



АО «НПП «ПУЛЬСАР»

105187, Москва, Окружной проезд, д. 27
Тел.: (495) 365-12-30; Факс: (495) 366-55-83
E-mail: administrator@pulsarnpp.ru
<http://pulsarnpp.ru>

На № _____ от _____

№ _____

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
АО «НПП «Пульсар»,
доктор технических наук, профессор

В.В. Колковский

Владимирович Колковский

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Пульсар» на диссертацию Сиделева Алексея Владимировича на тему «Разработка детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств

Актуальность темы исследования

Тема диссертации А.В. Сиделева является актуальной, поскольку в ней решается важная **научно-техническая задача**, а именно разработка в рамках единой конструктивно-технологической концепции детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов для широкого спектра условий применения. Существуют различные полупроводниковые детекторы ионизирующих излучений, среди которых несомненный интерес представляют детекторы поглощенной дозы на основе МДП-транзисторов, которые зарекомендовали себя в таких областях, как ядерная медицина и космическая техника. Чаще всего в качестве чувствительных элементов таких детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения применяются р-канальные МОП-транзисторы в силу монотонного характера дозовой зависимости порогового напряжения, которое часто рассматривается как информативный параметр. Кроме того, возможно применение серийно выпускаемых МОП-транзисторов (как дискретных, так и транзисторов из состава КМОП интегральных схем), однако для получения высокой радиационной чувствительности и широкого диапазона измеряемых доз, как правило, требуется разработка специальных чувствительных элементов под конкретные планируемые задачи.

Детекторы поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов обладают целым рядом преимуществ по сравнению с детекторами на основе

МОП-транзисторов. К таким преимуществам можно отнести: более высокую радиационную чувствительность, линейность калибровочной кривой, отсутствие отжига, отсутствие зависимости от мощности дозы ионизирующего излучения. На основании этого в данной диссертационной работе внимание было сконцентрировано на разработке детекторов поглощенной дозы для широкого спектра применений именно на основе транзисторных МНОП-структур.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация содержит введение, пять глав, заключение, список литературы из 100 наименований. Общий объем диссертации составляет 186 страниц, включая 77 иллюстраций и 23 таблицы.

Во введении обоснована актуальность научной работы, сформулирована цель и задачи диссертации, продемонстрирована научная новизна, показана практическая значимость и достоверность результатов исследования.

В первой главе был проведен обзор полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения, рассмотрены их основные конструкции и сферы применения. Рассмотрены принципы работы детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе МОП- и МНОП-транзисторов, выделены преимущества детекторов с чувствительными элементами на основе МНОП-транзисторов.

Во второй главе автором были сформулированы требования к характеристикам детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МНОП-транзисторов для применения в различных областях науки и техники. В данной главе также предложена физическая модель накопления радиационно-индуцированного заряда в подзатворных диэлектриках р-канального МНОП-транзистора, которая прошла валидацию на изготовленных тестовых транзисторах с толщиной подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм. После чего были проведены расчеты таких радиационных характеристик, как чувствительность и диапазон измеряемых доз для транзисторов с различными толщинами подзатворных нитрида и диоксида кремния.

В третьей главе автор исследовал возможность создания р-канальных МНОП-транзисторов в рамках единой конструктивно-технологической концепции для применения их в качестве чувствительных элементов детекторов, которые планируются к применению для решения широкого спектра задач. Была разработана топология кристаллов транзисторов и маршрут изготовления, который включал в себя 62 технологические операции. Было изготовлено несколько партий транзисторных структур, а на их основе были изготовлены детекторы поглощенной дозы ионизирующего излучения.

Четвертая глава посвящена исследованию радиационной чувствительности изготовленных детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов. Максимальная радиационная

чувствительность изготовленных детекторов наблюдалась у детекторов с чувствительными элементами, имеющими толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 800$ нм, а максимальный диапазон измеряемых доз при толщине подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 35 / 35$ нм.

В пятой главе представлены результаты практического применения разработанных детекторов совместно с разработанными дозиметрами в такие сферы науки и промышленности, как: в *in vivo* дозиметрию, радиоэлектронную аппаратуру космических аппаратов, дозиметрию на объектах использования атомной энергии, дозиметрию при проведении радиационных испытаний и персональную дозиметрию для регистрации «аварийных» доз персонала.

В заключении сформулированы основные результаты проведенных диссертационных исследований.

Автором вынесены на защиту следующие научные положения:

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, 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.

Основные научные результаты, полученные автором, и их новизна:

1. Разработана физическая модель, позволяющая прогнозировать радиационную чувствительность и диапазон измеряемых доз детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канальных МНОП-транзисторов. В отличие от ранее существующих моделей, данная модель 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. Продемонстрирован нелинейный характер дозовой зависимости напряжения затвор-исток р-канального МНОП-транзистора при постоянном токе стока. Автором установлено, что данный эффект 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. Впервые выявлен немонотонный характер зависимости радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канального МНОП-транзистора от приложенного к затвору отрицательного напряжения. Автором показано, что при увеличении отрицательного напряжения на затворе радиационная чувствительность 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. Показано, 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. При этом 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 . Проводившиеся ранее исследования радиационной чувствительности детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МОП-транзисторов показывают, что радиационная чувствительность при приложении положительного и отрицательного напряжения на затвор детектора при облучении отличается кардинально.

Достоверность результатов и обоснование выводов

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов диссертации подтверждается корректностью формулировки цели и постановки задач, а также использованием при проведении исследований комплексного подхода, включающего экспериментальную верификацию, теоретическое моделирование структур и сравнение полученных результатов с литературными данными. Достоверность также обеспечена использованием общепринятых и применяемых в АО «НИИП» методик исследований, использованием аттестованного и поверенного оборудования и приборов, а также публикациями научных работ, которые в полной мере отражают основные результаты по теме диссертации.

Выносимые автором диссертационной работы на защиту положения являются результатом детального анализа литературного материала, согласованностью полученных теоретических и экспериментальных данных с результатами исследований.

Практическая значимость

В работе 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 для заданных условий применения. Практическая значимость подтверждается внедрением результатов в промышленность при выполнении ряда НИР и ОКР, а также внедрением в учебный процесс ВУЗов.

Полученные результаты могут быть использованы предприятиями различных отраслей промышленности и в частности таких Госкорпораций, как «Росатом», «Ростех» и «Роскосмос» для разработки дозиметров и детекторов для измерения поглощенной дозы ионизирующего излучения, что сыграет значительную роль для развития данных отраслей.

Теоретическая значимость

Теоретическая значимость диссертации заключается в том, что представленная зависимость радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канального МНОП-транзистора от отрицательного напряжения на затворе, а также нелинейная дозовая зависимость напряжения затвор-исток р-канального МНОП-транзистора при постоянном токе стока дополняют уже имеющиеся знания о радиационных характеристиках детекторов на основе МНОП-транзисторов и физических механизмах накопления положительного заряда в подзатворных диэлектриках МНОП-транзисторов.

Апробация работы и публикации по диссертации

Автором опубликовано 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 тезисов докладов.

Апробация работы и основных результатов диссертации была проведена на 7 тематических научно-технических конференциях.

К замечаниям можно отнести следующее:

1. В преимуществах детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов перед детекторами с чувствительными элементами на основе МОП-транзисторов, описанных во введении, указано отсутствие зависимости от рабочей температуры при измерениях дозы. Отсутствие зависимости от температуры достигается поиском рабочей точки (рабочего тока). Такой метод можно использовать и при использовании детекторов с чувствительными элементами на основе МОП-транзисторов.

2. В главе 1 указано, что детекторы с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов являются чувствительными ко всем типам ионизирующего излучения, но в главе 4 представлены результаты измерений только при облучении гамма-квантами ^{60}Co .

3. В диссертации, как и в автореферате встречаются некритические опечатки и оформительские недочеты, на пример: на странице 141 в таблице 22 присутствуют некорректные переносы слова «чувствительность».

Все замечания, указанные выше, ни коем образом не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и не умаляют ее новизну и практическую значимость.

Заключение

Содержание диссертационной работы и автореферата изложены с соблюдением общепринятой терминологии, демонстрируют высокий уровень научной проработки и обладают значительной практической ценностью.

Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям диссертации.

Несмотря на наличие замечаний, **не носящих принципиального характера**, исследование в целом выполнено **на профессиональном уровне**, проведенные исследования являются актуальными.

Приведенные в диссертации результаты, выводы и выдвигаемые на защиту положения соответствуют научной специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Диссертация Сиделева А.В. на тему «Разработка детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов» полностью соответствует требованиям ВАК «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (со всеми последующими

изменениями), предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата наук. Научные положения работы обладают четко сформулированной новизной, а практические результаты имеют доказанную значимость для развития современной микроэлектроники.

Работа представляет собой существенный вклад в развитие перспективного направления науки и открывает новые возможности для дальнейших исследований и практических разработок в данной области.

Автор диссертационной работы, Сиделев Алексей Владимирович, **заслуживает** присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

Диссертация и отзыв на обсуждены и одобрены на заседании научно-технического совета АО «НПП «Пульсар» (№ 10/574-25 от 18 декабря 2025г.)

Отзыв составил:

Ученый секретарь НТС

Начальник лаборатории перспективных научных исследований АО «НПП «Пульсар»,
кандидат физико-математических наук

(кандидатская диссертация защищена по специальности
01.04.07 — «Физика конденсированного состояния»)

18.12.2025г.

Электронный адрес: kaevitser_ev

Подпись Е.В. Каевицер удостоверяю:

на Владиленовна Каевицер

Тел.: 8(499)7450544 доб. 1195

СПЕЦИАЛИСТ
1 КАТЕГОРИИ
ТЕЛЕЖНИКОВА Е. В.

Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Пульсар»

Почтовый адрес: 105187, г. Москва, Окружной проезд, д. 27

Тел.: +7 (495)-365-12-30 Факс: +7 (495) 366-55-83

Электронный адрес: administrator@pulsarnpp.ru