

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.286.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Воронежский государственный технический университет»,
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации,
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 20.01.2026 г. № 398

О присуждении Сиделеву Алексею Владимировичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Разработка детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов» по специальности специальности 2.2.2 Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств принята к защите 11.11.2025 г. (протокол заседания № 396) диссертационным советом 24.2.286.01, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84, приказ о создании совета № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Сиделев Алексей Владимирович, 7 января 1986 года рождения, в 2008 году окончил федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный технологический университет «Московский институт стали и сплавов» с присуждением квалификации инженер по специальности «Микроэлектроника и твердотельная электроника». В период с 2008 по 2012 г. проходил обучение в аспирантуре в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах». В настоящее время работает начальником управления научных исследований и инновационных разработок в Акционерном обществе «Научно-исследовательский институт приборов» Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом».

Диссертация выполнена в Акционерном обществе «Научно-исследовательский институт приборов» Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом».

Научный руководитель – Таперо Константин Иванович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заместитель генерального директора по науке и инновациям Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборов».

Официальные оппоненты:

1. Зольников Константин Владимирович, доктор физико-математических наук, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, доцент, ведущий инженер-конструктор дизайн-центра проектирования ИМС Акционерного общества «Научно-исследовательский институт электронной техники», г. Воронеж;

2. 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»,

дали **положительные отзывы** на диссертацию.

Ведущая организация Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Пульсар», г. Москва в своем **положительном отзыве**, подписанном учёным секретарем научно-технического совета, начальником лаборатории перспективных научных исследований, кандидатом физико-математических наук Каевицер Екатериной Владиленовной, и утвержденном заместителем генерального директора Акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Пульсар», доктором технических наук, профессором Колковским Юрием Владимировичем, указала, что тема диссертации Сиделева Алексея Владимировича 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. 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. Практическая значимость подтверждается внедрением результатов диссертации в промышленность при выполнении ряда НИР и ОКР, а также внедрением в

учебный процесс ВУЗов. 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. Содержание диссертационной работы и автореферата изложены с соблюдением общепринятой терминологии, демонстрируют высокий уровень научной проработки и обладают значительной практической ценностью. Несмотря на наличие замечаний, не носящих принципиального характера, исследование в целом выполнено **на профессиональном уровне**. 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 учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (со всеми последующими изменениями), предъявляемым к диссертационным работам на соискание учёной 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 нанoeлектроники, квантовых устройств.

Соискатель имеет 9 опубликованных научных работ по теме диссертации: в рецензируемых научных изданиях: 7 из них в изданиях, рекомендованных ВАК, и 2 в изданиях, индексируемых в базах цитирования Scopus и Web of Science, а также 20 тезисов докладов.

Лично соискателю в опубликованных в соавторстве работах принадлежит: обзор литературных данных, участие в разработке и уточнении модели накопления радиационно-индуцированного заряда в детекторах поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе МНОП-транзисторов, планирование экспериментов и обработка данных, полученных в ходе экспериментов, расчет

статических характеристик детекторов, а также характеристик детекторов при воздействии ионизирующего излучения, разработка конструкции детекторов, измерение характеристик детекторов, участие в обсуждении полученных результатов и оформление работ в виде публикаций.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

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-n-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. 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.

На диссертацию и автореферат поступило 9 отзывов, все положительные:

1. Рисованый Владимир Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, научный руководитель Акционерного общества «Научно-исследовательский институт научно-производственное объединение «Луч» со следующим замечанием:

- Несмотря на то, что разработанная физическая модель прогнозирования характеристик детектора на основе р-канального МНОП-транзистора является одним из основных результатов диссертации, в автореферате приведено лишь общее описание данной модели с приведением финального выражения для

определения поглощенной дозы по величине накопленного заряда. Однако, указанное замечание несколько не снижает теоретическую и практическую ценность диссертации и не влияет на её высокую оценку в целом.

2. Лагов Петр Борисович, доктор технических наук, доцент, начальник отдела радиационной стойкости Акционерного общества «Российские космические системы» со следующими замечаниями:

- В автореферате не приведены требования к детекторам поглощенной дозы ионизирующего излучения 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.

- Во введении, как преимущество детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ перед детекторами с ЧЭ на основе МОПТ указано, что детекторы обладают линейной калибровочной кривой. Рисунок 2 показывает, что характеристика нелинейна. Необходимо было указать в каком режиме работы детектор имеет линейную калибровочную кривую.

3. Протопопов Григорий Александрович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Акционерного общества «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» со следующими замечаниями:

- На рисунке 1 не продемонстрирован положительный заряд, захватываемый на дырочные ловушки в SiO_2 , кроме того было бы целесообразно представить два рисунка для случаев положительного и отрицательного напряжения на затворе.

- В автореферате не указано, есть ли физический смысл у коэффициента M в формуле (1), и если есть – то в чем он заключается.

- В автореферате не указано, проводились ли эксперименты по исследованию зависимости изменения напряжения между затвором и истоком МНОП-транзистора и уровнем поглощенной дозы (формула (1)) от температуры (например, из-за возможного смещения «рабочей точки» с увеличением температуры).

4. Градобоев Александр Васильевич, доктор технических наук, профессор-консультант отделения экспериментальной физики инженерной школы ядерных технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» со следующим замечанием:

- В качестве недостатка следует указать на слишком краткое описание технологии изготовления разработанных детекторов на основе

МНОП-транзисторов, что, скорее, является недостатком автореферата, а не работы в целом, и не влияет на высокую оценку результатов диссертации.

5. Родионов Николай Борисович, доктор физико-математических наук, начальник сектора «Алмазный детектор» Частного учреждения Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР» со следующим замечанием:

- К недостаткам автореферата следует отнести то, что в автореферате не представлена оценка радиационной стойкости чувствительного элемента детектора на основе р-МНОПТ. Однако, указанное замечание не снижает научную и практическую ценность диссертации и не влияет на её оценку в целом.

6. Толбанов Олег Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, директор центра исследований и разработок «Перспективные технологии в микроэлектронике» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» со следующими замечаниями:

- Недостаточное внимание уделено описанию и интерпретации эффекта нелинейности отклика разработанных детекторов при высоких уровнях дозы ионизирующего излучения.

- Не представлен пример построения дозиметра на основе разработанных детекторов, что, возможно, нашло место в диссертации.

7. Саранин Данила Сергеевич, доктор технических наук, заведующий лабораторией перспективной солнечной энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» со следующим замечанием:

- В качестве замечания по автореферату следует указать на отсутствие в нем электрических схем включения детектора поглощенной дозы на основе р-МНОПТ. Однако, это является, скорее, недостатком автореферата и не влияет на высокую оценку диссертации в целом.

8. Пенязь Милена Алексеевна, кандидат технических наук, учёный секретарь – руководитель группы научного руководства Акционерного общества «Росатом Наука» со следующими замечаниями:

- В автореферате не представлено описание текущего прогресса разработки и создания полупроводниковых детекторов ИИ за рубежом.

- Не приведено также сравнение достигнутых практических результатов, полученных в ходе выполнения работы, с достижениями зарубежных научных групп.

9. Бакеренков Александр Сергеевич, кандидат технических наук, начальник отдела разработки РЭА, ИО и СПО отделения 1-1 НТЦ-1 Акционерного общества «Научно-исследовательский институт космического приборостроения» со следующими замечаниями:

- Технология производства МНОП-транзисторов отличается от стандартной, хорошо отработанной технологии производства МОП приборов. В автореферате не рассмотрено влияние технологических факторов на разброс характеристик чувствительности исследуемых образцов к дозовой нагрузке. Не приведен метод оценки учета технологического разброса с целью повышения точности контроля уровня поглощенной дозы.

- Не приведены экспериментальные и теоретические исследования в диапазоне температур при различных мощностях дозы, что ограничивает возможность применения предложенных изделий для оперативного контроля уровня поглощенной дозы в составе бортовых электронных систем космических аппаратов.

- Использование рабочего режима, соответствующего термостабильной точке на сток-затворной характеристике, ограничивает возможности применения предложенных изделий. Для расширения диапазона регистрируемых поглощенных доз необходимо применение физической модели, учитывающей температурный дрейф выходных сигналов при различных уровнях поглощенной дозы.

На замечания соискателем даны исчерпывающие ответы и пояснения.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается наличием компетенций в области разработки электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники, а также исследования эффектов при воздействии ионизирующего излучения на электронную компонентную базу, что отражено в опубликованных научных работах.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Решена важная и актуальная **научно-техническая задача**: в рамках единой конструктивно-технологической концепции разработаны детекторы поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов, имеющие четыре варианта толщины подзатворных диэлектриков Si_3N_4 и SiO_2 , для широкого спектра условий применения, что позволило унифицировать дозиметры для работы с детекторами данного типа, а также технологию изготовления детекторов.

Разработана физическая модель, позволяющая при сильных и слабых полях в SiO_2 (вплоть до напряженности менее 10^3 В/см) прогнозировать радиационную чувствительность и диапазон измеряемых доз детекторов

поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов.

Показано, что накопление радиационно-индуцированного заряда на границе раздела Si_3N_4 / SiO_2 приводит к уменьшению напряжённости электрического поля в SiO_2 и, соответственно, снижению выхода заряда, а также критическому увеличению напряженности электрического поля в Si_3N_4 , что объясняет нелинейный характер дозовой зависимости информативного параметра в режиме работы с постоянным напряжением на затворе.

Выявлено, что зависимость радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канального МНОП-транзистора от отрицательного напряжения на затворе во время воздействия ионизирующего излучения имеет немонотонный характер с выраженным максимум: начальный рост обуславливается увеличением выхода заряда, за счет увеличения напряженности электрического поля в диоксиде кремния, а снижение чувствительности происходит за счет достижения предельно допустимой напряженности электрического поля в слое диоксида кремния, и(или) в слое нитрида кремния.

Установлено, что детектор поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канального МНОП-транзистора имеет близкие значения радиационной чувствительности как при отрицательном напряжении на затворе, когда радиационно-индуцированные дырки захватываются на границе Si_3N_4 / SiO_2 , так и при положительном, когда захватываются радиационно-индуцированные электроны на границе Si_3N_4 / SiO_2 и дырки на границе SiO_2 / Si .

Разработаны и изготовлены новые детекторы поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов 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. Разработанные детекторы с четырьмя вариантами затворных систем в общем случае обладают диапазоном измеряемых доз от 0,04 до $4 \cdot 10^3$ Гр(SiO_2) и радиационной чувствительностью от 577 до 1,7 мВ/Гр(SiO_2) при напряжении не более 40 В и токе потребления ниже 250 мкА.

Определены оптимальные конструкции затворных систем и электрические режимы работы детекторов поглощенной дозы с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов, что позволило получить наилучшие характеристики детекторов в зависимости от требуемых условий применения.

Предложенный оригинальный схмотехнический метод увеличения радиационной чувствительности, позволяет увеличить чувствительность до двух раз, что расширяет границы применимости созданных детекторов.

Разработаны и изготовлены дозиметры, работающие с детекторами поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов, 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.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что доказана высокая эффективность детектора ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе МНОП-транзисторов, позволяющая обеспечить более высокую радиационную чувствительность, по сравнению с детектором на основе МОП-транзисторов при равной толщине диоксида кремния, являющегося чувствительной областью детектора.

Полученные в ходе исследования результаты, такие как:

- нелинейность дозовой зависимости напряжения затвор-исток р-канального МНОП-транзистора при постоянном токе стока;
- зависимость радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канального МНОП-транзистора от отрицательного напряжения на затворе;
- близкие значения радиационной чувствительности как при отрицательном, так и при положительном напряжении на затворе, приложенном во время облучения детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе р-канального МНОП-транзистора,

дополняют уже имеющиеся знания о радиационных характеристиках детекторов на основе МНОП-транзисторов и физических механизмах накопления положительного и отрицательного зарядов в подзатворных диэлектриках МНОП-транзисторов.

Применительно к проблематике диссертации эффективно использован комплексный подход проведения исследования, включающий анализ и классификацию полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения, выбор разрабатываемой конструкции полупроводникового чувствительного элемента, разработку физической модели накопления радиационно-индуцированного заряда в подзатворных диэлектриках р-канального МНОП-транзистора, расчет характеристик детекторов, исследование возможности создания р-канальных МНОП-транзисторов для использования в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего

излучения с различными толщинами подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$, разработку топологии и технологического маршрута изготовления р-канальных МНОП-транзисторов, измерение электрических характеристик, исследование радиационной чувствительности и диапазона измеряемых доз, а также валидацию разработанной физической модели.

Важность полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается актами **внедрения результатов диссертации** при выполнении НИР и ОКР, а также использования результатов в учебном процессе. Акты внедрения результатов диссертации представлены от АО «НИИП», НИТУ МИСИС, ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», АО «Российские космические системы», ФГБОУ ВО «ВГЛТУ».

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что результаты исследований получены с использованием общепринятых или применяемых в Акционерном обществе «Научно-исследовательский институт приборов» 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 учёными.

Личный вклад соискателя состоит в:

- анализе литературных данных, определении цели и постановке задач данной диссертации;
- разработке программ и методик исследований радиационной чувствительности детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов;
- обсуждении полученных экспериментальных данных;
- разработке физической модели накопления радиационно-индуцированного заряда в подзатворных диэлектриках р-канального МНОП-транзистора;
- проведении расчетов, выборе толщины подзатворных диэлектриков р-канальных МНОП-транзисторов, а также обосновании режимов работы для получения требуемых характеристик детекторов;
- разработке топологии и технологического маршрута изготовления р-канальных МНОП-транзисторов.
- расчете характеристик р-канальных МНОП-транзисторов;
- разработке концепции функционирования и построения дозиметров для различных применений.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств и отвечает критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (со

всеми последующими изменениями), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

На заседании 20.01.2026 г. диссертационный совет за решение научной задачи, имеющей значение для разработки электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств, и, в частности, полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения на основе р-канальных МНОП-транзисторов, принял решение присудить Сиделеву Алексею Владимировичу учёную степень кандидата технических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 17 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 13, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Заместитель председателя
диссертационного совета

Белоногов
Евгений Константинович

Учёный секретарь
диссертационного совета

Стогней
Олег Владимирович



20 января 2026 года