

На правах рукописи

**БОЙЧЕНКО ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ОТКАЗОВ  
ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН  
НА КРЕМНИЕВЫХ, КАРБИДКРЕМНИЕВЫХ  
И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ**

05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники  
и систем управления

**Автореферат диссертации**  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Автор:

Москва – 2009 г.

Работа выполнена в Московском инженерно-физическом институте (государственном университете).

Научный руководитель      Доктор технических наук, профессор  
Никифоров Александр Юрьевич

Официальные оппоненты:    Доктор технических наук, профессор  
Помазан Юрий Викторович  
Кандидат технических наук  
Фигуров Валерий Сергеевич

Ведущая организация:        ФГУ «22 ЦНИИИ Минобороны России»

Защита состоится 15 июня 2009 г. в 15 час. 00 мин.

На заседании диссертационного совета Д212.130.02

в Московском инженерно-физическом институте (государственном университете)

по адресу: 115409 Москва, Каширское шоссе, 31, тел. 324-84-98, 323-91-76

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ

Автореферат разослан        мая 2009 г.

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

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук,  
профессор



П.К. Скоробогатов

## Общая характеристика работы

Диссертация направлена на решение научно-технической задачи разработки и развития расчетно-экспериментальных методов моделирования радиационных эффектов в пьезопреобразователях механических величин (ПМВ) на кремниевых, карбидкремниевых и диэлектрических структурах, имеющей большое значение для создания новых перспективных радиационно-стойких элементов, устройств и систем управления, сбора и обработки информации военного, космического и другого специального назначения, определения возможных областей использования и повышения эффективности их применения.

**Актуальность темы диссертации** обусловлена необходимостью разработки и развития эффективных методов расчетно-экспериментального моделирования радиационных эффектов в ПМВ на кремниевых, карбидкремниевых и диэлектрических структурах как нового важного класса изделий микроэлектроники в условиях ограниченных возможностей определения информативных параметров преобразователей на испытательных моделирующих установках (МУ) и имитаторах.

Перспективным направлением развития аппаратуры военного, космического и другого специального назначения, является создание новых классов изделий на основе автономного и полуавтономного принципа функционирования. Перспективной элементной базой для новых систем, отвечающей требованиям по надежности, ресурсу, массогабаритным показателям, энергопотреблению являются изделия микросенсорики и микросистемной техники, выполненные по технологиям микроэлектроники. Создание таких изделий предполагает использование в их составе широкой номенклатуры элементов и систем сбора и обработки информации, в частности, пьезопреобразователей механических величин - давления, ускорения, силы и т.д. Современный пьезопреобразователь механической величины представляет собой интегрированное устройство, выполненное в едином конструктивно-технологическом базисе, в состав которого, как правило, входят первичный пьезопреобразователь механической величины, предназначенный для преобразования сигнала измерительной или управляющей информации в электрический сигнал и вторичный преобразователь (ВП), выполняющий функцию преобразования, обработки и коммутации электрического сигнала и, как правило, реализованный в виде аналоговой микросхемы.

Современные тактико-технические требования, предъявляемые к микросистемам специального назначения, определяют условия их эксплуатации при радиационных воздействиях. При этом одними из наиболее уязвимых к радиационным воздействиям элементов современных электронных систем являются преобразователи механических величин, расположенные в начале измерительной цепи. Т.о. необходимость создания новых перспективных микросистем специального назначения, исследования возможных областей их применения определяет важность и актуальность научных задач исследования и моделирования закономерностей радиационного поведения ПМВ и определения доминирующих механизмов их радиационных отказов в условиях трудностей определения точностных па-

раметров характеристики преобразования в ходе дистанционных измерений и помех при испытаниях на МУ и отсутствия широкого опыта применения имитаторов для этих задач.

Развитие микросистемной техники и ее реализация по технологиям микроэлектроники привело к тому, что в 90х годах преобразователи физических величин и компоненты датчиков (ПФВ и КД) стали восприниматься не только как средства измерений, а в качестве микроэлектронных устройств. Это привело к необходимости подтверждения соответствия ПМВ требованиям нормативной документации на микросхемы по радиационной стойкости. Однако ранее исследования радиационного поведения ПМВ в основном проводились в составе аппаратуры и не позволяли определять наиболее информативные - точностные параметры их радиационной деградации. Т.о. актуальной стала задача развития методических и технических средств расчетно-экспериментального моделирования радиационного поведения ПМВ как отдельного класса микроэлектронных изделий.

Поэтому в качестве **объектов исследования** в диссертации выбраны ПМВ, реализованные по трем конструктивно-технологическим направлениям, в наибольшей степени ориентированным на радиационные применения - кремниевые мембранные пьезопреобразователи (например, серий ИПД, ТДМ, АВИ - ГУ НПК «Технологический центр» МИЭТ), - карбидкремниевые мембранные пьезопреобразователи (Центр Микротехнологии и Диагностики СПбГЭТУ) и - пьезокерамические преобразователи. В настоящее время модели, методические и технические средства определения доминирующих механизмов и характерных уровней радиационных отказов указанных первичных преобразователей пьезорезистивного и пьезокерамического типов отсутствуют.

В условиях запрета натуральных облучательных опытов и ограниченных возможностей МУ широко используются имитационные методы радиационных исследований изделий микроэлектроники, позволяющие существенно расширить систему контролируемых параметров и повысить информативность результатов. Однако, опыт системного использования имитационных методов радиационных исследований для пьезорезистивных и, особенно, для пьезокерамических преобразователей отсутствует. Т.о. актуальным становится исследование возможностей применения, развитие и адаптация имитационных методов оценки и прогнозирования радиационной стойкости ПМВ.

Отдельной задачей является выбор системы параметров-критериев работоспособности ПМВ, как самостоятельного класса изделий микроэлектроники, и разработка методик их определения в процессе радиационного эксперимента.

Наиболее распространенными элементами вторичных преобразователей (ВП) являются микросхемы операционных усилителей (ОУ), интегральных компараторов напряжения (ИКН) и аналоговых ключей и коммутаторов (АКК). В многочисленных работах широко представлены исследования радиационного поведения аналоговых микросхем, в результате чего были разработаны методические и технические средства оценки их радиационной стойкости. Однако в последнее время произошла существенная модернизация тех-

нологии производства аналоговых микросхем с использованием новых технологических норм и топологических решений (ОУ 140, 1463, 1467 серий; ИКН , 521 и 1467 серий; АКК 590 серии), а увеличение функциональной сложности систем обработки и коммутации выходного сигнала привело к широкому использованию специализированных БИС. Испытания на МУ, проводимые до недавнего времени, не обладали достаточной информативностью из-за невозможности контроля большинства информативных параметров аналоговых микросхем вследствие дистанционного характера измерений и больших уровней помех на МУ. Т.о. необходимо провести расчетно-экспериментальное моделирование доминирующих механизмов радиационных отказов современных аналоговых узлов вторичных преобразователей для учета новых технологических и топологических решений с использованием преимуществ имитационных методов. При этом важно определить влияние радиационной деградации параметров ВП на стойкость ПМВ в целом.

Значимость и актуальность темы диссертации отражена в «Основах политики Российской Федерации в области развития электронной компонентной базы на период 2010 года и дальнейшую перспективу», утвержденных Президентом Российской Федерации 12.04.2002, в соответствии с которыми создание радиационно-стойкой электронной компонентной базы (ЭКБ) отнесено к одной из основных задач в области ее дальнейшего развития при разработке, производстве и применении в стратегически значимых системах.

### **Состояние исследований по проблеме**

Базовые физические представления о природе взаимодействия радиационных воздействий с полупроводниковыми структурами ИС сформированы в трудах Ухина Н.А., Ладыгина Е.А., методологические подходы и принципы моделирования основных радиационных эффектов в элементах ИС развиты в работах д.т.н. Агаханяна Т.М., д.т.н. Скоробогатова П.К. (эффекты мощности дозы в кремниевых приборах и ИС), д.т.н. Першенкова В.С., д.т.н. Зинченко В.Ф., к.т.н. Согаяна А.В. (дозовые эффекты в биполярных и МОП-структурах), д.т.н. Чумакова А.И. (эффекты воздействия отдельных ядерных частиц в БИС), д.т.н. Улимова В.Н., к.т.н. Романенко А.А., к.т.н. Фигурова В.С. (методы радиационных испытаний). Однако все эти работы практически не рассматривали ПМВ и не учитывали их специфики в качестве объектов радиационных исследований.

Вопросы разработки, изготовления и развития преобразователей механических величин и датчиков широко представлены в трудах д.т.н. Вернера В.Д., д.т.н. Кузина А.Ю., д.т.н. Лучинина В.В., д.т.н. Саурова А.Н., д.т.н. Тельца В.А., д.т.н. Чаплыгина Ю.А., д.т.н. Шелепина Н.А., к.т.н. Ваганова В.И. и многих других специалистов. Однако в этих трудах практически не рассматривались вопросы моделирования радиационных эффектов в ПМВ.

В работах к.т.н. Подлепецкого Б.И. и к.т.н. Никифоровой М.Ю. рассмотрены дозовые эффекты в химических датчиках (водорода и др.) на МОП-структурах, в работах д.т.н. Мордковича В.Н. и д.т.н. Мальцева П.П. – дозовые эффекты в преобразователях магнитной индукции, однако доминирующие механизмы их радиационных отказов отличны от ПМВ.

Обширное исследование радиационного поведения интегральных преобразователей информации (ИПИ) проведено в работах д.т.н. Никифорова А.Ю., которым предложен методологический подход к развитию теоретических и экспериментальных методов моделирования доминирующих радиационных эффектов и закономерностей радиационного поведения современных сложно-функциональных ИПИ при воздействии импульсного ИИ в широком диапазоне уровней воздействий и с учетом конструктивно-технологической реализации, режимов и условий работы. Однако при этом пьезорезистивные преобразователи затронуты лишь кратко наряду с многими другими классами ИПИ, а пьезокерамические преобразователи вообще не анализировались. Отметим, что работы Никифорова А.Ю. ограничивались рассмотрением только эффектов воздействия импульсного ИИ на ИПИ практически без анализа эффектов стационарных радиационных воздействий.

В ранее проведенных исследованиях широко освещена проблема использования лазерного и рентгеновского имитационного моделирования при проведении радиационных исследований микросхем. Однако использование в ПМВ новых материалов (пьезокерамики и т.д.) привело к необходимости анализа адекватности применения и выбора оптимальных параметров имитаторов и в целом рационального выбора испытательных установок.

Новые технологические и топологические решения (проектные нормы, БиКМОП и т.д.) требуют развития методических и технических средств оценки радиационной стойкости аналоговых элементов вторичных преобразователей (ОУ, ИКН, АКК и др.).

Таким образом, диссертация направлена на разрешение научного противоречия, которое заключается одновременно в необходимости и невозможности обеспечить достоверное расчетно-экспериментальное моделирование доминирующих радиационных эффектов в ПМВ на кремниевых, карбидкремниевых и диэлектрических структурах, оставаясь в рамках имеющихся методов и средств теоретического и экспериментального моделирования без их существенного научно-технического развития.

**Целью** диссертации является развитие научных методов и разработка методических и технических средств моделирования радиационных эффектов в пьезопреобразователях механических величин на кремниевых, карбидкремниевых и диэлектрических структурах с учетом характеристик радиационных воздействий, а также режимов и условий работы преобразователей в аппаратуре.

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

- Анализ тенденций развития ЭКБ и особенностей применения пьезопреобразователей механических величин в радиационно-стойкой аппаратуре.

- Выявление, теоретический анализ, моделирование и экспериментальные исследования основных закономерностей поведения, доминирующих радиационных эффектов и механизмов отказов в первичных пьезопреобразователях на кремниевых, карбидкремниевых и диэлектрических структурах и их элементах при стационарных и импульсных ионизирующих воздействиях.

- Анализ адекватности и методических особенностей имитационного экспериментального моделирования первичных пьезопреобразователей механических величин на кремниевых, карбидкремниевых и диэлектрических структурах, развитие методики дозиметрического сопровождения имитационных исследований применительно к ПМВ для различных вариантов конструктивного исполнения изделий.

- Разработка радиационно-испытательного комплекса, обеспечивающего возможность одновременного задания радиационного воздействия, температуры и измеряемой механической величины, разработка рекомендаций по выбору необходимого и достаточного набора параметров-критериев годности и обеспечению радиационной стойкости пьезопреобразователей механических величин.

- Исследование и моделирование доминирующих механизмов радиационных отказов аналоговых элементов вторичных преобразователей с учетом расширенной системы их информативных параметров-критериев работоспособности, получение и систематизация оригинальных экспериментальных данных о радиационном поведении вторичных преобразователей в широких диапазонах режимов работы, температуры и уровней воздействий.

#### **Научная новизна работы:**

1. Разработана модель ионизационного отклика кремниевых мостовых пьезопреобразователей, основанная на численном решении фундаментальной системы уравнений в программном пакете «DIODE-2D», в соответствии с которой синфазный отклик выходного напряжения преобразователей на импульсное ионизирующее воздействие определяется реакцией паразитных диодных структур между контактами пьезорезисторов и подложкой, а парафазный - асимметрией топологии преобразователя.

2. Разработана модель ионизационного отклика мостовых пьезопреобразователей на карбидкремниевых структурах, основанная на численном решении фундаментальной системы уравнений в программном пакете «DIODE-SiC», в соответствии с которой основным механизмом отклика преобразователей является радиационно-индуцированная ионизационная проводимость диэлектрических слоев.

3. Разработана модель ионизационного отклика пьезокерамических преобразователей, учитывающая распределение центров захвата дырок на межзеренной границе, в соответствии с которой зависимость ионизационного тока преобразователя от интенсивности ионизирующего воздействия является сублинейной, что соответствует выводам теории множественного захвата и подтверждается экспериментально.

4. Установленное влияние накопленного радиационно-индуцированного положительного заряда на величину ионизационного тока пьезокерамических преобразователей приводит к необходимости совместного анализа эффектов дозовых и мощности дозы, что определяет неадекватность для этих задач методов лазерного имитационного моделирования. Экспериментально показано, что ионизационный отклик пьезокерамических преобразователей при воздействии лазерных имитаторов определяется термомеханическими про-

цессами в результате импульсного неоднородного энерговыведения и вторичным пироэфф-  
фектом.

5. Результаты проведенного теоретического моделирования в системе GEANT показывают, что относительные значения поглощенной дозы в пьезокерамических преобразователях уменьшаются на порядок на глубине до 40 мкм, что не позволяет использовать рентгеновские имитаторы для моделирования дозовых эффектов в пьезокерамике в связи с существенной неоднородностью распределения поглощенной дозы в чувствительном элементе пьезокерамического преобразователя.

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

1. Получены оригинальные результаты экспериментальных исследований эффектов смещения и дозовых эффектов в пьезопреобразователях механических величин на кремниевых и карбидкремниевых структурах с использованием моделирующих установок. Установлено, что стойкость пьезопреобразователей механических величин по указанным эффектам существенно (более чем на порядок величины) выше по сравнению с элементами вторичных преобразователей. Результаты диссертации внедрены в ГНЦ НПК «Технологический центр» МИЭТ, ФГУП ФНПЦ «НИИИС им. Е.Ю.Седакова» и ОАО «ЭНПО СПЭЛС» при разработке и радиационных испытаниях интегральных преобразователей давления и ускорения (ИПД, ПДМ, АВИ), использованы в отчетности по НИР, выполненным по заказам Минобороны России и предприятий оборонного комплекса (НИР «Мида», «Вельвет», «Латинист» и др.).

2. Получены оригинальные результаты экспериментальных исследований аналоговых элементов вторичных преобразователей, выполненных по биполярной, КМОП, БиКМОП, КМОП КНС технологиям, в том числе операционных усилителей, компараторов напряжения, аналоговых ключей и коммутаторов и специализированных СБИС. Впервые исследования проводились с контролем расширенной системы параметров критериев радиационной стойкости в диапазоне температур. Разработано более 50 методик испытаний элементов вторичных преобразователей, результаты испытаний внедрены в ОАО «Ангстрем», ОАО «Светлана-Полупроводники», ОАО «НИИМЭ и Микрон», ПКК «Миландр» и ОАО «ЭНПО СПЭЛС».

3. Предложена методика выбора информативного набора параметров-критериев радиационной стойкости пьезопреобразователей механических величин на кремниевых, карбид кремниевых и диэлектрических структурах, основанная на контроле электрических и точностных параметров в процессе воздействия.

4. Разработана методика дозиметрического сопровождения имитационных радиационных исследований пьезопреобразователей механических величин на кремниевых, карбид кремниевых и диэлектрических структурах, базирующаяся на методе калибровки по результатам испытаний на моделирующих установках и методе расчетной дозиметрии с



учетом наличия слоев различных материалов в составе конструкции, сложности формы и большого объема чувствительных областей элементов.

5. Полученные в диссертации результаты реализованы в Нормативных документах Минобороны России (ОСТ В 11.073.013 часть 10), а также в более чем 50 программах-методиках и протоколах испытаний ПМВ и элементов вторичных преобразователей, согласованных с ФГУ «22 ЦНИИИ Минобороны России» в рамках Государственной Программы Вооружений.

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

1. Расчетная модель ионизационного отклика кремниевых мостовых пьезопреобразователей, связывающая радиационно-индуцированный разбаланс их выходного напряжения при импульсном ионизирующем воздействии с ионизационным током, протекающий через паразитные диодные структуры между контактами пьезорезисторов и подложкой. Модель позволяет прогнозировать величину и длительность синфазной и парафазной составляющих отклика выходного разбаланса пьезопреобразователей при импульсном ионизирующем воздействии.

2. Расчетная модель ионизационного отклика карбидкремниевых мостовых пьезопреобразователей, связывающая радиационно-индуцированный разбаланс их выходного напряжения при импульсном ионизирующем воздействии с радиационно-индуцированной ионизационной проводимостью диэлектрических слоев. Модель позволяет прогнозировать величину и длительность выходного разбаланса пьезопреобразователей при импульсном ионизирующем воздействии.

3. Расчетная модель зависимости ионизационного тока пьезокерамических преобразователей от интенсивности ионизирующего воздействия, учитывающая распределение центров захвата дырок на межзеренной границе и объясняющая экспериментально наблюдаемые сублинейный характер данной зависимости и уменьшение величины ионизационного тока пьезокерамических преобразователей при накоплении радиационно-индуцированного положительного заряда.

4. Методики и реализующий их экспериментальный комплекс, позволяющие проводить определение всех информативных параметров пьезопреобразователей механических величин при совместном воздействии ионизирующих излучений, измеряемой механической величины и температуры, а также полученные с их использованием оригинальные результаты экспериментальных исследований радиационного поведения типовых представителей пьезопреобразователей механических величин.

5. Методики и оригинальные результаты экспериментальных исследований радиационной стойкости основных аналоговых элементов вторичных преобразователей (операционные усилители, компараторы, аналоговые коммутаторы, БИС управления), обеспечивающие контроль расширенной системы параметров-критериев в диапазоне температур,

что повышает достоверность определения показателей радиационной стойкости пьезопреобразователей механических величин в целом.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации докладывались на Международных научных конференциях по радиационным эффектам RADECS-2001 (Франция, 2001г.) и RADECS-2007 (Франция, 2007г.); на научных сессиях МИФИ (Москва, 2000-2009 гг.); на Российских научных конференциях “Радиационная стойкость электронных систем” (Лыткарино, 2000-2008 гг.); на научной конференции “Микро– и наноэлектроника” (2001-2008 гг.).

**Публикации:** Основные результаты диссертации опубликованы в 15 работах (в период с 2000 по 2009 гг.), в том числе 1 – в реферируемом журнале и 4 - без соавторов.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация содержит 150 страниц, в том числе 82 рисунка, 12 таблиц, список литературы из 59 наименований и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

### **Содержание диссертации**

**Введение** обосновывает актуальность работы, выбор объектов исследований, обобщает краткие результаты анализа ранее выполненных научных работ по тематике и на этой основе обосновывает наличие научного противоречия, которое заключается одновременно в необходимости и невозможности обеспечить достоверное расчетно-экспериментальное моделирование доминирующих радиационных эффектов в ПМВ на кремниевых, карбид-кремниевых и диэлектрических структурах, оставаясь в рамках имеющихся методов и средств теоретического и экспериментального моделирования без их существенного научно-технического развития.

**Первая глава** посвящена анализу проблемной ситуации в области развития ПМВ для радиационно-стойких систем; в ней описываются типовая структура и особенности построения современных пьезопреобразователей механических величин, радиационные эффекты в ПМВ и существующие методы их моделирования, приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие высокую потенциальную стойкость ПМВ пьезорезистивного типа на кремнии и карбиде кремния к воздействию эффектов смещения и дозовым эффектам, обоснована постановка задач исследований.

**Вторая глава** содержит анализ доминирующих механизмов ионизационной реакции ПМВ на кремниевых структурах, модель радиационного поведения ПМВ на кремниевых структурах при ИИВ, а также методы повышения радиационной стойкости ПМВ на кремниевых структурах.

**Третья глава** содержит описание доминирующих радиационных эффектов в ПМВ на карбидкремниевых структурах, обоснование адекватности применения лазерного имитационного моделирования эффектов мощности дозы в ПМВ на карбидкремниевых структу-

рах, моделирование и экспериментальные исследования эффектов мощности дозы в ПМВ на карбидкремниевых структурах.

**Четвертая глава** содержит анализ применимости имитационных методов исследований эффектов дозы и мощности дозы в ПМВ на пьезокерамических структурах, описывается методика дозиметрического сопровождения имитационных радиационных исследований ПМВ и определяются границы их применимости, приводится модель доминирующих механизмов радиационных отказов ПМВ на пьезокерамических структурах с учетом совместного воздействия дозовых эффектов и эффектов мощности дозы.

**Пятая глава** посвящена исследованиям радиационной стойкости номенклатуры ИС вторичных преобразователей с учетом расширенной системы параметров критериев в диапазоне температур, разработке рекомендаций по оптимизации системы параметров критериев радиационной стойкости ПМВ в целом с учетом особенностей радиационного поведения первичного пьезопреобразователя и элементов вторичных преобразователей.

Предложена методика выбора критериальных параметров стойкости ПМВ на кремниевых структурах при воздействии эффектов мощности дозы, описан универсальный комплекс для расчетно-экспериментального моделирования доминирующих радиационных эффектов в ПМВ, позволяющий проводить исследования при совместном воздействии ионизирующих излучений, измеряемой механической величины и температуры.

**Заключение** обобщает основные теоретические и практические результаты диссертации.

### **Анализ проблемной ситуации в области развития ПМВ на кремниевых, карбид кремниевых и диэлектрических структурах для радиационно-стойких систем**

В результате анализа литературных источников и результатов исследований отечественных ПМВ установлено, что подавляющее большинство современных ПМВ построено на основе первичных преобразователей (ПП) пьезорезистивного типа на кремнии и карбиде кремния. Применение новых для микроэлектроники материалов привело к широкому распространению ПМВ на диэлектрических структурах, в частности на пьезокерамике. Обобщенная структура современного ПМВ приведена на рис. 1.

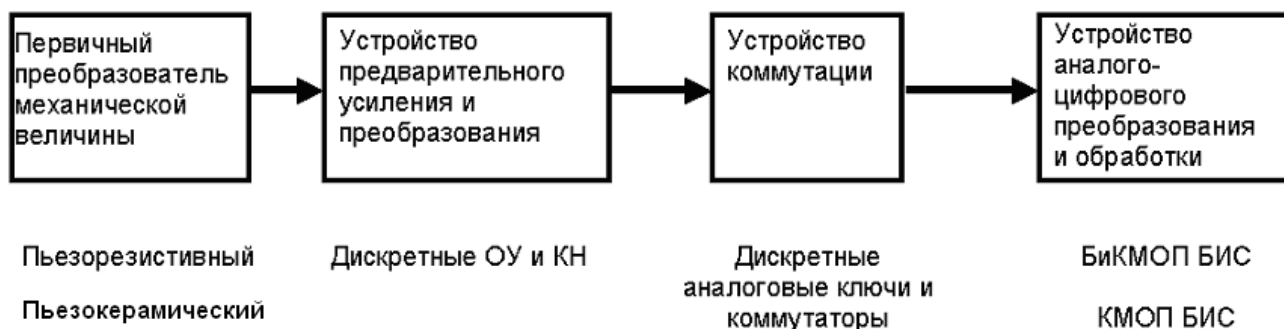


Рис. 1. Структура интегрального пьезопреобразователя механической величины.

Современные ПП на кремнии и карбиде кремния (SiC) построены по мостовой пьезорезистивной схеме. В ПП на диэлектрических структурах используются пьезоэлектрические свойства материалов, в частности пьезокерамик (PZT и т.д.).

ПМВ пьезорезистивного типа (кремниевые и карбидкремниевые) изготавливаются в рамках базовой микроэлектронной технологии, что обосновывает возможность применения существующих в микроэлектронике методических и технических подходов к оценке их радиационного поведения. Результаты впервые проведенных в работе экспериментальных исследований радиационного поведения показывают более высокую стойкость первичных кремниевых и карбидкремниевых пьезопреобразователей к дозовым эффектам и структурным повреждениям по сравнению с типовыми уровнями для микросхем (рис. 2).

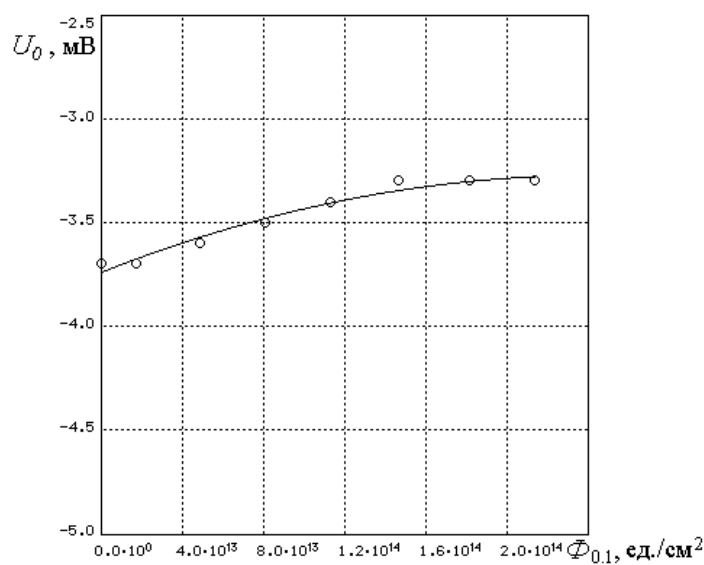


Рис. 2а. Зависимость выходного напряжения пьезорезистивного кремниевого преобразователя от флюенса нейтронов.

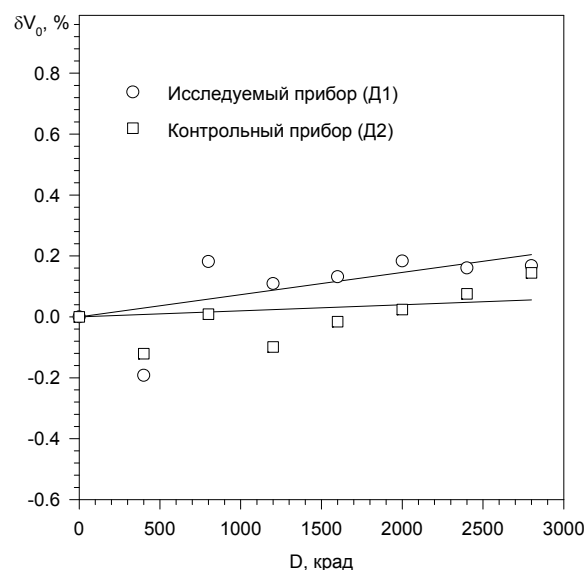


Рис. 2б. Дозовая зависимость напряжений разбаланса исследуемого и контрольного пьезорезистивных кремниевых преобразователей относительно начального значения.

Измерение электрических параметров пьезорезистивного моста на основе SiC, до и после нейтронного облучения ( $1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ) показало незначительные изменения номинального сопротивления и начального разбаланса моста, которые находятся в пределах погрешности измерения этих параметров на кристалле с помощью внешних зондов.

Экспериментальные результаты показывают, что в диапазоне доз до  $3 \cdot 10^6$  ед. изменение чувствительности пьезорезистивного кремниевого преобразователя не превышает 0.1%, что находится в пределах погрешности эксперимента (рис 2б).

В результате экспериментальных исследований на МУ установлено, что при уровнях воздействия до  $10^6$  ед. изменение напряжения разбаланса пьезорезистивного моста на основе SiC не превышает 2%. Это говорит о высокой, по сравнению с ИС, стойкости карбидкремниевых пьезопреобразователей к дозовым эффектам.

Обобщенный анализ проблемной ситуации показал невозможность решения поставленных задач с помощью существующих на момент начала работы методических и технических средств радиационного эксперимента и радиационного моделирования ПМВ без их развития и подтвердил необходимость и актуальность темы и цели диссертации.

### **Анализ стойкости мостовых пьезопреобразователей МВ на кремнии к воздействию импульсного ионизирующего излучения**

В качестве основного средства расчетного моделирования эффектов мощности дозы в мостовых пьезопреобразователях МВ на кремнии принят программный комплекс «DIODE-2D», основанный на численном решении фундаментальной системы диффузионно-дрейфовых уравнений непрерывности, переноса и Пуассона в двумерном приближении на основе метода прямых и жестко-устойчивых методов Гира.

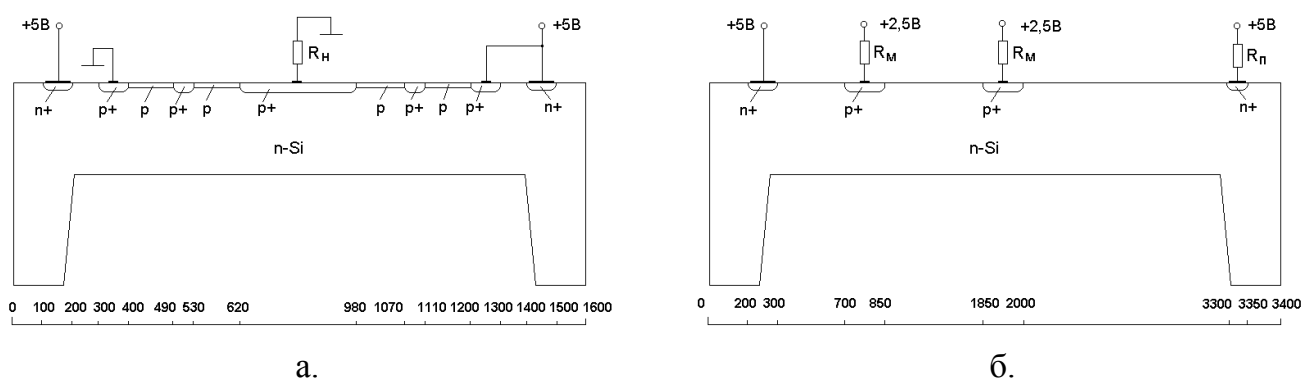


Рис.3. Эквивалентная двумерная схема мостового преобразователя для анализа синфазной (а) и парафазной (б) составляющих ионизационного отклика выходного напряжения.

Проведенное расчетное моделирование (рис. 3а) показало, что синфазная составляющая ионизационного отклика кремниевых пьезорезистивных ПП определяется паразитными диодными структурами, образованными пьезорезисторами и соединительными диффузионными областями. Парафазная составляющая отклика определяется асимметрией, связанной с различным расположением пар резисторов по отношению к контакту питания, соединенному с подложкой (рис. 3б). Результаты расчетного моделирования находятся в хорошем качественном и количественном соответствии с полученными экспериментальными данными (рис. 4, 5).

С помощью расчетного моделирования установлено, что повышение УБР мостовых ПМВ на кремнии достигается улучшением симметрии топологии преобразователя. Уменьшение ВПР преобразователей достигается вводом дополнительного заземления нижней части мембраны либо снижением времени жизни неосновных носителей заряда.

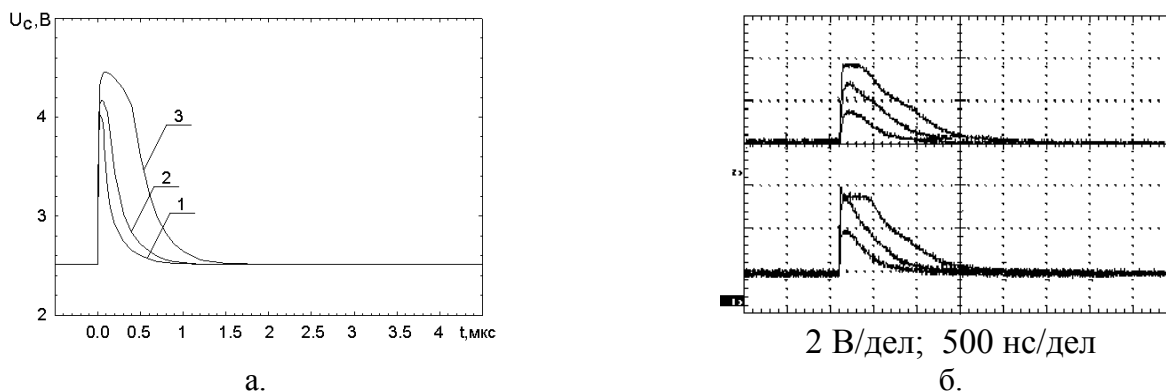


Рис. 4. Расчетные (а) и экспериментальные (б) временные зависимости синфазной составляющей ионизационной реакции мостового преобразователя давления при воздействии импульса ИИ мощностью дозы  $1,1 \cdot 10^9$  (1),  $1,8 \cdot 10^9$  (2) и  $4,3 \cdot 10^9$  (3) рад(Si)/с.

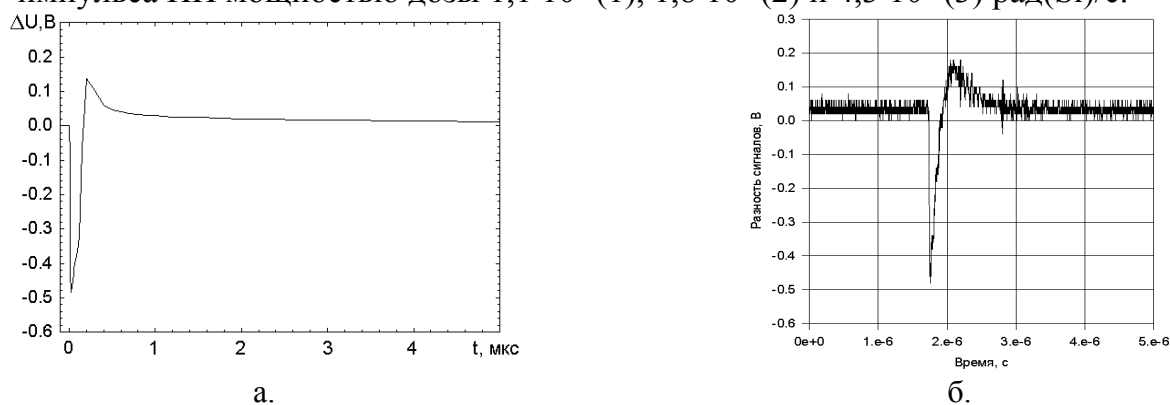


Рис. 5. Расчетные (а) и экспериментальные (б) временные зависимости парафазной составляющей выходного напряжения мостового преобразователя давления при воздействии ИИ мощностью дозы  $2,0 \cdot 10^9$  рад(Si)/с.

### Анализ стойкости мостовых пьезопреобразователей МВ на карбиде кремния к воздействию импульсного ионизирующего излучения

Анализ ионизационной реакции мостовых ПМВ на карбиде кремния с использованием программного комплекса «DIODE-SiC» показал, что основным механизмом ионизационной реакции приборов данной конструкции является наведенная ионизационная проводимость диэлектрических слоев. Асимметрия площадей диэлектрических слоев может приводить к тому, что уже при относительно невысоких уровнях ИИ (порядка  $10^{10}$  ед./с) наблюдается существенный разбаланс моста, достигающий значений 0,4В во время воздействия. При дальнейшем росте мощности дозы ИИ разбаланс моста уменьшается, однако при этом резко уменьшается его чувствительность за счет шунтирования рабочих сопротивлений моста ионизационной проводимостью диэлектрических слоев (рис. 6). Модуляция сопротивления резисторов импульсом ИИ практически не сказывается на параметрах ионизационной реакции датчика. Это связано с чрезвычайно низкими значениями подвижности и времени жизни носителей в используемом карбиде кремния (рис. 7). Результаты моделирования качественно и количественно подтверждены полученными экспериментальными данными.

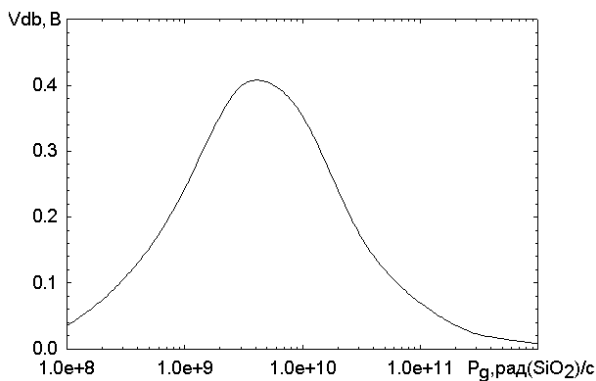


Рис. 6. Расчетная зависимость напряжения разбаланса на выходе SiC пьезопреобразователя от мощности дозы ИИ с учетом ионизационной проводимости диэлектрика и асимметрии моста.

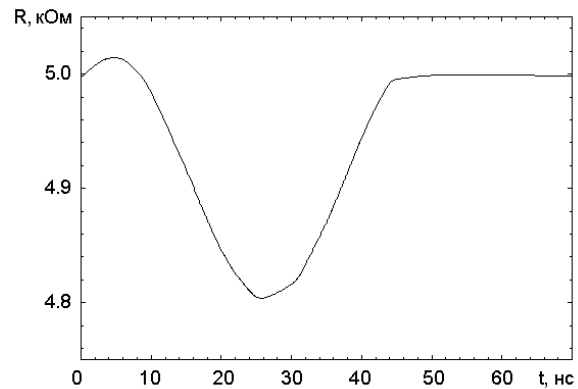


Рис. 7. Результаты расчетов модуляции сопротивления пьезорезистора SiC преобразователя при воздействии 22 нс импульса ИИ с максимальным уровнем  $10^{12}$  рад(SiC)/с.

Время потери работоспособности пьезопреобразователей на основе карбида кремния практически полностью определяется длительностью импульса ИИ (без заметных запаздывающих эффектов).

Расчетным путем показано, что повышение стойкости SiC пьезопреобразователей к воздействию импульса ИИ возможно при увеличении толщины диэлектрических слоев прибора и выполнении топологии разводки металлизации прибора с максимально возможной симметрией по отношению к площади каждого из выводов моста.

Анализ зависимости коэффициента поглощения светового излучения от длины волны основных политипов карбида кремния показал, что для целей лазерного имитационного моделирования наиболее пригоден участок вблизи 3 эВ в области полосы основного поглощения.

Проведенная теоретическая оценка дает для энергии ионизации 6H-SiC при плотности  $3,166 \text{ г/см}^3$  величину энергии ионизации равную 9 эВ, близкую к экспериментально определенному значению  $9,3 \pm 1$  эВ. Следовательно, фактор ионизации карбида кремния составляет  $g_0 \cong 2,3 \cdot 10^{13}$  пар/( $\text{см}^3 \text{ рад}$ ). Поэтому эквивалентная мощность дозы у поверхности карбида кремния, создаваемая лазерным имитатором (ЛИ), при коэффициенте отражения  $R = 0,21$  может быть оценена по формуле:

$$P_{\text{экв}}(0,t) = 0,79\alpha[I_{\text{л}}(t)/(2,3 \cdot 10^{13} \text{ hv})]. \quad (1)$$

Выбор оптимальной волны ЛИ для целей имитации требует учета технологических особенностей конкретных типов приборов на основе SiC. Так, для тонкопленочных пьезопреобразователей на основе карбида кремния с толщиной активного слоя до 1 мкм можно использовать практически весь диапазон длин волн короче 0,41 мкм.

## Модель радиационного поведения ПМВ на диэлектрических структурах при импульсном ионизирующем воздействии

Принципиальное значение для прогнозирования радиационного отклика пьезопреобразователей на PZT-керамике имеет зависимость ионизационного тока от интенсивности ИИ. Специфика ионизационной реакции PZT-керамик обусловлена совместным вкладом кристаллитов и межзеренной границы. Кристаллофаза представляет собой зерна  $Pb(Zr,Ti)O_3$  ( $E_g \sim 3.5$  эВ) с характерными размерами от долей до десятков микрон. В процессе формирования PZT происходит вытеснение избыточного свинца на границы кристаллитов, и образование фазы оксида свинца ( $E_g \sim 1.7$  эВ). При этом именно межзеренная граница играет важнейшую роль в формировании проводимости PZT-керамики. Можно ожидать, что межзеренная граница, вследствие высокой дефектности, вносит также важнейший вклад в протекание рекомбинационных процессов. По мере снижения доли кристаллической фазы и увеличения доли стеклофазы в пьезокерамике наблюдается уменьшение показателя зависимости ионизационного тока от мощности дозы ИИ  $I \propto P^a$  от 1 до  $\sim 0,7$ .

Для описания радиационной проводимости пьезокерамик применяется модель множественного захвата (Роуза-Фаулера). Она, в частности, предполагает монополярный (электронный) тип проводимости и бимолекулярный характер рекомбинации без участия ловушек. Применительно к радиационной составляющей проводимости PZT керамики указанные предпосылки не являются очевидными, особенно в части канала рекомбинации.

Предполагаемая в работе модель ионизационной реакции PZT-керамики выглядит следующим образом. Электронно-дырочные пары, генерируемые излучением в объеме кристаллитов, разделяются полем и перемещаются к границам зерен. Часть носителей рекомбинирует в объеме кристаллита, часть – захватывается глубокими приграничными центрами. Оставшиеся носители преодолевают барьер и переходят в межзеренную область. В этой области, вследствие высокой концентрации структурных дефектов, протекают активные рекомбинационные процессы.

Рассматривалась рекомбинация через ловушки, распределенные вблизи дна зоны проводимости по экспоненциальному закону:

$$D(E) = \frac{N_t}{E_0} \exp\left(-\frac{E_c - E}{E_0}\right) \quad (2)$$

Результирующей темп рекомбинации носителей у границы зерен и в межзеренной области в этом случае составит:

$$U = \frac{c_p N_t}{N_c} np \cdot \frac{1}{x} \left(1 + \frac{1}{x}\right)^{-\beta} {}_2F_1\left(\beta, \beta; 1 + \beta; \frac{1}{1+x}\right) \quad (3)$$



где  $x = \frac{nc_n + pc_p}{N_c c_n}$ ,  $\beta = \frac{kT}{E_0}$ ,  ${}_2F_1$  - гипергеометрическая функция,  $N_c$  – эквивалентная плотность состояний дефектов в области проводимости,  $N_t$  – объемная плотность дефектов,  $E_0$  – параметр энергетического распределения ловушек. При относительно малых уровнях возбуждения имеем:

$$n \sim \left( \frac{g}{cN_c N_t} P \right)^{\frac{1}{1+\beta}} \cdot N_c \quad (4)$$

Данный результат, аналогичный выводам теории Роуза-Фаулера, подтверждается экспериментальными результатами (рис. 8).

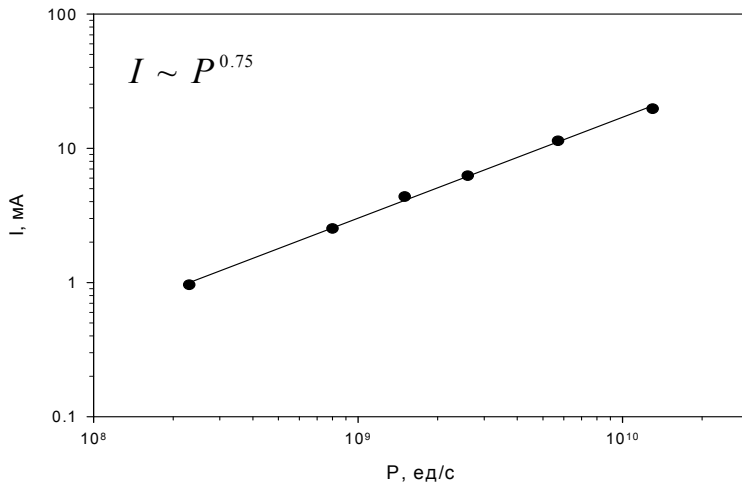


Рис.8. Экспериментальная зависимость ионизационного тока PZT пьезопреобразователя от интенсивности гамма излучения.

Захват ловушками свободных носителей в приэлектродных областях или на границах зерен приводит к появлению внутренних электрических полей, противонаправленных вектору суммарного поля в каждом сегнетоэлектрическом домене. Данное предположение может объяснить отличие мгновенного значения ионизационного тока от его установившегося значения, наблюдавшееся в эксперименте (рис. 9).

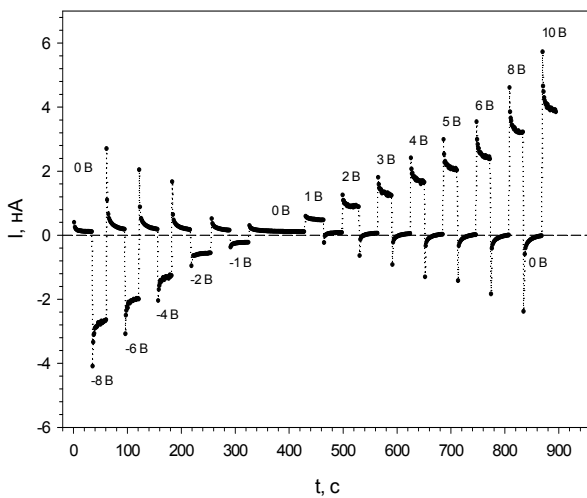


Рис. 9а. Зависимость ионизационного тока PZT преобразователя от времени облучения. Режим «восстановления» соответствовал облучению при смещении 0В.

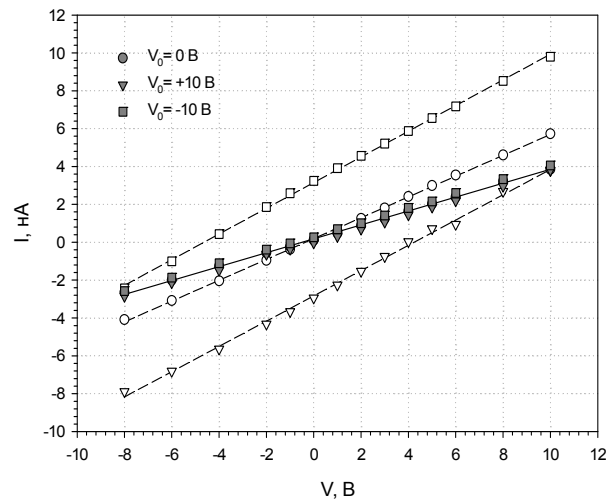


Рис. 9б. Зависимость максимального (белые фигуры) и установившегося (темные фигуры) значения ионизационного тока PZT преобразователя от напряжения смещения.

При переключении полярности внешнего смещения внешнее поле и поле захваченного заряда оказываются сонаправленными, что приводит к увеличению мгновенной составляющей отклика.

При численной оценке модели предполагалось, что захват положительного заряда имеет место в тонких (~ 10-30 нм) слоях возле границ зерен. В этом случае стационарное состояние системы может быть описано системой уравнений:

$$\frac{\partial f_p}{\partial x} + g - U - (N_{ht} - p_t) f_p \sigma_p = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial f_n}{\partial x} + g - U - f_n \sigma_n p_t = 0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = - \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon} p_t \tag{7}$$

$$\frac{\partial p_t}{\partial t} = N_{ht} f_p \sigma_p - p_t (f_p \sigma_p + f_n \sigma_n) \tag{8}$$

$$f_{n,p} = \varphi_T \mu_{n,p} \frac{\partial n_{n,p}}{\partial x} \pm \mu_{n,p} E n_{n,p} \tag{9}$$

$n(0)=p(0)=n(d)=p(d)=0$ , где  $g=k \cdot P$  – темп генерации электрон-дырочных пар при интенсивности  $P$ ,  $N_{ht}$  – плотность глубоких центров захвата положительного заряда,  $p_t$  – плотность захваченного положительного заряда,  $\sigma_n, \sigma_p$  – сечения захвата электронов и дырок,  $U$  – коэффициент рекомбинации,  $d$  – размер зерна.

При типовых значениях  $\sigma_p \sim 3 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ ,  $\sigma_n \sim 1 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$  система уравнений была численно решена для размера зерен 1...10 мкм. Рассчитанная зависимость фототока от приложенного напряжения (рис. 10) носит омический характер до определенного критического значения поля  $E_c$ ,

$$E_c \sim \frac{d}{\mu \tau} \tag{10}$$

где  $\tau$  среднее время жизни носителей заряда в зерне. При  $d=1-10 \text{ мкм}$  и  $\mu \tau \sim 10^{8 \dots 10} \text{ см}^2/\text{В}$ , получаем  $E_c \sim 10^4 - 10^5 \text{ В/см}$ .

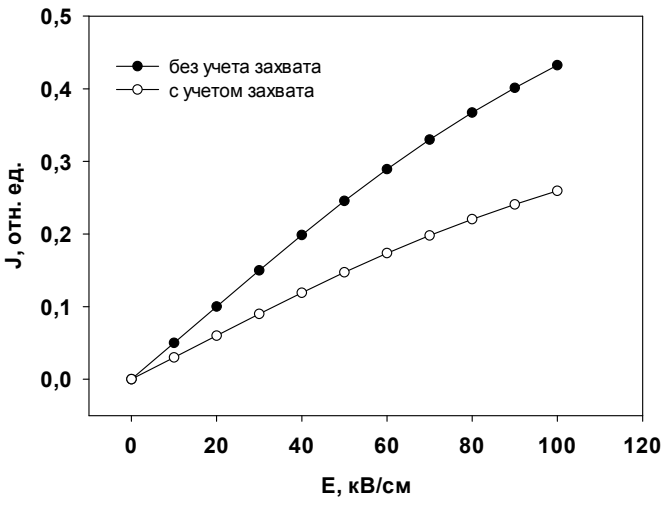


Рис.10. Рассчитанная зависимость фототока PZT пьезопреобразователя от приложенного напряжения.

Выработанные модельные представления подтверждают влияние поля захваченного положительного заряда и хорошо согласуются с экспериментальными данными.

### Особенности имитационного моделирования радиационного поведения ПМВ на диэлектрических структурах

Излучение рентгеновских имитаторов («РЕИМ») обладает относительно мягким спектром, в результате чего необходимым становится учет неоднородности и неравномерности энерговыделения в объеме пьезопреобразователя. На рис. 11 приведено сопоставление расчетного и экспериментального спектров излучения имитатора РЕИМ-М. Расчет проводился в пакете GEANT4 (в рамках подсистемы Penelope) для трубки с Re-анодом (3 мкм) и окном из бериллия (200 мкм). Хорошее согласие расчетного и экспериментального спектров позволяет применять полученные результаты для расчета поглощенных доз, обусловленных излучением имитатора, в чувствительных объемах ПМВ.

На рис. 12 показаны профили распределения поглощенной дозы в чувствительном элементе типового пьезоэлектрического преобразователя PKGS-90LC-R (ф. Murata) при воздействии различных спектров излучения рентгеновских имитаторов. Проведенные в рамках системы GEANT расчеты показывают, что в случае пьезоэлектрических преобразователей на базе титаната-цирконата свинца (PZT) применение имитационных методов не обеспечивает однородности энерговыделения в объеме структуры.

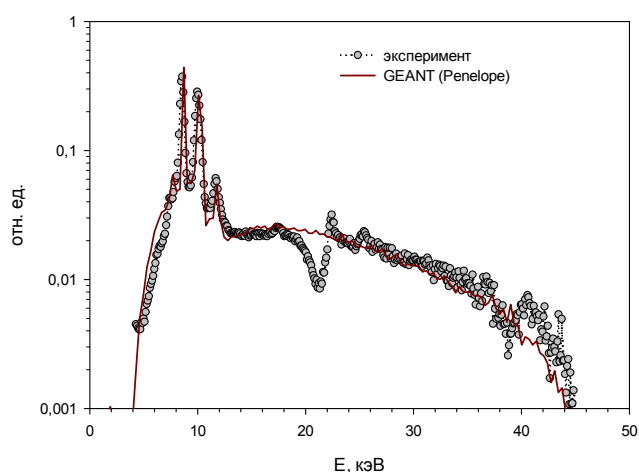


Рис. 11. Спектр излучения имитатора РЕИМ-М фигуры – эксперимент, линия – расчет GEANT.

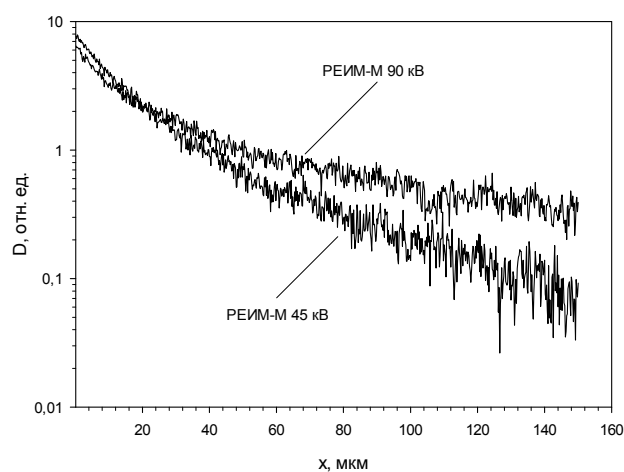


Рис. 12. Расчетные профили распределения поглощенной дозы в PZT пьезоэлектрическом преобразователе.

Помимо равенства энерговыделения в чувствительном объеме от различных видов воздействия (имитаторов и МУ) необходимо учитывать зависимость выхода первичной рекомбинации в диэлектрике от вида и энергии ИИ и напряженности поля в чувствительной области. Оценка «эффективной» дозы  $D_{\text{eff}}$  в чувствительном объеме может быть получена на основании соотношения:

$$D_{eff} = \frac{f_{yx}(E)}{f_{y0}(E)} D_x, \quad (11)$$

где символы "x" и "0" относятся к рентгеновскому и моделируемому излучению соответственно;  $f_y(E)$ - выход первичной рекомбинации, зависящий от электрического поля  $E$ ;  $D_x$ - расчетная поглощенная доза рентгеновского излучения в чувствительном объеме.

Проведенные в ходе работы экспериментальные исследования показали (рис. 13), что реакция на воздействие импульса лазерного излучения обусловлена процессами релаксации заряда, индуцированного за счет пирозффекта, и колебательными модами преобразователя. Колебательный процесс содержит моды, соответствующие основной резонансной частоте преобразователя (20 кГц) и моды, соответствующие распространению продольных акустических волн. Для адекватного имитационного моделирования эффектов мощности дозы в ПМВ на пьезоэлектриках необходимо учитывать:

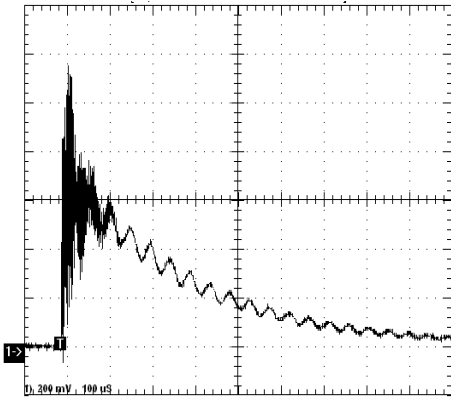


Рис.13. Импульсная реакция PZT преобразователя при воздействии импульса лазерного излучения.

– вторичный пирозффект, являющийся результатом пьезоэлектрической поляризации образца при его деформации за счет теплового расширения материала и определяющий длительность отклика пьезоэлектрического преобразователя на воздействие лазерного излучения. Определение поля в пьезоэлектрике должно проводиться совместно с определением деформации:

$$D_n = d_{nj} \sigma_j + \gamma_n \Delta T + \varepsilon_{nj} E_j \quad (12a)$$

$$S_n = s_{nj} \sigma_j + d_{jn} E_j \quad (12б)$$

$$\nabla \vec{D} = \frac{\rho_t}{\varepsilon_0} \quad (12в)$$

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (12г)$$

где  $D_n$ ,  $E_n$  – компоненты вектора электрической индукции и напряженности поля, соответственно,  $S_n$  – компоненты тензора деформации в сокращенной нотации,  $d_{nj}$  – компоненты пьезоэлектрического модуля,  $s_{nj}$  – компоненты тензора упругой податливости,  $\varepsilon_{nj}$  – компо-

ненты тензора диэлектрической проницаемости,  $\sigma_j$  – компоненты тензора механических напряжений в сокращенной нотации,  $\gamma$ - вектор пьезоэлектрических коэффициентов (первого рода),  $\Delta T$ - изменение температуры,  $\rho_t$  – плотность нескомпенсированного радиационно-генерированного заряда.

– термомеханические процессы, развивающиеся в преобразователе в результате импульсного неоднородного энерговыделения и приводящие к появлению колебательных процессов при воздействии лазерного излучения. Процессы возникновения и распространения волн могут быть описаны соотношениями теории термоупругости:

$$\rho C_V \frac{\partial T}{\partial t} - k \Delta T + T_0 \beta \nabla \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = Q(x, y, z) \delta(t - t_0) \quad (13)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} - \nabla \cdot (c \nabla \vec{u}) + \beta \cdot \nabla T = 0 \quad (14)$$

$$\beta = \alpha \frac{E}{1 - 2\nu}$$

где  $\beta$ - константа термомеханической связи,  $T_0$  – температура среды,  $\alpha$  – коэффициент температурного расширения,  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $u$  – величина деформации,  $Q$  – плотность источников тепла,  $\rho$  – плотность,  $C_V$  – теплоемкость,  $k$  – коэффициент теплопроводности,  $c$  – скорость звука. Распространение волн механических напряжений в материале пьезоэлектрика приводит к модификации импульсной электрической реакции преобразователя.

На основании проведенных исследований была разработана методика дозиметрического сопровождения имитационных радиационных испытаний ПМВ на кремниевых, карбид кремниевых и диэлектрических структурах, базирующаяся на научно обоснованном применении методов калибровки по результатам испытаний на моделирующих установках (МУ) и методов расчетной дозиметрии с учетом наличия слоев различных материалов в составе конструкции, сложности формы и большого объема чувствительных областей элементов.

### **Исследование и прогнозирование стойкости аналоговых микросхем вторичных преобразователей к импульсному ионизирующему воздействию**

Впервые проведены экспериментальные исследования радиационного поведения аналоговых элементов вторичных преобразователей (ОУ, ИКН, АКК и специализированные СБИС) с контролем расширенного набора параметров (табл. 1) в диапазоне температур. Установлено, что в зависимости от технологии изготовления и схемотехнических решений информативным может оказаться любой параметр из расширенного набора.

Табл.1. Расширение системы параметров-критериев при исследованиях АКК

<b>Контролируется при испытаниях АКК на МУ</b>
Выходное напряжение высокого уровня
Выходное напряжение низкого уровня
Ток потребления, импульсный ток потребления
Время потери работоспособности
Контроль функционирования
Контроль тиристорного эффекта и катастрофических отказов
<b>Дополнительно контролируется с использованием имитаторов</b>
Выходное сопротивление ключа
Ток потребления при низком (высоком) уровне выходного напряжения
Входной ток при высоком (низком) уровне управляющего напряжения
Ток утечки закрытого ключа
Падение напряжения на открытом ключе
Максимальный ток утечки на выходе
Ток утечки аналогового входа
Ток утечки на управляющем входе
Время задержки распространения входного сигнала при включении и выключении
Время задержки распространения сигнала «запрет» при включении и выключении
Время задержки распространения управляющего сигнала при включении и выключении

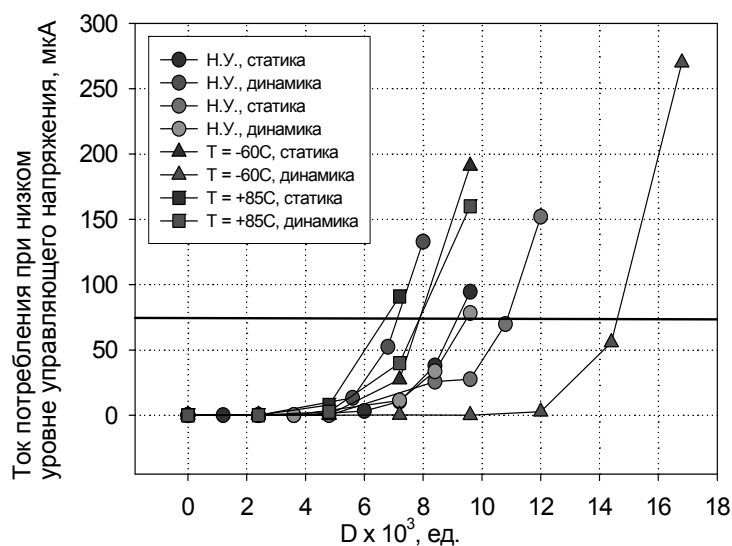


Рис. 14а. Зависимость тока потребления КМОП ИС 590КН33У от уровня поглощенной дозы

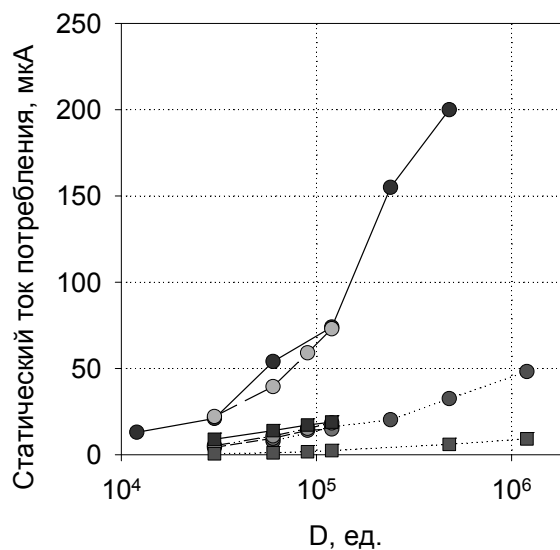


Рис. 14б. Зависимость тока потребления КМОП КНС ИС Б1825КН1 от уровня поглощенной дозы

Установлено, что уровни стойкости КМОП КНС аналоговых ключей и коммутаторов при импульсном ИВ выше, чем у КМОП АКК, что связано с отсутствием в их составе паразитных биполярных структур (рис. 14). Отсутствие четкой температурной зависимости дозовой деградации информативных параметров свидетельствует о необходимости их контроля во всем температурном диапазоне (рис. 14а).

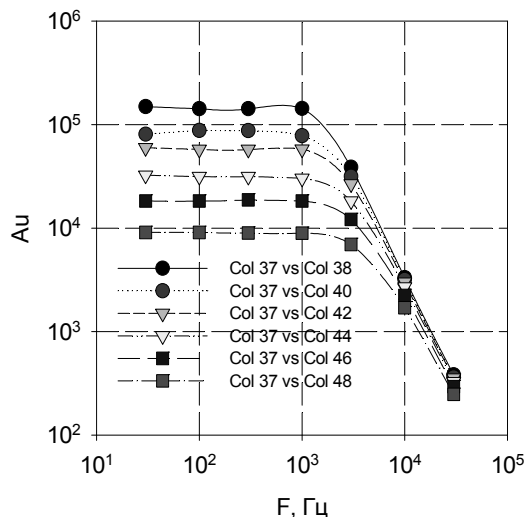


Рис. 15а. Зависимость АЧХ ИС 544УД17У3 от уровня поглощенной дозы.

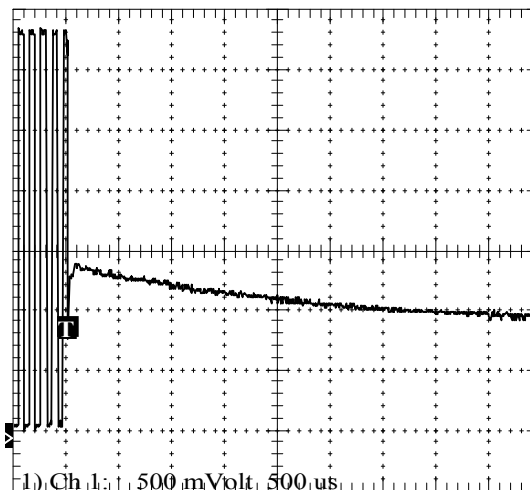


Рис. 15б. Осциллограмма нарушения функционирования (ТЭ) ИС 1467СА3Т при уровне воздействия  $1,4 \cdot 10^{11}$  ед./с.

Анализ и экспериментальные исследования с контролем расширенного набора параметров, включая амплитудно-частотных характеристик (АЧХ - рис. 15а) операционных усилителей и компараторов напряжения показали, что сбой выходного напряжения при ИИВ, как правило, определяется реакцией входной схемы преобразования двухфазного сигнала в однофазный и может быть адекватно промоделирован электрическими эквивалентными схемами. Установлено, что исследования при повышенной температуре являются наиболее критичными для этого класса элементов ВП, что связано со снижением уровня ТЭ и проявлением эффектов низкой интенсивности. Использование имитационных методов исследований позволяет существенно расширить диапазон уровней воздействий и обнаруживать нехарактерный для аналоговых ИС тиристорный эффект (рис. 15б).

Установлено, что уровни стойкости специализированных аналоговых СБИС, выполненных по КМОП и БиКМОП технологиям выше, чем у дискретных ИС, что связано с уменьшением проектных норм и повышенной чистотой технологического процесса изготовления.

Основные экспериментально определенные уровни радиационной стойкости элементов вторичных преобразователей приведены в табл.2.

В результате проведенных экспериментальных исследований разработаны рекомендации по выбору информативного состава радиационных испытаний основных элементов вторичных преобразователей МВ.

Табл.2. Типовые значения уровней радиационной стойкости элементов ВП

Элементы ВП	по эффектам мощности дозы			по дозовым эффектам	
	УБР*	УТЭ*	УКО*	УПО*	УФО*
ОУ	$10^6 \dots 10^8$ ед./с	$10^8 \dots 10^9$ ед./с	$>10^9$ ед./с	$>10^3$ ед.	$>10^4$ ед.
ИКН	$10^6 \dots 10^8$ ед./с	$10^8 \dots 10^9$ ед./с	$>10^9$ ед./с	$>10^3$ ед.	$>10^4$ ед.
АКК	$10^6 \dots 10^9$ ед./с	$10^8 \dots 10^9$ ед./с	$>10^{10}$ ед./с	$>10^3$ ед.	$>10^3$ ед.
СБИС и БМК	$10^6 \dots 10^9$ ед./с	$10^8 \dots 10^{10}$ ед./с	$>10^{11}$ ед./с	$>10^5$ ед.	$>10^5$ ед.

\*УБР – уровень бессбойной работы, УТЭ – уровень тиристорного эффекта, УКО – уровень катастрофического отказа, УПО - уровень параметрического отказа, УПО - уровень функционального отказа.

Выбор информативного набора параметров-критериев радиационной стойкости ПМВ в целом предлагается проводить исходя из физических принципов преобразования энергии. В общем случае для описания характеристики преобразования ПМВ с точки зрения радиационной стойкости необходимо контролировать максимальную чувствительность элемента, диапазон преобразования элемента и смещение нуля. Если элемент представляет собой активную структуру, то целесообразно также контролировать основной электрический параметр элемента, например, ток потребления.

В результате разработаны методические и технические средства, позволяющие проводить измерение информативных параметров ПМВ при совместном воздействии ионизирующих излучений, измеряемой механической величины и температуры. Структурная схема экспериментального комплекса для исследований дозовых эффектов в пьезопреобразователях давления приведена на рис. 16. Исследуемый и контрольный (эталонный) пьезопреобразователи (П1 и П2 соответственно) через единый воздухопровод (ВП) подключаются к электрокомпрессору К. Выходные сигналы пьезопреобразователей усиливаются схемой предварительного усиления (ПУ) и через блок согласования и коммутации (БСК) поступают на блок измерения статических характеристик (БИСХ) на базе ПЭВМ. Компрессор (К) и источник излучения (И) управляются программно посредством БИСХ через исполнительные устройства ИУ1 и ИУ2 соответственно.

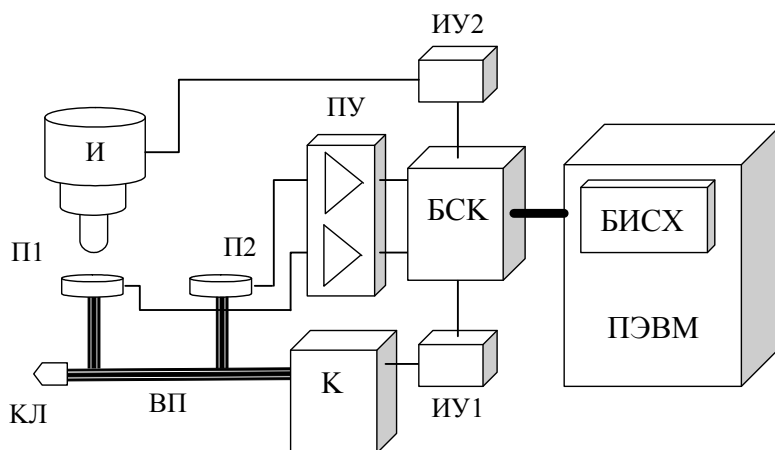


Рис. 16. Структурная схема экспериментального комплекса для исследований дозовых эффектов в пьезопреобразователях давления.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Предложена модель ионизационного отклика кремниевых мостовых пьезопреобразователей, основанная на численном решении фундаментальной системы уравнений, в соответствии с которой синфазный отклик выходного напряжения преобразователей на импульсное ионизирующее воздействие определяется реакцией паразитных диодных структур между контактами пьезорезисторов и подложкой, а парафазный - асимметрией топологии преобразователя. Для повышения уровня бесшумной работы кремниевых мостовых пьезопреобразователей предложено улучшать симметрию топологии моста, а для уменьшения времени потери работоспособности – вводить дополнительное заземление донной части мембраны и снижать время жизни неосновных носителей заряда.

2. Предложена модель ионизационного отклика мостовых пьезопреобразователей на карбидкремниевых структурах, основанная на численном решении фундаментальной системы уравнений, в соответствии с которой основным механизмом отклика преобразователей является радиационно-индуцированная ионизационная проводимость диэлектрических слоев. Асимметрия площадей диэлектрических слоев приводит к тому, что уже при относительно невысоких уровнях импульсного ионизирующего воздействия (порядка  $10^{10}$  ед./с) наблюдается существенный разбаланс моста по сравнению с номинальным выходным сигналом.

3. Предложена модель ионизационного отклика пьезокерамических преобразователей, учитывающая распределение центров захвата дырок на межзеренной границе, в соответствии с которой зависимость ионизационного тока преобразователя от интенсивности ионизирующего воздействия является сублинейной, что соответствует выводам теории множественного захвата и подтверждается экспериментально. Расчетно-экспериментальным путем обосновано, что накопление радиационно-индуцированного положительного заряда приводит к уменьшению величины ионизационного тока пьезокерамических преобразователей.

4. Разработаны базовые методики и экспериментальный комплекс, позволяющие проводить измерение параметров пьезопреобразователей механических величин при совместном воздействии ионизирующих излучений, измеряемой механической величины и температуры. Впервые получены оригинальные результаты экспериментальных исследований радиационного поведения типовых представителей пьезопреобразователей механических величин.

5. Развита методика имитационных исследований основных аналоговых элементов вторичных преобразователей (операционные усилители, компараторы, аналоговые коммутаторы, БИС управления) обеспечивающие контроль расширенной системы параметров-критериев в диапазоне температур, что повышает достоверность определения показателей радиационной стойкости пьезопреобразователей механических величин в целом.

Основной практический результат диссертации заключается в разработке методических и технических средств обеспечивающих диагностирование информативных параметров пьезопреобразователей механических величин непосредственно в процессе и после ионизирующего воздействия при совместном воздействии измеряемой механической величины и температуры. Разработанные средства внедрены в ОАО «ЭНПО СПЭЛС», ОАО «Ангстрем», ОАО «Светлана-Полупроводники», ОАО «НИИМЭ и Микрон» при проведении исследований пьезопреобразователей механических величин на моделирующих установках и имитаторах.

Частные практические результаты работы и их реализация:

1. Получены оригинальные результаты экспериментальных исследований эффектов смещения и дозовых эффектов в пьезопреобразователях механических величин на кремниевых и карбидкремниевых структурах с использованием моделирующих установок. Установлено, что стойкость пьезопреобразователей механических величин по указанным эффектам существенно (более чем на порядок величины) выше по сравнению с элементами вторичных преобразователей.

2. Проведены исследования аналоговых элементов вторичных преобразователей, выполненных по биполярной, КМОП, БиКМОП, КМОП КНС технологиям, в том числе операционных усилителей, компараторов напряжения, аналоговых ключей и коммутаторов и специализированных СБИС. Показана необходимость контроля расширенной системы информативных параметров радиационной стойкости элементов ВП в диапазоне температур. Разработано более 50 методик испытаний элементов вторичных преобразователей, результаты испытаний внедрены в ОАО «Ангстрем», ОАО «НИИМЭ и Микрон», ПКК «Миландр» и ОАО «ЭНПО СПЭЛС».

3. Предложена методика выбора информативного набора параметров-критериев радиационной стойкости пьезопреобразователей механических величин на кремниевых, карбид кремниевых и диэлектрических структурах, основанная на контроле электрических и точностных параметров в процессе воздействия.

4. Разработана методика дозиметрического сопровождения имитационных радиационных исследований пьезопреобразователей механических величин на кремниевых, карбид кремниевых и диэлектрических структурах, базирующаяся на методе калибровки по результатам испытаний на моделирующих установках и методе расчетной дозиметрии с учетом наличия слоев различных материалов в составе конструкции, сложности формы и большого объема чувствительных областей элементов.

### Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Никифоров А.Ю., Скоробогатов П.К., Бойченко Д.В. Анализ стойкости мембранных датчиков давления на основе карбида кремния к воздействию импульсного ионизирующего излучения // Известия вузов. Электроника. – 2003. – №1. – С. 57-62.
2. Single-chip pressure sensor radiation hardness research / Artamonov A.S., Boychenko D.V., Niki-forov A.Y., Sogoyan A.V., Shelepin N.A., Telets V.A., Tverskoy M.G. // Proc. of 8th European Conf. "Radiation and its Effects on Components and Systems" (RADECS 2001), Sept. 10-14, 2001, Cap d'Agle, France, pp. 296-299.
3. Бойченко Д.В. Исследование влияния технологии на радиационную стойкость операционных усилителей // Научная сессия МИФИ-2002. Сб. научн. трудов. – М.: МИФИ, 2002. – Т.14. – С. 73-74.
4. Бойченко Д.В. Прогнозирование радиационного отклика операционных усилителей по результатам исследований тестовых структур // Научная сессия МИФИ-2003. Сб. научн. трудов. – М.: МИФИ, 2003. – Т.14. – С. 123-124.
5. Бойченко Д.В. Сравнительное исследование радиационного поведения БИС управления микрогироскопов и микроакселерометров // Научная сессия МИФИ-2004. Сб. научн. трудов. – М.: МИФИ, 2004. – Т.15. – С. 85-86.
6. Бойченко Д.В. Моделирование ионизационной реакции интегрального датчика давления // Научная сессия МИФИ-2001. Сб. научн. трудов. – М.: МИФИ, 2001. – Т.14. – С. 107-108.
7. Бойченко Д.В., Согоян А.В. Модель прогнозирования радиационного поведения пьезопреобразователей на основе PZT керамики // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов. – М.: МИФИ, 2008. – С. 222-224.
8. Бойченко Д.В., Согоян А.В. Исследование радиационного поведения пьезопреобразователей на основе  $Pb(Zr,Ti)O_3$  керамики // Радиационная стойкость электронных систем. – 2006. – Вып. 9. – С. 147-148.
9. Исследование радиационного поведения интегральных преобразователей давления и ускорения резистивного типа / Бойченко Д.В., Ванжа М.М., Шелепин Н.А., О.В.Панкратов, А.А.Орлов // Радиационная стойкость электронных систем. – 2004. – Вып. 7. – С. 141-142.
10. Исследование радиационного поведения интегральных компараторов напряжения в диапазоне температур / Бойченко Д.В., Ванжа М.М., Архангельский Ю.К. // Радиационная стойкость электронных систем. – 2004. – Вып. 7. – С. 85-86.
11. Исследование радиационного поведения интегральных КМОП КНС коммутаторов аналоговых сигналов / Бойченко Д.В., Кессаринский Л.Н., Борисов А.А., И.В.Поляков // Радиационная стойкость электронных систем. – 2005. – Вып. 8. – С. 83-84.
12. Влияние технологии изготовления на радиационную стойкость аналоговых мультиплексов / Бойченко Д.В., Кессаринский Л.Н., Ванжа М.М., С.А.Красноперов // Радиационная стойкость электронных систем. – 2006. – Вып. 9. – С. 83-84.
13. Исследование влияния топологии на радиационную стойкость аналоговых ИС / Бойченко Д.В., Кессаринский Л.Н., Архангельский Ю.К. // Радиационная стойкость электронных систем. – 2007. – Вып. 10. – С. 21-22.
14. Бойченко Д.В., Ванжа М.М. Влияние температуры и приложенного давления на стойкость кремниевых датчиков давления к воздействию импульсного ионизирующего излучения // Научная сессия МИФИ-2004. Сб. научн. трудов. – М.: МИФИ, 2004. – Т.1. – С. 199-200.
15. Исследование радиационного отклика интегральных датчиков давления / Бойченко Д.В., Никифоров А.Ю., Согоян А.В. Артамонов А.С., Шелепин Н.А. // Научная сессия МИФИ-2000. Сб. научн. трудов. – М.: МИФИ, 2000. – Т.1. – С. 97-98.