



На правах рукописи

Швецов-Шиловский Иван Иванович

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИССЛЕДОВАНИЙ
НЕСТАБИЛЬНЫХ ТИРИСТОРНЫХ ЭФФЕКТОВ В КМОП СБИС
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2022 г.

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)».

Научный руководитель: **Чумаков Александр Иннокентьевич**
доктор технических наук
профессор ИНТЭЛ НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты: **Таперо Константин Иванович**
доктор технических наук
заместитель генерального директора по науке и инновациям АО «НИИП»

Титаренко Юрий Ефимович
доктор физико-математических наук
начальник лаборатории ККТЭФ НИЦ «Курчатовский институт»

Будяков Алексей Сергеевич
кандидат технических наук
заместитель генерального директора по научной работе ООО «Инноцентр ВАО»

Защита состоится 29 сентября 2022 г. в ____ час. ____ мин
на заседании диссертационного совета МИФИ.05.03
в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»
по адресу: 115409 Москва, Каширское шоссе, 31, тел. 324-84-98, 323-91-76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте ds.mephi.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,

Д.С. Веселов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация направлена на решение актуальной научно-технической задачи разработки и внедрения методических и технических средств моделирования нестабильных тиристорных эффектов в КМОП микросхемах высокой степени интеграции при воздействии ионизирующих излучений естественного и искусственного происхождения. Задача имеет существенное значение для создания и совершенствования существующих и разрабатываемых высоконадежных элементов и устройств вычислительной техники и систем управления.

Актуальность темы исследования

В настоящее время элементная база на основе технологии «комплементарная структура металл-оксид-полупроводник» (КМОП) занимает доминирующее место в электронных устройствах вычислительной техники и систем управления, что обусловлено их большими функциональными возможностями, высоким быстродействием и низким энергопотреблением. В современных КМОП микросхемах характерным является эффект защелкивания или тиристорный эффект (ТЭ), возникающий при воздействии ионизирующих излучений естественного и искусственного происхождения. В силу особенностей технологических процессов изготовления близкорасположенных МОП-транзисторов с каналами *n*- и *p*-типов в этих микросхемах образуются паразитные *p-n-p-n* структуры, которые в нормальных условиях не влияют на работоспособность изделий. Тиристорный эффект проявляется при включении этой паразитной *p-n-p-n* структуры вследствие внешнего воздействия, что приводит к необратимому возрастанию тока потребления, которое устраняется только сбросом питания. Помимо нарушения функционирования протекание больших токов может привести к катастрофическому отказу (КО). Уровень возникновения ТЭ зачастую определяет радиационную стойкость КМОП микросхемы.

Этот эффект известен давно и широко исследовался отечественными и зарубежными авторами. Однако все эти работы относятся к анализу классического стабильного ТЭ, из состояния которого КМОП микросхему можно вывести только кратковременным сбросом питания. Вместе с тем возможна ситуация, когда этот эффект сбрасывается самопроизвольно без внешнего отключения питания, то есть наблюдается нестабильный тиристорный эффект (НТЭ).

НТЭ не обнаруживается при использовании классических методик контроля ТЭ по фиксации квазистационарного тока в цепи питания. При этом НТЭ может быть особенно чувствителен к изменению условий функционирования микросхемы и при их изменении способен переходить в стабильное состояние. Потенциально стабильный ТЭ может проявиться в виде НТЭ при некорректной методике его контроля, например, при использовании относительно высокоомных резисторов в цепях питания. Это может привести к тому, что установленные в ходе подобных исследований показатели радиационной стойкости КМОП микросхемы не будут соответствовать имеющим место в аппаратуре.

Регистрация НТЭ в ходе экспериментальных исследований обеспечивает правильную интерпретацию получаемых результатов, в которых наблюдаются эффекты, являющиеся следствием НТЭ, например, катастрофические отка-

зы (КО), не сопровождающиеся стабильным ТЭ, или потери информации, не являющиеся следствием эффектов «традиционных» сбоев.

На момент начала работы в практике проведения расчетно-экспериментальных исследований ТЭ в сверхбольших интегральных схемах (СБИС) эффект НТЭ не учитывался. Данное обстоятельство могло приводить к неверному определению уровня стойкости изделий как по эффектам сбоев, так и по эффектам отказов.

В связи с этим актуальной является научная задача разработки методических и технических средств исследования нестабильных тиристорных эффектов в СБИС при воздействии ионизирующих излучений естественного и искусственного происхождения. Решение данной задачи основывается на систематизации закономерностей проявления НТЭ в КМОП СБИС, адаптации схемотехнической модели ТЭ для учета нестационарных процессов, разработке методик выявления и регистрации НТЭ, доработке существующего аппаратно-программного комплекса для проведения эффективных экспериментальных исследований.

Состояние исследований по проблеме

В России на момент начала работы над диссертацией имелись публикации авторов д.т.н. А.И. Чумакова и к.т.н. А.А. Печенкина, посвященные проблеме НТЭ. Проблема частично рассмотрена в работах д.ф.-м.н. В.Ф. Зинченко при описании чувствительности схем к импульсному ионизирующему излучению (ИИИ). Исследованию проявления ТЭ в СБИС в России посвящены труды к.т.н. А.В. Яненко, д.т.н. П.К. Скоробогатова, к.т.н. А.Е. Козюкова и ряда других авторов.

За рубежом эффект ТЭ рассматривался в работах таких авторов, как А.Н. Johnston, D. McMorro, S. Buchner и В. Bhuvu, при этом термин, обозначающий НТЭ, не вводился. Тема была частично затронута в статьях J.L. Azarewicz, посвященных щелевому ТЭ, то есть эффекту, когда ТЭ наблюдается в одном или нескольких ограниченных диапазонах интенсивностей ИИИ. Проблема рассмотрена в терминах устойчивости в работах R. Troutman и H. Zarre, однако в них предполагалась возможность самопроизвольного отключения тиристорной структуры после ее полного включения. Связь ТЭ и одиночных сбоев (ОС) при воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) рассмотрена в работах J. Barak, а классификация многократных сбоев, включающая в себя потери информации, связанные с НТЭ, сделана в работах G. Tsiligiannis и R. Secondo.

Имеющийся в работах указанных авторов научно-методический задел был использован при проведении диссертационного исследования. Анализ существующих отечественных и зарубежных работ показал, что эти работы охватывают важные аспекты исследуемой области, но, тем не менее, требуются систематические расчетно-экспериментальные исследования проявления НТЭ в КМОП СБИС при воздействии ионизирующих излучений, что **обуславливает актуальность** темы исследования. Существующие на момент начала работы над диссертацией модели, методики и аппаратно-программные средства контроля ТЭ не обеспечивали возможности полноценного и автоматизированного контроля НТЭ в процессе экспериментальных исследований.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является совершенствование методов и средств оценки радиационной стойкости КМОП СБИС к воздействию ИИИ и ТЗЧ космического пространства при наличии нестабильных тиристорных эффектов.

Указанная цель достигается в работе решением следующих **задач**:

- анализ существующих методических и технических средств исследований ТЭ в КМОП СБИС;
- выявление основных механизмов, влияющих на наличие в схеме НТЭ, а также на возможность перехода НТЭ в стабильный ТЭ (СТЭ);
- экспериментальные исследования возможности возникновения множественных сбоев при воздействии ТЗЧ и ИИИ как следствие проявления НТЭ, а также влияния режимов работы и однородности воздействия на проявление НТЭ;
- совершенствование схемотехнических моделей ТЭ, учитывающих возможность его самопроизвольного сброса при воздействиях ТЗЧ и ИИИ;
- развитие методик расчетно-экспериментальных исследований ТЭ при наличии НТЭ в объекте при воздействии ИИИ на основании анализа импульсной реакции и/или данных по многократным сбоям в рамках стандартной процедуры радиационных исследований;
- разработка аппаратно-программных средств контроля НТЭ с учетом особенностей испытательных установок;
- апробация и внедрение разработанных методических и технических средств при проведении экспериментальных исследований широкой номенклатуры КМОП СБИС.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Выявлены основные механизмы проявления НТЭ в КМОП СБИС, изучены и систематизированы условия функционирования микросхем, влияющие на проявление ТЭ и НТЭ в КМОП СБИС, для обеспечения корректного выбора критичного режима при экспериментальных исследованиях.
2. Впервые системно экспериментально исследована возможность влияния на проявление ТЭ режима работы, неоднородности воздействия ЛИ, вызванной металлизацией и локализацией воздействия.
3. Впервые получены экспериментальные результаты и описана взаимосвязь проявления НТЭ и многократных сбоев при воздействии ТЗЧ и «окон сбоев» при воздействии ИИИ.
4. Предложены и обоснованы схемотехническая и поведенческая модели тиристорной структуры, отличающиеся от существующих возможностью описания эффекта НТЭ и позволяющие получить качественные зависимости тока, характерные для КМОП микросхем при наличии в них нестабильного ТЭ, для задач схемотехнического моделирования.

Практическая значимость работы:

1. Предложены методики экспериментальных исследований для определения стойкости по НТЭ к воздействию ТЗЧ и ИИИ на основе анализа импульсной реакции.

2. Разработан аппаратно-программный комплекс, позволяющий регистрировать эффекты НТЭ в процессе экспериментальных исследований. Аппаратно-программный комплекс обеспечивает проведение исследований стойкости микросхем использованием различных установок: АРСА, «РАДОН-8», «РАДОН-17», «ПИКО-3» (АО «ЭНПО СПЭЛС» и НИЯУ МИФИ) и «У-400» (ЛЯР ОИЯИ).

3. Проведен комплекс уникальных экспериментальных исследований на современных КМОП микросхемах по выявлению влияния характеристик полей облучения, режимов работы и оснастки на условия возникновения НТЭ. Получены оригинальные результаты экспериментальных исследований НТЭ и СТЭ для множества типов как отечественных, так и иностранных микросхем. Результаты работы вошли в отчетные материалы по многочисленным НИР и составным частям ОКР («Информация-РС», «Информация-РС-2», «Преобразователь-И20-СВВ», «Процессор-ИЗ-МИФИ», «Процессор-И6-СВВ», «Схема-И8-1-СВВ», «Лазер»), выполненных по заказам Минпромторга России и предприятий промышленного и оборонного комплекса.

4. Результаты диссертации внедрены в АО «ЭНПО СПЭЛС» и ОА «Микрон» в рамках процедуры радиационных исследований микросхем на стойкость к ТЭ при воздействии ИИИ и ТЗЧ.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Анализ основных механизмов, определяющие появление НТЭ в КМОП микросхемах.

2. Схемотехнические модели тиристорной структуры в КМОП СБИС, позволяющие объяснить возникновение и развитие НТЭ в микросхемах.

3. Усовершенствованные методики экспериментальных исследований стойкости микросхем при воздействии ИИИ и ТЗЧ, учитывающие возможность проявления НТЭ в схемах и позволяющие установить порог возникновения НТЭ.

4. Аппаратно-программный комплекс, отличающийся возможностью контроля наличия НТЭ и его особенностей в объекте исследований.

5. Оригинальные результаты экспериментальных исследований КМОП СБИС, показывающие применимость усовершенствованных методик.

Апробация работы:

Основные результаты диссертации докладывались и получили положительную оценку на российских научных конференциях «Радиационная стойкость электронных систем» (г. Лыткарино, 2017 г., 2019-2021 гг.), Международной конференции по радиационным эффектам в компонентах и системах – The Conference on Radiation Effects on Components and Systems – RADECS (г. Монпелье, Франция, 2019 г.), Международной конференции по микроэлектронике – International Conference on Microelectronics – MIEL (г. Ниш, Сербия,

2021 г.), Международной сибирской конференции по измерениям и коммуникациям – International Siberian Conference on Control and Communication – SIBCON (г. Астана, 2017 г. и г. Казань, 2021 г.).

Публикации:

Основные результаты диссертации опубликованы в 21 работе, в том числе в 5 работах из перечня ВАК (в том числе 1 без соавторов), в 10 работах в базе данных Scopus (в том числе 2 статьи: Q2 и Q3, 8 тезисов докладов на конференциях).

Объем и структура диссертации:

Диссертация содержит 127 страниц, 69 рисунков, 6 таблиц, список сокращений, список литературы из 102 наименований и состоит из введения, четырех глав и заключения.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность работы, определена цель и задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту, а также обобщены краткие результаты анализа ранее выполненных работ по тематике.

1. МЕХАНИЗМЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СТЭ И НТЭ В КМОП СБИС

Тиристорный эффект в КМОП микросхемах возникает при включении паразитной р-n-p-n структуры. Она образуется из-за наличия паразитного рпр-транзистора, который сформирован р⁺-истоком – n-карманом – р-карманом, и паразитного прп-транзистора, который сформирован n⁺-истоком – р-карманом – n-карманом. При возникновении ионизационного тока тиристорная структура может перейти во включенное состояние из-за наличия цепи положительной обратной связи. Если напряжение удержания больше напряжения питания, стабильного ТЭ в схеме не наблюдается. Тем не менее, кратковременное включение тиристорной структуры приводит к протеканию многократно усиленного ионизационного тока, которое может приводить к отказам и сбоям, вызванным просадками напряжения. Из-за наличия у кристалла емкости первоначальный ток может быть существенно больше, однако по мере зарядки емкости напряжение на самой тиристорной структуре уменьшается. Если это напряжение оказывается меньше напряжения удержания, происходит срыв ТЭ.

С уменьшением проектных норм во избежание пробоя подзатворных диэлектриков транзисторов и снижения рассеиваемой мощности устройств разработчики микросхем вынуждены снижать напряжение питания внутренних элементов микросхем. Снижение напряжения питания приводит к тому, что оно становится сопоставимо или меньше напряжения удержания возможных паразитных тиристорных структур. По этой причине при экспериментальных исследованиях современных микросхем актуальной является задача контроля эффекта кратковременного включения тиристорной структуры.

Обычно в процессе экспериментальных исследований контроль наличия ТЭ осуществляется по показаниям измерителя тока с относительно низким

быстродействием (до 1000 измерений в секунду), встроенного в источник питания. Такие средства контроля тока имеют минимальную дискретизацию по времени порядка единиц мс. Специальные программные решения могут обеспечить быстродействие до 300 мкс ценой отсутствия усреднения и огрубления результатов измерений. В то же время типичные длительности импульсных реакций (рисунок 1) при развитии СТЭ и НТЭ СБИС, например, в статических оперативных запоминающих устройствах (СОЗУ) могут иметь длительности от сотен нс до десятков мкс. Таким образом, имеющиеся средства контроля ТЭ не могут обеспечить достоверный контроль наличия НТЭ.

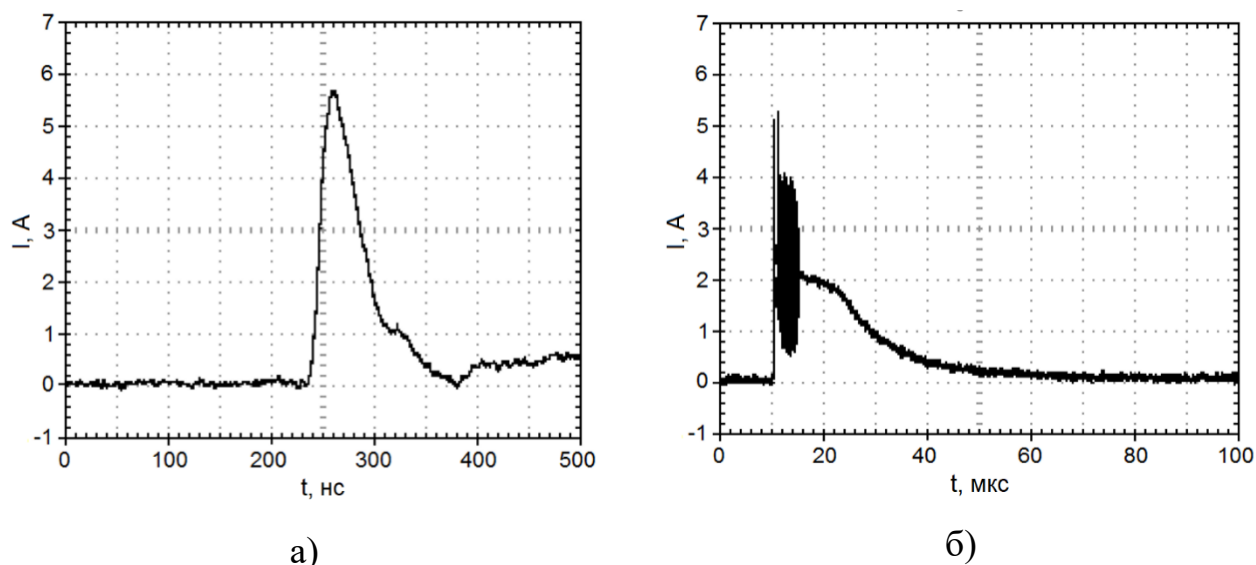


Рисунок 1 – Примеры импульсных реакций:
а) СТЭ в КМОП СОЗУ 180 нм; б) НТЭ в КМОП СОЗУ 90 нм

Классификация тиристорных эффектов

Для описания полученных экспериментальных результатов были изучены и систематизированы основные признаки тиристорных эффектов и предложена их следующая классификация.

По проявлению – данный признак отражает принадлежность не тиристорной структуры, а эффекта, возникающего в заданных условиях, то есть одна и та же тиристорная структура может проявлять себя в различных категориях в зависимости от условий и режима функционирования:

- стабильный – ТЭ, который устраняется только сбросом питания;
- нестабильный – ТЭ устраняется самопроизвольно без сброса питания.

При уровнях воздействия ниже тех, которые необходимы для включения тиристорной структуры, не происходит многократного усиления ионизационных токов тиристорной структурой. Нарушения функционирования в этом случае вызываются объемными ионизационными эффектами (переходными ионизационными реакциями), они проявляются как нарушения сохранности информации и кратковременной потери работоспособности.

Тиристорная структура при воздействии ИИИ в диапазоне набора параметров (как в диапазоне воздействий, так и в диапазоне напряжений питания) может проявлять себя следующим образом:

- пороговый ТЭ – *стабильный*, который ТЭ наблюдается при всех значениях параметра выше порогового;
- щелевой ТЭ – *стабильный*, который ТЭ наблюдается в одном или нескольких диапазонах значений параметра.

Среди НТЭ следует выделить **нестационарный** тиристорный эффект, который самопроизвольно сбрасывается за счет влияния собственных внутренних инерционных элементов. Нестационарный ТЭ отличается тем, что не может быть переведен в стабильное состояние изменением внешних условий, в том числе, изменением параметров оснастки.

Экспериментально установлено, что путем изменения характеристик воздействия нестабильный ТЭ может быть переведен в стабильное состояние. Например, при **неоднородном** импульсном воздействии на ограниченную область микросхемы (в случае СОЗУ – на часть массива памяти) может наблюдаться стабильный ТЭ, а при увеличении диаметра зоны облучения ТЭ самостоятельно сбрасывается. Аналогичного результата можно достичь при **неравномерном** воздействии на площадь кристалла ИС, например, при воздействии ЛИ со стороны приборного слоя через металлизацию. В обоих случаях ТЭ не наблюдается при равномерном распределении интенсивности (в том числе при воздействии импульса гамма-излучения). Таким образом, нестабильный при однородном облучении ТЭ может переходить в стабильное состояние при локализованном или неравномерном воздействии.

Таким образом, если в объекте исследований есть тиристорная структура, то в зависимости от условий функционирования и внешнего воздействия она потенциально может проявлять себя как стабильный ТЭ и как нестабильный ТЭ. Задачей при проведении экспериментальных исследований является, с одной стороны, адекватно определить стойкость микросхемы к эффектам отказов, а с другой – консервативно оценить область возникновения НТЭ по параметрам воздействия и функционирования.

2. ПРОЯВЛЕНИЕ НЕСТАБИЛЬНОГО ТИРИСТОРНОГО ЭФФЕКТА В КМОП СБИС ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЗЧ

Тиристорные эффекты при воздействии ТЗЧ являются одной из основных причин отказов РЭА космических аппаратов, поэтому при выборе КМОП ИС для применения в этой аппаратуре для них проводится оценка стойкости на ускорителях ионов или протонов либо на источниках сфокусированного ЛИ пикосекундной длительности. Стандартные процедуры оценки стойкости базируются на регистрации только стабильных ТЭ. Однако в КМОП ИС при воздействии ТЗЧ могут иметь место нестабильные ТЭ, как связанные с качеством оснастки, так и с внутренними особенностями объекта (нестационарные). При участии автора были проведено численное моделирование паразитных структур для выявления основных факторов, влияющих на условия возникновения НТЭ.

Результаты (рисунок 3) моделирования структуры, приведенной на рисунке 2 ($R1 = R2 = R3 = R4 = 50 \text{ Ом}$ и $C1 = C2 = C3 = C4 = 250 \text{ пФ}$), демонстрируют наличие стабильного ТЭ при интенсивности воздействия, большей $I \geq 2 \times I_0$ и отсутствие при меньшей (I_0 – нормированное значение воздействия).

При уменьшении постоянной времени RC-цепи (рисунок 3б), включение тиристорной структуры произойдет уже при интенсивности $I = 1,7 \times I_0$. Однако при увеличении постоянной времени внешней цепи (что достигается увеличением конденсаторов $C2$ и $C3$) нужен больший ток для открытия перехода эмиттер-база. Таким образом, паразитная р-п-р-п структура включится в случае, если ток не просто больше порогового значения, но и больше этого значения в течение периода времени, превосходящего постоянную времени RC-цепи.

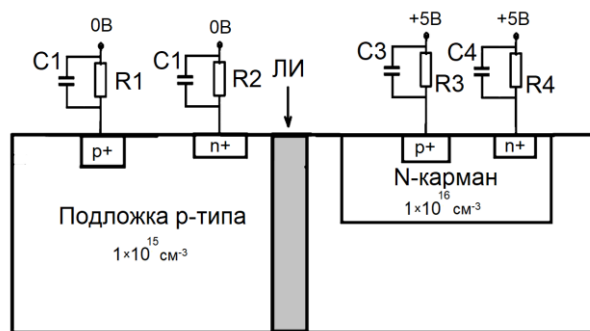
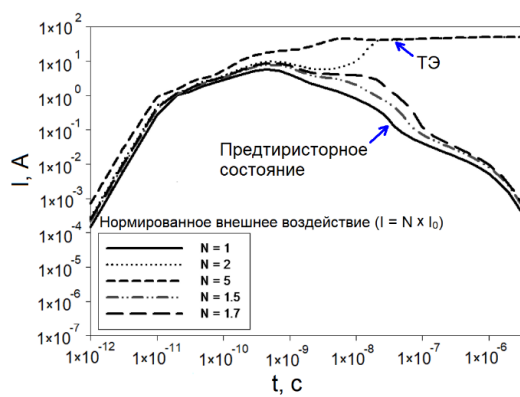
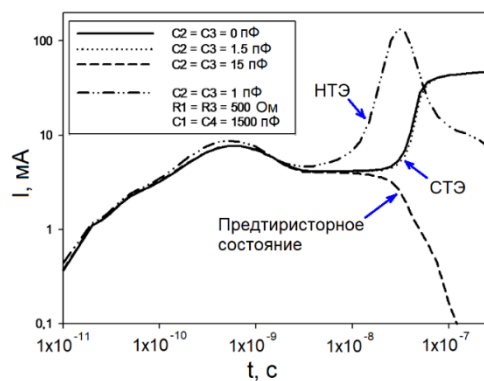


Рисунок 2 – Структура для 2D-моделирования



а)



б)

Рисунок 3 – Результаты моделирования тока цепи питания: а) для разной интенсивности воздействия; б) для разных внешних пассивных элементов

В первый момент после импульса ЛИ конденсаторы шунтируют резисторы, что позволяет тиристорной структуре включиться. Но по прошествии около 20 нс падение напряжения на резисторах снижает напряжение на структуре и ТЭ срывается.

На основе этих результатов автором была предложена доработанная схемотехническая модель НТЭ, которая учитывает емкостную реакцию всего кристалла (рисунок 4).

Учет НТЭ предлагается осуществить с помощью добавления в классическую двухтранзи-

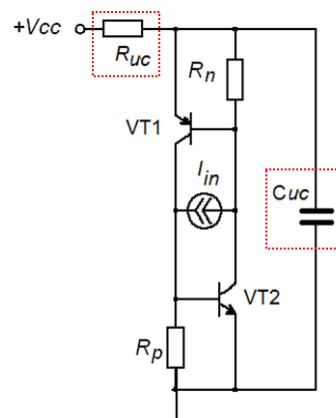


Рисунок 4 – Эквивалентная схема НТЭ

сторную схему резистора $R_{ис}$ и конденсатора $C_{ис}$. Резистор $R_{ис}$ отражает влияние сопротивления источника питания и эквивалентное значение внутреннего активного сопротивления самой СБИС. Конденсатор $C_{ис}$ отражает собственную емкость схемы. При протекании ионизационного тока или тока в динамическом режиме функционирования происходит перераспределение потенциалов на элементах этой эквивалентной схемы, что в конечном итоге, может привести к тому, что напряжение на $C_{ис}$ станет меньше напряжения удержания.

Влияние режима функционирования на проявление ТЭ в КМОП СБИС при воздействии ТЗЧ

Считается, что наиболее критичным режимом работы КМОП ИС для возникновения ТЭ при воздействии ТЗЧ является статический режим, в котором внутренние просадки напряжения, вызванные функционированием схемы, минимальны. Вместе с тем, для современных СБИС возможна ситуация, когда критичный режим будет иным из-за особенностей организации питания схемы.

Пример подобного поведения экспериментально был обнаружен в ходе исследований СОЗУ, в которой активный уровень сигналов выбора кристалла повышает чувствительность СОЗУ к воздействию ТЗЧ по СТЭ.

В большинстве случаев динамический режим является наименее критичным из-за внутренней просадки питания за счет увеличенного тока потребления. При этом часть паразитных структур, в которых в статическом режиме имел место СТЭ, в динамическом режиме переходили в нестабильное состояние. При исследовании микросхемы ПЛИС установлено, что чувствительность микросхемы по тиристорному эффекту в динамическом режиме с загруженной конфигурацией значительно ниже, чем в статическом режиме без загрузки конфигурации. Аналогично для другой микросхемы СОЗУ чувствительность микросхемы по эффекту стабильного ТЭ в режиме считывания более чем 20 раз ниже, чем в режиме хранения при одинаковой температуре корпуса микросхемы и напряжении питания.

Таким образом, в ходе исследований стойкости КМОП ИС к воздействию ТЗЧ следует предварительно анализировать возможность влияния управляющих сигналов и функционального режима на питание внутренних блоков. Исходя из полученных данных можно сделать вывод о необходимости контроля СТЭ и НТЭ в режиме активных управляющих сигналов, но при отсутствии внешнего тактирования или при минимально допустимой частоте функционирования устройства.

Кластеры сбоев как следствие НТЭ в СОЗУ при воздействии ТЗЧ

При воздействии ТЗЧ нестабильный ТЭ в СОЗУ может вызывать локальную просадку напряжения питания, которая приведет к появлению сбоев. В КМОП ОЗУ наблюдались события при неактивном состоянии сигнала *Chip Enable* (CE), заключающиеся в возникновении большого числа сбоев, и могли быть ошибочно интерпретированы как функциональные сбои (ФС). Более подробное исследование позволило установить, что они являются следствием

НТЭ: во-первых, наблюдалась зависимость сечения эффектов от температуры (рисунок 5), во-вторых, число сбившихся бит в кластере после его возникновения зависело только от локализации воздействия ЛИ, но не от энергии или диаметра пятна ЛИ. Вместе с тем, возникновение группы сбоя сопровождалось импульсом в цепи питания.

Распределение числа сбоя по кластерам демонстрирует отсутствие промежуточного числа сбоя между одиночными сбоями и кластерами, насчитывающими сотни сбоя. При активном сигнале СЕ в микросхеме наблюдались стабильные ТЭ в тех же точках, где ранее обнаружены кластеры сбоя. Зависимость пороговой энергии ТЭ и ОС от диаметра пятна ЛИ практически совпадает, что подтверждает тиристорную природу их происхождения.

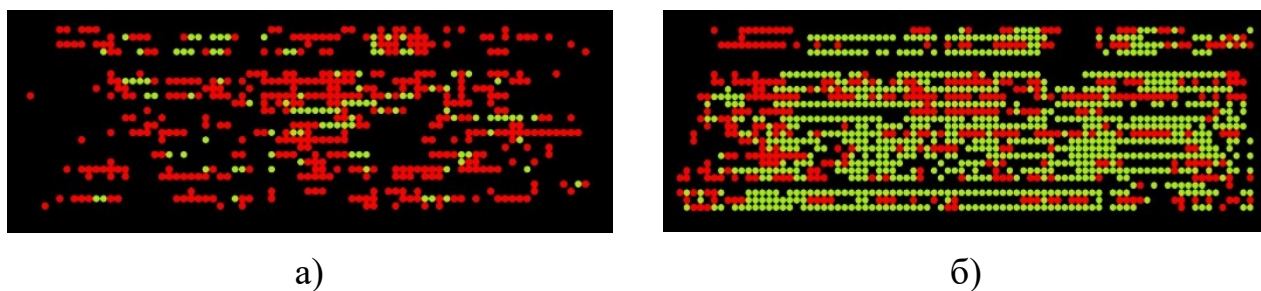


Рисунок 5 – Карта распределения эффектов: красные точки – одиночные сбоя, зеленые точки – кластеры от 300 до 500 сбоя: а) $T = (25 \pm 10)^\circ\text{C}$; б) $T = (85 \pm 5)^\circ\text{C}$

3. ПРОЯВЛЕНИЕ НЕСТАБИЛЬНОГО ТИРИСТОРНОГО ЭФФЕКТА В КМОП СБИС ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Наличие нестабильного тиристорного эффекта при воздействии ИИИ имеет место около границ области щелевого ТЭ, при котором стабильный ТЭ наблюдается в ограниченном сверху диапазоне интенсивностей воздействия. Основной причиной самопроизвольного сбоя ТЭ при воздействии однородного импульсного излучения является просадка напряжения питания ниже напряжения удержания ТЭ.

Вместе с тем влияние просадки питания может быть снижено за счет неоднородной генерации избыточного заряда, что в конечном итоге может перевести ТЭ из нестабильного состояния в стабильное. Например, при облучении однородным импульсным ЛИ микросхемы со стороны приборного слоя линии металлизации затеняют часть чувствительных областей, что вызывает сильные неоднородности в плотностях генерации носителей заряда и ионизационных токов. Автором получены результаты исследований 6 микросхем из 4 семейств, согласно которым в идентичных условиях функционирования, в том числе в идентичной оснастке, наблюдается СТЭ при воздействии однородного ЛИ со стороны приборного слоя и не наблюдается при воздействии со стороны подложки. В то же время на импульсном ускорителе электронов типа АРСА в режиме генерации тормозного гамма-излучения в аналогичных условиях не наблюдалось ТЭ как при воздействии со стороны приборного слоя, так и при

воздействии со стороны подложки. Таким образом, снижение величины суммарного ионизационного тока приводит к более низким внутренним падениям напряжения.

С одной стороны, это говорит о невозможности применения со стороны приборного слоя лазерных источников для современных СБИС, так как при облучении со стороны приборного слоя сам факт наличия эффекта определяется не реальными характеристиками воздействия, а недостатками процедуры исследований. С другой стороны, этот же механизм может быть использован в ряде случаев для перевода НТЭ в СТЭ.

Наблюдаемые факты можно проиллюстрировать результатами схемотехнического моделирования. Тиристорная структура представлена двухтранзисторной моделью, а просадка может быть вызвана ионизационными токами всего кристалла (переходы карман-подложка). Автором предложено дополнить обычную схемотехническую модель этим источником тока (один внешний источник тока, рисунок 6а) или одновременным включением множества параллельно включенных тиристорных структур (рисунок 6б). В втором случае СТЭ наблюдается начиная с некоторого значения ионизационного тока, но в случае, если активен только один источник тока, что соответствует неравномерному воздействию. В то же время при наличии импульса фототока в нескольких тиристорных структурах (равномерное воздействие) ТЭ не переходит в стабильное состояние.

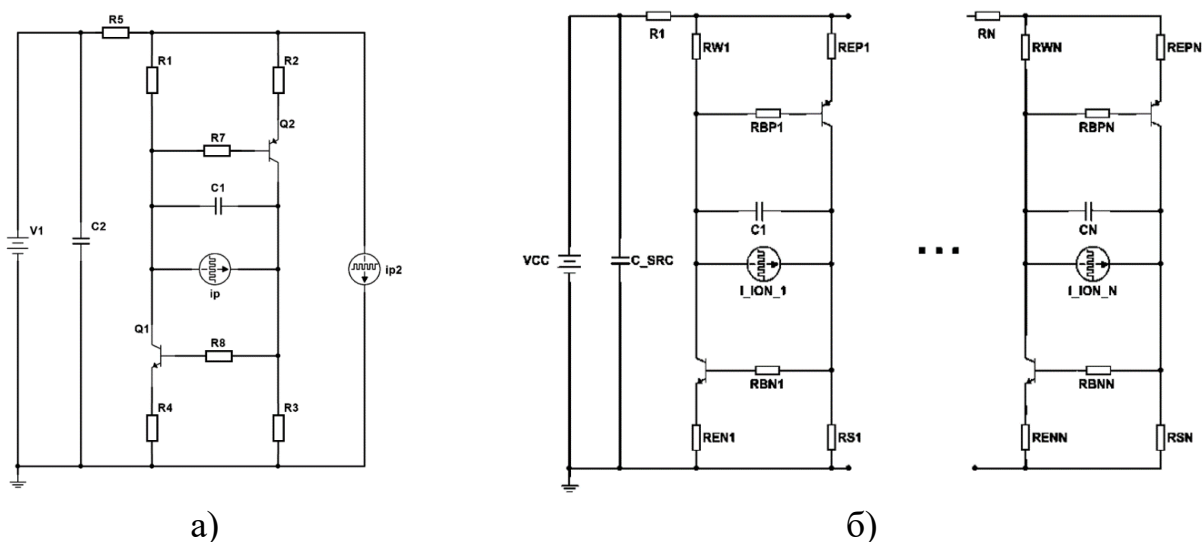


Рисунок 6 – схемотехнические модели нестабильного тиристора:

а) срыв ТЭ из-за тока в подложке; б) срыв ТЭ из-за одновременного включения множества структур

Пример расчета импульсной реакции приведен на рисунке 7. Результат моделирования демонстрирует зависимость, качественно совпадающую с экспериментальной (рисунок 1).

Примером, иллюстрирующим влияние просадки питания, может служить наблюдавшаяся в эксперименте ситуация, когда для двух микросхем СОЗУ, изготовленных по одной и той же технологии, но имеющих разную информационную емкость, и, соответственно, размеры кристалла, имела место ситуация наличия стабильного ТЭ со стороны приборного слоя для микросхемы с кристаллом меньшего размера и его отсутствия в микросхеме с кристаллом большего размера.

Из этого следует возможный способ контроля НТЭ при воздействии ИИИ, состоящий в том, чтобы перевести НТЭ в СТЭ в максимальном диапазоне условий функционирования и контролировать уже наличие СТЭ источником питания как необратимое возрастание тока потребления. Такой способ может быть реализован через ТЭ, вызванный неравномерным воздействием ЛИ со стороны приборного слоя или неоднородным (локализованным) воздействием со стороны подложки при облучении только части кристалла при помощи диафрагмы.

Рассмотренная выше схемотехническая модель может быть без потери достоверности заменена поведенческой моделью, в которой тиристорная структура вместо двухтранзисторной схемы представлена упрощенной моделью тиристора, представляющей собой RS-триггер и управляемый ключ. При достижении напряжением на затворе структуры порогового значения, ключ замыкается и остается в замкнутом состоянии до тех пор, пока ток через структуру не становится меньше тока удержания.

Влияние нестабильного ТЭ на сбоеустойчивость при воздействии ИИИ

Как и в случае воздействия ТЗЧ при воздействии ИИИ НТЭ может приводить к сбоям. Меньший уровень сохранности информации при большем напряжении питания наблюдается для нескольких микросхем и указывает на необходимость контролировать сохранность информации при ИИИ не только при минимально допустимом напряжении питания, но и при напряжении, соответствующем верхней границе диапазона напряжений питания, являющимся критичным для ТЭ.

В случае нестабильного ТЭ можно ожидать его проявления в виде «окон сбоев» по аналогии с «окнами ТЭ», то есть наблюдения не связанных между собой диапазонов интенсивности воздействия, в которых наблюдаются сбои. Данное предположение подтверждается экспериментально, в частности в микросхеме СОЗУ область нарушения сохранности не сплошная, а имеет промежуток, в котором сбоев не наблюдается (рисунок 8а). Промежуток отсутствия сбоев совпадает с областью, в которой в другом функциональном режиме уменьшается импульсная реакция, то есть не наблюдается нестабильного ТЭ (рисунок 8б).

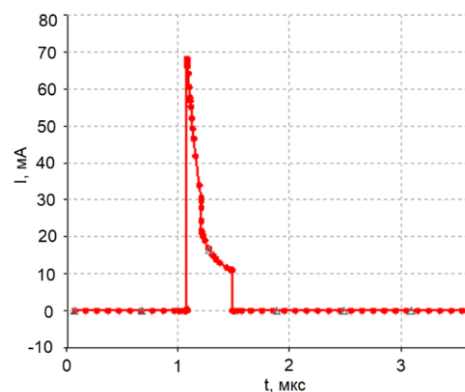


Рисунок 7 – результат схемотехнического моделирования нестабильного ТЭ

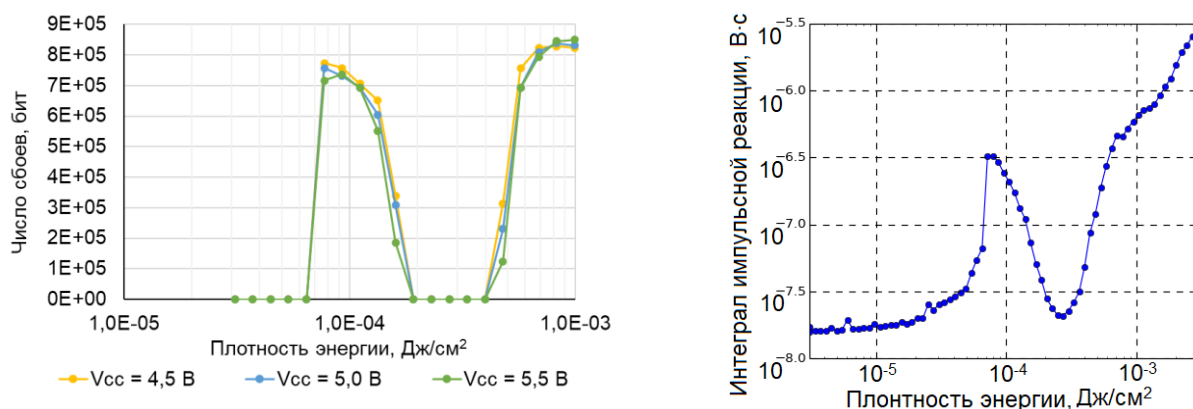


Рисунок 8 – а) Зависимости числа сбоев от плотности энергии б) – Зависимость интеграла импульсной реакции от плотности энергии

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ МИКРОСХЕМ К НЕСТАБИЛЬНОМУ ТИРИСТОРНОМУ ЭФФЕКТУ В КМОП СБИС

На основании проведенных расчетно-экспериментальных исследований в рамках диссертации предложены методические и технические средства оценки стойкости КМОП СБИС с учетом возможности возникновения НТЭ. Экспериментальные результаты демонстрируют, что важным источником информации о протекании переходных процессов, связанных с частичным или полным включением тиристорной структуры в объекте исследований, является импульсная реакция микросхемы в цепи питания.

В качестве основного параметра для анализа импульсной реакции предлагается использовать длительность импульсной реакции или ее интеграл. В случае длительности импульса рекомендуется определять ее по пересечению границы, составляющей 5-10 значений среднеквадратичного отклонения от среднего уровня до начала импульса.

Методика контроля наличия НТЭ в КМОП СБИС при воздействии ТЗЧ

В случае проявления НТЭ при воздействии ТЗЧ затруднен контроль импульсной реакции по причине ее малой величины, особенно при проведении испытаний с использованием ускорителей ионов, где имеют сильное влияние помехи и наводки, невозможна локализация места возникновения ТЭ, а стоимость проведения испытаний высокая. Кроме того, при облучении на ускорителе ионов нет возможности итеративных изменения и доработки оснастки в процессе исследований и проведения повторного облучения. Таким образом, наиболее подходящим способом контроля НТЭ при воздействии ТЗЧ является его перевод в стабильное состояние и контроль как обычного стабильного ТЭ. Это достигается за счет выполнения сделанных рекомендаций при разработке оснастки и правильным выбором режима функционирования в процессе исследований.

Предлагается следующий алгоритм контроля экспериментальных исследований КМОП СБИС при воздействии ТЗЧ с учетом возможности наличия НТЭ:

1. Контроль всех отдельных радиационных эффектов (ОРЭ): ОС, КО и стабильных ТЭ при помощи источника тока в условиях функционирования контроля сбоев (минимальные напряжения питания, динамический режим функционирования, нормальные климатические условия) при воздействии ТЗЧ.

2. Контроль всех ОРЭ в условиях функционирования, критичных для контроля ТЭ (максимальное напряжение питания, активный статический режим функционирования, максимальная температура) при воздействии ТЗЧ. В обоих условиях при технической возможности проводится контроль импульсных реакций в цепи питания.

3. Определение наличия признаков НТЭ по результатам контроля сбоев (таблица 1) и путем сравнения результатов контроля стабильных ТЭ в двух режимах. Отличия сечения стабильных ТЭ в двух режимах может говорить о том, что либо напряжение удержания ТЭ лежит в пределах диапазона напряжений питания, либо о том, что стабильный ТЭ сильно чувствителен к изменению внешних условий.

Таблица 1 – Критерии наличия НТЭ в микросхеме при воздействии ТЗЧ на основе информации о числе и характере сбоев

Признак	Есть НТЭ	Нет НТЭ («обычные» сбои)
Число сбоев в результате однократного воздействия ТЗЧ	10-1000	1-10
Зависимость числа сбоев от ЛПЭ при воздействии ТЗЧ	Пороговый характер (0→1→500)	Монотонное возрастание
Распределение числа ошибок в группе сбоев по событиям: непрерывность	Есть промежутки	Нет промежутков
Максимум распределения числа ошибок в группе при увеличении напряжения питания	Максимум сдвигается в сторону увеличения	Максимум сдвигается в сторону уменьшения
Зависимость от температуры	Увеличение числа событий и снижение пороговой энергии	Слабая или отсутствует
Зависимость от напряжения питания	Увеличение числа событий при увеличении напряжения питания	Снижение числа событий при увеличении напряжении питания

4. В случае наличия признаков НТЭ требуются дополнительные исследования с использованием источников сфокусированного лазерного излучения, в ходе которых по резкому изменению импульсной реакции определяется порог возникновения НТЭ, а также исследуется характер проявления ОС с целью раз-

делить сбои, возникающие вследствие проявления НТЭ и сбои, являющиеся переключением ячеек в результате непосредственно воздействия.

5. При отсутствии возможности контроля признаков НТЭ (отсутствие данных по сбоям или отсутствие результатов контроля параметров в двух режимах) также требуется проведение дополнительных исследований.

6. При отсутствии признаков НТЭ по результатам исследований при воздействии ТЗЧ дополнительных исследований не требуется и можно сделать вывод об отсутствии НТЭ.

Методика контроля наличия НТЭ в КМОП СБИС при воздействии ИИИ

Практика экспериментальных исследований показывает, что чаще НТЭ проявляется при воздействии ИИИ, что связано с большими просадками питания вследствие протекания больших ионизационных токов по сравнению с воздействием ТЗЧ.

Важным источником информации при исследовании наличия СТЭ и НТЭ в КМОП СБИС при воздействии ИИИ являются результаты исследований при воздействии ТЗЧ (при их наличии), которое представляет собой случай предельно неоднородного воздействия. Обнаружение в объекте исследований стабильного ТЭ при воздействии ТЗЧ говорит о том, что ожидается его проявление и при однородном воздействии. В случае отсутствия стабильного ТЭ при однородном воздействии можно предположить, что он проявляется как нестабильный ТЭ.

Признаки НТЭ по сбоям при воздействии ИИИ приведены в таблице 2. В пользу наличия НТЭ в схеме может говорить, во-первых, пороговая зависимость сбоев от интенсивности воздействия, когда при повышении интенсивности по сравнению с уровнем бессбойной работы наблюдается потеря информации сразу в относительно большой области адресного пространства накопителя. Во-вторых, что уровень сбоеустойчивости при большем напряжении питания меньше. В классическом варианте порог возникновения сбоев уменьшается при снижении напряжения питания.

Таблица 2 – Основные отличия поведения микросхем при наличии и отсутствии НТЭ

Признак	Наличие НТЭ	Отсутствие НТЭ
Многократные сбои	Пороговый характер	Монотонное возрастание
Уровень сбоеустойчивости	Ниже при повышенном напряжении	Ниже при пониженном напряжении
Импульсная реакция	Имеет излом и/или скачок или резкое увеличение длительности	Монотонный характер
Поведение при неравномерном и неоднородном облучении	Появление СТЭ	Отсутствие СТЭ

С учетом вышеизложенного, предложен следующий порядок проведения экспериментальных исследований стойкости при воздействии ИИИ для контроля наличия НТЭ:

1. Анализ результатов исследований при воздействии ТЗЧ (при их наличии). Наличие ТЭ при воздействии ТЗЧ и его отсутствие при воздействии ИИИ говорит о проявлении НТЭ.

2. Предварительный контроль наличия стабильного ТЭ при воздействии ИИИ (в широком диапазоне интенсивностей с шагом не более 50% с учетом возможности щелевого стабильного ТЭ).

3. При отсутствии СТЭ или признаков НТЭ справочно проводится контроль импульсной реакции для определения амплитуды ионизационных токов.

4. При наличии СТЭ или признаков НТЭ при одном из видов воздействия проводится доработка испытательной оснастки для обнаружения стабильного ТЭ при воздействии ИИИ в случае его отсутствия или для возможного расширения диапазона его наблюдения.

5. Проводится тщательный контроль импульсной реакции для определения по ее артефактам области возникновения НТЭ.

6. В случае, если есть признаки НТЭ, но отсутствуют изломы на зависимостях параметров импульсной реакции от интенсивности воздействия, следует предпринять попытки перевести нестабильный ТЭ в стабильное состояние при помощи неоднородного воздействия.

7. Определение уровней возникновения ТЭ/КО и уровня бессбойной работы в объекте исследований в доработанной (при необходимости) испытательной оснастке.

Основные рекомендации к порядку экспериментальных исследований стойкости при воздействии ТЗЧ и ИИИ:

1. Измерительная оснастка должна включать конденсаторы широкого диапазона номиналов, в том числе конденсаторы емкостью не менее 100 мкФ.

2. В объектах, в которых наблюдается НТЭ, проводить контроль сбоев при повышенном напряжении питания и/или температуре для выявления сбоев, являющихся следствием НТЭ.

При экспериментальных исследованиях на ТЗЧ следует уделять внимание зависимости сечения сбоев от ЛПЭ. Резкое изменение сечения может свидетельствовать о том, что в микросхеме был нестационарный ТЭ.

Апробация методики и экспериментальные результаты

Апробация методики проведена для ряда СОЗУ, так как массив памяти является регулярной и масштабируемой структурой, в которой вероятно проявление НТЭ, вызванного просадкой питания, при воздействии ИИИ.

Пример результатов, полученных в ходе экспериментальных исследований микросхемы СОЗУ, приведен на рисунке 9. Резкое изменение формы осциллограммы свидетельствует о проявлении нестабильного ТЭ, что количественно выражается в скачкообразном изменении зависимости длительности от интен-

сивности воздействия. Значение интенсивности, при котором наблюдается изменение длительности, соответствует значению, при котором наблюдается стабильный ТЭ при неоднородном воздействии.

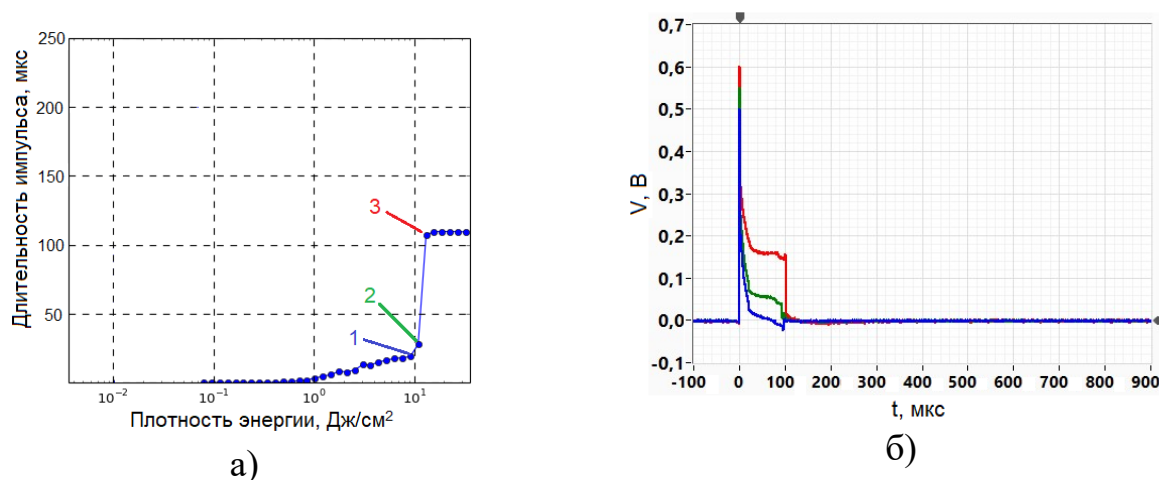


Рисунок 9 – Результаты экспериментальных исследований микросхемы СОЗУ:
а) зависимость интеграла импульсной реакции от интенсивности воздействия;
б) осциллограммы импульсных реакций при разных значениях интенсивности воздействия

Одним из факторов, ограничивающих возможность формирования заключений на основе предложенных рекомендаций, является наличие в микросхеме наличия вторичного источника питания, при этом могут наблюдаться зависимости, аналогичные приведенным выше, в отсутствие ТЭ, а также признаки НТЭ по сбоям (таблица 2). Присутствие вторичного источника питания в исследуемом объекте требует проведения дополнительных исследований с применением источника сфокусированного ЛИ.

Также с использованием предложенной методики невозможно обнаружить резкое изменение на зависимостях импульсной реакции в случае, если амплитуды фототоков сопоставимы с амплитудами токов в предтиристорном состоянии, то есть в случае, если основной вклад в ионизационный ток вносит первичный фототок. Это можно проверить, получив зависимость импульсной реакции при отключенном питании. Если снижение номинала резистора не позволяет добиться импульсной реакции ниже напряжения отпираания р-п перехода (300 мВ, то методика неприменима. В рассмотренном случае для оценки области возникновения НТЭ может применяться метод перевода НТЭ в СТЭ при помощи неоднородного воздействия.

Аппаратно-программный комплекс для регистрации НТЭ

В ходе работы над диссертацией был разработан аппаратно-программный комплекс, который обеспечивает проведение исследований СТЭ и НТЭ КМОП микросхем при воздействии ИИИ с использованием установок АРСА, «РАДОН-8» и «РАДОН-17», а также на ускорителе ионов «У-400» (ЛЯР ОИЯИ) и источниках сфокусированного лазерного излучения «ПИКО-3» и

«РАДОН-17». Наиболее эффективным он оказался при использовании именно источников ЛИ.

В состав разработанного комплекса вошли:

- шасси и набор модульных приборов National Instruments, обеспечивающий оперативное проведение функционального и параметрического контроля;
- автоматизированная система установки диафрагмы диаметром от 10 мкм до 4 мм вдоль оси пучка ЛИ между источником ЛИ и объектом исследований для обеспечения возможности неоднородного облучения;
- система позиционирования объекта исследований на источнике однородного ЛИ, позволяющая также в автоматическом режиме контролировать неравномерность воздействия;
- контактная система задания температуры, с программным управлением.

Программная часть разработанного аппаратно-программного комплекса характеризуется модульностью, высоким быстродействием и простотой адаптации для проведения функционального и параметрического контроля впервые исследуемых микросхем. Программная часть построена на основе принципов объектно-ориентированного программирования.

Аппаратно-программный комплекс позволяет проводить исследования ТЭ и сохранности информации в диапазоне параметров, таких как интенсивность воздействия, напряжение питания, ограничение тока потребления источником питания и температура. Порядок изменения параметров и шаг изменения определяет пользователь, вложенность изменяемых параметром может быть до 3. Для повышения точности контроля импульсной реакции получаемая осциллограмма усредняется по не менее, чем 10 измерениям. Основные параметры импульса, такие как амплитуда, длительность, интеграл и т.д., сохраняются в табличном виде, как и сама осциллограмма для возможной дальнейшей обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом диссертации является решение актуальной научно-технической задачи по развитию методов и средств исследований нестабильных тиристорных эффектов в КМОП СБИС при воздействии ИИИ и ТЗЧ космического пространства.

Основные научные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Выявлены основные механизмы проявления НТЭ в КМОП СБИС, изучены и систематизированы условия функционирования микросхем, влияющие на проявление ТЭ и НТЭ, для обеспечения корректного выбора критичного режима при экспериментальных исследованиях. Проанализированы существующие методические и технические средства исследований ТЭ в КМОП СБИС.

2. Впервые системно экспериментально исследована возможность влияния на проявление ТЭ режима работы, неоднородности воздействия ЛИ, вызванной металлизацией и локализацией воздействия.

3. Впервые получены экспериментальные результаты и описана взаимосвязь НТЭ и проявления многократных сбоев при воздействии ТЗЧ и «окон сбоев» при воздействии ИИИ.

4. Предложены и обоснованы схемотехническая и поведенческая модели тиристорной структуры, отличающиеся от существующих возможностью описания эффекта НТЭ и позволяющие получить качественные зависимости тока, характерные для КМОП микросхем при наличии в них нестабильного ТЭ, для задач схемотехнического моделирования.

Основные **практические результаты** диссертации заключаются в следующем:

1. Предложены методики экспериментальных исследований для определения стойкости по НТЭ к воздействию ТЗЧ и ИИИ, отличающиеся анализом импульсной реакции.

2. Разработан аппаратно-программный комплекс, позволяющий регистрировать эффекты НТЭ в процессе экспериментальных исследований. Аппаратно-программный комплекс обеспечивает проведение исследований стойкости микросхем использованием различных установок: АРСА, «РАДОН-8», «РАДОН-17», «ПИКО-3» (АО «ЭНПО СПЭЛС» и НИЯУ МИФИ) и «У-400» (ЛЯР ОИЯИ).

3. Проведен комплекс уникальных экспериментальных исследований на современных КМОП микросхемах по выявлению влияния характеристик полей облучения, режимов работы и оснастки на условия возникновения НТЭ. Получены оригинальные результаты экспериментальных исследований НТЭ и СТЭ для множества типов как отечественных, так и иностранных микросхем. Результаты работы вошли в отчетные материалы по многочисленным НИР и составным частям ОКР («Информация-РС», «Информация-РС-2», «Преобразователь-И20-СВВ», «Процессор-ИЗ-МИФИ», «Процессор-И6-СВВ», «Схема-И8-1-СВВ», «Лазер»), выполненных по заказам Минпромторга России и предприятий промышленного и оборонного комплекса.

4. Результаты диссертации внедрены в АО «ЭНПО СПЭЛС» и АО «Микрон» в рамках процедуры радиационных испытаний микросхем на стойкость к ТЭ при воздействии импульсного ионизирующего излучения и ТЗЧ.

Таким образом, в ходе работы над диссертацией **решены все поставленные задачи и достигнута ее цель**, а именно проведено совершенствование методов и средств оценки радиационной стойкости КМОП СБИС к воздействию ИИИ и ТЗЧ космического пространства при наличии нестабильных тиристорных эффектов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Швецов-Шиловский И.И. Особенности проявления и регистрации тиристорного эффекта в КМОП СБИС при воздействии однородного импульсного лазерного излучения // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2021. № 4. С. 176-181.

2. Механизмы возникновения нестабильных тиристорных эффектов в КМОП ИС / А.И. Чумаков, Д.В. Бобровский, А.А. Печенкин, Д.В. Савченков,

Г.С. Сорокоумов, И.И. Швецов-Шиловский. // Микроэлектроника. 2019. Т. 48. № 4. С. 295-299.

3. Прогнозный анализ доминирующих механизмов отказов, типовых и предельных уровней радиационной стойкости перспективной нанометровой КМОП ЭКБ микроэлектроники / А.Ю. Никифоров, В.А. Телец, Д.В. Бойченко, А.А. Смолин, А.В. Уланова, И.И. Швецов-Шиловский, А.В. Согоян, В.В. Елесин // Наноиндустрия. 2020. Т. 13. № S4 (99). С. 256-258.

4. Чепов В.А., Швецов-Шиловский И.И., Шмаков С.Б. Алгоритм соотнесения физической и логической адресаций в микросхемах памяти с помощью источников лазерного излучения // Безопасность информационных технологий. 2020. Т. 27. № 3. С. 43–53.

5. Гвоздев Р.И., Швецов-Шиловский И.И., Шмаков С.Б. Адаптированная методика контроля функциональных сбоя в NOR flash-памяти при испытаниях на стойкость к воздействию тяжёлых заряженных частиц // Безопасность информационных технологий. 2020. Т. 27. № 3. С. 66–75.

Публикации в изданиях, входящих в базу Scopus:

6. Nonstable Latchups in CMOS ICs Under Pulsed Laser Irradiation / I.I. Shvetsov-Shilovskiy, A.I. Chumakov, A.A. Pechenkin, D.V. Bobrovsky // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2020. Vol. 67. № 7. P. 1540-1546.

7. Mechanisms of Initiation of Unstable Latchup Effects in CMOS ICs / A.I. Chumakov, D.V. Bobrovsky, A.A. Pechenkin, D.V. Savchenkov, G.S. Sorokoumov I.I. Shvetsov-Shilovskiy // Russian Microelectronics. 2019. Vol. 48. № 4. P. 250-254.

8. The Effects of the External Conditions of CMOS IC Functioning on Latchup Occurrence under Uniform Laser Irradiation / I.I. Shvetsov-Shilovskiy, A.I. Chumakov, A.A. Pechenkin, D.V. Bobrovskiy. // 2021 IEEE 32nd International Conference on Microelectronics (MIEL). 2021. P. 375-377.

9. Shvetsov-Shilovskiy I.I. Features of the Software Component of the Memory Test Setup Based on the Object-Oriented Approach in LabVIEW Development Environment [Электронный ресурс] // 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2021. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9438930> (дата обращения 05.05.2022).

10. Measurement system for test memory cells based on Keysight B1500A semiconductor device analyzer running LabVIEW software / I.I. Shvetsov-Shilovskiy, A.B. Boruzdina, A.V. Ulanova, A.A. Orlov, K.M. Amburkin, A.Y. Nikiforov [Электронный ресурс] // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2017. URL: <http://ieee.tpu.ru/proceedings/papers/3kn260.pdf> (дата обращения 05.05.2022).

11. FRAM test memory cells radiation hardness research / I.I. Shvetsov-Shilovskiy, A.B. Boruzdina, A.V. Ulanova, O.M. Orlov, Y.A. Matveev, D.V. Negrov. // 2017 IEEE 30th International Conference on Microelectronics (MIEL). 2017. P. 255-257.

12. TID Impact on SEL Sensitivity in the Case of High Latchup Holding Voltage / A.A. Novikov, I.I. Shvetsov-Shilovskiy, E.N. Oblova, A.A. Pechenkin, A.I. Chumakov // 2021 IEEE 32nd International Conference on Microelectronics (MIEL). 2021. P. 371-373.

13. SEL and cell failures in MRAM under ion and focused laser irradiation / A.A. Pechenkin, A.B. Boruzdina, A.V. Yanenko, D.E. Protasov, I.I. Shvetsov-Shilovskiy, A.A. Sangalov [Электронный ресурс] // 2017 17th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). 2017. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8696211> (дата обращения 05.05.2022).

14. Testing System for Analog Devices Direct Digital Synthesizer / I. Loskutov, I. Shvetsov-Shilovskiy, D. Boychenko [Электронный ресурс] // MATEC Web of Conferences. 2016. URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2016/42/mateconf_imet2016_01015.pdf (дата обращения 05.05.2022).

15. SEFI cross-section evaluation by fault injection software approach and hardware detection / I.O. Loskutov, P.V. Nekrasov, I.I. Shvetsov-Shilovskiy, D.V. Boychenko, V.M. Uzhegov // 2017 IEEE 30th International Conference on Microelectronics (MIEL). 2017. P. 251-254.

Статьи и материалы конференций:

16. Швецов-Шиловский И.И. Нестабильные тиристорные эффекты в КМОП ИС при воздействии импульсного лазерного излучения / И.И. Швецов-Шиловский, А.И. Чумаков, А.А. Печенкин, Д.В. Бобровский // Тезисы докладов 22-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» – «Стойкость – 2019»: научно-технический сборник. 2019. С. 189-190.

17. Швецов-Шиловский И.И. Факторы, оказывающие влияние на развитие тиристорного эффекта при воздействии однородного импульсного лазерного излучения / И.И. Швецов-Шиловский, А.И. Чумаков, А.А. Печенкин, Д.В. Бобровский // Тезисы докладов 24-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» – «Стойкость – 2021»: научно-технический сборник. 2021. С. 145-146.

18. Швецов-Шиловский И.И. Исследование радиационной стойкости тестовых ячеек памяти FRAM отечественной разработки / И.И. Швецов-Шиловский, А.Б. Боруздина, В.А. Вавилов, Д.Д. Воронов, Е.В. Кондратюк, Ю.А. Матвеев, Д.В. Негров, А.Ю. Никифоров, О.М. Орлов, А.В. Уланова // Тезисы докладов 20-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» – «Стойкость – 2017»: научно-технический сборник. 2017. С. 222-223.

19. Чепов В.А. Визуализация координат сбойных ячеек памяти в микросхемах СОЗУ после воздействия ионизационного излучения / В.А. Чепов, С.Б. Шмаков, И.И. Швецов-Шиловский // Тезисы докладов 23-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» – «Стойкость – 2020»: научно-технический сборник. 2020. С. 136-137.

20. Новикова М.М. Различие чувствительности к воздействию ТЗЧ по ТЭ в СОЗУ в зависимости от режима работы / М.М. Новикова, А.А. Новиков, И.И. Швецов-Шиловский, А.А. Печенкин, А.Б. Боруздина // Тезисы докладов 22-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» – «Стойкость – 2019»: научно-технический сборник. 2019. С. 223-224.

21. Грачёва А.А. Сопоставление радиационной стойкости многокристального модуля памяти и отдельного кристалла из его состава / А.А. Грачева, И.И. Швецов-Шиловский, С.Б. Шмаков, А.Г. Петров // Тезисы докладов 22-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» – «Стойкость – 2020»: научно-технический сборник. 2020. С. 140-141.