

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ

по защите диссертации Васильева Антона Андреевича на тему

«Глубокие центры в оксиде галлия различных полиморфов», представленной на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.11 «Физика полупроводников», состоявшейся в НИТУ «МИСИС» 03.09.2025 г.

Диссертация принята к защите Диссертационным советом НИТУ МИСИС 23.06.2025, протокол № 30.

Диссертация выполнена на кафедре полупроводниковой электроники и физики полупроводников (ППЭиФПП) и в лаборатории «Ультраширокозонных полупроводников» (ЛУШП) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС), Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – Поляков Александр Яковлевич, к.т.н., профессор кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников и заведующий лабораторией «Ультраширокозонных полупроводников» НИТУ МИСИС.

Экспертная комиссия утверждена Диссертационным советом НИТУ МИСИС (протокол № 30 от 23.06.2025 г.) в составе:

1. Ховайло Владимир Васильевич – д.ф.-м.н., профессор кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ МИСИС - председатель комиссии;
2. Мухин Сергей Иванович – д.ф.-м.н., заведующий кафедрой теоретической физики и квантовых технологий НИТУ МИСИС;
3. Калошкин Сергей Дмитриевич - д.ф.-м.н., директор Института новых материалов и нанотехнологий НИТУ МИСИС;
4. Таперо Константин Иванович – д.т.н., заместитель генерального директора по науке и инновациям АО «Научно-исследовательский институт приборов», ГК «Росатом»;
5. Мармалюк Александр Анатольевич – д.т.н., начальник научно-технического центра АО «Научно-исследовательский институт «Полус» имени М.Ф. Стельмаха», ГК «Ростех».

В качестве ведущей организации утверждена Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий».

Экспертная комиссия отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- Обнаружены и систематизированы основные глубокие центры в различных полиморфах оксида галлия (α , κ , γ и β -Ga₂O₃); определены их энергетические положения, сечения захвата и концентрации, что позволило составить сопоставимую картину для исследованных образцов.

- Показано влияние глубоких уровней на характеристики приборных структур: установлена существенная роль уровня E2, связанного с акцепторной примесью Fe, в формировании эффекта коллапса тока в полевых транзисторных структурах на основе нанопленок β -Ga₂O₃. Это связывает микроскопические параметры дефектов с поведением приборов.

- Продемонстрирована высокая радиационная стабильность барьеров Шоттки, полученных на γ -Ga₂O₃, в сравнении с аналогичными структурами на β -Ga₂O₃; показано, что при облучении 1 МэВ протонами характеристики Ni/ γ -Ga₂O₃ сохраняются, тогда как для Ni/ β -Ga₂O₃ наблюдается полная потеря выпрямляющих свойств. Эти результаты имеют значение для применения приборов в условиях ионизирующего излучения и являются первым подтверждением гипотезы о высокой радиационной стабильности γ -Ga₂O₃.

- Для фотодетектора на основе α -Ga₂O₃ обнаружен эффект и описан механизм аномально высокой фоточувствительности. Суть предложенной феноменологической модели заключается в эффекте прилипания дырок на глубоких акцепторных уровнях, что приводит увеличению эффективного времени жизни электронов. В модели рециклинга носителей это объясняет как аномально высокую фоточувствительность, так и длинные времена нарастания и спада фотосигнала. Предложенная феноменологическая модель согласуется с экспериментальными данными.

Научная и практическая значимость исследования заключается в систематизации экспериментальных данных о глубоких центрах в нескольких полиморфах Ga₂O₃ (α , κ , γ , β), впервые приводятся сведения о параметрах глубоких уровней в α -, κ - и γ -полиморфах. Предложены интерпретации природы глубоких центров и их связи с приборными характеристиками. В частности, показано, что дефект, связанный с акцепторным железом, вызывает коллапс тока в полевых транзисторах на основе пленок β -Ga₂O₃; разработана модель, в которой захват дырок на акцепторные центры приводит к существенному увеличению фоточувствительности солнечно-слепых фотодетекторов на основе α -Ga₂O₃; установлено, что γ -Ga₂O₃ отличается более высокой радиационной стабильностью по сравнению с β -полиморфом. Полученные результаты углубляют понимание роли дефектов в широкозонных оксидах и формируют основу для дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Практическая значимость данной работы состоит в том, что полученные результаты открывают возможности для реального применения Ga₂O₃-структур в силовой и оптоэлектронной электронике. В частности, работа демонстрирует что:

- выпрямители на основе $\text{NiO}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ показывают пробивные напряжения до 750 В, что значительно превышает значения для барьеров Шоттки $\text{Ni}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (450 В), что делает их перспективными для применения в силовой электронике в условиях умеренного ионизирующего воздействия.

- барьеры Шоттки на $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$ обладают высокой радиационной стабильностью и могут быть использованы в условиях интенсивного воздействия высокоэнергетических частиц, характерных для космических применений и ядерных технологий.

- солнечно-слепые фотодетекторы на $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ отличаются аномально высокой фоточувствительностью и могут применяться в УФ-фотонике, при решении проблем с долгими временами нарастания и спада фотосигнала.

Оценка достоверности результатов выявила:

Достоверность полученных результатов подтверждается применением комплекса современных методов: релаксационная спектроскопия глубоких уровней (РСГУ) и её модификаций (включая преобразование Лаплас РСГУ), адмиттанс-спектроскопия, фото- и электрическая релаксационная спектроскопия, фотолюминесценция и термо-стимулированные методы. Использование взаимодополняющих методов и проведение измерений на множестве образцов, в частности эпитаксиальных и объемных слоев, повышает надежность выводов.

Личный вклад соискателя заключается в самостоятельном планировании и проведении цикла экспериментальных исследований глубоких уровней в различных полиморфах Ga_2O_3 . Соискатель разработал и реализовал алгоритмы для методики Лаплас РСГУ, предложил подход к анализу профилей концентрации глубоких уровней и модель температурной зависимости сечения захвата в рамках многофононной модели эмиссии. Соискатель выполнил обработку и интерпретацию экспериментальных данных, подготовил публикации и доклады.

По материалам диссертации опубликовано 33 печатных работ, из которых 24 научные статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ (базах Web of Science/Scopus) и 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Пункт 2.6 Положения присуждения ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук НИТУ МИСИС соискателем ученой степени не нарушен.

Диссертация Васильева Антона Андреевича соответствует критериям п. 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС, так как в ней на основании выполненных автором исследований содержится описание результатов комплексных экспериментальных исследований глубоких уровней в образцах и структурах на основе полиморфов Ga_2O_3 , а также влияния глубоких уровней на характеристики приборных структур. Полученные в работе результаты имеют важное научное значение и являются перспективными в решении практических задач современной физики полупроводников.

Экспертная комиссия приняла решение о возможности присуждения Васильеву Антону Андреевичу ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 «Физика полупроводников».

При проведении тайного голосования экспертная комиссия в количестве 5 человек, участвовавших в заседании, из 5 человек, входящих в состав комиссии, проголосовала: за 5, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель Экспертной комиссии



В.В. Ховайло

03.09.2025