

## Расчетно-экспериментальная оценка сбоеустойчивости ИС в условиях космического пространства

А.А. Печенкин<sup>1</sup>, А.Л. Васильев<sup>1</sup>, А.А. Козлов<sup>1</sup>, Д.О.Кольцов<sup>1</sup>, А.А. Орлов<sup>2</sup>,  
А.С. Тарараксин<sup>1</sup>, А.И.Чумаков<sup>1</sup>, А.В. Яненко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ОАО ЭНПО «Специализированные Электронные Системы», aarech@spels.ru

<sup>2</sup> ФГУ «22 ЦНИИИ Минобороны России»

**Аннотация** - Представлена расчетно-экспериментальная методика прогнозирования частоты возникновения локальных радиационных эффектов в бортовой аппаратуре космических аппаратов при воздействии высокоэнергетичных протонов и тяжелых заряженных частиц. Частота локальных радиационных эффектов определяется исходя из оценки внутренней радиационной обстановки и параметров чувствительности ИС, полученных расчетно-экспериментальными методами.

**Ключевые слова** — тяжелые заряженные частицы, одиночные сбои, тиристорные эффекты.

За последнее десятилетие электронные системы космических аппаратов качественно изменялись, что обусловлено переходом на элементно-технологический базис микроэлектроники. Это 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.

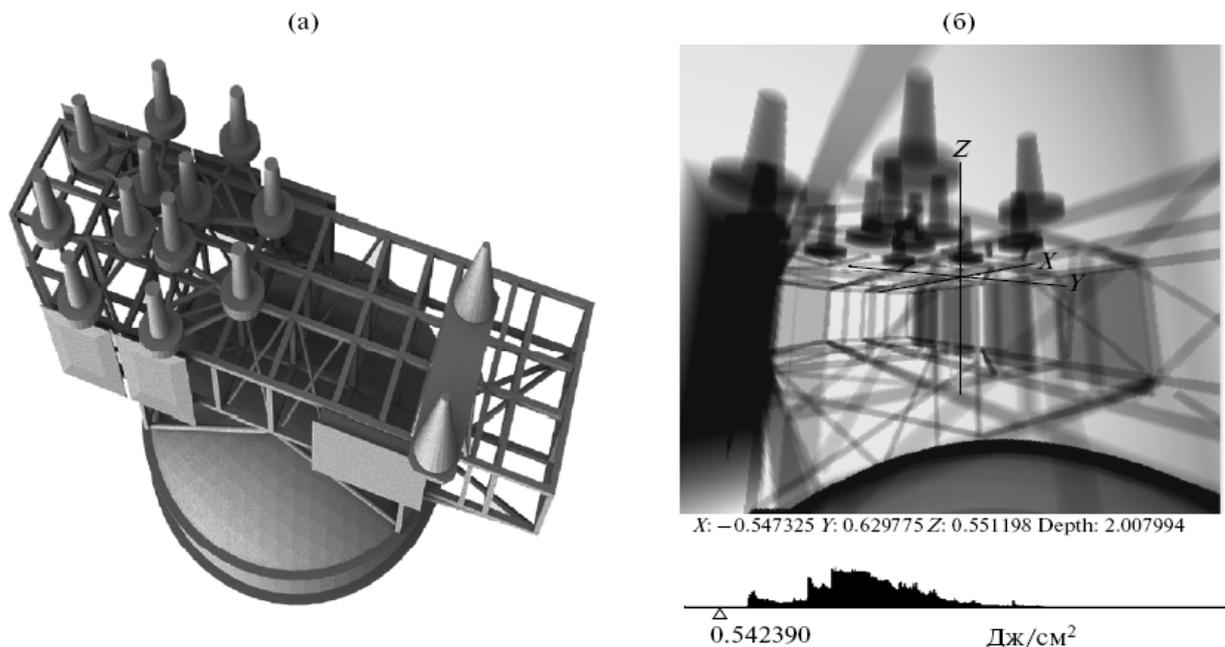


Рис. 1. Конструкция космического аппарата (а) и пример его оптической модели (б)

При анализе локальных радиационных эффектов в ИС можно пренебречь влиянием электронного излучения, которое не способно формировать большое энерговыделение в чувствительных 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 существует 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, полученной 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 за-

данной 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·см<sup>2</sup>/мг. В первом случае не возникает особых

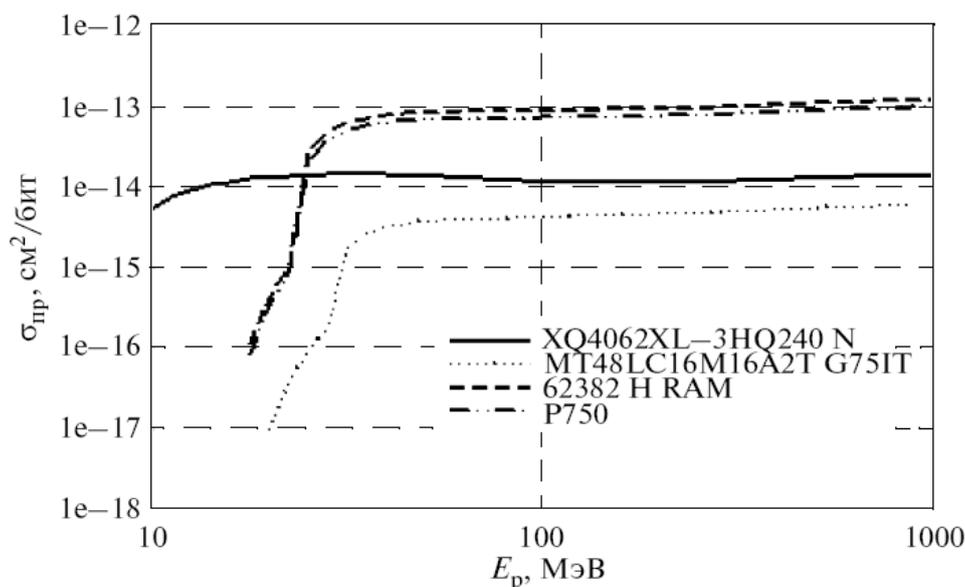


Рис. 2. Расчетные зависимости сечений одиночных сбоев от энергии протонов для ПЛИС XQ4062XL-3HQ240N, ДОЗУ MT48LC16M16A2TG-75IT, ОЗУ 62382H и микропроцессора P750

проблем при проведении экспериментальных исследований на ускорителях протонов.

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  $10^{-15} \dots 10^{-14}$  см<sup>2</sup>/бит;

- в силу наличия пороговой энергии протекания ядерных реакций в материалах при воздействии 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 проектных норм 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 приповерхностных 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 заряда с трека ядерной частицы (осколка спонтанного деления).

Другим альтернативным методом является применение лазерных имитаторов сфокусированного излучения пикосекундной длительности.

Экспериментальная оценка сечения одиночных сбоев с помощью лазерных имитаторов может быть получена методом случайного сканирования всей поверхности кристалла ИС сфокусированным лазерным излучением. Но и в этом случае существуют ограничения, связанные с наличием многослойной металлизации. Это ограничение может быть устранено при использовании методики локального лазерного облучения, исключающей полное отражение лазерного излучения от металлизации. Также с помощью методики локального облучения, можно оценить сечение насыщения отдельного элемента [9].

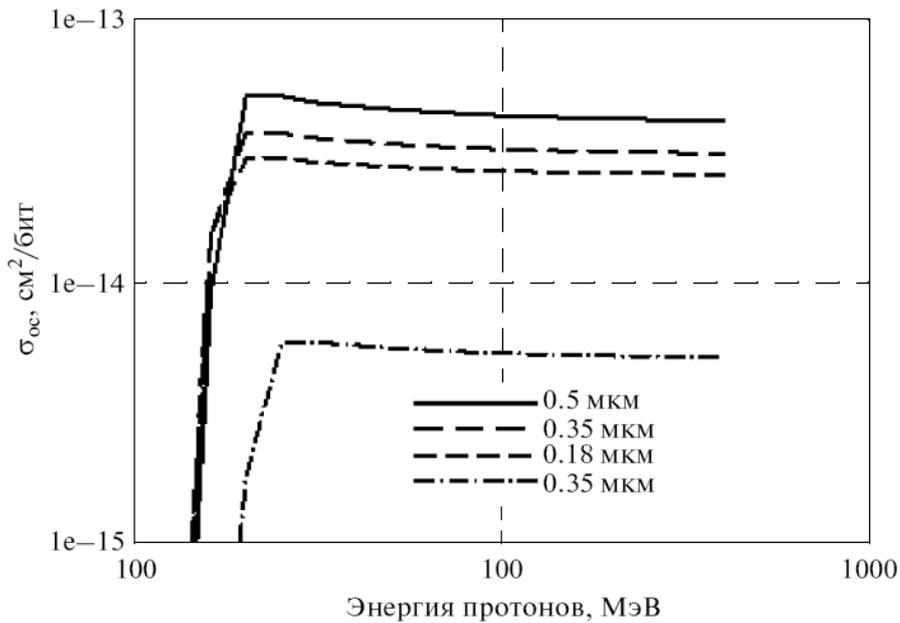


Рис. 3. Типовые зависимости сечений одиночных сбоев от энергии протонов для ИС с различными проектными нормами

Грубая оценка сечения насыщения так же может быть сделана исходя из анализа поверхности кристалла ИС. Например, 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  $N_{озу}$  – Количество ячеек памяти на кристалле ИС ОЗУ.

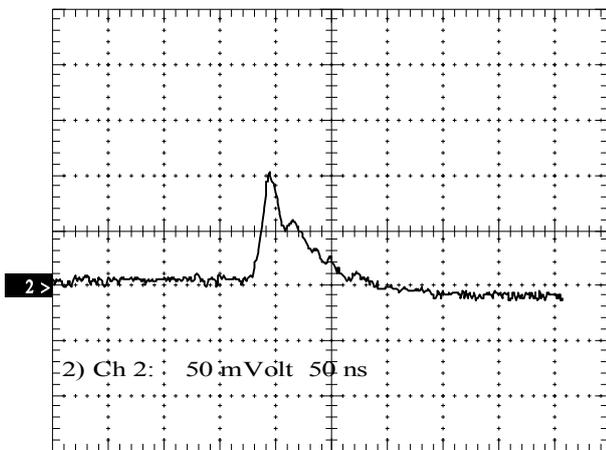


Рис. 4. Типовая форма импульсов, “иголок” на выходе операционного усилителя 1484УД1 при облучении лазерным имитатором РАДОН-9ф

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

Наиболее опасным из всех видов локальных радиационных эффектов, возникающих в бортовой аппаратуре космических аппаратов, является тиристорный эффект. При возникновении тиристорного эффекта возможно выгорание как самой ИС, так и вторичного источника питания, при условии, что питание ИС не будет незамедлительно отключено. Однако в условиях автономного активного существования летательного аппарата на орбите питание ИС не может быть отключено, без принятия специальных схемотехнических мер на этапе проектирования бортовой аппаратуры. По результатам экспериментальных исследований было установлено, что в ряде случаев после возникновения тиристорного эффекта и последующего кратковременного прекращения подачи питания, ИС восстанавливала свою работоспособность, при нахождении в состоянии тиристорного эффекта до 1-5 минут. В то же время ряд ИС не восстанавливали свою работоспособность после нахождения в состоянии тиристорного эффекта менее 100мс. Проведенные расчетно-экспериментальные исследования выявили

повышение чувствительности КМОП ИС по мере уменьшения проектных норм проектирования.

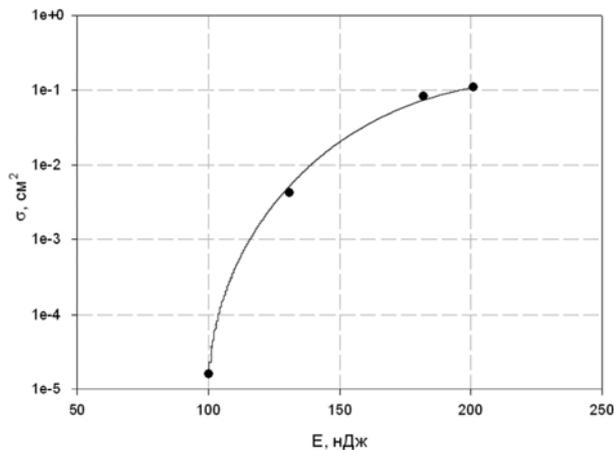


Рис. 5. Зависимость сечения тиристорного эффекта от энергии ЛИ в кристалле 7C1049V производства Sypress 1999г

Например, в КМОП ИС с проектными нормами 0.5 мкм и выше крайне редко имеет место тиристорный эффект при воздействии протонов 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 произвести оценку параметров чувствительности КМОП ИС к этому эффекту.

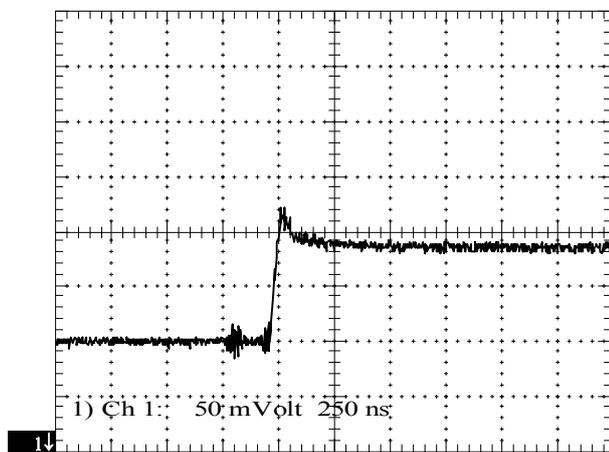


Рис. 6. Типовая осциллограмма развития тиристорного эффекта в КМОП ИС – стационарный ТЭ

Отметим, что представленные выше 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<sup>-1</sup> см<sup>2</sup>. В этом

случае эффективна методика случайного сканирования с помощью лазерных имитаторов, для оценки зависимости сечения тиристорного эффекта от энергии лазерного излучения (эквивалентных значений линейных потерь энергии) (рис. 5).

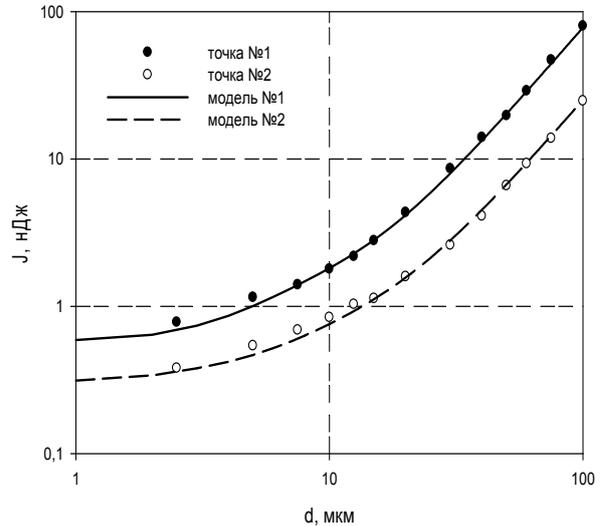


Рис. 7. Экспериментальные и расчетные зависимости пороговой энергии возникновения тиристорного эффекта в разных чувствительных областях от диаметра лазерного пятна в микроконтроллере ADUC841BS62-5

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 методами локального облучения 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).

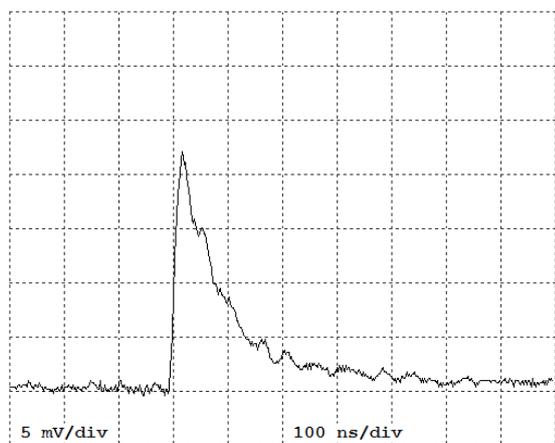
Для определения пороговых величин линейных потерь энергии расчетно-экспериментальными методами локального лазерного облучения необходимо определить энергию возникновения тиристорного эффекта, приведенную к сфокусированному излучению и оценить потери лазерного излучения на оптических неоднородностях.

Приведенная энергия возникновения тиристорного эффекта может быть получена расчетными методами из экспериментальной зависимости пороговой энергии лазерного излучения для возникновения тиристорного эффекта от диаметра пятна лазерного излучения. Так же из этой зависимости определяется площадь чувствительной области (сечение) в модели прямоугольной чувствительной области.

Оценка потерь лазерного излучения на оптических неоднородностях может быть произведена из сравне-

ния амплитудно-временных характеристик ионизационной реакции в цепи питания при локальном облучении части кристалла ИС. При этом, необходимо учитывать интегрирование ионизационной реакции на внутренних и внешних инерционностях ИС. Типичная величина потерь лазерного излучения может варьироваться в диапазоне от 1.5 до  $10^2$  раз, в зависимости от степени интеграции ИС и числа слоев металлизации.

При наличии слишком больших потерь лазерного излучения с активной стороны кристалла из-за высокой степени покрытия металлизацией, возможно локальное облучение с тыльной стороны подложки кристалла ИС. Так же этот метод эффективен для определения параметров чувствительности ИС в корпусах с кристаллом, перевернутым тыльной стороной ("Flip-Chip").



**Рис. 7. Типовая осциллограмма ионизационной реакции в цепи питания КМОП ИС**

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 сбоях 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  $6 \times 10^{-4}$  событий/(ИС/сутки) и  $3 \times 10^{-3}$  событий/(ИС/сутки).

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

фектов 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.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [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 наноэлектроника. 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. – М.: МИФИ/СПЭЛС. 2004. Вып. 7. 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. 2004. Т. 33. № 2. С. 128–133.