

ЧУКОВ ГЕОРГИЙ ВИКТОРОВИЧ

**НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ И АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ  
СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ  
ИЗДЕЛИЙ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ СВЧ ЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ  
ВОЗДЕЙСТВИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем  
управления

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Автор:



Москва – 2013 г.

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

- Научный руководитель: Кандидат технических наук, доцент  
Елесин Вадим Владимирович
- Научный консультант: Доктор технических наук, профессор,  
Громов Дмитрий Викторович
- Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор  
Национального исследовательского университета  
«Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»  
Оболенский Сергей Владимирович  
Кандидат технических наук,  
начальник Центра проектирования ФГУП «НПП  
«Пульсар»  
Савченко Евгений Матвеевич
- Ведущая организация: Институт СВЧ полупроводниковой электроники  
РАН

Защита состоится 17 июня 2013 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д212.130.02 в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу: 115409 Москва, Каширское шоссе, 31, тел. (499) 324-84-98, (499) 323-91-76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.  
Автореферат разослан 17 мая 2013 г.

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

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д. т. н., профессор



П.К. Скоробогатов

## **Введение. Общая характеристика работы**

Диссертация направлена на решение важной научно-технической задачи разработки и развития научно-методических, аппаратных и программных средств контроля работоспособности современных и перспективных изделий твердотельной СВЧ электроники (ТСВЧЭ), функционирующих при воздействии ионизирующих излучений в составе электронных устройств и систем управления, связи, локации и навигации военных, космических и ядерных комплексов, что позволяет улучшить их технико-экономические и эксплуатационные характеристики.

### **Актуальность диссертации**

Работы в области создания радиационно-стойкой электронной компонентой базы (ЭКБ) микроэлектроники и ТСВЧЭ на протяжении многих лет проводятся в России и за рубежом. Создание перспективных изделий ТСВЧЭ, особенно в радиационно-стойком исполнении, отнесено к приоритетным и критически важным направлениям развития электронной техники, обеспечивающим технологическую независимость от иностранных государств.

В настоящее время интенсивно ведется разработка изделий ТСВЧЭ, в том числе полупроводниковых приборов, интегральных схем и электронных модулей для аппаратуры специального назначения. Тенденция развития этого направления связана с совершенствованием технологий нано- и микроэлектроники, использованием новых полупроводниковых структур и элементов на их основе, функциональным усложнением разрабатываемых изделий до уровня «система на кристалле» (СнК), «система в корпусе» (СвК), сочетающих в своем составе СВЧ приемопередающие тракты, тракты промежуточной частоты и функциональные блоки цифровой обработки и управления.

С одной стороны, функциональное усложнение современных изделий ТСВЧЭ приводит к увеличению совокупной сложности системы информативных параметров изделий и предъявляет новые требования к методам и средствам контроля их работоспособности. С другой стороны, использование для реализации изделий новых типов структур и полупроводниковых элементов (наногетероструктурных транзисторов на соединениях  $A_3B_5$ , субмикронных МОП транзисторов на структурах кремний-на-изоляторе (КНИ), кремний-германиевых (SiGe) БиКМОП элементов и других) сопровождается проявлением новых радиационных эффектов, что определяет специфику выбора и развития эффективных методов контроля работоспособности изделий ТСВЧЭ в условиях их эксплуатации в радиационных полях.

Методические и технические трудности измерения и контроля информативных параметров изделий ТСВЧЭ в процессе и после радиационных воздействий, необходимость создания и использования специализированного контрольно-измерительного и испытательного оборудования, коаксиальных

и волноводных измерительных трактов, специализированной СВЧ измерительной оснастки в процессе дистанционных измерений параметров и в условиях высоких уровней помех испытательных установок (ИУ) привели к тому, что в течение последних двадцати лет большинство радиационных испытаний изделий ТСВЧЭ практически не учитывали их специфику, а контроль работоспособности при испытаниях по сути сводился к измерению значений простейшего набора параметров, общих для большинства классов низкочастотных налоговых ЭРИ, таких как, например, ток потребления. Между тем, применительно к современным и перспективным изделиям ТСВЧЭ, эти параметры малоинформативны и, зачастую, вообще не являются критериальными, что приводит к недостоверной оценке уровня радиационной стойкости.

Поэтому представленная диссертация, посвященная разработке научно обоснованной методологии и инструментария для измерения информативных параметров и в целом контроля работоспособности изделий ТСВЧЭ при воздействии радиационных факторов, является актуальной.

### **Состояние исследований по проблеме**

Методы и средства радиационных испытаний кремниевых цифровых и аналоговых интегральных схем были развиты в работах д.т.н. Улимова В.Н., к.т.н. Фигурова (ФГУП «НИИП»), д.т.н. Скоробогатова П.К., д.т.н. Никифорова А.Ю., д.т.н. Чумакова А.И. (НИЯУ МИФИ), Вологодина Э.Н. (ФГУП «НПП «Пульсар»).

Расчетно-экспериментальному исследованию радиационной стойкости арсенид-галлиевых (GaAs) изделий посвящены научные работы д.т.н. Громова Д.В. (НИЯУ МИФИ) и Оболенского С.В. (НГУ им. Лобачевского) в части дискретных приборов и аналоговых СВЧ ИС, к.т.н. Елесина В.В. (НИЯУ МИФИ) в части цифровых ИС, но объектами их исследований были приборы «предыдущего» поколения.

Отдельные вопросы развития методических и технических средств измерения и контроля специфических параметров изделий ТСВЧЭ в процессе радиационного эксперимента рассмотрены в публикациях д.т.н. Мальцева П.П. (ИСВЧПЭ РАН), к.т.н. Щербакова С.В., Петрова А.И., Полевича С.А. (ФГУП «НПП «Исток»), однако данные работы были направлены на решение других задач.

За рубежом помимо монографии Chaffin R., вышедшей в конце прошлого столетия, по рассматриваемой проблеме следует отметить работы Anderson W., McMorrow D., Knudson A. R., Zuleeg R., Flesner L.D., Papaioannou G.J., Cressler J.D. и др. Представленные результаты также относятся к конкретным темам проводимых исследований и не решают общей задачи создания методического обеспечения контроля работоспособности изделий ТСВЧЭ.

В тоже время многие научно-методические вопросы достоверного измерения и контроля параметров изделий ТСВЧЭ в процессе радиационного эксперимента до сих пор проработаны недостаточно. Не обоснован рациональный набор контролируемых информативных параметров в привязке к функциональному назначению и технологии изготовления. Имеющиеся методики измерения СВЧ параметров не учитывают особенностей радиационного эксперимента, а имеющиеся измерительные оснастки не пригодны к использованию в условиях высокого уровня помех при радиационных испытаниях. Разработанные программные средства автоматизации измерений и обработки экспериментальных данных не адаптированы к условиям радиационных испытаний и не позволяют проводить управление режимом работы испытательных установок.

В указанных работах исследования влияния ионизирующих излучений проводились в основном для СВЧ приборов и ИС, выполненных по технологиям прошлого века на основе GaAs. В последнее десятилетие наблюдалось бурное развитие в области разработки новых изделий ТСВЧЭ на основе как совершенствования уже известных полупроводниковых технологий, так и внедрения новых структур для СВЧ-применений (гетероструктур на основе соединений  $A_3B_5$ , кремний-на-изоляторе, кремний-германий), новых технологических процессов и схемотехнических решений, поэтому задачи развития методик и средств контроля работоспособности современных и перспективных изделий ТСВЧЭ при радиационных воздействиях являются актуальными.

#### **Цель диссертации:**

Разработка и развитие научно-методических, аппаратных и программных средств контроля работоспособности современных и перспективных изделий твердотельной СВЧ электроники для задач радиационных экспериментальных исследований и испытаний.

#### **Цель достигается путем решения следующих основных задач:**

1. Анализ тенденций развития изделий ТСВЧЭ и особенностей их применения в радиационно-стойкой аппаратуре. Сравнительное исследование особенностей полупроводниковых технологий, используемых при создании современных и перспективных изделий ТСВЧЭ. Определение типовых структурных схем построения приемо-передающих модулей для систем связи, локации и навигации СВЧ диапазона, выявление базового набора составных функциональных блоков (СФБ). Анализ основных закономерностей радиационного поведения, доминирующих радиационных эффектов и механизмов радиационных отказов в изделиях ТСВЧЭ. Выбор и научное обоснование рационального (необходимого и достаточного) набора контролируемых информативных параметров, достоверно

характеризующих радиационную стойкость базовых СФБ в зависимости от их функционального назначения и технологии реализации.

2. Критический анализ существующих методов и средств контроля работоспособности изделий ТСВЧЭ при испытаниях на радиационную стойкость, экспертиза достоверности подхода к оценке показателей стойкости на основании контроля только статических параметров изделий ТСВЧЭ. Разработка научно-методических и аппаратно-программных средств экспериментального исследования параметров изделий ТСВЧЭ в составе измерительных коаксиальных трактов при радиационных воздействиях с использованием моделирующих и имитирующих испытательных установок. Разработка методик автоматизированных измерений и контроля параметров, сбора и обработки экспериментальных данных при стационарных и импульсных видах воздействия.

3. Разработка и развитие методов и средств подключения кристаллов изделий ТСВЧЭ к измерительным коаксиальным и зондовым СВЧ трактам, создание специализированной и универсальной СВЧ оснастки, моделей корпусов для изделий ТСВЧЭ, методик автоматизированного исключения влияния измерительной оснастки при испытаниях изделий ТСВЧЭ.

4. Получение и систематизация оригинальных экспериментальных результатов радиационного поведения изделий ТСВЧЭ в широких диапазонах изменения режимов работы и уровней воздействия с целью подтверждения эффективности предложенных методов и средств, расчетно-экспериментального моделирования радиационных эффектов, прогнозирования радиационной стойкости на этапах проектирования.

5. Развитие базовой методики лазерных имитационных испытаний GaAs изделия ТСВЧЭ применительно к контролю основных информативных СВЧ параметров и в диапазоне предельных значений мощности дозы импульсного ионизирующего излучения.

#### **Научная новизна работы:**

1. Выявлены и систематизированы основные закономерности радиационного поведения, доминирующие радиационные эффекты и механизмы радиационных отказов в современных изделиях ТСВЧЭ на кремниевых, кремний-на-изоляторе, кремний-германиевых и арсенид-галлиевых структурах. Определен и научно-обоснован рациональный (необходимый и достаточный) набор контролируемых информативных параметров радиационной стойкости базовых составных функциональных блоков изделиях ТСВЧЭ в зависимости от функциональной принадлежности и технологии их реализации.

2. Создана оригинальная расчетно-экспериментальная методика определения информативных параметров и контроля работоспособности изделий ТСВЧЭ, включая разработку моделей корпусов для СВЧ ИС, других элементов испытательной оснастки, оценку эффективности их применимости для диапазона

сверхвысоких частот, разработку методики автоматизированного исключения влияния измерительной оснастки при радиационных испытаниях изделий ТСВЧЭ.

3. Получены и систематизированы оригинальные экспериментальные результаты по характеру радиационного поведения широкой номенклатуры современных изделий ТСВЧЭ в широком диапазоне изменения режимов работы, рабочих частот до 26 ГГц и уровней радиационных воздействий до 6Ус по ГОСТ РВ 20 39.414.2, подтвердившие высокую эффективность предложенных методов и средств контроля работоспособности и в целом прогнозирования радиационной стойкости изделий ТСВЧЭ в ходе их проектирования.

4. Развита базовая методика лазерных имитационных испытаний GaAs изделий ТСВЧЭ, адаптированная к контролю основных информативных СВЧ параметров в диапазоне предельных значений мощности дозы импульсного ионизирующего излучения, не достижимых на моделирующих установках.

#### **Практическая значимость работы:**

1. Разработан и внедрен в эксплуатацию универсальный автоматизированный аппаратно-программный комплекс (АПИК) для расчетно-экспериментальных исследований и испытаний всей номенклатуры изделий ТСВЧЭ в диапазоне частот до 26 ГГц.

2. Разработан маршрут исследований и испытаний корпусированных и некорпусированных (кристаллов) СВЧ приборов и ИС СВЧ диапазона, включающий в себя разработку программ-методик испытаний с обоснованным выбором контролируемых параметров, разработку испытательной оснастки с учетом конструктивных и функциональных параметров образцов, адаптацию СВЧ измерительного стенда и средств автоматизации, проведение испытаний и автоматизированную обработку результатов.

3. Разработаны модели корпусов для СВЧ ИС, как элементов испытательной оснастки, проведена оценка их применимости для сверхвысоких частот.

4. Обоснована и практически реализована возможность радиационных исследований изделий ТСВЧЭ на пластинах с контролем параметров зондовыми методами на ранних этапах разработки и производства, что особо актуально при испытаниях изделий с рабочими частотами выше 12 ГГц.

5. Получены оригинальные результаты экспериментальных исследований и испытаний более чем 100 типов изделий ТСВЧЭ отечественного и иностранного производства.

6. Результаты диссертации внедрены в ряде НИОКР проводимых ОАО «НИИМА «Прогресс», ОАО «НИИМЭ и Микрон», ФГУП «НПП «Исток», ИСВЧПЭ РАН и ОАО «ЭНПО СПЭЛС» в части экспериментальных исследований и испытаний изделий СВЧ диапазона на радиационную стойкость.

### **Результаты, выносимые на защиту:**

1. Базовая расчетно-экспериментальная методика определения информативных параметров и в целом контроля работоспособности изделий ТСВЧЭ и реализующий ее аппаратно-программный автоматизированный испытательный комплекс, обеспечивающий измерение и контроль полного набора информативных параметров изделий ТСВЧЭ в диапазоне частот до 26 ГГц при испытаниях на радиационную стойкость.

2. Маршрут исследований и испытаний корпусированных и некорпусированных (кристаллов) СВЧ приборов и ИС СВЧ диапазона, включающий в себя разработку программ-методик испытаний с обоснованным выбором контролируемых параметров, разработку испытательной оснастки с учетом конструктивных и функциональных параметров образцов, адаптацию СВЧ измерительного стенда и средств автоматизации, проведение испытаний и автоматизированную обработку результатов.

3. Расчетно-экспериментальная методика определения параметров СВЧ моделей корпусов ИС, оригинальные модели ряда отечественных металлокерамических и металлостеклянных корпусов в диапазоне от 2 до 10 ГГц и выше.

4. Оригинальные результаты экспериментальных исследований и испытаний широкой номенклатуры (более чем 100 типов) изделий ТСВЧЭ отечественного и иностранного производства.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации были представлены и обсуждались на российских и международных конференциях и семинарах: «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо)» (Севастополь, 2009 г.), «Научно-техническая конференция «Пульсар» (2009-2012 гг.), «Радиационная стойкость электронных систем» (Лыткарино, 2008-2012 гг.), «Электроника, микро- и нанoeлектроника» (2007-2012 гг.), «Проблемы создания специализированных радиационно-стойких СБИС на основе гетероструктур» (Н. Новгород, 2012 г.), научных сессиях МИФИ (Москва, 2008-2013 гг.) и других. По теме диссертации опубликовано более 40 печатных работ (в период с 2007 по 2013 гг.), в том числе 6 статей в журналах перечня ВАК, 1 монография, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация содержит 125 страницы, в том числе 57 рисунков, 12 таблиц, список литературы из 95 наименований и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.



## Содержание диссертации

**Во введении** обосновывается актуальность работы, обобщаются краткие результаты анализа ранее выполненных работ по тематике и на этой основе обосновывается наличие научного противоречия, которое заключается одновременно в необходимости и невозможности обеспечить достоверное определение показателей радиационной стойкости изделий ТСВЧЭ, оставаясь в рамках имеющихся методов и средств экспериментального исследования и контроля параметров без их существенного научно-технического развития.

**Первая глава** посвящена анализу развития элементной базы ТСВЧЭ. Проведена классификация современных зарубежных и отечественных ИС и БИС СнК для систем связи, обнаружения и навигации, определены рабочие частоты, используемые полупроводниковые технологии, рассмотрены типовые схемы построения. На основе структурной схемы приема-передающего модуля выделен базовый набор СФБ, в который входят: малошумящие усилители (МШУ), усилители средней и высокой мощности (УСМ и УМ), смесители (СМ), квадратурные модуляторы и демодуляторы (КМ и КД), генераторы, системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), ступенчатые фазовращатели (ФВ) и аттенюаторы (АТ), переключатели сигналов (ПС). Проведена классификация СФБ из базового набора по функциональному назначению, технологиям изготовления (базовые технологии), определен перечень основных СВЧ параметров (базовые параметры) СФБ и их типовые значения, представленные в табл. 1.

Рассмотрены основные современные полупроводниковые технологии, используемые при производстве изделий ТСВЧЭ, проведено их сравнение с точки зрения максимальной граничной частоты, максимальной плотности тока, минимальных технологических норм и других характеристик. В настоящее время коммерческие субмикронные объемные КМОП технологии являются наиболее доступными и относительно недорогими. Потенциально они могут обеспечить достаточный уровень стойкости к дозовым эффектам. КМОП КНИ технология более стойкая, чем объемная КМОП, к одиночным сбоям и импульсному ИИ, но в ряде случаев имеет достаточно высокие токи утечки, вызванные дозовыми эффектами. С другой стороны ни объемные КМОП, ни КМОП КНИ схемы пока не обеспечивают достаточно низкого уровня амплитудных шумов и высокочастотных характеристик, свойственных биполярной технологии.

Современные БиКМОП технологии, объединяющие субмикронные МОП транзисторы и малошумящие СВЧ биполярные транзисторы (в том числе SiGe), позволяют разрабатывать смешанные БИС, содержащие цифровые, аналоговые и СВЧ блоки на одном кристалле. Однако в качестве платы за функциональную завершенность БиКМОП схемы подвержены эффектам радиационной деградации

свойственным и МОП и биполярным транзисторам. В этой связи для частот в пределах S-диапазона наблюдается устойчивая тенденция к более широкому применению КМОП КНИ технологии. Определены параметры-критерии, определяющие уровень стойкости базовых СФБ к различным видам ионизирующего излучения. Установлено, что типовыми параметрами-критериями стойкости при дозовом, импульсном и нейтронном видах воздействия являются коэффициенты усиления и шума, верхняя граница линейности амплитудной характеристики по уровню минус 1 дБ, уровень выходной мощности и выходная частота, фазовый шум (для генераторных схем), функционирование.

Таблица 1. Типовые значения СВЧ параметров базового набора СФБ

Параметр	МШУ	УСМ	УМ	СМ	КМ/КД	Ген.	ФАПЧ	ФВ	АТ	ПС
Коэффициент усиления (вносимые потери), дБ	10	10	10	-10	0			-10	-10	-1
	÷	÷	÷	÷	÷	-	-	÷	÷	÷
	20	20	40	10	20			-2	-2	0
Выходная мощность, дБм	0	15	40	0	0	0		20	20	27
	÷	÷	÷	÷	÷	÷	-	÷	÷	÷
	15	20	50	10	20	10		30	30	33
Коэффициент шума, дБ	1	3		3	10			2	2	
	÷	÷	-	÷	÷	-	-	÷	÷	-
	3	5		20	20			20	20	
Уровень фазовых шумов, дБн/Гц						-80	-110			
	-	-	-	-	-	÷	÷	-	-	-
						-100	-130			
Дискретность переключения состояний, дБ / град.										
	-	-	-	-	-	-	-	5,6	0,5	-
Технология изготовления	SiGe, GaAs	Si, SiGe, GaAs, InGaP	GaAs, GaN	Si бипол.	Si, SiGe бипол.	Гибрид., БиКМОП	БиКМОП, КМОП КНД	SiGe, GaAs	SiGe, КМОП КНД	КМОП КНД, GaAs, Si

Проведен анализ и классификация современного контрольно-измерительного оборудования (КИО) отечественного и зарубежного производства, рассмотрены основные классы современного КИО, такие как: векторные анализаторы параметров цепей и сигналов, источники сигналов (генераторы), измерители мощности, осциллографы, специализированные и мобильные измерительные приборы; определены их основные параметры, влияющие на скорость и точность проведения измерений. Рассмотрены основные методы калибровки и учета влияния измерительной оснастки и элементов

измерительного тракта на результаты измерений. Проведен обзор современных программных средств автоматизации измерений. На основании параметров-критериев стойкости базовых СФБ, диапазона их значений, а также специфики радиационных испытаний, сформированы основные требования по функциональному составу и характеристикам КИО для формирования основы АПИК для измерения и контроля параметров изделий ТСВЧЭ при испытаниях на радиационную стойкость.

**Вторая глава** посвящена разработке АПИК. С учетом сформированного перечня базовых СФБ и диапазона значений информативных параметров определен набор требований к функциональному составу и параметрам требуемого КИО для создания АПИК, включающий в свой состав анализаторы цепей и сигналов с опциями измерения амплитудного и фазового шумов, аналоговые, векторные и функциональные генераторы, измеритель мощности, осциллографы, мультиметр и источники питания, объединенные в сеть стандарта GPIB (General Purpose Interface Bus) под управлением персонального компьютера. Обобщенная структурная схема АПИК показана на рис. 1.

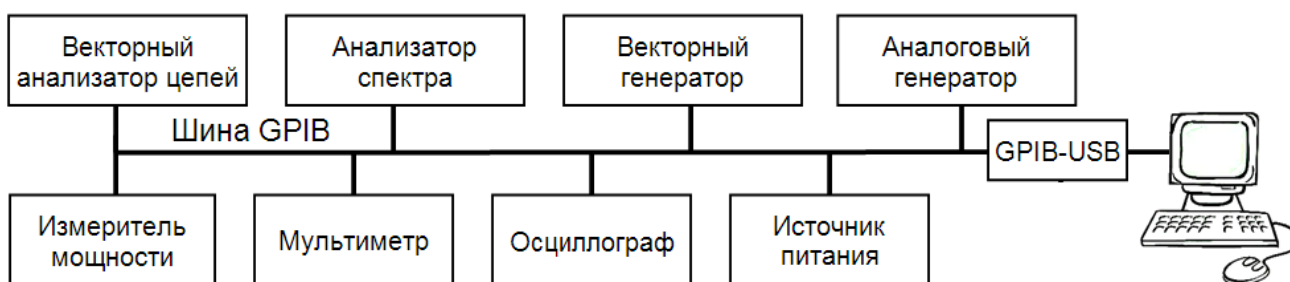


Рисунок 1. Обобщенная структурная схема АПИК

АПИК позволяет проводить измерения параметров полного набора изделий ТСВЧЭ, входящих в состав приемопередающих трактов в частотном диапазоне до 26 ГГц: маломощных усилителей и усилителей мощности, смесителей, синтезаторов, в т.ч. ГУН и систем ФАПЧ, аттенюаторов и фазовращателей, фильтров, делителей частоты и мощности, модуляторов и демодуляторов, в т.ч. векторных и др. Названия информативных параметров и частотные диапазоны измерения показаны на рис. 2.

С использованием языков программирования высокого уровня разработана и реализована программная оболочка для АПИК, решающая задачи автоматизации измерений и испытаний и обеспечивающая:

1. Оперативную настройку КИО при оптимальном соотношении между точностью и скоростью измерений в зависимости от функционального назначения исследуемого объекта, его основных параметров и условий испытаний;
2. Управление процессом испытаний, функционированием установок и КИО, измерение первичных и оперативный расчёт вторичных параметров.

3. Окончательную обработку экспериментальных данных по завершении испытаний, расчет приборных погрешностей, представление результатов в табличном и графическом виде для последующей обработки, в том числе средствами САПР.

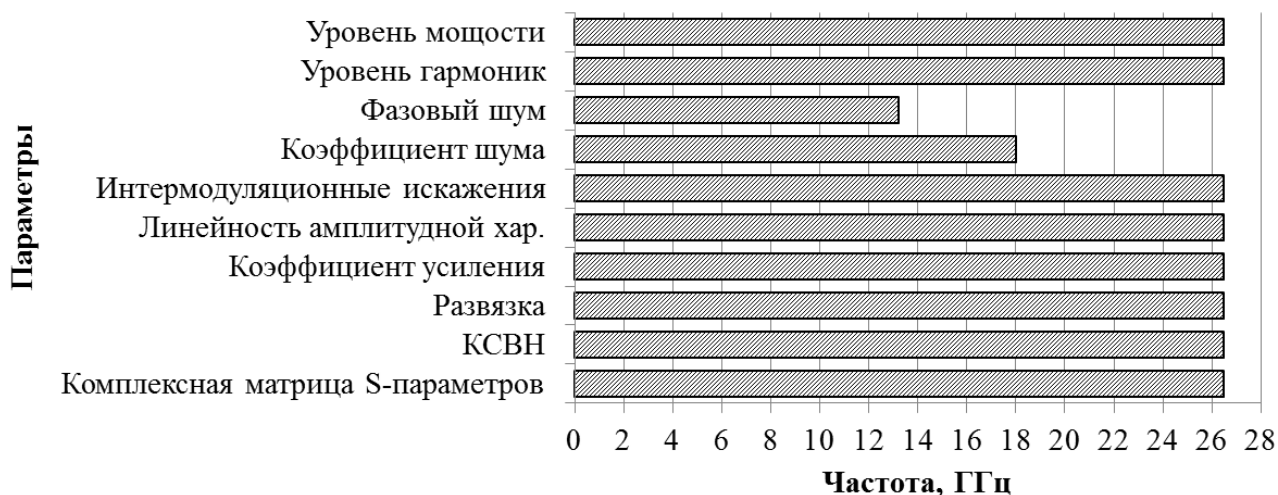


Рисунок 2. Система измеряемых параметров изделий ТСВЧЭ в частотном диапазоне

Проведение процессов настройки оборудования, измерений, сбора и обработки информации в автоматизированном режиме существенно (в разы) сокращает время контроля информативных параметров и работоспособности и минимизирует риск ошибки. Например, для измерения полного набора параметров генераторов, управляемых напряжением, обеспечен десятикратный выигрыш во времени, что особенно важно при радиационных испытаниях с контролем параметров-критериев за время, ограниченное процессами отжига.

Обеспечение совместной, синхронной работы АПИК с лабораторными имитаторами является важным элементом комплекса, поскольку позволяет проводить радиационные исследования и испытания в автоматизированном режиме, когда управление имитатором (переключение режимов, включение/выключения излучения) полностью передается интерфейсному ПО АПИК.

Наряду с лабораторными источниками радиационного воздействия обеспечена возможность автоматизированного исследования параметров изделий ТСВЧЭ в диапазоне температур от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ . Совместно с лабораторными источниками радиационного воздействия, используются лабораторные стенды задания температуры СЗТ-0201 и СЗТ-0401, разработанные ОАО «ЭНПО СПЭЛС». Их компактные размеры и конструктивное исполнение допускают размещение в непосредственной близости с измерительным оборудованием и использование обычных измерительных кабельных сборок минимальной длины, что повышает точность и достоверность результатов.

**Третья глава** посвящена разработке методов и средств подключения кристаллов изделий ТСВЧЭ к измерительным коаксиальным СВЧ трактам, созданию специализированной и универсальной СВЧ оснастки, моделей корпусов, методик автоматизированного исключения влияния измерительной оснастки (ИО).

Проведение экспериментальных исследований и испытаний изделий ТСВЧЭ требует изготовления специальной ИО, позволяющей проводить измерение и контроль параметров в широкой полосе частот. СВЧ ИО делятся на универсальные и специализированные, имеющие свои преимущества и недостатки. Универсальные ИО (УИО) позволяют экономить время, требуемое на сборку оснастки, повысить точность и воспроизводимость результатов за счет использования качественных СВЧ коаксиально-микророскопических переходов (КМП) с большим сроком службы. При этом под каждый тип исследуемого объекта изготавливается индивидуальная печатная плата с металлическим основанием («вставка»), которая монтируется внутрь УИО. В ходе работы была спроектирована и изготовлена УИО, позволяющая с высокой точностью проводить измерения параметров изделий ТСВЧЭ в диапазоне частот до 12 ГГц. Внешний вид УИО со вставкой показан на рис. 3.

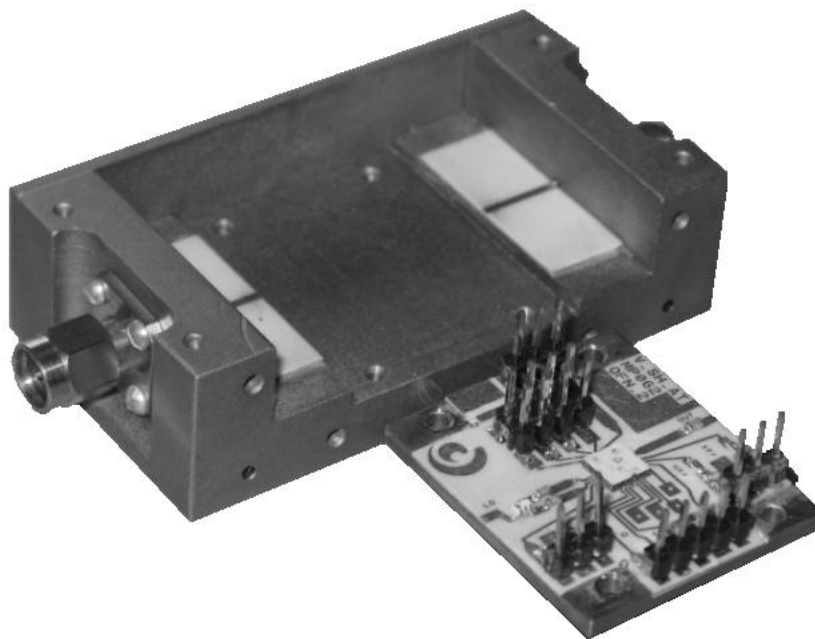


Рисунок 3. Внешний вид УИО со вставкой

Определение параметров модели разработанной ИО проводилось по расчетно-экспериментальной методике на основе изготовленного набора калибровочных мер (КМ) и результатов трехмерного электромагнитного моделирования. По результатам измерений КМ и расчетного трехмерного моделирования разработана схемотехническую модель УИО, упрощенная эквивалентная схема которой показана на рис. 4. С помощью модели

производится обработка результатов измерений и исключение влияния УИО средствами САПР.

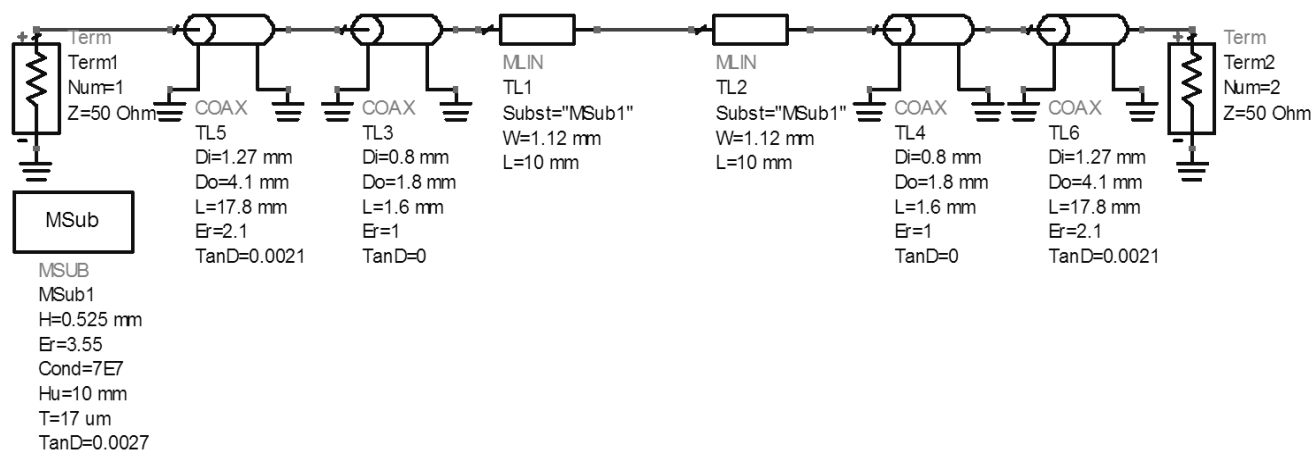


Рисунок 4. Эквивалентная схема универсальной измерительной оснастки

В ряде случаев при радиационных испытаниях используются специализированные ИО (СИО), изготавливаемые индивидуально под каждый типонаминал исследуемого объекта. СИО проигрывают по точности результатов измерений УИО, но обладают большей конструктивной приспособленностью к условиям радиационных испытаний, а так же, как правило, имеют меньше габариты, что позволяет проводить одновременное облучение нескольких образцов в одной кассете из нескольких СИО. Между тем, характеристика таких оснасток из-за невозможности провести измерения параметров калибровочных мер может проводиться только на этапе разработки. Для решения этой задачи была предложена комплексная методика проектирования ИО, позволяющая создавать схемотехническую модель СИО на этапе проектирования и изготовления топологии печатной платы.

Для оценки уровней стойкости изделий ТСВЧЭ на ранних этапах проектирования для отработки схемотехнических, топологических и конструктивных способов повышения радиационной стойкости проводятся испытания некорпусированных образцов (кристаллов). В этом случае широко распространенным методом исследований является непосредственная разварка кристаллов исследуемых образцов в стандартные корпуса ИС. Между тем, еще 3...5 лет назад производство серийных отечественных корпусов ИС было ориентировано в основном на цифровые и смешанные схемы разной степени интеграции (ОАО «ЗПП», г. Йошкар-Ола, ОАО «Завод «Марс», г. Торжок, ЗАО «Тестприбор» г. Москва), особо остро ощущается отсутствие отечественных серийных многовыводных корпусов (более 14 выводов) для смешанных СВЧ ИС с цифровым управлением.

В ходе работы была создана комплексная расчетно-экспериментальная методика моделирования СВЧ-параметров металлокерамических и металlostеклянных корпусов ИС, основанная на векторных измерениях

и электромагнитном анализе модельных структур кристалл ИС – корпус, и предназначенная для оперативного определения параметров моделей для САПР отечественных и зарубежных корпусов ИС. По представленной методике были разработаны модели ряда отечественных серийно выпускаемых корпусов: 401.14-5 (ОКБ «Марс»), Н06-24-2В (ОАО «ЗПП») и 6-выводного металлокерамического СВЧ-корпус производства ЗАО «НПП «Планета-Аргалл» (корпус «Планета»), частотные зависимости S-параметров модельной структуры для измерений (МСИ) которых показаны на рис. 5.

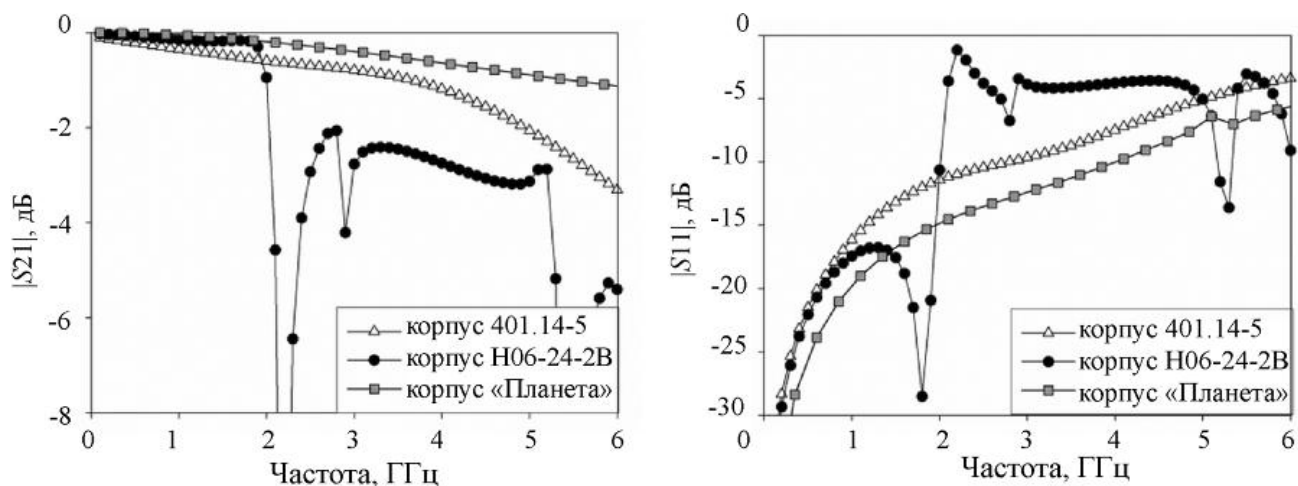


Рисунок 5. Сравнительные результаты измерений S-параметров МСИ для корпусов 401.14-5, Н06-24-2В и «Планета»

В условиях недоступности корпусов, удовлетворяющих требованиям по диапазону рабочих частот, конфигурации и числу выводов, возможна разварка непосредственно в ИО. При этом кристалл устанавливается на поверхность или в углубление на печатной плате, а его контактные площадки развариваются проволочками на печатные проводники, как показано на рис. 6.

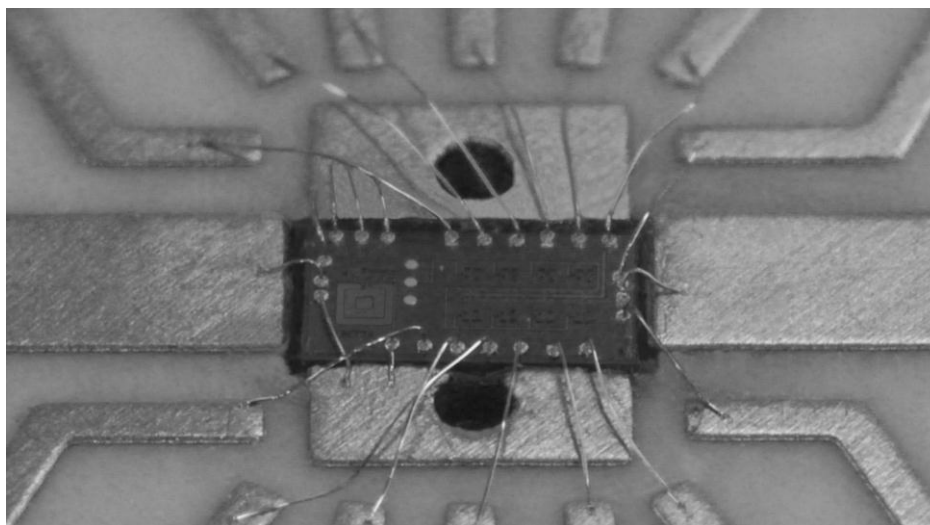


Рисунок 6. Внешний вид фрагмента печатной платы с установленным кристаллом

Отказ от использования корпуса экономит место на печатной плате, практически снимает ограничение на количество контактных площадок (выводов), а также позволяет значительно уменьшить количество паразитных элементов и длину разварочных проволочек, паразитная индуктивность которых может приводить к деградации характеристик и нарушению условий устойчивости исследуемых образцов. Одновременно с этим разварка в ИО обладает рядом существенных недостатков, среди которых особые требования к подготовке печатной платы (золочение проводников в местах разварки), невозможность оперативной замены образца в измерительной оснастке, а также отсутствие механической защиты исследуемого объекта. Для проведения оперативного монтажа и разварки кристаллов в условиях испытательной СВЧ лаборатории был разработан, укомплектован и введен в эксплуатацию технологический участок на основе полуавтоматической установки шариковой микросварки, разработан технологический маршрут монтажа полупроводниковых кристаллов и сборки ИС.

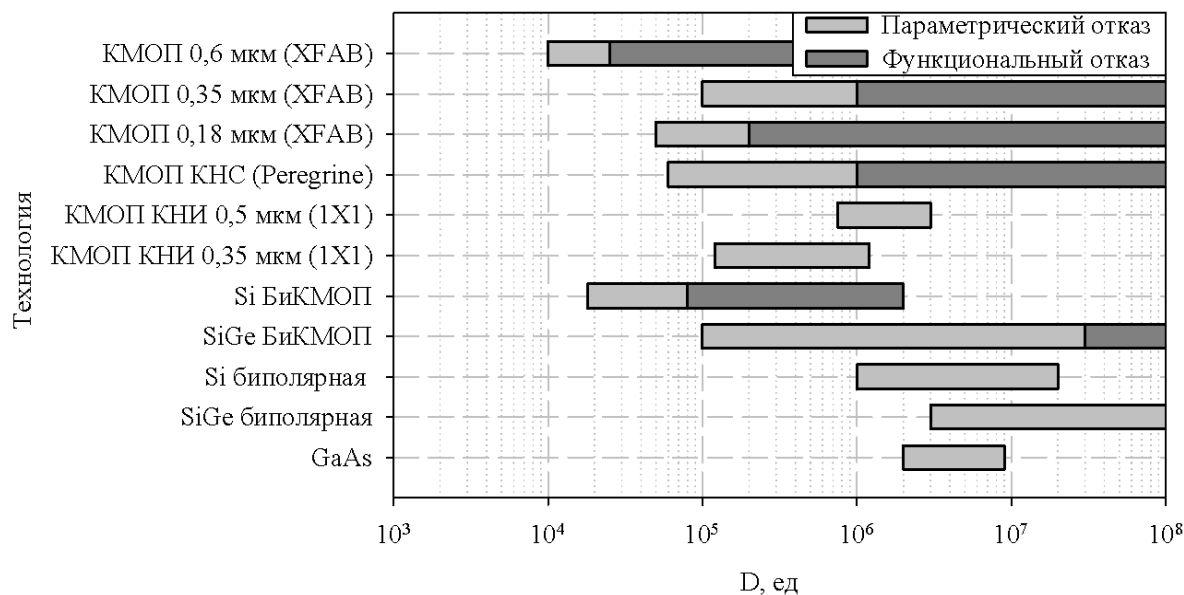
Для улучшения точности измерений в процессе испытаний и экспериментальных исследований параметров изделий ТСВЧЭ важной является задача определения и исключения систематических ошибок. Их причинами являются вносимые потери, рассогласование и фазовый набег. Основными источниками ошибок являются измерительная оснастка, элементы коаксиального измерительного тракта и измерительное оборудование. Существует несколько методов определения и исключения ошибок, широкое распространение из которых получили два: калибровка и математическое исключение ошибок (МИО или de-embedding), а на практике часто применяется их комбинация. В диссертации предложены методики автоматизированного исключения ошибок из результатов измерений средствами САПР на основе известной модели ИО, полученной либо непосредственным измерением, либо с использованием моделирования. Предложенные методики позволили исключить систематические ошибки, существенно повысив точность измерения параметров и достоверность результатов испытаний.

**Четвертая глава** посвящена обобщению и систематизации оригинальных экспериментальных результатов радиационного поведения изделий ТСВЧЭ, а также развитию базовой методики лазерных имитационных испытаний GaAs изделий ТСВЧЭ применительно к контролю основных информативных СВЧ параметров в диапазоне предельных значений мощности дозы импульсного ионизирующего излучения.

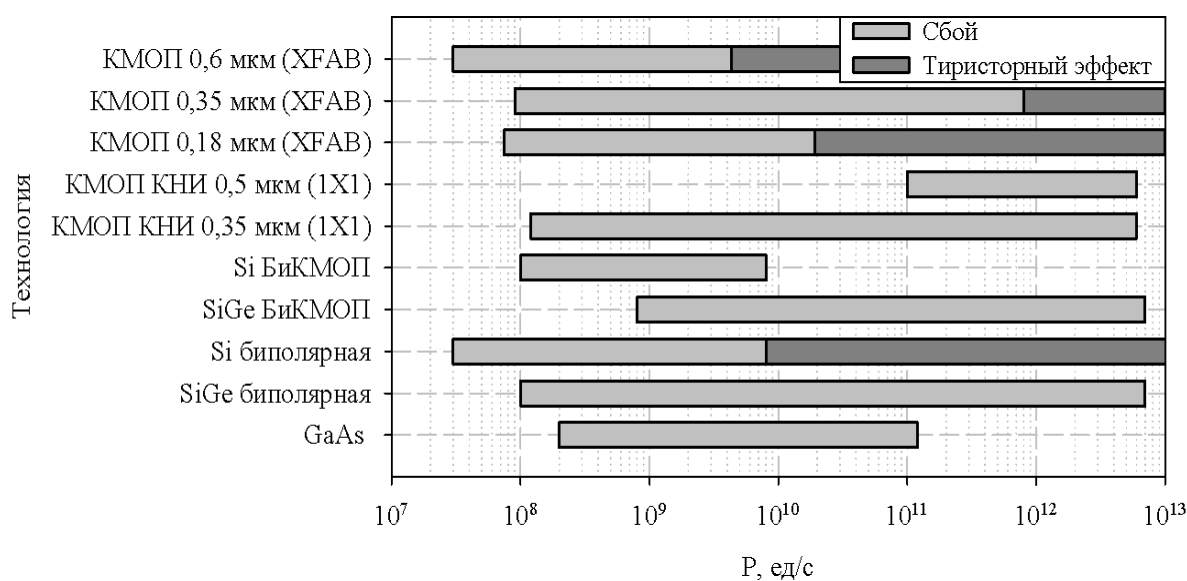
По результатам обобщения и систематизации оригинальных экспериментальных результатов радиационного поведения изделий ТСВЧЭ отечественного и зарубежного производства, изготовленных по различным перспективным технологиям, построены наглядные диаграммы уровней



стойкости с абсолютными и относительными показателями стойкости к дозовому и импульсному видам воздействия, представленные на рис. 7.



а)



б)

Рисунок 7. Сравнительные показатели радиационной стойкости изделий ТСВЧЭ к дозовому (а) и импульсному (б) видам воздействия

На основе экспериментальных данных, представленных на диаграммах, установлено следующее:

1. Для космических применений, требующих высокого уровня стойкости к дозовым эффектам, наиболее предпочтительными являются SiGe биполярные СВЧ МИС; на втором месте находятся КМОП ИС, изготовленные по технологии «кремний-на-изоляторе» и ИС на основе GaAs; третье место занимают кремниевые биполярные ИС.

2. Для применений, дополнительно требующих повышенной стойкости к воздействию нейтронов, наиболее перспективной является технология КНИ/КНС КМОП; на втором месте по этому фактору стоят КМОП ИС и схемы на основе GaAs.

3. Для военных применений, дополнительно требующих повышенной стойкости к импульсным ионизирующим излучениям, перспективной является технология КМОП КНИ/КНС; на втором месте по этому фактору стоят SiGe биполярные ИС и ИС на основе GaAs.

Аттестация изделий ТСВЧЭ для военного применения требует испытания на импульсное ионизирующее воздействие (ИИВ) до уровней, соответствующих группе унифицированного исполнения 5Ус и выше, не достижимых для большинства современных моделирующих установок (МУ). В этих случаях используются возможности лазерной имитации совместно с калибровкой на МУ. В настоящее время широкое применение при испытаниях на стойкость к ИИВ кремниевой ЭКБ нашли лазерные имитаторы (ЛИ) серии «Радон» (ОАО «ЭНПО СПЭЛС») с диапазоном длин волн 1,06...1,08 мкм. Указанный диапазон обеспечивает практически равномерную ионизацию активных приборных слоев и подложки для большинства кремниевых приборов. Для ЭКБ на основе GaAs, являющегося прямозонным полупроводником, характерна более крутая зависимость коэффициента поглощения от длины волны лазерного излучения со спадом в диапазоне длин волн 0,8...0,9 мкм, как показано на рис. 8.

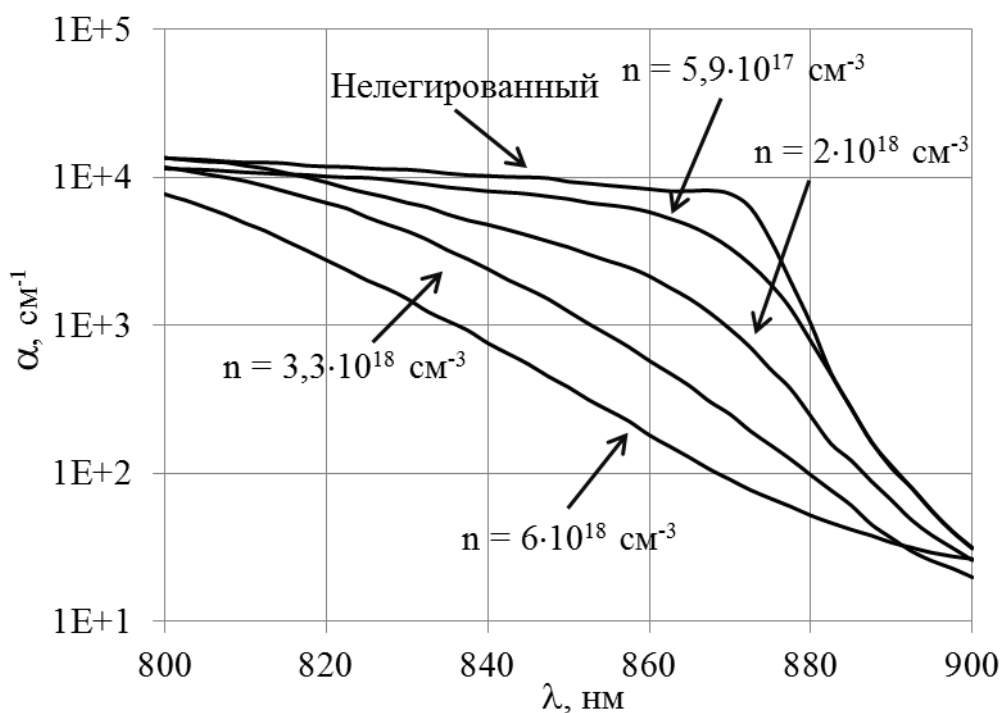


Рисунок 8. Зависимость коэффициента поглощения в GaAs от длины волны излучения при нескольких уровнях легирования.

Известно, что для имитационных лазерных испытаний ИС на основе GaAs полевых транзисторов с затвором Шоттки (MESFET) оптимальным считается диапазон длин волн 860...900 нм. Между тем, вопросы адекватности лазерной имитации в части эффектов мощности дозы в ИС на основе псевдоморфных транзисторов с высокой подвижностью электронов (рНЕМТ), отличительной особенностью которых является наличие большого числа приборных слоев с гетеропереходами, до настоящего времени остаются не проработанными. В этой связи в диссертационной работе решалась задача исследование возможности развития лазерной имитационной методики для изделий ТСВЧЭ на основе GaAs рНЕМТ.

Объектом для отработки имитационной методики был выбран тестовый СВЧ МШУ с рабочим диапазоном частот 1...3 ГГц, построенный на GaAs рНЕМТ с шириной затвора 320 мкм.

В качестве источников ИИВ использовались: МУ – импульсный ускоритель электронов «АРСА», работающий в режиме тормозного гамма-излучения (МУ «АРСА»); лабораторный ЛИ «Радон-8» с возможностью перестройки длины волны (ЛИ «Радон-8»).

Оценка адекватности лазерного имитационного моделирования объемных ионизационных эффектов проведена на основе сравнения амплитудно-временных характеристик (АВХ) ионизационной реакции (ИР) базовых параметров МШУ –  $K_u$  и тока потребления (стока) МШУ ( $\Delta I_p$ ).

На первом этапе были проведены исследования на МУ «АРСА». В полученных АВХ ИР  $\Delta I_p$  можно выделить две основных составляющих:

1. Кратковременная (см. рис. 9,а): увеличение тока потребления (стока) МШУ, сравнимое по длительности с импульсом ИИВ, вследствие возникновения объемной ионизационное проводимости в области канала.

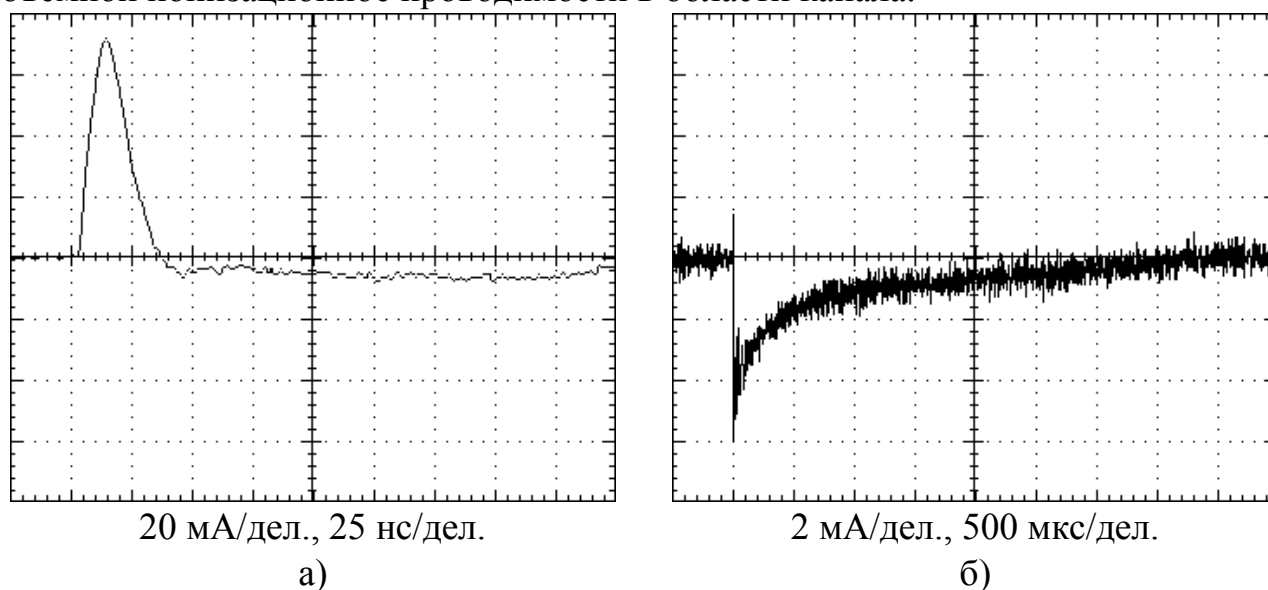
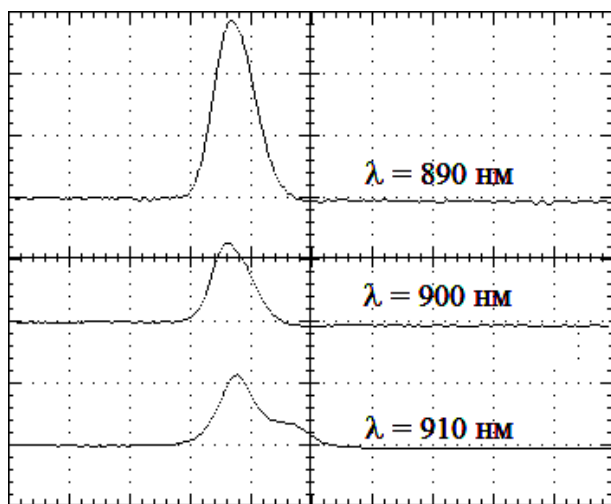


Рисунок 9. Осциллограммы кратковременной (а) и долговременной (б) составляющих ИР  $\Delta I_p$  при исследовании на МУ «АРСА».

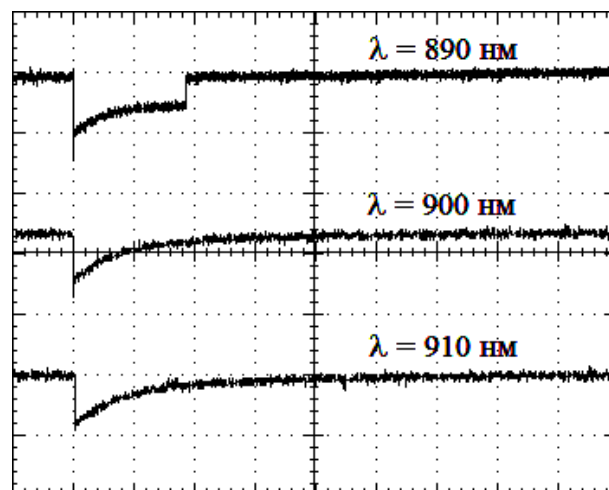
2. Долговременная (см. рис. 9,б): миллисекундное уменьшение тока потребления (стока), обусловленное релаксацией заряда носителей, захваченных глубокими уровнями в подложке и на границах раздела.

На втором этапе при облучении на ЛИ «Радон-8» были исследованы характеристики кратковременной и долговременной составляющих ИР  $\Delta p$  и выходного СВЧ сигнала МШУ в диапазоне длин волн 880...920 нм.



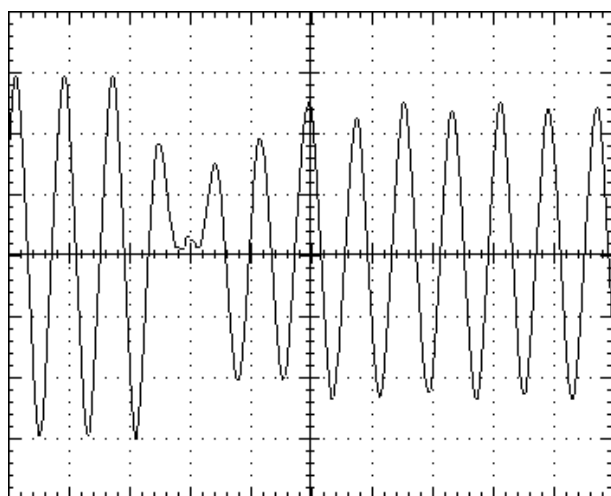
100 мА/дел., 25 нс/дел.

а)



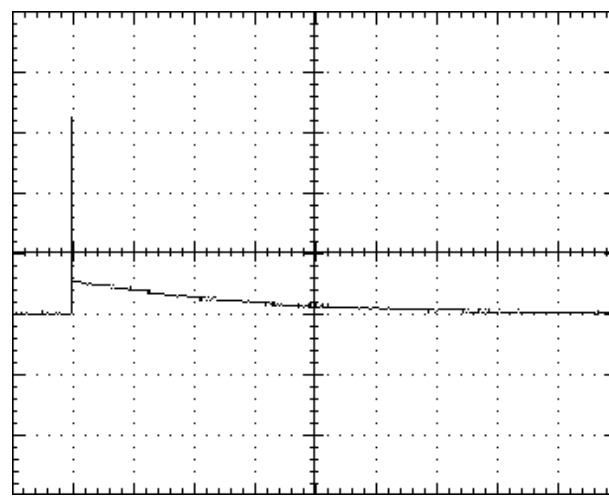
5 мА/дел., 500 мкс/дел.

б)



$\lambda = 900$  нм, 50 мВ/дел., 25 нс/дел.

в)



$\lambda = 900$  нм, 0,05 дБ/дел., 500 мкс/дел.

г)

Рисунок 10. Осциллограммы кратковременной (а) и долговременной (б) составляющих ИР  $\Delta p$ , выходного СВЧ сигнала МШУ после понижающего смесителя (в) и инвертирующего детектора (г)

По соответствию формы ИР  $\Delta p$  были выделены три случая (соответствующие осциллограммы приведены на рис. 10):

1. При  $\lambda \leq 890$  нм: кратковременная составляющая соответствует, долговременная – нет.

2. При  $\lambda = 900$  нм: кратковременная и долговременная составляющие соответствуют.

3. При  $\lambda \geq 910$  нм: долговременная составляющая соответствует, кратковременная – нет.

Результаты свидетельствуют об идентичности АВХ ИР тока потребления  $\Delta I_p$  при воздействии лазерного излучения с длиной волны 900 нм.

На третьем этапе были исследованы зависимости амплитуды кратковременной составляющей ИР  $\Delta I_p$  от интенсивности лазерного излучения ЛИ «Радон-8» (при  $\lambda = 900$  нм) и эквивалентной мощности дозы ( $P$ , рад(Si)/с) МУ «АРСА».

Согласно представленным на рис. 11 результатам зависимости амплитудных значений ИР от эквивалентной мощности дозы ИИВ МУ и ЛИ полностью аналогичны. До уровня  $10^9$  рад(Si)/с амплитуда ионизационного тока линейно возрастает с ростом  $P$ . Дальнейшее увеличение эквивалентной мощности дозы приводит к сублинейной зависимости от  $P$  вследствие падения напряжения на последовательном сопротивлении структуры и процессов излучательной рекомбинации. В ходе работы подтверждена возможность лазерных имитационных испытаний СВЧ ИС на основе GaAs РНЕМТ. На примере СВЧ МШУ определена длина волны лазерного излучения и получен калибровочный коэффициент (интенсивность – мощность дозы), при которых обеспечивается адекватность лазерной имитации.

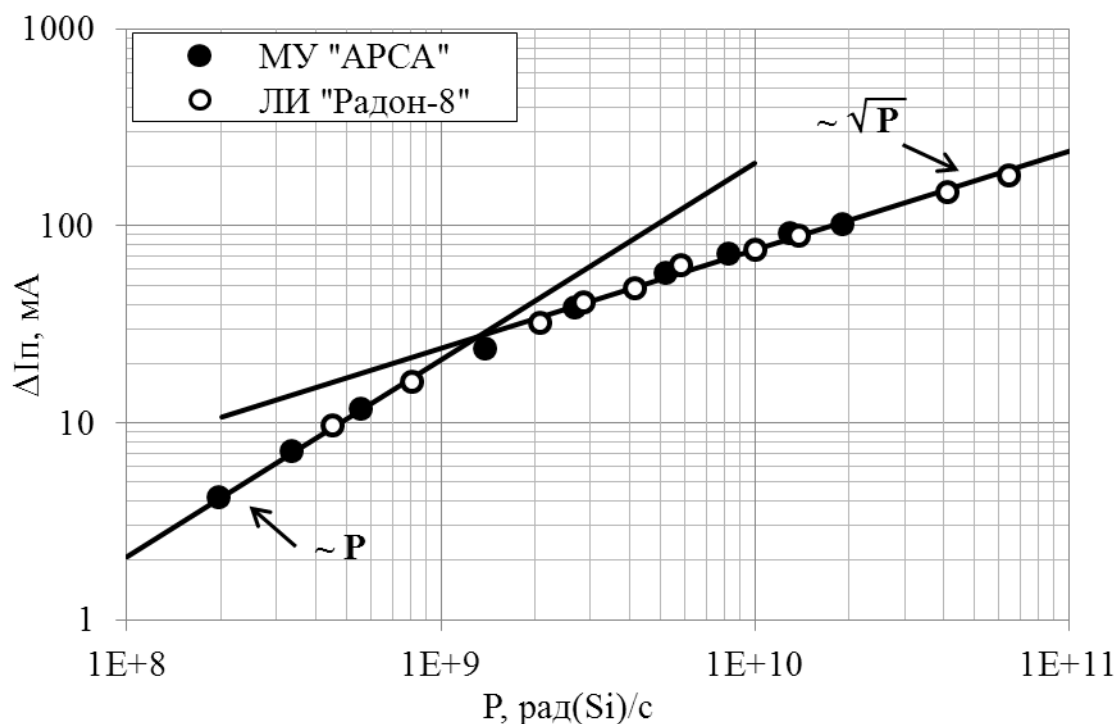


Рисунок 11. Сравнительные зависимости амплитуды кратковременной составляющей ИР тока потребления от мощности дозы

**Заключение** обобщает основные результаты диссертации, а именно:

1. Проведен анализ тенденций развития изделий ТСВЧЭ и особенностей их применения в радиационно-стойкой аппаратуре и сравнительное исследование особенностей полупроводниковых технологий, используемых при создании современных и перспективных изделий ТСВЧЭ. Определены типовые структурные схемы построения приемо-передающих модулей для систем связи, локации и навигации СВЧ диапазона, на основании анализа которых выявлен базовый набор СФБ. По результатам анализа основных закономерностей радиационного поведения, доминирующих радиационных эффектов и механизмов радиационных отказов в изделиях ТСВЧЭ, выбран и научно обоснован рациональный набор контролируемых информативных параметров, достоверно характеризующих радиационную стойкость базовых СФБ в зависимости от их функционального назначения и технологии реализации.

2. Проведен анализ существующих методов и средств контроля работоспособности изделий ТСВЧЭ при испытаниях на радиационную стойкость. Показано, что контроль работоспособности по результатам измерения значений простейшего набора параметров, общих для большинства классов низкочастотных налоговых ЭРИ, малоинформативен и может привести к недостоверной оценке уровня радиационной стойкости.

3. Разработаны научно-методические и аппаратно-программные средства экспериментального исследования параметров изделий ТСВЧЭ в составе измерительных коаксиальных трактов при радиационных воздействиях с использованием моделирующих и имитирующих испытательных установок, а так же методики автоматизированных измерений и контроля параметров, сбора и обработки экспериментальных данных при стационарных и импульсных видах воздействия.

4. Разработаны и развиты методы и средства подключения кристаллов изделий ТСВЧЭ к измерительным коаксиальным и зондовым СВЧ трактам, созданы специализированные и универсальные СВЧ оснастки, модели корпусов для изделий ТСВЧЭ, методики автоматизированного исключения влияния измерительной оснастки при испытаниях изделий ТСВЧЭ.

5. Получены и систематизированы оригинальные экспериментальные результаты радиационного поведения изделий ТСВЧЭ в широких диапазонах изменения режимов работы и уровней воздействия, подтверждающие эффективность предложенных методов и средств, расчетно-экспериментального моделирования радиационных эффектов, прогнозирования радиационной стойкости на этапах проектирования.

6. Развита базовая методика лазерных имитационных испытаний GaAs изделия ТСВЧЭ применительно к контролю основных информативных СВЧ параметров и в диапазоне предельных значений мощности дозы импульсного ионизирующего излучения.

**Список работ, опубликованных по теме диссертации:**

1. Исследование влияния ионизирующих излучений на характеристики кремний-германиевых интегральных схем СВЧ диапазона / Елесин В.В., Чуков Г.В., Громов Д.В., Репин В.В. и др. // Микроэлектроника. - 2010. - Т.39. - №2. - С. 136-148.
2. Елесин В.В., Назарова Г.Н., Чуков Г.В. Маршрут исследований ИС многоразрядных фазовращателей и аттенуаторов для АФАР СВЧ диапазона // Известия высших учебных заведений. Электроника. - 2011. - №4(90). - С. 78-85.
3. Комплекс методических, аппаратных и программных средств для автоматизированных исследований параметров полупроводниковых СВЧ ИС в условиях испытаний на радиационную стойкость / Елесин В.В., Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чуков Г.В. // Спецтехника и связь. - 2011. - №4-5. - С. 28-32.
4. Расчетно-экспериментальное исследование возможности разработки радиационно-стойких БИС навигационного назначения по отечественной КМОП КНИ технологии с нормами 0,35 мкм / Елесин В.В., Назарова Г.Н., Чуков Г.В., Кабальнов Ю.А. и др. // Микроэлектроника. - 2012. - Т.41 - №4. - С. 291-303.
5. Елесин В.В., Назарова Г.Н., Чуков Г.В. Расчетно-экспериментальное моделирование СВЧ-характеристик металлокерамических и металлокерамических корпусов ИС // Известия высших учебных заведений. Электроника. - 2012. - №5(97). - С. 24-30.
6. Построение монолитных ИС многоразрядных фазовращателей СВЧ-диапазона с улучшенными точностными характеристиками / Елесин В.В., Назарова Г.Н., Усачев Н.А., Чуков Г.В. и др. // Известия высших учебных заведений. Электроника. - 2012. - №5(97). - С.31-38
7. Громов Д.В., Чуков Г.В. Влияние радиации на гетероструктурные СВЧ приборы и интегральные схемы // ISBN: 978-3-659-98111-1 – Palmarium academic publishing. - Германия. - 2012. – 97 с.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа управления портативным логическим генератором-анализатором», №. 2013611634 от 30 января 2013 г.
9. Радиационные эффекты в биполярных транзисторах на основе гетероструктур кремний-германий / Громов Д.В., Елесин В.В., Чуков Г.В., Репин В.В. // Материалы Междунар. конф. КрыМиКо'2009. - Севастополь. - 2009. - С. 726-727.
10. Исследование стойкости интегральных схем СВЧ усилителей на основе гетероструктур кремний-германий / Громов Д.В., Елесин В.В., Чуков Г.В., Репин

В.В // Материалы Междунар. конф. КрыМиКо'2009. - Севастополь. - 2009. - С. 719-720.

11. Елесин В.В., Чуков Г.В. Сравнительный анализ методик измерения S-параметров некоаксиальных СВЧ устройств // Научная сессия МИФИ-2008: Сборник научных трудов: В 15 томах: МИФИ. - 2008 г. - С.81-82.

12. Зайцев А.В., Чуков Г.В. Разработка методик и средств автоматизированных испытаний СВЧ ЭРИ // Научная сессия МИФИ-2008: Тезисы докладов: В 2 ч. М.: МИФИ. - 2008. - С. 45-46.

13. Чуков Г.В., Громов Д.В., Елесин В.В. Разработка автоматизированного комплекса для радиационных испытаний СВЧ генераторов, управляемых напряжением // Радиационная стойкость электронных систем. М.: СПЭЛС-НИИП. - 2008 г. - С. 217-218.

14. Расчетно-экспериментальное моделирование СВЧ характеристик металлокерамических корпусов ИС / Елесин В.В., Назарова Г.Н., Чуков Г.В., Громов Д.В. и др. // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. науч. тр.: МИФИ. - 2008 г., - С.102-109.

15. Чуков Г.В. Методика измерения СВЧ параметров RLC-компонентов с помощью векторного анализатора цепей // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. науч. тр.: МИФИ. - 2008 г., - С.110-113.

16. Исследование радиационной стойкости кремний-германиевых интегральных схем СВЧ диапазона / Елесин В.В., Чуков Г.В., Кузнецов А.Г., Громов Д.В. // Научная сессия МИФИ-2009: Сборник научных трудов: В 6 томах: МИФИ. - 2009 г. - С.119-122.

17. Расчетно-экспериментальное моделирование СВЧ характеристик металлокерамических корпусов ИС / Громов Д.В., Елесин В.В., Назарова Г.Н., Чуков Г.В. // Материалы научно-технической конференции -М: ФГУП "НПП "Пульсар". - 2009. – С. 86-88.

18. Исследование радиационной стойкости кремний-германиевых интегральных схем СВЧ диапазона / Елесин В.В., Чуков Г.В., Кузнецов А.Г., Громов Д.В. и др. // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. науч. тр.: МИФИ. - 2009 г. - С.225-240.

19. Чуков Г. В., Кузнецов А.К.. Показатели стойкости ИС ФАПЧ серии ADF41XX к дозовому воздействию // Радиационная стойкость электронных систем. М.: МИФИ. - 2010 г. - С.33-34.

20. Чуков Г.В. Способы подключения кристаллов СВЧ блоков к измерительному тракту // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. науч. тр.: МИФИ. - 2010 г. - С.155-159.

21. Чуков Г. В., Дмитриев В. А. Разработка аппаратно-программного комплекса для проведения автоматизированных измерений параметров СВЧ



электрорадиоизделий // Научная сессия МИФИ-2010: Сборник научных трудов: В 6 томах: МИФИ. - 2010 г. - С.173-175.

22. Технология испытаний интегральных схем многоразрядных фазовращателей и аттенюаторов для систем АФАР СВЧ диапазона / Елесин В.В., Назарова Г.Н., Чуков Г.В., Усачев Н.А. // Материалы научно-технической конференции -М: ФГУП "НПП "Пульсар". - 2010 г., - С. 176-178.

23. Исследование СВЧ характеристик отечественной КНИ КМОП технологии с нормами 0,35 мкм / Елесин В.В., Назарова Г.Н., Чуков Г.В., Кабальнов Ю.А., и др. // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. науч. тр.: МИФИ. - 2011 г. - С. 90-101.

24. Чуков Г.В. Автоматизированное исследование параметров СВЧ ИС в условиях испытаний на радиационную стойкость // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. науч. тр.: МИФИ. - 2011 г. - С. 154-162.

25. Амбуркин К.М., Чуков Г.В. Разработка логического генератора-анализатора для испытаний СВЧ электрорадиоизделий с цифровым управлением // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. науч. тр.: МИФИ. - 2011 г. - С. 123-127.

26. Метелкин И.О., Чуков Г.В. Моделирование высокочастотных характеристик КНИ МОП транзистора средствами САПР TCAD // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. науч. тр.: МИФИ. - 2011 г. - С.102-107.

27. Показатели радиационной стойкости современных отечественных и зарубежных твердотельных интегральных схем СВЧ диапазона / Елесин В.В., Кузнецов А.Г., Чуков Г.В., Громов Д.В. и др. // Радиационная стойкость электронных систем. М.: МИФИ. - 2011 г. - С. 245.

28. Амбуркин К.М., Чуков Г.В. Методика оптимизации точностных параметров векторных СВЧ фазовращателей // Материалы научно-технической конференции -М: ФГУП "НПП "Пульсар". - 2011 г. - С. 46-48.

29. Особенности контроля параметров СВЧ ЭРИ при воздействии импульсного ионизирующего излучения / Амбуркин К.М., Чуков Г.В., Кузнецов А.Г., Елесин В.В. // Научная сессия МИФИ-2012. Аннотации докладов -Т.1. - М.: НИЯУ МИФИ. - 2012. - С. 100.

30. Результаты разработки монолитных функциональных блоков навигационного радиоприемного устройства по маршруту КМОП КНИ 0,35 мкм / Елесин В.В., Кабальнов Ю.А., Кузнецов А.Г., Чуков Г.В. и др.// Научная сессия МИФИ-2012. Аннотации докладов - Т.1. - М.: НИЯУ МИФИ. - 2012. - С. 106.

31. И.О. Метелкин, К.М. Амбуркин, Г.В. Чуков Моделирование СВЧ устройств с использованием X-параметров // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2012. Молодежь и наука. Тезисы докладов в 3-х частях. - Ч. 1. - М.: НИЯУ МИФИ. - 2012. - С.47-48.

32. Сравнительный анализ методик контроля параметров СВЧ ЭРИ при воздействии импульсного ионизирующего излучения / Амбуркин К.М., Чуков Г.В., Кузнецов А.Г., Елесин В.В. // Электроника, микро- и наноэлектроника. Сб. науч. тр.: НИЯУ МИФИ. - 2012. - С. 81-89.

33. Метелкин И.О., Чуков Г.В. Моделирование шумовых характеристик МОП транзистора на КНИ структуре // Электроника, микро- и наноэлектроника. Сб. науч. тр.: НИЯУ МИФИ. - 2012. - С. 90-95.

34. Кузнецов А.Г., Чуков Г.В., Елесин В.В. Дозовые эффекты в ИС ФАПЧ // Радиационная стойкость электронных систем. Научн.-техн. Сборник. - Вып. 15. - 2012. - С. 127-128.

35. Особенности лазерных имитационных испытаний арсенид-галлиевых СВЧ ИС на РНЕМТ / Елесин В.В., Чуков Г.В., Назарова Г.Н., Амбуркин К.М. и др. // Материалы научно-технической конференции -М: ФГУП "НПП "Пульсар". - 2012. - С. 181-185.

36. Многозарядные фазовращатели X-диапазона с преобразованием частоты / Елесин В.В., Репин В.В., Назарова Г.Н., Чуков Г.В. и др. // Материалы научно-технической конференции -М: ФГУП "НПП "Пульсар". - 2012. - С. 29-33.

37. Амбуркин К.М., Чуков Г.В., Елесин В.В. Расчетно-экспериментальное моделирование СВЧ ИС на основе GaAs при дозовом и импульсном воздействии // Научная сессия МИФИ-2013. Аннотации докладов - Т.1. - М.: НИЯУ МИФИ. - 2013. - С. 100.

38. Расчетно-экспериментальное моделирование элементов КМОП КНИ СВЧ ИС при дозовом и импульсном воздействии / Чуков Г.В., Назарова Г.Н., Амбуркин К.М., Елесин В.В. // Научная сессия МИФИ-2013. Аннотации докладов -Т.1. -М.: НИЯУ МИФИ. - 2013. - С.100.

39. Амбуркин Д.М., Чуков Г.В. Измерительный комплекс для испытаний СВЧ переключателей // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2013. Молодежь и наука. Тезисы докладов в 3-х частях. - Ч. 1. - М.: НИЯУ МИФИ. - 2013. - С. 77-78.

40. Показатели импульсной электрической прочности СВЧ ЭРИ на основе соединений АЗВ5 / Амбуркин К.М., Епифанцев К.А., Скоробогатов П.К., Чуков Г.В. // Радиационная стойкость электронных систем. Научн.-техн. Сборник. - Вып. 16. - 2013.

41. Исследование СВЧ малошумящих усилителей на импульсную электрическую прочность / Епифанцев К.А., Скоробогатов П.К., Чуков Г.В., Кузнецов А.Г. // Радиационная стойкость электронных систем. Научн.-техн. Сборник. - Вып. 16. - 2013.

42. Амбуркин К.М., Чуков Г.В., Петров А.И. Результаты испытаний изделий твердотельной СВЧ-электроники на основе соединений АЗВ5 при воздействии специальных факторов // Тезисы докладов конференции молодых специалистов ФГУП "НПП "Исток". - 2013. - С. 22.