



СИДЕЛЕВ Алексей Владимирович

РАЗРАБОТКА ДЕТЕКТОРОВ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО
ИЗЛУЧЕНИЯ С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВЕ
P-КАНАЛЬНЫХ МНОП-ТРАНЗИСТОРОВ

Специальность 2.2.2. Электронная компонентная база микро-
и нанoeлектроники, квантовых устройств

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-исследовательский институт приборов»

Научный руководитель **Таперо Константин Иванович,**
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, заместитель генерального директора по
науке и инновациям Акционерного общества
«НИИП», г. Лыткарино

Официальные оппоненты: **Зольников Константин Владимирович,**
доктор физико-математических наук, доцент, ведущий
инженер Акционерного общества «Научно-
исследовательский институт электронной техники»,
г. Воронеж

Гусев Евгений Эдуардович,
кандидат технических наук, начальник научно-
исследовательской лаборатории «Микросборка нано-
и микросистемной техники» федерального
государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Национальный
исследовательский университет «Московский
институт электронной техники», г. Москва

Ведущая организация Акционерное общество "Научно-производственное
предприятие «Пульсар», г. Москва

Защита состоится 20 января 2026 г. в 14⁰⁰ в конференц-зале на заседании
диссертационного совета 24.2.286.01 ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет» по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский проспект,
д. 14, ауд. 216.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на сайте
<https://cchgeu.ru/>

Автореферат разослан 24 ноября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Стогней О.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы диссертации

В настоящее время в науке и технике применяется множество детекторов ионизирующего излучения (ИИ), имеющих не только различное назначение, но и различные конструкции, материалы чувствительного элемента (ЧЭ) и принципы работы. Особым классом выделяются детекторы ИИ с полупроводниковыми ЧЭ, разрабатываемыми на основе не только простых, как кремний, германий, алмаз (модификация углерода), но и сложных полупроводниковых материалах, таких как: арсенид галлия, карбид кремния, теллурид кадмия, диоксид титана и других полупроводниках. Рассматривая самый распространенный и технологичный полупроводниковый материал – кремний (Si), необходимо отметить, что только на его основе разрабатываются и изготавливаются целые классы детекторов ИИ, различающиеся следующими характеристиками:

- конструкция чувствительного элемента (резисторная, диодная, транзисторная);
- информативный параметр (напряжение, ток);
- тип регистрируемого излучения (альфа-, бета-, гамма-, нейтронное излучение и др.);
- температурный режим применения (охлаждаемые и неохлаждаемые);
- способность различать энергию и интегральные потоки (спектрометрические и несспектрометрические);
- технология изготовления (поверхностно-барьерные, диффузионные с р-п-переходом, диффузионно-дрейфовые и др.);
- возможность регистрации координаты (некоординатный, стриповый или однокоординатный, пиксельный или координатно-чувствительный);
- другие характеристики.

К настоящему моменту в мире проблематикой разработки и создания полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения занимается достаточно большое количество научных групп и за несколько десятилетий было создано огромное многообразие детекторов. Автором данной диссертации с 2008 года проводились работы по созданию и исследованию детекторов ионизирующего излучения на основе различных полупроводниковых материалов для разнообразных применений, что отражено в списке публикаций по теме диссертации. На основании ранее проведенных исследований был сделан вывод, что для измерения поглощенной дозы ионизирующего излучения в различных радиационных условиях наиболее оптимальным решением является применение полупроводниковых детекторов с чувствительными элементами на основе транзисторов со структурой «металл – диэлектрик – полупроводник» (МДП-транзистор).

Использование детекторов ИИ с ЧЭ на основе МДП-транзисторов для измерения поглощенной дозы обусловлено целым рядом преимуществ, таких как: простота аппаратуры считывания значений информативного параметра (информативный параметр – напряжение, пропорциональное поглощенной дозе ИИ), относительная простота изготовления и низкая стоимость чувствительного элемента, малый размер чувствительного элемента, возможность измерения поглощенной дозы ИИ в режиме «online», возможность применения в условиях воздействия ИИ со смешанным составом, определение дозы, поглощенной

непосредственно в полупроводниковом кристалле ЧЭ с учетом влияния защитного действия всех имеющихся конструктивных элементов, низкое энергопотребление.

Наиболее широко детекторы ИИ с ЧЭ на основе МДП-транзисторов применяются для контроля дозовых нагрузок на борту космических аппаратов. Аналогичные детекторы ионизирующего излучения применяются в ядерной медицине для контроля поглощенной дозы, получаемой пациентом во время сеансов лучевой терапии, так называемой *in vivo* дозиметрии, что дословно переводится, как измерение дозы на живом организме (теле человека). Детекторы, разрабатываемые для данных задач, могут существенно отличаться в части требований, предъявляемых к их радиационной чувствительности и диапазону измеряемых значений поглощенной дозы. В абсолютном большинстве случаев в качестве чувствительных элементов применяются р-канальные МОП-транзисторы (р-МОПТ) с диоксидом кремния (SiO_2) в качестве подзатворного диэлектрика. Применение детекторов с ЧЭ на основе р-МОПТ также достаточно распространено для контроля поглощенной дозы ИИ в радиационных экспериментах и испытаниях. Во многом это обусловлено возможностью применения серийно выпускаемых МОП-транзисторов (как дискретных, так и транзисторов из состава КМОП интегральных схем), что существенно упрощает разработку дозиметрической системы. Однако передовые решения, обладающие превосходством по своим характеристикам, в первую очередь, по радиационной чувствительности, рабочему диапазону и точности измерения поглощенной дозы, как правило, получаются в случае использования специально разработанных под планируемые задачи ЧЭ.

Несмотря на свое широкое распространение, а также на перечисленные выше достоинства, детекторы ИИ с ЧЭ на основе р-МОПТ обладают рядом недостатков, к основным из которых можно отнести:

- низкую радиационную чувствительность в режиме измерения информативного параметра (отрицательное напряжение на затворе), для увеличения которой требуется переключаться из режима измерения информативного параметра в режим накопления заряда (положительное напряжение на затворе) и обратно, что приводит к сильному дрейфу информативного параметра и, как следствие, росту погрешности измерения поглощенной дозы;

- фединг (эффект отжига), приводящий к изменению информативного параметра при длительной эксплуатации, например, на борту космического аппарата, и росту погрешности определения поглощенной дозы ИИ;

- нелинейность калибровочной кривой: зависимость порогового напряжения от поглощенной дозы ИИ имеет нелинейный характер, что приводит к увеличению погрешности в измерении дозы.

Известно, что в качестве подзатворного диэлектрика при разработке и изготовлении МДП-транзисторов используется не только диоксид кремния, но и различные диэлектрические материалы, включая их комбинации. Интересной особенностью обладают транзисторы со структурой «металл – нитрид кремния – диоксид кремния – полупроводник» (МНОП-транзисторы, МНОПТ), где в качестве подзатворного диэлектрика используется комбинация диоксида кремния и нитрида кремния (Si_3N_4): граница раздела $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ является областью захвата заряда, на которой накапливается как положительный, так и отрицательный заряд. За счет данного свойства границы раздела диэлектриков МНОПТ, в частности, используют в

качестве ячейки энергонезависимой флеш-памяти, а при использовании в качестве ЧЭ детекторов поглощенной дозы ИИ можно получить чувствительные элементы, обладающие рядом преимуществ по сравнению с ЧЭ на основе р-МОПТ, таких, как:

- более высокая радиационная чувствительность при отрицательном напряжении на затворе в режиме измерения информативного параметра и режиме накопления заряда;
- линейность калибровочной кривой, приводящая к уменьшению погрешности измерения поглощенной дозы ИИ;
- отсутствие фединга, что дает возможность хранить информацию о поглощенной дозе ионизирующего излучения более 5 лет, и отсутствие зависимости от рабочей температуры непосредственно при измерениях дозы;
- отсутствие зависимости от мощности дозы ионизирующего излучения.

Как уже упоминалось выше, специфика конкретных условий применения, как правило, характеризуется своими требованиями к параметрам ЧЭ детекторов, применяемых для измерения поглощенной дозы ИИ. Причем стремление улучшить какие-то конкретные характеристики во время разработки ЧЭ часто упирается в существующие противоречия. Например, попытки повысить радиационную чувствительность ЧЭ на основе р-МОПТ, определяемую как изменение информативного параметра, приходящееся на единицу поглощенной дозы, за счет увеличения толщины подзатворного SiO_2 приводят к существенному сокращению рабочего диапазона измеряемых доз вследствие нелинейности дозовой зависимости информативного параметра, а кроме этого, такие попытки упираются в технологические ограничения по максимальной толщине подзатворных SiO_2 в составе транзисторов. При повышении чувствительности детектора с ЧЭ на основе р-МОПТ за счет выбора электрического режима (облучение транзистора в закрытом состоянии при подаче на затвор положительного напряжения; измерение информативного параметра в открытом состоянии транзистора – на затворе отрицательное напряжение) повышается погрешность измерения поглощенной дозы, связанная с дрейфом информативного параметра при переключениях режимов работы транзистора. Увеличение планируемого срока эксплуатации ЧЭ в условиях воздействия ИИ всегда приводит к необходимости учета влияния эффектов отжига на погрешность измерения поглощенной дозы. Исходя из этого, можно заключить, что существует важная и актуальная **научно-техническая задача**, требующая своего решения: разработка в рамках единой конструктивно-технологической концепции детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов для широкого спектра условий применения. Тематика исследований и разработок в рамках настоящей диссертации направлена на решение данной научно-технической задачи, и поэтому является актуальной. В ходе исследований за основу был выбран технологический вариант ЧЭ на основе р-канальных МНОП-транзисторов (р-МНОПТ), учитывая уже отмеченный ранее целый ряд преимуществ данного конструктивно-технологического варианта.

Целью диссертации является разработка и научное обоснование конструкции затворных систем и режимов работы детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов для различных применений.

В соответствии с поставленной целью необходимо было решить следующие задачи:

- определить требования к характеристикам детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов для применения в *in vivo* дозиметрии, в составе радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов (РЭА КА) и на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ), в том числе для радиационных испытаний, а также для регистрации «аварийных» доз персонала на ОИАЭ;
- разработать физическую модель накопления радиационно-индуцированного заряда в подзатворных диэлектриках р-МНОПТ;
- провести расчет конструкции диэлектрических слоев подзатворного диэлектрика, состоящего из Si_3N_4 и SiO_2 , для получения требуемых характеристик детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ для каждого из применений;
- разработать топологию р-МНОПТ для использования в качестве ЧЭ детектора поглощенной дозы ИИ;
- разработать технологию изготовления р-МНОПТ для использования в качестве ЧЭ детектора поглощенной дозы ИИ;
- исследовать радиационную чувствительность детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ с различными толщинами диэлектрических слоев;
- исследовать радиационную чувствительность детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ в зависимости от режимов работы при облучении;
- разработать схемотехнический метод увеличения радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ.

Научная новизна заключается в том, что:

1. Разработана физическая модель, позволяющая прогнозировать радиационную чувствительность и диапазон измеряемых доз детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канальных МНОП-транзисторов, которая, в отличие от ранее существующих моделей, учитывает влияние накопленного заряда на границе раздела $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ на напряженность электрического поля в слоях диэлектрика и на выход заряда в SiO_2 . Модель применима, в том числе, при слабых электрических полях в SiO_2 с напряженностью менее 10^3 В/см.

2. Показано, что нелинейный характер дозовой зависимости напряжения затвор-исток р-канального МНОП-транзистора при постоянном токе стока является следствием накопления радиационно-индуцированного заряда на границе раздела $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$, приводящего к снижению выхода заряда за счет уменьшения напряженности электрического поля в SiO_2 и критическому увеличению напряженности электрического поля в Si_3N_4 .

3. Показано, что радиационная чувствительность детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канального МНОП-транзистора при увеличении отрицательного напряжения на затворе вначале растет вследствие увеличения выхода заряда, связанного с ростом напряженности электрического поля

в SiO_2 , а затем снижается вследствие достижения предельно допустимой напряженности электрического поля в SiO_2 и(или) в Si_3N_4 .

4. Установлено, что детектор поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канального МНОП-транзистора может характеризоваться близкими значениями радиационной чувствительности как при отрицательном, так и при положительном напряжении на затворе, приложенном во время облучения. Величина и направление сдвига информативного параметра при отрицательном напряжении на затворе определяется захватом радиационно-индуцированных дырок на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$, а при положительном – захватом радиационно-индуцированных электронов на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ и дырок на границе SiO_2 / Si .

Практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

- разработаны новые детекторы поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ для различных применений, позволяющие получать наиболее точные значения измерений поглощенной дозы ионизирующего излучения в режиме реального времени за счет высокой радиационной чувствительности и проводить измерения в широком диапазоне доз;

- определены оптимальные конструкции затворных систем и режимы работы р-МНОПТ, использующихся в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения для различного применения, позволяющие получать наиболее достоверные данные в требуемых условиях применения;

- в рамках единой конструктивно-технологической концепции изготовлены два типа детекторов поглощенной дозы ИИ с высокой радиационной чувствительностью и широким диапазоном измеряемых доз с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющих четыре варианта толщины подзатворных Si_3N_4 и SiO_2 , охватывающие широкий спектр условий применения, что позволило значительно унифицировать дозиметры для работы с детекторами данного типа, а также технологию изготовления детекторов;

- определены оптимальные электрические режимы работы детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ в зависимости от требований и условий применения, что позволяет получать наилучшие характеристики детекторов;

- разработаны и изготовлены дозиметры, работающие с детекторами поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, для применения в составе радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов и на объектах использования атомной энергии, в том числе для радиационных испытаний, а также применения в *in vivo* дозиметрии и для регистрации «аварийных» доз персонала на ОИАЭ, что дало возможность скорейшему внедрению разработанных детекторов в промышленность.

Практическая значимость результатов диссертации подтверждается их внедрением в промышленность при выполнении ряда НИР и ОКР в АО «НИИП», АО «Российские космические системы», ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» и ФГБОУ ВО «ВГЛУ», а также в учебный процесс подготовки студентов по направлению «Электроника и нанoeлектроника» в НИТУ МИСИС и учебный

процесс ФГБОУ ВО «ВГЛТУ» по дисциплинам: «Инструментальные средства информационных систем», «Программирование на языке VHDL и проектирование микроэлектронных устройств» и «Алгоритмы проектирования микроэлектронных устройств».

В приложении к диссертации представлены акты внедрения от следующих организаций: АО «НИИП», НИТУ МИСИС, ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», АО «Российские космические системы», ФГБОУ ВО «ВГЛТУ».

Методология и методы исследования

В рамках данной диссертации изначально был проведен детальный анализ и классификация полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения, включая области их применения, входе которого был сделан вывод, что для измерения поглощенной дозы ионизирующего излучения в различных радиационных условиях наиболее оптимальным решением является применение полупроводниковых детекторов с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов и наиболее подходящим является р-МНОПТ. Для прогнозирования радиационного отклика детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ была разработана физическая модель накопления радиационно-индуцированного заряда в подзатворных диэлектриках р-канального МНОП-транзистора. Проведенное исследование возможности создания р-МНОПТ для использования в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с различными толщинами подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ и требуемыми характеристиками в рамках единой конструктивно-технологической концепции показало возможность создания таких транзисторов. Для создания р-МНОПТ с необходимыми затворными системами была разработана топология кристаллов транзисторов, разработан технологический маршрут их изготовления и проведено приборно-технологическое моделирование. На изготовленных детекторах поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ были измерены электрические характеристики, а также исследованы радиационная чувствительность и диапазон измеряемых доз в зависимости от конструкции затворной системы и режима работы детектора во время облучения, которые показали высокую степень совпадения с расчетами.

Основным методом исследования детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ являлось измерение их вольт-амперных характеристик (ВАХ) и измерение информативного параметра детекторов в различных электрических схемах работы при воздействии ионизирующего излучения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Физическая модель, позволяющая прогнозировать радиационную чувствительность и диапазон измеряемых доз детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канальных МНОП-транзисторов, которая, в отличие от ранее существующих моделей, учитывает влияние накопленного заряда на границе раздела $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ на напряженность электрического поля в слоях диэлектрика и на выход заряда в SiO_2 . Модель применима, в том числе, при слабых электрических полях в SiO_2 с напряженностью менее 10^3 В/см.

2. Эффект нелинейности дозовой зависимости напряжения затвор-исток р-канального МНОП-транзистора при постоянном токе стока, являющийся

следствием накопления радиационно-индуцированного заряда на границе раздела $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$, приводящего к снижению выхода заряда за счет уменьшения напряженности электрического поля в SiO_2 и критическому увеличению напряженности электрического поля в Si_3N_4 .

3. Зависимость радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе р-канального МНОП-транзистора от отрицательного напряжения на затворе во время воздействия ионизирующего излучения, имеющая немонотонный характер с выраженным максимумом.

4. Радиационная чувствительность детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канального МНОП-транзистора, характеризуемая близкими значениями радиационной чувствительности как при отрицательном, так и при положительном напряжении на затворе, приложенном во время облучения. Величина и направление сдвига информативного параметра, определяемые захватом радиационно-индуцированных дырок на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ при отрицательном напряжении на затворе, а при положительном – захватом радиационно-индуцированных электронов на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ и дырок на границе SiO_2 / Si .

5. Конструкции затворных систем р-канальных МНОП-транзисторов, использующихся в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения и режимы работы детекторов для получения необходимой радиационной чувствительности и диапазона измеряемых доз при заданных условиях применения.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректной обработкой экспериментальных данных, использованием общепринятых или применяемых в АО «НИИП» методик исследований, использованием аттестованного и поверенного оборудования и приборов, а также согласованностью результатов моделирования и экспериментальных исследований, и соответствием результатов данной диссертации исследованиям, проведенным другими учеными.

Апробация работы. Основные результаты по теме диссертации докладывались на: 24-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2021» в 2021 году, Научно-технической конференции «Ядерное приборостроение. Актуальные вопросы разработки, производства, эксплуатации. Метрология ионизирующих излучений» в 2021 году, 25-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2022» в 2022 году, Научно-технической конференции «Ядерное приборостроение: история, современность, перспективы» в 2022 году, 26-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2023» в 2023 году, 27-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2024» в 2024 году, 28-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2025» в 2025 году.

Личный вклад автора заключается в анализе литературных данных, определении цели и постановке задач данной диссертации, разработке программ и методик исследований радиационной чувствительности детекторов поглощенной

дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ в разном конструктивно-технологическом исполнении и различных условиях эксплуатации, обсуждении полученных экспериментальных данных с научным руководителем и главным научным сотрудником АО «НИИП». При непосредственном участии автора была разработана физическая модель накопления радиационно-индуцированного заряда в подзатворных диэлектриках р-МНОПТ. Лично автором были проведены расчеты, выбраны толщины подзатворных диэлектриков р-МНОПТ, а также обоснованы режимы работы для получения требуемых характеристик детекторов поглощенной дозы ИИ для широкого спектра применения. Автором самостоятельно было проведено расчетное исследование возможности изготовления р-МНОПТ для использования в качестве ЧЭ детекторов поглощенной дозы ИИ и разработан технологический маршрут изготовления р-МНОПТ. Под руководством научного руководителя и участия главного научного сотрудника АО «НИИП» были подготовлены основные публикации и доклады на конференциях по теме диссертационной работы.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств по следующим пунктам:

1. Разработка и исследование физических основ создания новых и совершенствования существующих приборов, интегральных схем, изделий микро- и нанoeлектроники, твердотельной электроники, дискретных радиоэлектронных компонентов, микроэлектромеханических систем (МЭМС), нанoeлектромеханических систем (НЭМС), квантовых устройств, включая оптоэлектронные приборы и преобразователи физических величин.

2. Исследование и разработка физических и математических моделей изделий по п. 1, в том числе для систем автоматизированного проектирования.

3. Исследование и разработка схмотехнических основ создания, конструкций и методов совершенствования изделий по п. 1.

4. Исследование, моделирование и разработка технологических процессов и маршрутов изготовления, методов измерения характеристик и совершенствования изделий по п. 1.

5. Исследование, проектирование и моделирование изделий, исследование их функциональных и эксплуатационных характеристик по п. 1, включая вопросы качества, долговечности, надежности и стойкости к внешним воздействующим факторам, а также вопросы их эффективного применения.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 9 научных работах: 7 из них в изданиях, рекомендованных ВАК, и 2 в изданиях, индексируемых в базах цитирования Scopus и Web of Science, а также в 20 тезисах докладов.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 186 страниц, содержит 77 рисунков и 23 таблицы. Список литературы состоит из 100 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, поставлена цель и сформулированы задачи диссертации, показана научная новизна, практическая значимость работы, описана методология и методы исследования, а также представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены основные виды детекторов ионизирующего излучения и принципы их работы: ионизационная камера, детекторы на основе сцинтиллятора, термолюминесцентные и полупроводниковые детекторы. Проведена классификация полупроводниковых детекторов ИИ в зависимости от технологии изготовления и приведены их основные конструкции. Отмечено, что области применения полупроводниковых детекторов ИИ перекрывают большой объем потребности в детекторах для различных областей науки и техники: от ядерной медицины до геофизики и промышленности.

Детекторы с ЧЭ на основе МДП-транзисторов являются чувствительными ко всем типам ИИ: электромагнитному (рентгеновскому, гамма-излучению), потокам частиц (бета-частиц, протонов, ионов, в том числе и альфа-частиц), но достаточно слабо взаимодействуют с нейтронным излучением. В данной главе обосновано применение МДП-транзисторов в качестве ЧЭ детекторов поглощенной дозы ИИ и выделены традиционные области их применения: космическая наука и техника, а также ядерная медицина (лучевая терапия).

Информативным параметром детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МДПТ может являться пороговое напряжение, а в более общем случае – напряжение на затворе, обеспечивающее протекание заданного рабочего тока в цепи сток-исток.

Принцип работы детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МОПТ заключается в том, что при воздействии ИИ в слое подзатворного SiO_2 образуются неравновесные электронно-дырочные пары, количество которых пропорционально поглощенной энергии ИИ и за счет захвата на ловушки части дырок в процессе их переноса через SiO_2 , а также образования радиационно-индуцированных поверхностных состояний на границе SiO_2 / Si , происходит сдвиг сток-затворной вольт-амперной характеристики: изменение его порогового напряжения (или напряжения на затворе при заданном фиксированном рабочем токе).

Главной особенностью работы детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МНОПТ является то, что граница SiO_2 и Si_3N_4 за счет большой концентрации ловушек позволяет захватывать 100 % носителей заряда обоих знаков, дошедших до этой границы, за счет чего можно получить лучшие характеристики: большую радиационную чувствительность, линейность калибровочной кривой и отсутствие фединга, чем при использовании ЧЭ на основе МОПТ. На рисунке 1 представлен разрез затворной системы р-МНОПТ, отображающий накопление радиационно-индуцированного заряда и поверхностных состояний в подзатворном SiO_2 и Si_3N_4 при воздействии ИИ в режиме работы, обеспечивающим перенос положительного заряда к границе раздела диэлектриков.

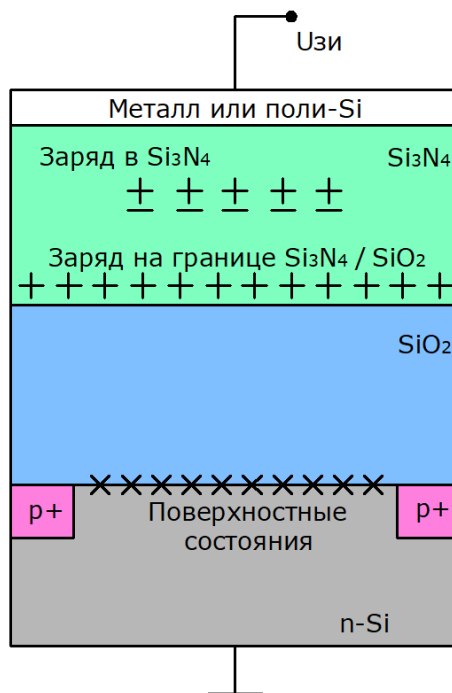


Рисунок 1 – Накопление радиационно-индуцированного заряда и поверхностных состояний в подзатворном Si_3N_4 и SiO_2 p-MНОПТ при воздействии ионизирующего излучения в режиме работы, обеспечивающим перенос положительного заряда к границе раздела диэлектриков

Во второй главе на основе анализа областей применения детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МДПТ были определены требования к характеристикам разрабатываемых детекторов для применения в *in vivo* дозиметрии, в составе РЭА КЭ и на ОИАЭ, в том числе для радиационных испытаний и регистрации «аварийных» доз персонала на ОИАЭ. Для применения в указанных областях разрабатываемых в рамках единой конструктивно-технологической концепции детекторов были проведены исследования, которые показали, что необходимо создать два типа детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-MНОПТ с индуцированным каналом на кремниевой подложке n-типа проводимости: с высокой чувствительностью более 70 мВ/Гр(SiO_2) и диапазоном измеряемых доз от 0,2 до 100 Гр(SiO_2), и с низкой чувствительностью не менее 1 мВ/Гр(SiO_2) и диапазоном измеряемых доз от 5 до 10^3 Гр(SiO_2).

Была разработана физическая модель, позволяющая прогнозировать радиационную чувствительность и диапазон измеряемых доз детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе p-канальных МНОП-транзисторов, которая, в отличие от ранее существующих моделей, учитывает влияние накопленного заряда на границе раздела $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ на напряженность электрического поля в слоях диэлектрика и на выход заряда в SiO_2 . Модель применима, в том числе, при слабых электрических полях в SiO_2 с напряженностью менее 10^3 В/см. Данная физическая модель прогнозирует величину изменения напряжения между затвором и истоком МНОПТ (ΔV_{MNOS}) при фиксированном значении тока стока во время облучения, зависящую от величины захваченного положительного заряда на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ на единицу площади (Q_p), электрической емкости слоя Si_3N_4 на единицу площади ($C_{\text{Si}_3\text{N}_4}$) и

полной электрической емкости затворной системы на единицу площади (C_{tot}). Данная зависимость представлена выражением 1.

$$\Delta V_{MNOS} = - \left(\frac{Q_p}{C_{Si_3N_4}} + \frac{M \cdot Q_p}{C_{tot}} \right), \#(1)$$

где M – безразмерный коэффициент, зависящий от характеристик изготовления МНОПТ, таких как технология выращивания и толщина слоя SiO_2 , концентрация ионов водорода в диоксиде кремния и т. д. Коэффициент M невозможно рассчитать из каких-либо выражений и зависимостей, он определяется экспериментально, и, как правило, не превышает значения 0,07.

Расчет дозовой зависимости $Q_p(D)$ должен проводиться по следующему выражению:

$$D = \frac{1}{q \cdot G_{SiO_2} \cdot d_{SiO_2}} \cdot \int_0^{Q_p} \frac{1}{Y(E_{SiO_2}(x))} dx, \#(2)$$

где q – заряд электрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), G_{SiO_2} – число электронно-дырочных пар, генерируемых в единице объема диоксида кремния на единицу поглощенной дозы ($G_{SiO_2} = 8,35 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3} \cdot \text{рад}^{-1}$, с учетом того, что для образования одной электронно-дырочной пары в диоксиде кремния требуется энергия равная 17 эВ), E_{SiO_2} – величина напряженности электрического поля в SiO_2 , $Y(E_{SiO_2})$ – выход заряда, d_{SiO_2} – толщина слоя SiO_2 .

Физическая модель прошла валидацию на детекторах с ЧЭ на основе р-МНОПТ с затворной системой $Si_3N_4 / SiO_2 = 100 / 106,7$ нм. Результаты расчета и экспериментальные результаты представлены на рисунке 2, из которого видно, что расчетные и экспериментальные результаты хорошо согласуются. Значение коэффициента модели M составило 0,015. Из дозовых зависимостей, представленных на рисунке 2 хорошо видно, что все они, независимо от постоянного отрицательного напряжения на затворе детектора во время облучения, обладают нелинейностью: уменьшением наклона, который говорит о снижении радиационной чувствительности. Нелинейный характер дозовой зависимости напряжения затвор-исток детектора с ЧЭ на основе р-МНОПТ при постоянном токе стока является следствием накопления радиационно-индуцированного заряда на границе раздела Si_3N_4 / SiO_2 , приводящего к снижению выхода заряда за счет уменьшения напряженности электрического поля в SiO_2 и критическому увеличению напряженности электрического поля в Si_3N_4 .

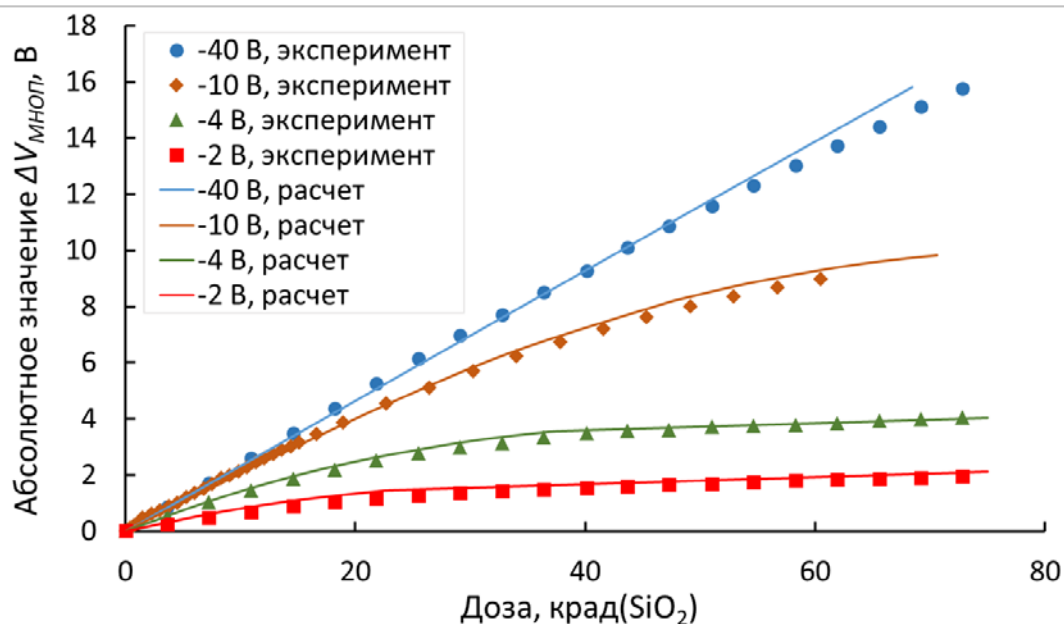


Рисунок 2 – Абсолютное значение изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющих толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм, от дозы гамма-излучения при приложении различных постоянных отрицательных напряжений на затвор во время облучения

Для получения оптимальных характеристик детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ по разработанной физической модели были проведены оптимизационные расчеты конструкции затворных систем транзисторов: толщин подзатворных диэлектрических слоев Si_3N_4 и SiO_2 . Расчеты конструкции диэлектрических слоев показали, что радиационную чувствительность детектора более 70 мВ/Гр(SiO_2) можно получить с помощью ЧЭ на основе р-МНОПТ со следующими параметрами затворной системы: $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 300$ нм, 150 / 800 нм, (параметры затворных систем представлены в порядке возрастания чувствительности) не превышая напряжение питания минус 40 В, при этом минимальная регистрируемая доза составит 0,04 Гр(SiO_2), а максимальная 390 Гр(SiO_2). Диапазон регистрируемых доз от 5 до 10^3 Гр, вплоть до 3500 Гр(SiO_2) возможно получить при использовании ЧЭ на основе р-МНОПТ с затворными системами: $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 35 / 35$ нм, 150 / 150 нм, 150 / 300 нм, при этом чувствительность будет варьироваться от 1,0 до 27 мВ/Гр(SiO_2).

В главе 3 продемонстрирована возможность создания в рамках единой конструктивно-технологической концепции детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ для применения в различных областях науки и техники, имеющих равнозначные электрические характеристики, но различные радиационные чувствительности и диапазоны измеряемых доз. Исследование возможности создания проводилось путем расчета электрических характеристик с учетом возможности использования кремниевых пластин с различным удельным сопротивлением, особенностей топологии и затворной системы транзисторов, а также особенностей и возможностей технологической линии производства.

На основе разработанных пяти вариантов топологии р-МНОПТ с кольцевой и полосковой конструкцией, имеющих ширину канала равную 10 и 20 мкм, и эффективным отношением ширины к длине канала равным 10; 12; 12,5 и 15 был изготовлен комплект фотошаблонов, который в дальнейшем был использован для изготовления транзисторов.

Разработанный технологический маршрут изготовления р-МНОПТ включает в себя 8 фотолитографий. Так как разрабатываемые р-МНОПТ имеют 4 варианта затворной системы: различную толщину подзатворных Si_3N_4 и SiO_2 , а их изготовление рассматривалось на кремниевой подложке 460 КЭФ 4,5 (100), была использована операция подгонки порогового напряжения методом ионного легирования бором подзатворной области транзистора. На рисунке 3 представлен разрез разработанного р-МНОПТ после всех технологических операций, состав и толщина слоев разработанного р-МНОПТ представлены в таблице 1.

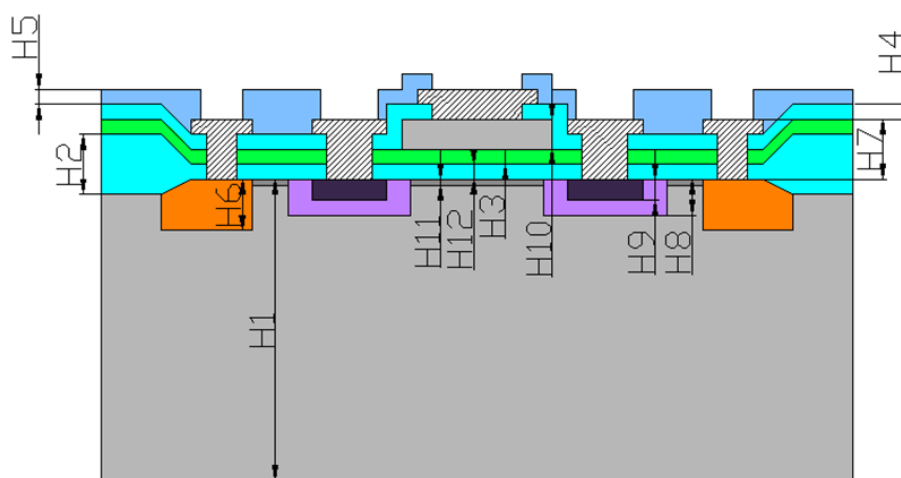


Рисунок 3 – Структура разработанного р-канального МНОП-транзистора

Таблица 1 – Состав и толщина слоев разработанного р-МНОПТ

№ слоя	Наименование слоя	Толщина, мкм	Примечание
Н1	Подложка п - типа Si (100)	460 ± 20	
Н2	LOCOS	1,2 ± 0,1	
Н3	Подзатворный Si_3N_4	0,035 / 0,15	В зависимости от исполнения
Н4	ФСС	0,8 ± 0,1	
Н5	Пассивация SiO_2	0,9 ± 0,1	
Н6	Охранный кольцо	-	Не регламентируется
Н7	Металлизация Al-Ti	1,7 ± 0,2	
Н8	р-область истока/стока	-	Не регламентируется
Н9	р+-область истока/стока	от 0,3 до 0,5	
Н10	Поликремний	0,7 ± 0,05	
Н11	Подгонка порога	-	Очень малая величина
Н12	Подзатворный SiO_2	0,035 / 0,15 / 0,3 / 0,8	В зависимости от исполнения

Для проведения исследований было изготовлено 500 образцов детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ: по 100 образцов каждого из пяти вариантов топологии транзистора, при этом каждый из пяти вариантов топологии включал в себя 4 варианта затворной системы (по 25 образцов каждого варианта затворной системы). Для удобства проведения измерений и испытаний детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ и с учетом размера кристалла 1×1 мм для изготовления детекторов был выбран корпус 402.16-33.

Измеренные электрические характеристики изготовленных детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ пяти вариантов топологии транзистора и четырех вариантов затворной системы полностью соответствуют предъявляемым требованиям.

В главе 4 представлены исследования детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ. Показано, что зависимость радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ от отрицательного напряжения на затворе во время воздействия ИИ имеет немонотонный характер с выраженным максимум: сначала чувствительность растет при увеличении отрицательного напряжения на затворе за счет увеличения выхода заряда, обусловленного увеличением напряженности электрического поля в SiO_2 , а затем снижается за счет достижения предельно допустимой напряженности электрического поля в слое SiO_2 , определяемой инжекцией Фаулера-Нордгейма из кремниевой подложки, равной ≈ 5 МВ/см, и(или) предельно допустимой напряженности электрического поля в слое Si_3N_4 , определяемой началом переноса заряда через данный диэлектрик вследствие полевой ионизации ловушек по механизму Пула-Френкеля, равной ≈ 2 МВ/см. На рисунке 4 продемонстрирована зависимость радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющего толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм, от отрицательного напряжения на затворе.

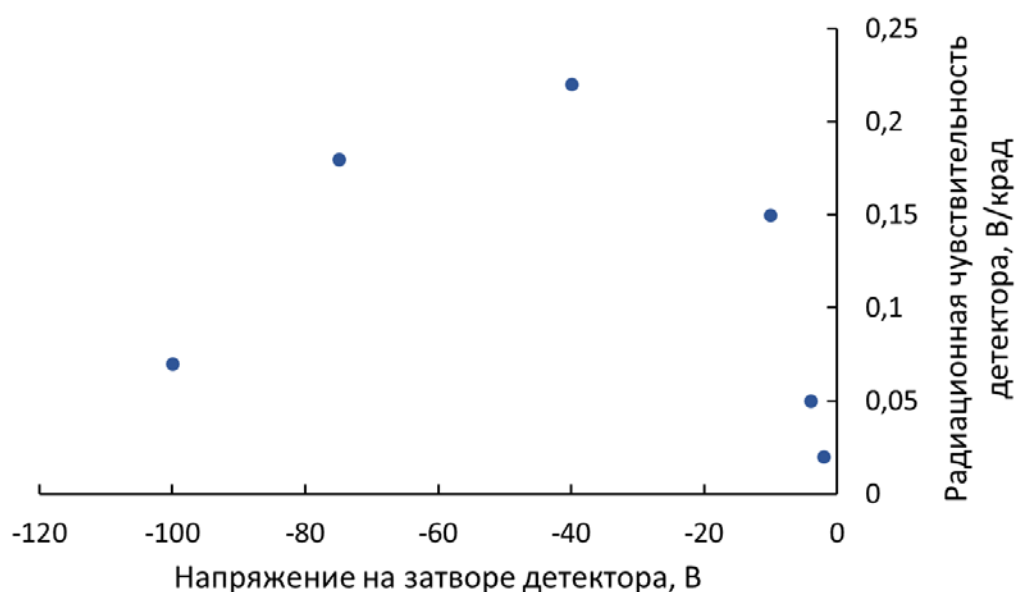


Рисунок 4 – Зависимость радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющего толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм, от отрицательного напряжения на затворе

Детектор поглощенной дозы ИИ на основе р-МНОПТ может работать, как при отрицательном, так и при положительном напряжении на затворе во время облучения. На рисунке 5 изображены абсолютные значения напряжения между затвором и истоком детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющего толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм, в зависимости от дозы ИИ в режиме с постоянным напряжением минус 40 В, а затем + 40 В на затворе.

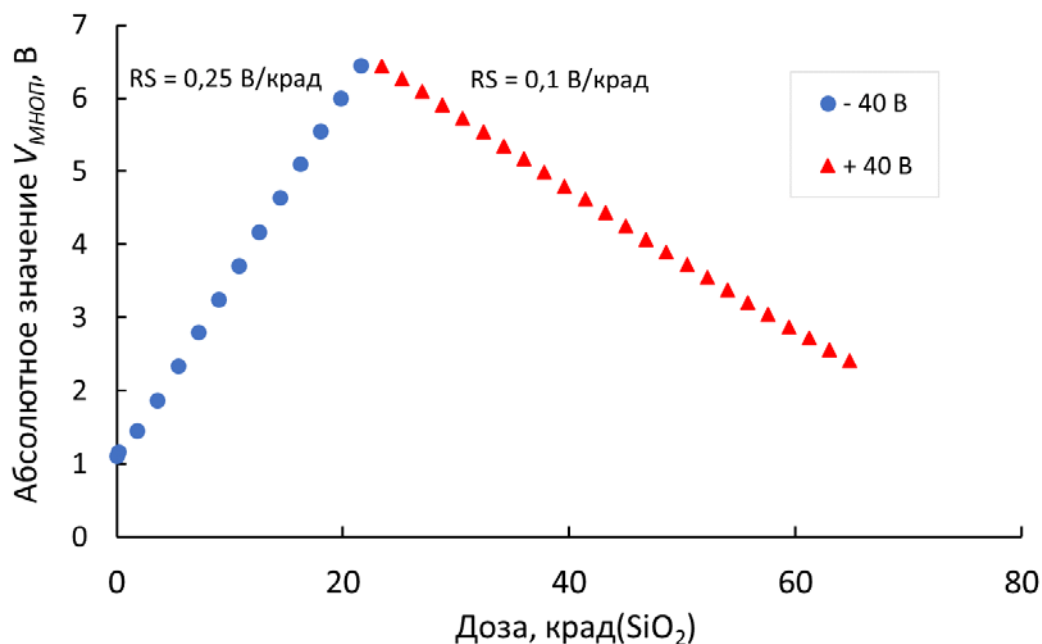


Рисунок 5 – Абсолютные значения напряжения между затвором и истоком детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющего толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм, в зависимости от дозы ИИ в режиме с постоянным напряжением минус 40 В, а затем + 40 В на затворе

Из рисунка 5 видно, что радиационная чувствительность детектора при приложении постоянного положительного напряжения на затвор меньше, чем при приложении аналогичного отрицательного напряжения: 0,1 В/крэд(SiO_2) и 0,25 В/крэд(SiO_2), соответственно. Данный факт объясняется захватом дырок в SiO_2 вблизи поверхности кремния, частично компенсирующих захваченный на границе раздела диэлектриков отрицательный заряд при приложении положительного напряжения на затвор во время облучения. Детектор поглощенной дозы ИИ на основе р-МНОПТ может характеризоваться близкими значениями радиационной чувствительности как при отрицательном, так и при положительном напряжении на затворе, приложенном во время облучения. Величина и направление сдвига информативного параметра при отрицательном напряжении на затворе определяется захватом радиационно-индуцированных дырок на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$, а при положительном — захватом радиационно-индуцированных электронов на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ и дырок на границе SiO_2 / Si . Используя данный эффект можно проводить подстройку порогового напряжения транзистора сдвигая его в сторону увеличения или уменьшения порогового напряжения.

На основе эффекта сдвига информативного параметра детектора в сторону отрицательных или положительных напряжений разработан оригинальный схемотехнический метод увеличения радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, заключающийся в приложении при облучении разного по знаку напряжения на затворы двух р-МНОПТ, расположенных на одном кристалле, являющимся ЧЭ детектора. Метод позволяет повысить радиационную чувствительность детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе

р-МНОПТ до двух раз.

Измерения таких радиационных характеристик, как чувствительность и диапазон измеряемых доз, на изготовленных в соответствии с требованиями детекторах показали, что радиационные характеристики детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ с толщиной диэлектрических слоев $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 35 / 35$ нм, $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 150$ нм и $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 300$ нм хорошо соответствуют расчетам, проведенным по разработанной в главе 2 физической модели накопления радиационно-индуцированного заряда в подзатворных диэлектриках р-МНОПТ, за исключением случая при достаточно больших напряженностях электрических полей в тонких слоях подзатворных диэлектриков и детекторов с толщиной диэлектрических слоев $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 800$ нм имеющих радиационную чувствительность, значительно превышающую расчетную, что может быть связано с особенностью технологии получения толстых слоев диоксида кремния.

В главе 5 описано применение разработанных и изготовленных детекторов поглощенной дозы ИИ в рамках единой конструктивно-технологической концепции на основе р-МНОПТ для различных применений со специально разработанными дозиметрами.

Для применения разработанных и изготовленных детекторов в *in vivo* дозиметрии, в составе РЭА КА и на ОИАЭ, в том числе для радиационных испытаний, а также для регистрации «аварийных» доз персонала на ОИАЭ были разработаны специальные дозиметры.

Необходимо отметить, что все разработанные и изготовленные в ходе данной диссертационной работы детекторы поглощенной дозы ИИ на основе р-МНОПТ с толщиной подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 35 / 35$ нм, $150 / 150$ нм, $150 / 300$ нм и $150 / 800$ нм нашли свое применение в одной или нескольких заявленных областях науки и техники.

В заключении приведены основные результаты работы, заключающиеся в следующем:

1. Проведен детальный анализ, рассмотрены принципы работы полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения, проведена классификация детекторов в зависимости от технологии изготовления и приведены их основные конструкции и области применения. Обосновано применение МДП-транзисторов в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения, описаны принципы работы детекторов с чувствительными элементами на основе МОП- и МНОП-транзисторов и приведены основные требования к детекторам данного типа.

2. Разработана физическая модель, позволяющая прогнозировать радиационную чувствительность и диапазон измеряемых доз детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канальных МНОП-транзисторов, которая, в отличие от ранее существующих моделей, учитывает влияние накопленного заряда на границе раздела $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ на напряженность электрического поля в слоях диэлектрика и на выход заряда в SiO_2 . Модель применима, в том числе, при слабых электрических полях в SiO_2 с напряженностью менее 10^3 В/см . Экспериментальные данные, полученные на изготовленных детекторах хорошо согласуются с результатами расчетов, проведенных по разработанной модели.

3. Показано, что нелинейный характер дозовой зависимости напряжения затвор-исток р-канального МНОП-транзистора при постоянном токе стока является следствием накопления радиационно-индуцированного заряда на границе раздела $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$, приводящего к снижению выхода заряда за счет уменьшения напряженности электрического поля в SiO_2 и критическому увеличению напряженности электрического поля в Si_3N_4 .

4. Продемонстрирована возможность создания в рамках единой конструктивно-технологической концепции детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ для применения в различных областях науки и техники, имеющих равнозначные электрические характеристики, но различные радиационные чувствительности и диапазоны измеряемых доз. В рамках исследования возможности создания р-МНОПТ с заданными характеристиками для применения в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы был выбран вариант технологического исполнения и в соответствии с ним проведены расчеты основных электрических характеристик. Разработано пять вариантов топологии р-МНОПТ с кольцевой и полосковой конструкцией, разработан технологический маршрут их изготовления, включающий в себя 62 технологические операции, в том числе 8 фотолитографий, проведено приборно-технологическое моделирование, результаты которого очень хорошо согласуются с измерениями электрических характеристик, проведенными на изготовленных транзисторах.

5. Определены и научно обоснованы конструкции затворных систем р-МНОПТ, использующихся в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения и режимы работы детекторов для получения необходимой радиационной чувствительности и диапазона измеряемых доз при заданных условиях применения. Показано, что радиационную чувствительность более $70 \text{ мВ/Гр}(\text{SiO}_2)$, вплоть до $246 \text{ мВ/Гр}(\text{SiO}_2)$, можно получить на детекторах с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ при приложении на затвор не более 40 В отрицательного напряжения, имеющих следующие параметры затворной системы: $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 300 \text{ нм}$, $150 / 800 \text{ нм}$, при этом диапазон измерения доз составит от $0,04$ до $390 \text{ Гр}(\text{SiO}_2)$. Максимальный диапазон регистрируемых доз от 5 до $10^3 \text{ Гр}(\text{SiO}_2)$, вплоть до $3,5 \cdot 10^3 \text{ Гр}(\text{SiO}_2)$, возможно получить на детекторах с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ, имеющих следующие затворные системы: $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 35 / 35 \text{ нм}$, $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 150 \text{ нм}$, $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 300 \text{ нм}$, при этом радиационная чувствительность будет варьироваться от $1,0$ до $27 \text{ мВ/Гр}(\text{SiO}_2)$.

6. Впервые в рамках единой конструктивно-технологической концепции созданы и исследованы детекторы поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ с заданными характеристиками, оптимизированные для применения в *in vivo* дозиметрии, контроле дозовых нагрузок на РЭА КА, проведении радиационных испытаний, измерении поглощенной дозы ионизирующего излучения на ОИАЭ и измерении поглощенной дозы ионизирующего излучения, при получении персоналом «аварийных» доз. Систематически изучено влияние конструктивно-технологических параметров и условий эксплуатации на характеристики детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ для широкого спектра применений.

7. Показано, что радиационная чувствительность детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канального МНОП-транзистора при увеличении отрицательного напряжения на затворе вначале растет вследствие увеличения выхода заряда, связанного с ростом напряженности электрического поля в SiO_2 , а затем снижается вследствие достижения предельно допустимой напряженности электрического поля в SiO_2 и(или) в Si_3N_4 . Также показано, что детекторы поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ имеют большую радиационную чувствительность, чем детекторы с ЧЭ на основе МОП-транзисторов при равной или даже меньшей толщине SiO_2 .

8. Установлено, что детектор поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канального МНОП-транзистора может характеризоваться близкими значениями радиационной чувствительности как при отрицательном, так и при положительном напряжении на затворе, приложенном во время облучения. Величина и направление сдвига информативного параметра при отрицательном напряжении на затворе определяется захватом радиационно-индуцированных дырок на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$, а при положительном – захватом радиационно-индуцированных электронов на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ и дырок на границе SiO_2 / Si . На основе этого эффекта разработан оригинальный схмотехнический метод увеличения радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, заключающийся в приложении при облучении разного по знаку напряжения на затворы двух р-МНОПТ, расположенных на одном кристалле, являющимся чувствительным элементом детектора. Метод позволяет повысить радиационную чувствительность детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ до двух раз.

9. Радиационная чувствительность и диапазон измеряемых доз разработанных и изготовленных детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ соответствуют требуемым характеристикам для заданных условий применения и режимов эксплуатации: максимальная радиационная чувствительность составила 577 мВ/Гр(SiO_2), а максимальный диапазон измеряемых доз составил от 4,8 до $4 \cdot 10^3$ Гр(SiO_2). При одновременном использовании двух разработанных детекторов с высокой и низкой радиационной чувствительностью диапазон измеряемых доз составит от 0,04 до $4 \cdot 10^3$ Гр(SiO_2), а радиационная чувствительность составит

величину от 577 до 1,7 мВ/Гр(SiO₂) при напряжении не более 40 В и токе потребления ниже 250 мкА.

10. Научно-техническая значимость работы подтверждена практическим применением разработанных и изготовленных детекторов совместно с разработанными и изготовленными дозиметрами в *in vivo* дозиметрии, радиоэлектронной аппаратуре космических аппаратов, дозиметрии на объектах использования атомной энергии, дозиметрии при проведении радиационных испытаний и в персональной дозиметрии для регистрации «аварийных» доз персонала на ОИАЭ.

Список публикаций по теме диссертации:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Модель накопления радиационно-индуцированного заряда в детекторах поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе МНОП-транзисторов / В.В. Емельянов, А.В. Сиделев, А.Е. Нестеренко // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2025. – Выпуск 1, С. 24 – 31.

2. Сравнение радиационной чувствительности детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МОП- и МНОП-транзисторов / А.В. Сиделев // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2025. – Выпуск 2, С. 5 – 8.

3. Радиационная чувствительность детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов при различной полярности напряжения на затворе / А.В. Сиделев, В.В. Емельянов, А.Е. Нестеренко // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2025. – Выпуск 2, С. 23 – 27.

4. Моделирование характеристик гамма-детекторов на основе кремниевых р-і-п-структур / С.А. Леготин, С.Ю. Юрчук, В.Н. Мурашев, М.П. Коновалов, К.И. Таперо, А.В. Сиделев, Е.П. Сиделева, Н.С. Хрущев // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2024. – Т. 27, № 3, С. 232 – 244.

5. Изменение параметров бета-вольтаических полупроводниковых преобразователей на основе наноструктурированного диоксида титана при воздействии ионизирующего излучения космического пространства / А.В. Брацук, А.В. Сиделев, Д.С. Киселёв, С.Ю. Ковтун, Е.Н. Фёдоров, А.А. Урусов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, 2024. – № 1 (272). – С. 31-39.

6. Детекторы быстрых нейтронов на основе GaAs структур / Г.И. Кольцов, С.И. Диденко, С.В. Черных, А.В. Черных, А.В. Сиделев, Г.И. Бритвич, А.П. Чубенко // Вестник ИКСИ. Серия «с». – 2012. – Вып. № 9. – С. 79-90. Инв. № 19648. (закрытый перечень ВАК).

7. Исследование спектральных характеристик детекторов ядерных излучений на GaAs, полученном методом хлоридной эпитаксии / Г.И. Кольцов, С.И. Диденко,

А.В. Черных, С.В. Черных, А.В. Сиделев // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2010. – № 3. – С. 66-71.

Публикации в изданиях, индексируемых в базах цитирования Scopus и Web of Science

8. Radiation effect on the polymer-based capacitive relative humidity sensors / I. V. Shchemerov, S.A. Legotin, P.B. Lagov, Y.S. Pavlov, K.I. Tapero, A.S. Petrov, A.V. Sidelev, V.S. Stolbunov, T.V. Kulevoy, M.E. Letovaltseva, V.N. Murashev, M.P. Kononov, V.N. Kirilov // Nuclear Engineering and Technology. – 2022. – Vol. 54, № 8, P. 2871 – 2876.

9. Multiscale Modeling of Accumulation of Radiation Defects in Silicon Detectors Under Alpha Particle Irradiation / Mikhail Yu. Romashka, Alexey V. Yanilkin, Alexander I. Titov, Dmitry V. Gusin, Member, IEEE, Alexey V. Sidelev, and Dmitry Yu. Mokeev // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2016. – Vol. 63, № 4, P. 2029 – 2038.

Материалы российских и международных конференций

10. Определение выхода заряда в диоксиде кремния при воздействии гамма-излучения с помощью МНОП-структуры / В.В. Емельянов, А.В. Сиделев, А.Е. Нестеренко // Тезисы докладов 28-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2025» – Лыткарино (Россия), 2025.

11. Оптимизационные расчеты конструкции затворной системы МДП-детекторов дозы типа МНОП / А.В. Сиделев, В.В. Емельянов, Е.П. Сиделева // Тезисы докладов 27-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2024». – Лыткарино (Россия), 2024.

12. Модель накопления радиационно-индуцированных зарядов в затворной системе МНОП-транзистора / В.В. Емельянов, Е.П. Матюхина, А.Е. Нестеренко, А.В. Сиделев // Тезисы докладов 26-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2023». – Лыткарино (Россия), 2023.

13. Радиационный отклик МНОП-структуры на воздействие стационарного гамма-излучения при различной полярности напряжения на затворе / В.В. Емельянов, А.Е. Нестеренко, А.В. Сиделев // Тезисы докладов 25-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2022». – Лыткарино (Россия), 2022.

14. Оценка предельной чувствительности детекторов ионизирующих излучений на основе МНОП-структур / А.В. Сиделев // Тезисы докладов 25-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2022». – Лыткарино (Россия), 2022.

15. Повышение чувствительности детектора на основе МНОП-структуры с помощью оптимизации выхода заряда в SiO_2 / В.В. Емельянов, А.В. Сиделев, А.Е. Нестеренко // Тезисы докладов 24-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2021». – Лыткарино (Россия), 2021.

16. Архитектура монолитного матричного чувствительного элемента рентгеновского излучения / С.А. Леготин, А.В. Сиделев, С.Ю. Юрчук, В.Н.

Мурашев, М.П. Коновалов, Н.С. Хрущев // Тезисы докладов 27-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2024». – Лыткарино (Россия), 2024.

17. Технологические возможности АО «НИИП» для испытаний и исследований радиационной стойкости ЭКБ в бескорпусном исполнении. Направления и перспективы развития / А.С. Ватуев, А.В. Сиделев // Тезисы докладов 27-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2024». – Лыткарино (Россия), 2024.

18. Разработки АО «НИИП» в области детекторов ионизирующего излучения / А.В. Сиделев // Тезисы докладов 26-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2023». – Лыткарино (Россия), 2023.

19. Определение оптимальных параметров ячейки матричного чувствительного элемента детектора рентгеновского излучения / С.А. Леготин, А.В. Сиделев, С.Ю. Юрчук, Н.С. Хрущев // Тезисы докладов 26-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2023». – Лыткарино (Россия), 2023.

20. Оценка дефектообразования и ионизационных эффектов в полупроводниковом преобразователе бета-вольтаического источника питания при работе в космическом пространстве / А.С. Зуев, Р.Г. Усеинов, А.В. Сиделев // Тезисы докладов 25-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2022». – Лыткарино (Россия), 2022.

21. Структура и конструкция монолитного матричного чувствительного элемента для квантовых координатных детекторов ионизирующих излучений / В.Н. Мурашев, К.И. Таперо, С.А. Леготин, А.В. Сиделев // Тезисы докладов 25-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2022». – Лыткарино (Россия), 2022.

22. Multiscale modeling of accumulation of radiation defects in silicon detectors under alpha particle irradiation / Mikhail Yu. Romashka, Alexey V. Yanilkin, Alexander I. Titov, Dmitry V. Gusin, Alexey V. Sidelev, Dmitry Yu. Mokeev // 2015 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). – Moscow (Russia), 2015.

23. Совершенствование конструкции альфа-детекторов для использования в газонаполненных трубках нейтронных генераторов / А.В. Сиделев // Сборник тезисов VII научно-технической конференции молодых ученых ВНИИА. – Москва (Россия), 2013.

24. Ion Implanted GaAs Detectors for Registration of Heavy Charged Particles and γ -quanta / G.I. Koltsov, S.I. Didenko, A.V. Chernykh, S.V. Chernykh, A.V. Sidelev // 18th International Conference on Ion Implantation Technology. Program and Abstracts. Kyoto, Japan, 2010. – P1-50.

25. VPE GaAs как материал для детекторов излучений / Г.И. Кольцов, С.И. Диденко, А.В. Черных, С.В. Черных, А.В. Сиделев // Тезисы докладов НКРК-2010. Том II. – М.: ИК РАН, 2010. – С. 314-315.

26. Выбор контакта Шоттки к VPE-GaAs для создания поверхностно-барьерных детекторов ядерного излучения / А.В. Черных, С.В. Черных, С.И.

Диденко, А.В. Сиделев, Г.И. Кольцов. // Микро- и нанотехнологии в электронике. Материалы III международной научно-технической конференции. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т., 2010.– С. 291-295.

27. Исследование радиационной чувствительности полевых транзисторов с барьером Шоттки / С.И. Диденко, М.П. Коновалов, А.А. Дорофеев, А.В. Сиделев, Н.Б. Гладышева // Материалы III международной научно-технической конференции. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т., 2010.– С. 245-247.

28. Создание детекторов ядерного излучения на основе полупроводниковых соединений Al_{0.5}B_{0.5} для регистрации слабозаимодействующих частиц и квантов / А.В. Сиделев, С.И. Диденко, Г.И. Кольцов, М.П. Коновалов, Ю.В. Осипов, А.В. Черных, С.В. Черных // Микро- и нанотехнологии в электронике. Материалы международной научно-технической конференции– Нальчик: Каб.-Балк. ун-т., 2009.– С. 239-241.

29. Исследование рабочих характеристик детекторов ядерных излучений на VPE GaAs / А.В. Сиделев, А.В. Черных, С.В. Черных // Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА. Материалы научно-технической конференции. – М.: ФГУП «НПП «Пульсар», 2009. – С. 131-133.

Подписано в печать 11.11.2025 г.

Формат 60×90 1/16. Бумага писчая.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ №

Отдел полиграфии Научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова
119192 Москва, Ломоносовский проспект 27