зависимости сечений одиночных сбоев от энергии протонов в ПЛИС XQ4062XL-3HQ240N, ДОЗУ MT48LC16M16A2TG-75IT, ОЗУ 62382H и микропроцессоре P750.

Применение упрощенной однопараметрической модели позволяет восстановить зависимость сечений одиночных сбоев от энергии протонов (рис. 2). Из результатов экспериментальных исследований ИС на ускорителях протонов можно сделать следующие выводы:

- в современных ИС, изготовленных по объемной технологии с проектными нормами 0.5 мкм и ниже, сечение одиночных сбоев составляет величину порядка $10^{-15} \dots 10^{-14}$ см²/бит;
- в силу наличия пороговой энергии протекания ядерных реакций в материалах от воздействия протонов, пороговая энергия протонов практически не изменяется и составляет величину около 15 МэВ. По мере уменьшения проектных норм зависимость сечений ОС от энергии протонов приближается к ступенчатой функции;
- при уменьшении норм проектирования значения сечений насыщения и пороговых энергий переключения уменьшаются незначительно. Например, при уменьшении проектных норм в 2 раза указанные величины уменьшаются не более чем на 30...40% (рис. 3).

Несколько сложнее обстоят дела с оценкой сечений насыщения одиночных сбоев при воздействии ионов. В силу определенных сложностей проведения испытаний на ускорителях ионов необходимо развитие альтернативных методов оценки сечений насыщения одиночных сбоев. Наиболее адекватно эти значения могут быть определены по результатам экспериментальных исследований в полях изотопных источников спонтанного деления, например, на основе изотопа CF^{252} . Однако при этом необходимо принимать во внимание следующие факторы:

- современные ИС с проектными нормами 0.5 мкм и ниже имеют несколько слоев металлизации, вследствие чего толщина пассивных припо-

верхностных областей может быть сравнима с пробегами осколков деления (около 10 мкм);

- в современных ИС с проектными нормами 0.5 мкм и ниже заряды переключения становятся настолько малыми, что одиночные сбои могут возникать от альфа-частиц, действующих наряду с осколками деления;
- имеет место практически полное собирание носителей с трека ядерной частицы от иона – осколка спонтанного деления.

Другим альтернативным методом является применение сфокусированного лазерного излучения пикосекундной длительности при сканировании всей поверхности кристалла ИС. Но и в этом случае существуют ограничения, связанные с наличием многослойной металлизации. В принципе это ограничение можно устранить при использовании методики локального лазерного излучения, с помощью которой можно оценить сечение насыщения отдельного элемента [9].

Грубая оценка сечения насыщения может быть сделана исходя из анализа поверхности кристалла ИС. Так анализ основных схемно-топологических решений ИС позволяет заключить, что сечение одиночных сбоев на ИС составляет величину порядка 10% от значения площади, занимаемой структурами типа ОЗУ, регистрами общего назначения и им подобными. Другими словами, при известной площади кристалла ИС ОЗУ $A_{ис}$ сечение насыщения одиночных сбоев при воздействии ионов $\sigma_{ион}$ можно оценить, как:

$$\sigma_{ион} \approx 0.1 A_{ис} / N_{озу},$$

где $N_{озу}$ суммарная информационная емкость ОЗУ.

Сложнее обстоят дела с оценкой параметров чувствительности ИС к эффектам типа “иголок”, которые определяют сбои аналоговых и комбинационных цифровых ИС. К сожалению, предсказать веро-

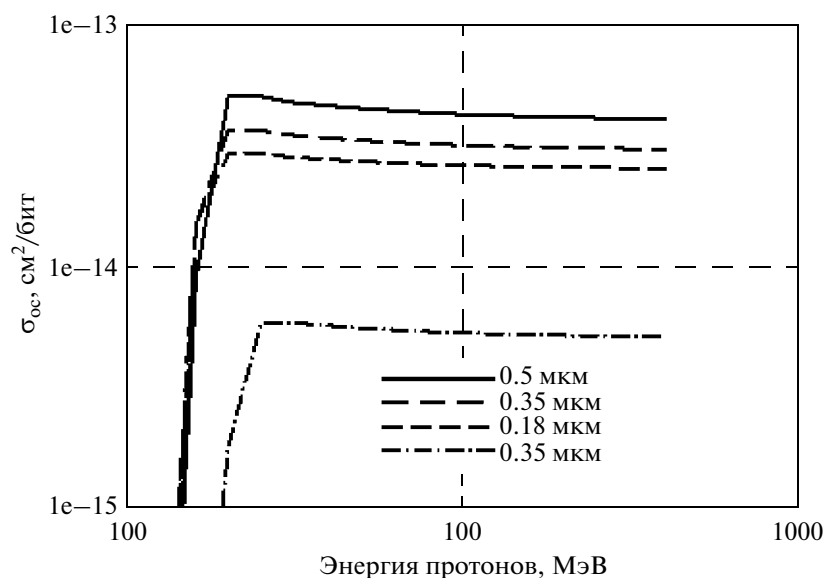


Рис. 3. Типовые зависимости сечений одиночных сбоев от энергии протонов для ИС с различными проектными нормами.

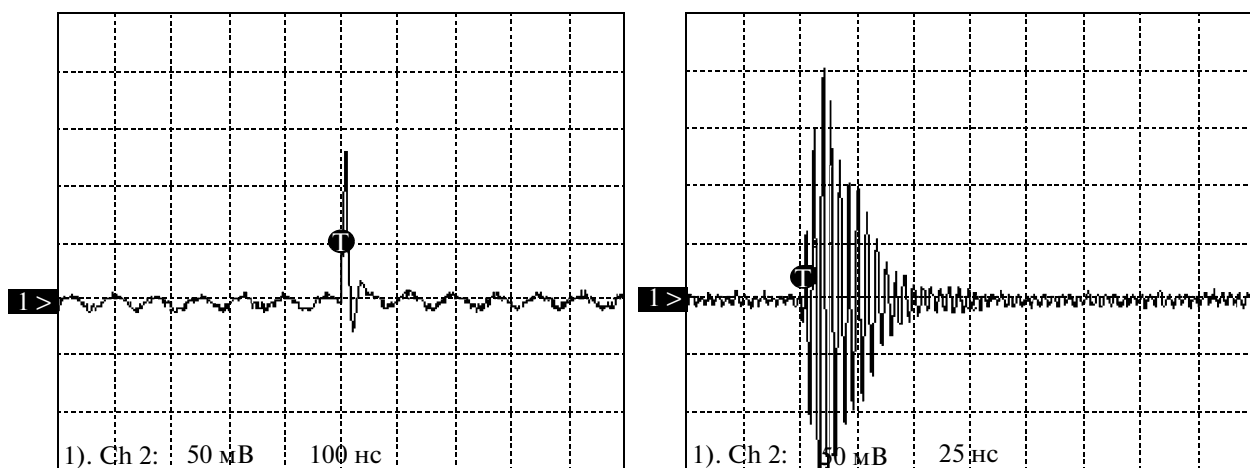


Рис. 4. Типовые формы импульсов, «иголок» на выходе операционного усилителя 1484УД1 при облучении 1 ГэВ протонами.

ятность появления сигнала, особенно в аналоговых ИС достаточно сложно. При этом на выходе ИС могут иметь место сигналы различной формы и амплитуды (рис. 4). Поэтому в этом случае единственно реальным путем является экспериментальное определение параметров чувствительности ИС.

Из всех эффектов наиболее опасен тиристорный эффект, при возникновении которого возможно выгорание как самой ИС, так и вторичного источника питания. Проведенные расчетно-экспериментальные исследования выявили повышение чувствительности КМОП ИС по мере уменьшения норм проектирования. Например, в КМОП ИС с проектными нормами 0.5 мкм и выше крайне редко имеет место тиристорный эффект при воздействии прото-

нов космического пространства, тогда как в ИС с проектными нормами 0.25 мкм и ниже он практически всегда имеет место, даже при нормальной температуре. Поэтому крайне важно проводить оценку параметров чувствительности КМОП ИС к этому эффекту.

Отметим, что представленные результаты для эффектов одиночных сбоев не распространяются на оценку параметров чувствительности по тиристорным эффектам, так как области чувствительности определяются паразитными структурами. Поэтому даже для однотипных элементов значения сечений при воздействии ионов могут изменяться от 0 до 10^{-2} см²/бит. В этом случае эффективна методика случайного сканирования для оценки зависимости

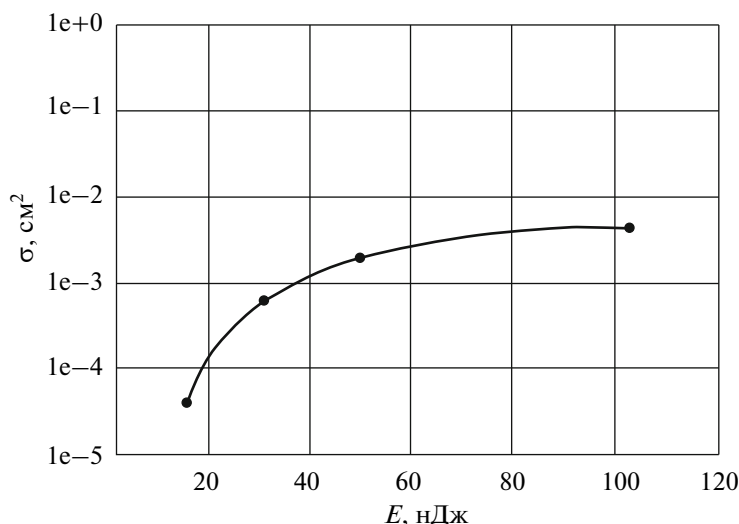


Рис. 5. Зависимость сечения тиристорного эффекта от энергии ЛИ в кристалле 98E07A фирмы Fujitsu.

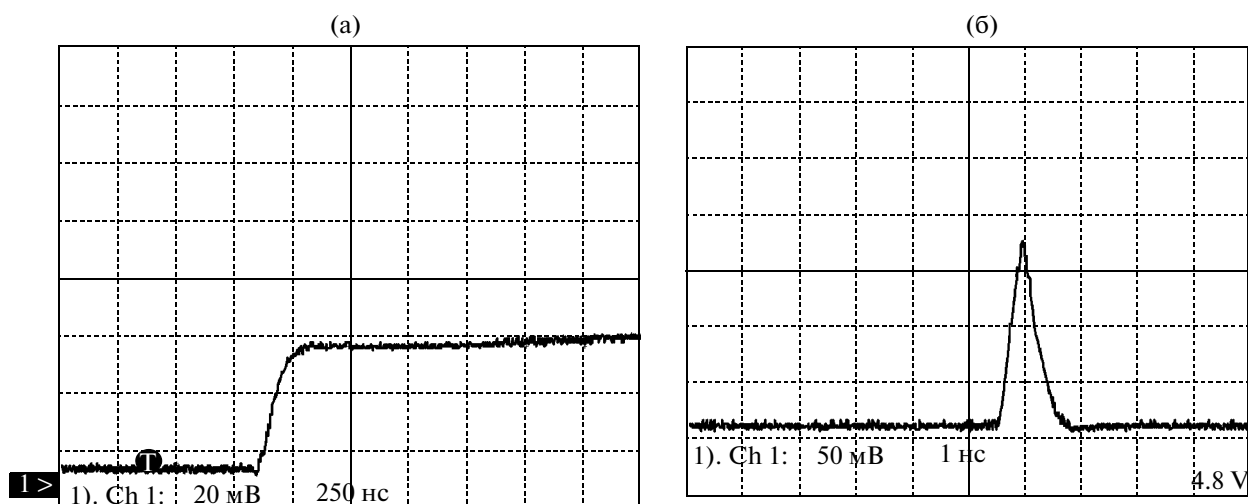


Рис. 6. Типовые осциллограммы развития тиристорного эффекта в КМОП ИС: (а) – стационарный ТЭ; (б) – кратковременный ТЭ.

сечений эффектов от энергии (эквивалентных значений линейных потерь энергии) (рис. 5). Отметим, что из-за относительно длительной стадии развития тиристорного эффекта (рис. 6) параметры чувствительности могут быть оценены при воздействии лазерным излучением с длительностью до 15 нс. Экспериментальные исследования на лазерной фокусирующей установке с учетом значительных потерь энергии на оптических неоднородностях позволяют оценить пороговую энергию возникновения тиристорного эффекта и площадь отдельной чувствительной области (сечение) (рис. 7).

На заключительном этапе при известной внутренней радиационной обстановке и параметрах чувствительности производится оценка частоты возникновения локальных радиационных эффектов в

ИС при воздействии факторов космического пространства. Проведенный анализ показывает, что приемлемую точность оценок дают модели на основе представления чувствительной области в виде прямоугольного параллелепипеда [5] и, в частности, упрощенная модель Пэтерсона FOM [4]. Например, на геостационарной орбите оценки по частоте одиночных сбоев в конфигурационной памяти ПЛИС XQ4062XL-3HQ240N по RPP и FOM моделям дают соответственно 0.6 событий/(ИС сутки) и 0.4 событий/(ИС сутки). Аналогичные оценки по тиристорным эффектам приводят к значениям 6×10^{-4} событий/(ИС сутки) и 3×10^{-3} событий/(ИС сутки).

Таким образом, результаты представленных исследований свидетельствуют о возможности оценки частоты возникновения локальных радиацион-

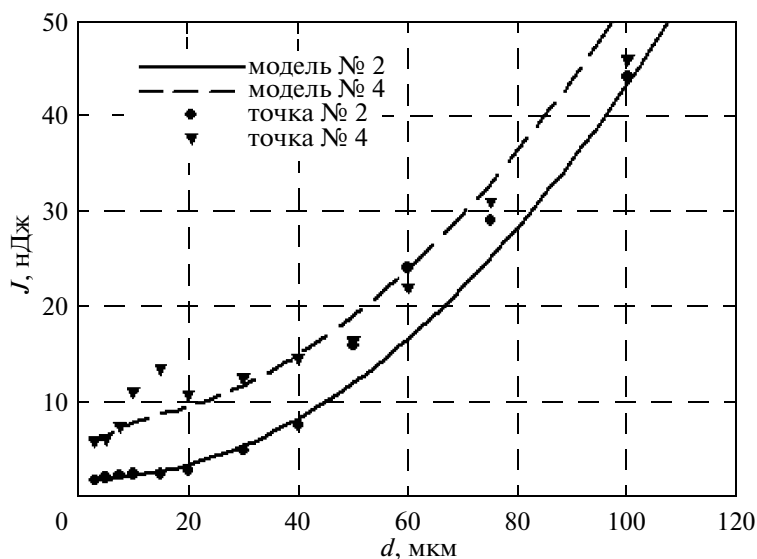


Рис. 7. Экспериментальные и расчетные зависимости пороговой энергии возникновения тиристорного эффекта в разных чувствительных областях от диаметра лазерного пятна в ИС A54SX16A-TQ100I.

ных эффектов в ИС при воздействии факторов космического пространства с использованием разработанных средств моделирования внутренней радиационной обстановки и расчетно-экспериментальных методик оценок параметров чувствительности ИС по результатам испытаний на ускорителе протонов и лазерной установке со сфокусированным излучением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чумаков А.И. Действие космической радиации на ИС. М.: Радио и связь, 2004. 320 с.
2. Holmes-Siedle A., Adams L. Handbook of Radiation Effects. N.Y.: Oxford university press, 1993. 479 p.
3. Messenger G.C., Ash M.S. Single Event Phenomena. N.Y.: Chapman&Hall, 1997. 368 p.
4. Petersen E.D. Single-event analysis and prediction / 1997 IEEE NSREC. Short Course: "Applying Computer Simulation Tools to Radiation Effects Problems". Snowmass Village, Colorado. 1997. P. III-1 III-160.
5. Stapor W.J. Single-Event Effects Qualification//1995 IEEE NSREC IEEE Nuclear and Space Radiation Conference. Short Course: "Advanced Qualification Techniques; a Practical Guide for Radiation Testing of Electronics". Madison, Winconsin. 1995. P. II-1 -II-68.
6. Козлов А.А., Чумаков А.И. Расчетная оценка радиационной защиты космической аппаратуры в трехмерном приближении // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научных трудов / Под ред. Стенина В.Я. М.:МИФИ, 2004. С. 326–329.
7. Козлов А.А., Чумаков А.И.. Алгоритм оценки конструкционной защиты космических аппаратов // Радиационная стойкость электронных систем. "Стойкость-2004". Научно-технический сборник. Вып. 7. М.: МИФИ/СПЭЛС, 2004. С. 21–22.
8. Чумаков А.И. Упрощенная методика оценки чувствительности ИС к одиночным сбоям // Микроэлектроника. 1998. Т. 27. № 6. С. 475–479.
9. Чумаков А.И., Егоров А.Н., Маврицкий О.Б., Яненко А.В. Возможности использования локального лазерного излучения для моделирования эффектов от воздействия отдельных ядерных частиц в ИС // Микроэлектроника. Т. 33. № 2. 2004. С. 128–133.