

# Методики исследования и предотвращения развития катастрофического отказа вследствие одиночного тиристорного эффекта

А.С. Тарараксин<sup>1,2</sup>, Р.Р. Нигматуллин<sup>2</sup>, Д.В. Савченков<sup>1,2</sup>, С.А. Соловьев<sup>2</sup>, А.В. Яненко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт экстремальной прикладной электроники НИЯУ «МИФИ»

<sup>2</sup>ОАО «ЭНПО Специализированные электронные системы», [astar@spels.ru](mailto:astar@spels.ru)

**Аннотация** — Рассмотрены особенности развития одиночного тиристорного эффекта и катастрофического отказа в интегральных схемах при воздействии тяжелых заряженных частиц. Для обоснованного выбора методов и технических решений по парированию тиристорного эффекта и предотвращению катастрофического отказа в общем случае необходимо получить экспериментальные данные о поведении интегральной схемы при развитии тиристорного эффекта и катастрофического отказа. Наиболее удобными и информативными для этих целей являются лазерные имитационные методы испытаний.

**Ключевые слова** — одиночные эффекты, тяжелые заряженные частицы, тиристорный эффект, катастрофический отказ, метод локального лазерного облучения.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Радиационные исследования и испытания изделий микроэлектроники для определения возможности их применения в бортовой аппаратуре космических аппаратов всегда были неотъемлемой частью космических проектов, однако до недавнего времени это, в основном, касалось только эффектов поглощенной дозы и структурных повреждений. Последние несколько лет в России внимание разработчиков сконцентрировалось на проблеме одиночных сбоев и отказов, возникающих в изделиях микроэлектроники при воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) и высокоэнергетичных протонов (ВЭП) космического пространства [1]. Наиболее существенной эта проблема становится в приложении к высокоинтегрированным и сложнофункциональным узлам современных систем управления космических аппаратов. Помимо отказов в высоковольтных полевых транзисторах наиболее распространены отказы в интегральных схемах (ИС) средней и высокой степени интеграции, выполненных по КМОП технологии, в которых при локальном радиационном воздействии ТЗЧ и ВЭП может развиваться одиночный тиристорный эффект (ТЭ). Тиристорный эффект обычно сопровождается протеканием больших токов по цепи питания, которые могут приводить к разогреву ИС и катастрофическому отказу (КО).

Повышенная чувствительность к ТЭ в КМОП ИС обычно является весомым аргументом для отказа от установки на борт космического аппарата того или иного изделия микроэлектроники. Однако из-за невозможности реализовать в другом технологическом базисе функционально-сложные изделия нередко используются КМОП ИС, чувствительные к ТЭ. В этом случае необходимо обеспечить защиту РЭА схемами парирования ТЭ. По этой причине необходимо определить поведение ИС во время развития в ней ТЭ для ее эффективной защиты от возможного катастрофического отказа.

## II. АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ТИРИСТОРНОГО ЭФФЕКТА

Одной из особенностей большинства ТЭ является его «обратимость»: при выключении питания тиристорная структура выключается, и при повторном включении питания и, возможно, восстановлении рабочей температуры кристалла, ожидается полное восстановление работоспособности и параметров изделия. На этом принципе построено большинство технических решений для парирования ТЭ.

Тиристорный эффект может проявляться в виде «микрощелчки» (micro-latchup) [2]. Ток потребления при этом возрастает значительно меньше, чем при обычном ТЭ. Поэтому необходимо тщательнее подходить к выбору критических значений тока, при которых защищаемая ИС отключается от питания, кроме того в некоторых случаях небольшие приращения токов сложно выделить на фоне больших рабочих динамических токов потребления [3].

С учетом локальности радиационного воздействия ТЗЧ или ВЭП при развитии ТЭ в ИС «включается», как правило, одна тиристорная структура, параметры которой зависят от особенностей ИС. Основными параметрами, характеризующими ТЭ в ИС, принимая во внимание механизм развития ТЭ и возможный отказ вследствие протекания больших токов, будут: ток потребления в состоянии ТЭ, ток удержания (минимальный ток, при котором ИС ещё может находиться в со-

стоянии ТЭ), соответствующее ему напряжение удержания и время до необратимой деградации ИС после возникновения ТЭ.

Особое беспокойство разработчиков аппаратуры вызывают так называемые латентные повреждения, следы которых могут появляться после возникновения в схеме тиристорного эффекта. Угроза таких повреждений заключается в том, что они могут сначала никак не повлиять на работоспособность и отдельные характеристики ИС, однако затем, в ходе дальнейшей эксплуатации, способны привести к параметрическому или функциональному отказу. Возможные структурные разрушения (рис. 1) [4], вызванные одиночным тиристорным эффектом, как правило, наблюдаются в верхних слоях металлизации. К следам скрытых повреждений относятся:

- наличие металлических сфер;
- растрескивание изолирующих материалов;
- видимые пустоты в узлах межсоединений.

Физический анализ скрытых повреждений показывает, что [2]:

- выдержка схемы при критических плотностях токов вызывает разогрев и расплавление металлических межсоединений;
- разность температурных коэффициентов расширения металлов и диэлектриков вызывает дополнительное стрессовое механическое воздействие на изолирующие части полупроводника;
- растрескивание диэлектрика и эрозия металла ускоряет наступление катастрофического отказа;
- резкое охлаждение вскипающего металла приводит к образованию сферических форм.

Наличие скрытых повреждений не всегда сразу приводит к катастрофическому отказу ИС. Количество «вскипевшего» и «выброшенного» металла может быть недостаточно для отказа ИС. Кроме того, после расплавления и рекристаллизации часть металла может сформировать «мостики», соединяющие нарушенные пустотами межсоединения, сохраняя тем самым общую работоспособность всей схемы (рис. 2) [2].

Очевидно, что подобные структурные нарушения, даже не приводящие к потере работоспособности и изменению параметров ИС, скажутся на параметрах надежности ИС и могут привести к сокращению ее срока службы.

Плотность тока, достигаемая при развитии ТЭ, определяется индивидуальными особенностями конкретных паразитных тиристорных структур, при этом связь с величиной тока потребления ИС в целом в состоянии ТЭ также будет индивидуальна для каждой тиристорной структуры даже в пределах одной ИС. Характерные плотности тока для образования локальных разрушений, как показано в [2], имеют величину порядка  $10^7$  А/см<sup>2</sup>, то есть для поперечного сечения проводника  $1 \text{ мкм}^2$  это соответствует току порядка 100 мА.

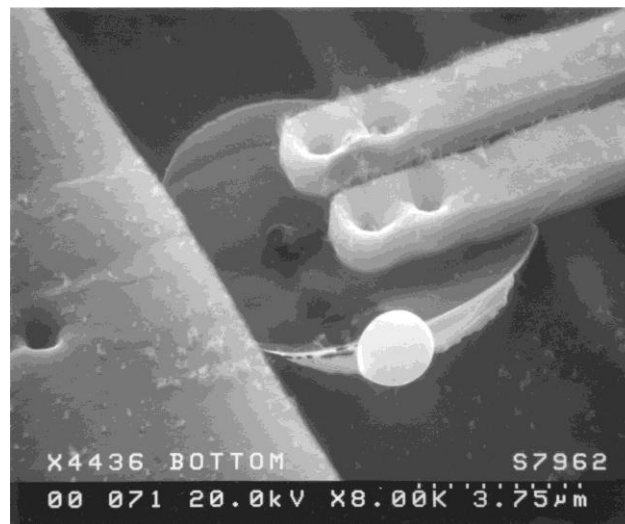


Рис. 1. Типичный вид структурного разрушения кристалла ИС вследствие ТЭ [4]

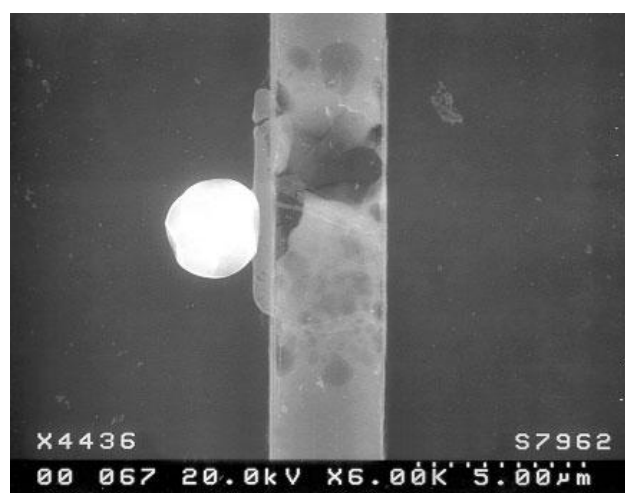


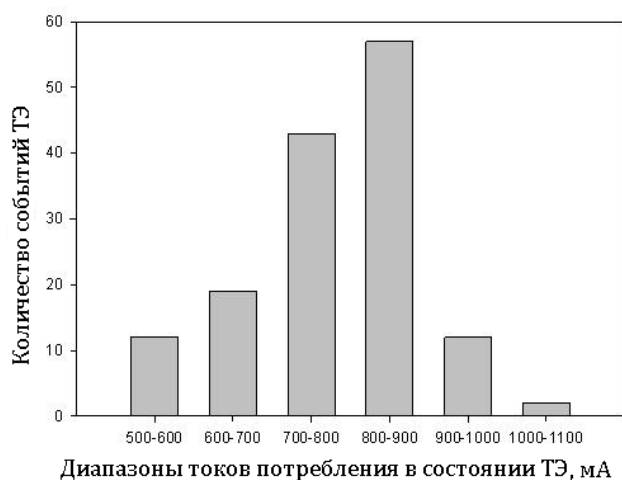
Рис. 2. Пример «самовосстановления» проводника [5]

Также очевидно, что чем дольше ИС находится в состоянии ТЭ, тем меньшая величина плотности тока (и значения тока потребления ИС) требуется для выхода ее из строя или образования структурных разрушений. В работе [2] показано, что существует область значений тока потребления в состоянии ТЭ и длительности импульса тока при развитии и удержании ТЭ, при которых не возникает скрытых структурных повреждений и латентных катастрофических отказов.

### III. МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЭ И КО В ИС

Традиционные методы исследования тиристорного эффекта базируются на проведении испытаний на ускорителях ионов или протонов [1]. При этом исследование поведения ИС при развитии ТЭ и выдержке ИС в состоянии ТЭ возможно, но не эффективно [5]. Однако статистическую информацию, например, относительные частоты значений токов ИС в состоянии ТЭ, удобно получать именно на ускорителях, так как обеспечивается равномерное по всей поверхности кристалла и случайное воздействие частиц (рис. 3).

Альтернативными являются методы, основанные на применении сфокусированного и локального лазерного излучения [6-8], основными преимуществами которых с точки зрения исследования ТЭ являются локальность и детерминированность воздействия (имеется возможность получать карту чувствительных к ТЭ зон на кристалле и определять характеристики тиристорных структур для каждой чувствительной зоны), возможность воздействия на ИС с тыльной стороны кристалла через подложку (для конструкции ИС типа flip-chip лазерные методы являются единственной рабочей альтернативой ускорителям ионов), нормальные лабораторные условия (исследования развития ТЭ проводятся при комнатной температуре; при необходимости температуру можно изменять и контролировать с использованием дополнительных средств).



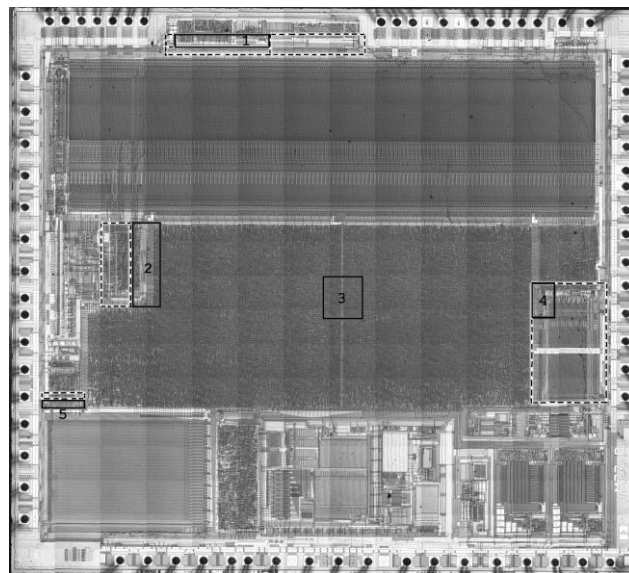
**Рис. 3.** Гистограмма значений тока потребления в состоянии ТЭ для СБИС 1879ВМ4 при воздействии протонами с энергией 1 ГэВ

Методика исследования развития ТЭ и характеристик ТЭ на лазерных имитаторах заключается в следующем.

На первом этапе проводится сканирование кристалла ИС лазерным лучом с некоторой начальной энергией лазерного излучения в импульсе с целью локализации областей, чувствительных к тиристорному эффекту. Сканирование производится обычно по «стандартной» траектории типа «змейка» вдоль большей стороны кристалла с определенным шагом (обычно 30...50 мкм в зависимости от размеров кристалла с учетом временных затрат на время сканирования всего кристалла). В некоторых случаях, когда известно расположение чувствительных областей на кристалле, применяются другие траектории сканирования. Затем, для уточнения положения чувствительных областей, диаметр оптического пятна и энергию в импульсе итерационно уменьшают и на основании полученных данных определяют несколько типовых областей, обладающих наименьшей пороговой энергией возникновения тиристорного эффекта. Типовые области выбираются с учетом топологического рисунка кристалла ИС и должны располагаться в визуальном смысле разных по структуре участках кристалла (при этом принимается допу-

щение, что в регулярных однородных структурах кристалла параметры тиристорных структур будут близки).

При наличии на кристалле ИС областей, в которых вследствие ТЭ развивается КО (особенно, если он наступает сразу), обычный подход локализации чувствительных областей (сканирование по траектории «змейка») неприменим из-за выхода из строя микросхем в процессе сканирования (рис. 4). В этих случаях применяются другие алгоритмы и траектории сканирования для локализации и обхода критичных по катастрофическому отказу областей кристалла, например, траектории типа «спираль» и сегментное сканирование.

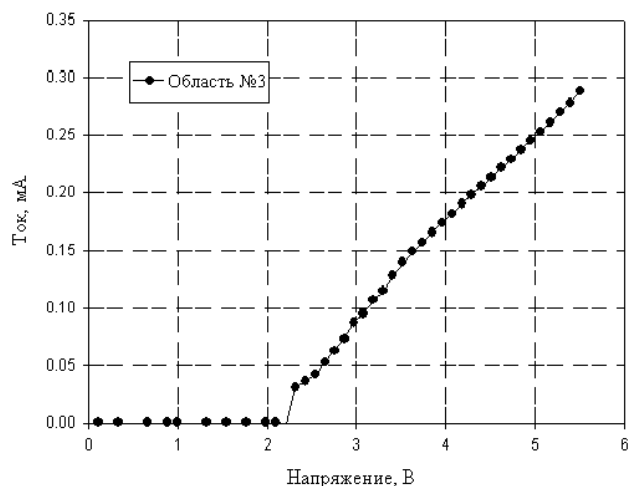


**Рис. 4.** На фотографии кристалла БИС ADUC832 сплошной рамкой показаны границы областей, развитие ТЭ в которых приводит к КО, пунктирной рамкой – границы областей риска КО, которые удалось получить сегментным сканированием поверхности кристалла

Для выявленных областей, чувствительных к локальному воздействию по тиристорному эффекту, проводятся испытания по определению характеристик тиристорной структуры и так называемые испытания на «живучесть». При этом определяются вольтамперные характеристики тиристорных структур (рис. 5), откуда экстрагируются напряжение и ток удержания ТЭ. Испытания по определению работоспособности (проверке функционирования) во время и после выдержки ИС в состоянии ТЭ проводятся в следующей последовательности:

- 1) Установка начального уровня внешнего ограничения тока потребления.
- 2) Ввод ИС в состояние ТЭ посредством воздействия на чувствительную область излучением лазерного имитатора. При необходимости – увеличение тока ограничения источника питания до восстановления нормального напряжения питания (внешнее ограничение тока потребления может приводить к просадке напряжения питания на ИС).

- 3) Если нормальное напряжение питания удалось восстановить – проводится контроль тока потребления и функционирования ИС в состоянии ТЭ.
- 4) Выдержка ИС в состоянии ТЭ заданное время.
- 5) Вывод ИС из состояния ТЭ путем кратковременно-го выключения питания.
- 6) Параметрический и функциональный контроль работоспособности ИС. В случае, если наблюдается отказ – испытание образца прекращается.
- 7) Повторение последовательности, начиная с п. 2 с увеличением интервала выдержки в состоянии ТЭ. Интервал времени выдержки итерационно увеличивается для определения допустимого времени выдержки в ТЭ.



**Рис. 5. Вольтамперная характеристика тиристорной структуры в одной из чувствительных областей кристалла БИС 1645РУ1У**

#### IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Как правило, по поведению в результате развития ТЭ испытываемые ИС разделяются на три группы: (1) ИС, в которых катастрофический отказ (КО) наступает практически сразу после воздействия, (2) ИС, в которых отказ наступает через некоторое ограниченное время (как правило, несколько десятков секунд), и (3) ИС, для которых выдержка в состоянии ТЭ при нормальной внешней температуре, некотором ограничении тока потребления (которое, как правило, определяется внутренним сопротивлением ИС в состоянии ТЭ) не приводит к функциональным отказам.

К каждой из групп могут относиться как ИС средней, так и высокой степени интеграции и разной функциональной сложности. Это говорит о том, что поведение ИС при развитии ТЭ определяется свойствами ее паразитных тиристорных структур, и, таким образом, может быть определено преимущественно только экспериментально.

В некоторых ИС существуют области на кристалле, чувствительные к ТЭ, в которых в результате развития ТЭ происходят некоторые изменения (предположительно, структурные разрушения), приводящие к невозможности повторного развития ТЭ в этой области.

Фактически, в некоторый момент времени после развития ТЭ происходит его «срыв», при этом работоспособность ИС не нарушается ни в момент ТЭ, ни после его «срыва». В данном случае большую роль играет полнота функционального контроля. Вполне вероятно, что ограниченный функциональный и параметрический контроль ИС, реализуемый в рамках радиационных испытаний не позволяет выявить нарушение работоспособности. Полученные экспериментальные данные для ПЛИС XC95144 говорят о связи функционального отказа и места возникновения КО на кристалле: если в прошивке ПЛИС область отказа не использована, то ПЛИС продолжает нормально функционировать.

В данной ПЛИС отказ связан с протеканием большого импульсного тока потребления в момент развития ТЭ, который за время менее единиц миллисекунд приводит к необратимым изменениям (рис. 6). При ограничении времени действия импульсного тока до времени порядка 1 мкс происходит частичное структурное разрушение, которое при нескольких повторных ТЭ в этой области приводит к катастрофическому отказу.

#### V. МЕТОДЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ТЭ И КО

Накопленный в ОАО «ЭНПО СПЭЛС» опыт испытаний ИС на стойкость к воздействию отдельных заряженных частиц позволяет выделить следующие основные пути по предотвращению и парированию ТЭ и предотвращению катастрофического отказа:

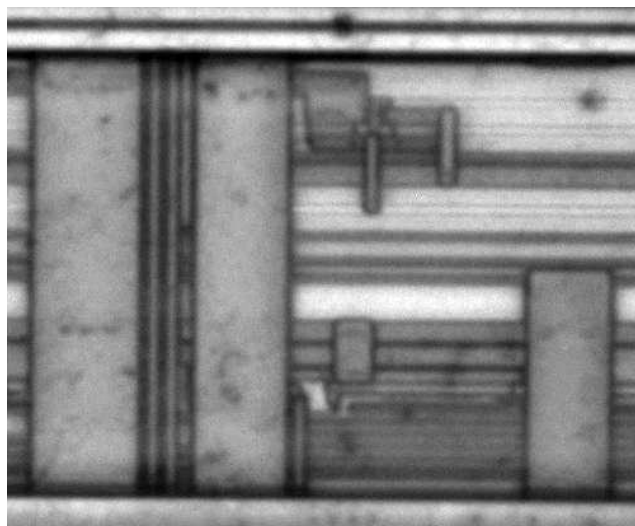
- ограничение тока потребления;
- кратковременное отключение питания;
- подавление «броска» тока при включении ТЭ.

Ограничение тока потребления внешним источником питания или токоограничивающим резистором осуществляется с целью снизить плотность тока в состоянии ТЭ. Такой подход может применяться, если ток потребления ИС сравнительно небольшой, и ограничение тока не приводит к снижению напряжения питания ИС. Если рабочие токи ИС намного меньше, чем ток удержания тиристорной структуры, то такой способ может с успехом применяться для подавления ТЭ, то есть ТЭ вообще перестанет развиваться. Для ряда ИС разных функциональных классов (ПЛИС EPM7128, АЦП AD677, цифровые гальванические развязки ADUM1200, ADUM1401 и др.) экспериментально подтверждена эффективность такого подхода.

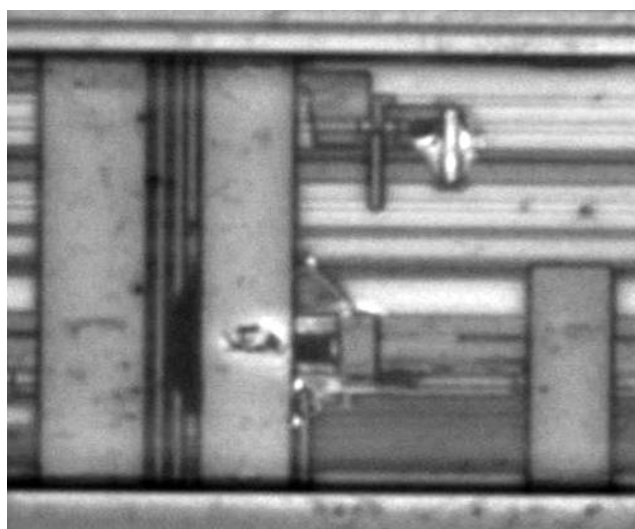
Следует отметить, что ограничение тока потребления схемами защиты в источниках питания имеет инерционность и может ограничить только установившийся ток включенной тиристорной структуры, при этом мгновенные плотности тока, до достижения им установившегося значения, могут достигать критических величин и приводить к катастрофическому отказу.

Второй подход парирования ТЭ и предотвращения КО – кратковременное отключение питания при «детектировании» ТЭ. Это универсальный способ парирования ТЭ, который наиболее широко применяется. В данном случае большое значение имеет время реакции

аппаратуры на развитие ТЭ. В зависимости от свойств защищаемой ИС или модуля необходимо выбирать аппаратные, программные или комбинированные методы детектирования и парирования ТЭ с учетом особенностей поведения ИС при развитии ТЭ и времени наступления КО в ИС при выдержке в состоянии ТЭ.



(а)



(б)

**Рис. 6.** Изменения в чувствительной области ПЛИС XC95144 при развитии ТЭ: (а) – состояние до ТЭ, (б) – структурные разрушения в результате импульса тока при ТЭ, регистрируется функциональный отказ ПЛИС

Для детектирования ТЭ обычно используют два подхода, основанных (1) на контроле тока потребления и (2) на контроле работоспособности ИС по результатам функционального контроля. В большинстве случаев достаточно контролировать ток потребления, однако, как показывает практика, из-за особенностей поведения разных ИС при развитии ТЭ даже комбинация контроля тока потребления и функционирования не всегда позволяет однозначно определять состояние ТЭ. В сложно-функциональных ИС типичны заметные изменения режимного тока при изменении состояния

вследствие одиночных сбоев. В сложных системах, например, в модулях, детектирование по току потребления затруднено из-за больших вариаций рабочего тока при сравнительно небольших токах потребления в состоянии ТЭ. Кроме этого, возможны и «микро» ТЭ [2], которые также потенциально сложно выделить на фоне относительно большого режимного тока потребления.

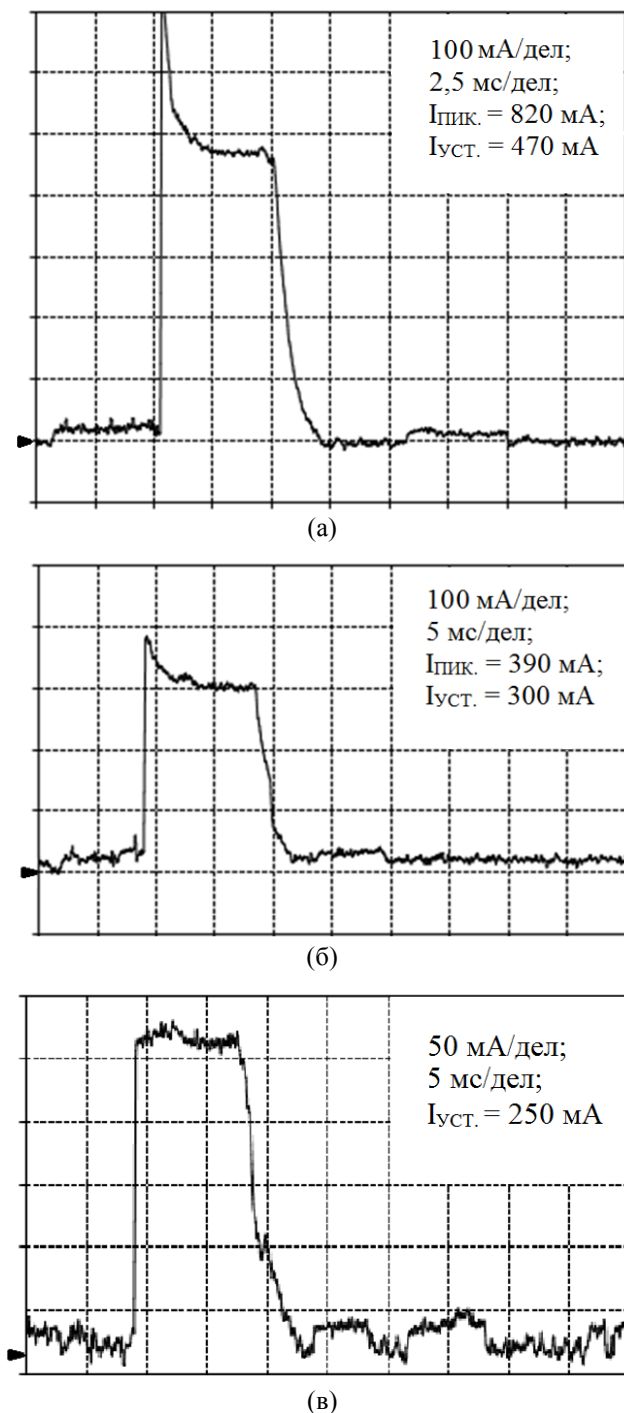
В зависимости от особенностей защищаемой ИС, в частности – периода времени, в течение которого ИС может находиться в состоянии ТЭ без наступления КО, выбирается схемотехническое или системотехническое решение для парирования ТЭ. Для ИС с высоким риском быстрого развития КО при ТЭ следует использовать схемотехнические методы, по возможности, с очень быстрым (менее микросекунд) отключением питания при детектировании ТЭ. В случаях, если ИС может без существенных последствий находиться в состоянии ТЭ значительное время (несколько минут), то парирование ТЭ допустимо организовать на уровне программного обеспечения.

Таким образом, затруднительно выделить один универсальный способ детектирования и парирования ТЭ и более правильно говорить об индивидуальной методике детектирования ТЭ для каждого типа ИС, как об общем подходе.

Следует упомянуть также о термическом методе исследования ТЭ с использованием тепловизора. Такой подход пока мало распространен в практике радиационных испытаний, однако имеет большие перспективы для изучения процессов, протекающих при развитии ТЭ и КО в ИС.

Третий подход по предотвращению КО в ИС при развитии ТЭ (подавление «броска» тока при включении ТЭ) связан с использованием конденсаторов в цепях питания ИС, блокирующих высокочастотные помехи. Одновременно эти конденсаторы являются накопителями энергии, которая при включении тиристорной структуры обеспечивает большие значения импульсного тока потребления. Подавление «броска» тока при включении ТЭ возможно путем увеличения постоянной времени цепи питания ИС, с учетом ее собственной емкости по выводам питания, с одновременным уменьшением емкости блокирующих конденсаторов по питанию. Очевидно, что такие меры могут привести к недопустимому ухудшению быстродействия ИС и снижению стабильности напряжения питания непосредственно на выводах ИС, поэтому применимость такого подхода требуется определять путем проведения испытаний в электрических режимах питания и нагружения, близких к режимам в аппаратуре.

Для ряда ИС с относительно небольшими значениями рабочих токов уменьшение выброса тока питания в момент включения ТЭ может быть достигнуто введением резистора в цепь питания между блокирующими конденсаторами и выводом питания ИС (рис. 7).



**Рис. 7.** Изменение формы импульса тока потребления цифровой гальванической развязки ADUM1200 при развитии ТЭ: (а) – без ограничивающего резистора, в результате ТЭ развивается КО; (б, в) – с ограничивающими резисторами 10 Ом (б) и 20 Ом (в), КО не развивается

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в работе основные особенности развития одиночного тиристорного эффекта и катастрофического отказа при воздействии тяжелых заряженных частиц на интегральные схемы позволяют сделать вывод, что выбор методов и технических решений

по парированию тиристорного эффекта и предотвращению катастрофического отказа в общем случае требует индивидуального подхода для каждого типа интегральной схемы и зависит от схемы ее включения в аппаратуре. Для обоснованного выбора необходимо получить экспериментальные данные о поведении интегральной схемы при развитии тиристорного эффекта и катастрофического отказа. Наиболее удобными и информативными для этих целей являются лазерные имитационные методы испытаний.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чумаков А.И. Действие космической радиации на ИС. М.: Радио и связь, 2004. 320 с.
- [2] Heidi N. Becker, Tetsuo F. Miyahira, and Allan H. Johnston. Latent Damage in CMOS Devices from Single-Event Latchup // Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. Pasadena, California. 2002.
- [3] Ахметов А.О. Особенности исследования стойкости одноплатных компьютеров к воздействию отдельных ядерных частиц // Спецтехника и связь. 2011. № 4-5. С. 21–24.
- [4] Miyahira T.F., Johnston A.H., Becker H.N., LaLumondiere S.D., Moss S.C. Catastrophic Latchup in CMOS Analog-to-Digital Converters // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2001. V. 48. № 6. P. 1833–1840.
- [5] Яненко А.В., Чумаков А.И., Печенкин А.А., Савченков Д.В., Тараксин А.С., Васильев А.Л. Сравнительный анализ испытаний электронной компонентной базы на стойкость к воздействию отдельных ядерных частиц на лазерных имитаторах и ускорителях ионов // Спецтехника и связь. 2011. № 4-5. С. 4–7.
- [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. Лазерные имитаторы «пико» для испытаний электронной компонентной базы на стойкость к воздействию отдельных ядерных частиц // Спецтехника и связь. 2011. № 4-5. С. 8–13.
- [7] Тараксин А.С., Савченков Д.В., Печенкин А.А. Автоматизация испытаний интегральных микросхем на стойкость к воздействию отдельных ядерных частиц с использованием аппаратно-программного комплекса National Instruments и технологий .NET // Спецтехника и связь. 2011. № 4-5. С. 14–16.
- [8] Васильев А.Л., Печенкин А.А., Чумаков А.И., Яненко А.В., Артамонов А.С. Верификация лазерных испытаний ИС на стойкость к воздействию отдельных ядерных частиц с использованием импульсной гамма-установки // Спецтехника и связь. 2011. № 4-5. С. 17–20.