

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Сиделева Алексея Владимировича на тему:
«РАЗРАБОТКА ДЕТЕКТОРОВ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ
ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ
ЭЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВЕ
P-КАНАЛЬНЫХ МНОП-ТРАНЗИСТОРОВ»

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Тема диссертации является **актуальной** в связи с возрастающими требованиями к точности и надежности дозиметрического контроля в различных областях: от космической техники до ядерной медицины. Работа соответствует указу Президента РФ от 18 июня 2024 г. № 529 по направлению VII «Электронная компонентная база» (работа напрямую относится к разработке новой электронной компонентной базы для приборов радиационного контроля) и направлению VIII «Медицина будущего» (разработанные детекторы предназначены для *in vivo* дозиметрии в лучевой терапии). Разработанные детекторы соответствуют наукоемкой технологии 35 «Технологии создания материалов и устройств для квантовых вычислений, сенсоров и метрологических систем» (детекторы могут рассматриваться как сенсоры нового поколения). Также работа соответствует стратегии научно-технологического развития РФ (утв. Указом Президента от 28 февраля 2024 г. № 145) по направлению 6 «Формирование систем обеспечения национальной безопасности», так как детекторы могут применяться для контроля радиационной обстановки на объектах критической инфраструктуры.

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

Во введении автор обосновывает актуальность научной работы, показывает научную новизну и практическую значимость результатов, полученных в ходе выполнения работы и представляет положения, выносимые на защиту.

В первой главе автор делает обзор конструкций полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения и рассматривает их основные конструкции. Акцентирует внимание на применении детекторов ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов и детально описывает принцип работы таких детекторов. При рассмотрении характеристик детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов для применения в *in vivo* дозиметрии, контроле дозовых нагрузок на радиоэлектронную аппаратуру космических аппаратов,

проведении радиационных испытаний, измерении поглощенной дозы ионизирующего излучения на объектах использования атомной энергии и измерении поглощенной дозы ионизирующего излучения, полученной персоналом на объектах использования атомной энергии при «аварии» автор ставит цель работы и формулирует задачи.

Цель данной диссертации – 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 и на объектах использования атомной энергии, 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 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 напряжения на затворе при облучении;

- разработать схемотехнический метод увеличения радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ.

Во второй главе автор определяет требования к характеристикам детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения, применяемым в различных областях науки и техники, и проводит выбор конструкции МНОП-транзистора для использования в качестве чувствительного элемента детекторов. В ходе выбора конструкции транзистора для применения в качестве чувствительного элемента за основу был выбран р-канальный МНОП-транзистор с индуцированным каналом на кремниевой подложке

n-типа проводимости. Для прогнозирования радиационной чувствительности и диапазона измеряемых доз детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канальных МНОП-транзисторов была разработана физическая модель, которая прошла валидацию на тестовых структурах. После чего был проведен расчет радиационных характеристик детекторов с различными затворными системами: толщинами подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 35 / 35$ нм, $150 / 150$ нм, $150 / 300$ нм и $150 / 800$ нм.

В третьей главе путем расчета электрических характеристик р-канальных МНОП-транзисторов с определенными в главе 2 толщинами диэлектрических слоев была исследована возможность создания данных транзисторов для использования в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с требуемыми характеристиками в рамках единой конструктивно-технологической концепции. Исследование показало, что для приведения электрических характеристик транзисторов с различными толщинами $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ к требуемым значениям необходима дополнительная технологическая операция ионного легирования бором подзатворной области транзистора. Для изготовления р-канальных МНОП-транзисторов была разработана топология кристаллов и технологический маршрут изготовления, состоящий из 62 операций, включая 8 фотолитографий. Для проведения исследований было изготовлено 500 образцов детекторов с четырьмя затворными системами.

В четвертой главе исследовались радиационные чувствительности изготовленных детекторов: чувствительность и диапазон измеряемых доз. Работа детекторов была исследована в двух режимах: с постоянным током в канале детектора и с постоянным напряжением на затворе детектора. Максимальная радиационная чувствительность детекторов наблюдалась при работе с постоянным отрицательным напряжением на затворе детектора, а наибольший диапазон измеряемых доз наблюдался при работе с постоянным током в канале детектора.

В пятой главе представлены разработанные в ходе работы дозиметры для работы с изготовленными детекторами поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов для применения в *in vivo* дозиметрии, радиоэлектронной аппаратуре космических аппаратов, дозиметрии на объектах использования атомной энергии, дозиметрии при проведении радиационных испытаний и персональной дозиметрии для регистрации «аварийных» доз персонала.

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы.

Автореферат диссертации полностью соответствует содержанию диссертации и отражает основные результаты, полученные автором работы.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обладают высокой **степенью обоснованности**. Автор последовательно провел сравнительный анализ существующих типов детекторов ИИ на основе МДП-транзисторов для различных применений; разработал и валидировал физическую модель накопления радиационно-индуцированного заряда; экспериментально подтвердил расчетные зависимости; обосновал выбор конструктивных параметров МНОПТ.

Достоверность результатов исследования подтверждается хорошим согласованием результатов данной работы с результатами исследований, проведенными другими учеными. Апробация основных результатов диссертации была проведена на тематических научно-технических конференциях.

Стоит выделить основные элементы **научной новизны** Сиделева А.В. Разработана физическая модель, учитывающая влияние накопленного заряда на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ на напряженность электрического поля и выход заряда, применимая в том числе при слабых полях ($< 10^3$ В/см). Установлен механизм нелинейности дозовой зависимости напряжения затвор-исток. Выявлена немонотонная зависимость радиационной чувствительности от отрицательного напряжения на затворе.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии физических основ создания полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения. Разработанная модель позволяет прогнозировать радиационные характеристики детекторов и оптимизировать их конструкцию для различных условий применения.

Практическая ценность работы подтверждена актами внедрения в АО «НИИП», АО «Российские космические системы», ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова». Также результаты работы использованы в учебном процессе НИТУ «МИСИС» и ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». Результаты работы могут быть использованы при создании дозиметров для космических аппаратов; при разработке систем *in vivo* дозиметрии; при контроле радиационной обстановки на объектах атомной энергетики; при проведении радиационных испытаний электронной аппаратуры.

Замечания по диссертации

1. Экспериментальная база ограничена воздействием γ -излучения. Отсутствуют результаты для протонов, электронов, тяжёлых ионов. Это важно для использования детектора в космосе.

2. При работе на космическом аппарате дозиметр может нагреваться от солнечного излучения, работы электроники, нагрева корпуса космического аппарата. Радиация (гамма, протоны, электроны, тяжёлые ионы) создаёт в

диэлектриках захваченный заряд, локальные дефекты, процессы генерации–рекомбинации. Эти процессы не являются основными источниками нагрева. Повышенная температура ускоряет релаксацию (выход) заряда из ловушек диэлектриков. Поэтому, уменьшается накопленный дозовый сигнал, наблюдается фединг. В диссертации не достаёт анализа влияния температуры на фединг.

3. Некоторые экспериментальные характеристики расходятся с расчётными. Из таблицы 23 заметно, что реальные верхние границы измеряемых доз выше расчётных до 30% для ряда толщин диэлектрических слоев (35/35, 150/150, 150/300 нм). В диссертации указано: «Это объясняется тем, что расчет верхней границы диапазона проводился до значения электрического поля в Si_3N_4 равного 2,1 МВ/см, а на изготовленных транзисторах реальная величина критической напряженности электрического поля в Si_3N_4 оказалась выше». Экспериментальная верхняя граница диапазона измеряемых доз для затворной системы $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 800$ нм значительно ниже расчетной и это объясняется «аномально высокой чувствительностью детектора, приводящей к превышению критической величины напряженности электрического поля в Si_3N_4 уже при достаточно малых значениях поглощенной дозы». Такие объяснения являются качественной гипотезой, но не научным доказательством.

4. Введение слишком объёмное (11 страниц), нарушает типовой баланс страниц.

5. В ходе работы было разработано 5 вариантов топологии р-канальных МНОП-транзисторов для использования в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения; не считая тестовые образцы, а радиационные характеристики детекторов, такие как чувствительность и диапазон измеряемых доз представлены только для одного варианта топологии чувствительного элемента: полосковой с длиной канала 10 мкм и соотношением ширины к длине канала равной 12,5.

6. В главе 3 исследуется возможность создания р-канальных МНОП-транзисторов для использования в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с требуемыми характеристиками в рамках единой конструктивно-технологической концепции. Проведен расчет максимально допустимого напряжения сток-исток, порогового напряжения транзисторов, но не представлены расчеты тока утечки сток-исток и затвор-исток.

Все замечания являются не критичными и не влияют на общую целостность, актуальность и новизну диссертационной работы.

Основные научные результаты достаточно полно отражены в публикациях, в том числе по перечню изданий ВАК. Соискатель опубликовал 9 научных работ, из них 7 – в изданиях, рекомендованных ВАК.

Заключение. Диссертация Сиделева Алексея Владимировича представляет собой завершенное научное исследование, содержащее решение актуальной научной задачи. Работа выполнена на высоком научно-техническом уровне, соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (со всеми последующими изменениями), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Официальный оппонент, к.т.н.

Гусев Евгений Эдуардович

15.12.2025г.

Сведения об оппоненте:

Ученая степень: кандидат технических наук по специальности 05.27.01. Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Должность: начальник научно-исследовательской лаборатории «Микросборка нано- и микросистемной техники»

Организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»

Адрес: 124498, Россия, Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, д. 1

Телефон: +7(499)731-44-41

Адрес электронной почты: bubbledouble@mail.ru

Сайт: <https://miet.ru/>

Подпись Гусева Евгения Эдуардовича

И.о. нач. ОРП Гусев

но:

Гусев