

УТВЕРЖДАЮ

Ректор Сколковского института
науки и технологий


"14"  2025 г.


ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Автономной некоммерческой организации высшего образования
«Сколковский институт науки и технологий»
на диссертационную работу **Васильева Антона Андреевича**
«Глубокие центры в оксиде галлия различных полиморфов»,
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.11 Физика полупроводников

Актуальность темы диссертации

Широкозонные полупроводники на основе оксидов в настоящее время привлекают значительный интерес благодаря уникальной комбинации их физических свойств, таких как хорошая проводимость и прозрачность в видимом диапазоне. Это способствует их применению в таких областях как оптоэлектронные приборы глубокого ультрафиолета, высоковольтная и силовая электроника, солнечные элементы, гибкая электроника. Недавние достижения в области технологий эпитаксиального роста таких полупроводников приводят к развитию этого направления в области интегральной электроники и фотоники, предлагая новые устройства для оптического детектирования, телекоммуникационных применений, сенсорики. Это позволяет таким материалам как оксид галлия серьезно конкурировать с традиционными материалами микроэлектроники, такими как кремний, карбид кремния и нитрид галлия.

Диссертационная работа Васильева Антона Андреевича посвящена исследованию физических свойств глубоких центров в оксиде галлия, сформированных точечными дефектами, и анализу их влияния на

характеристики полупроводниковых устройств, изготовленных на основе этого материала. В работе изучено влияние глубоких уровней на электрические, оптические и рекомбинационные свойства различных полиморфов Ga_2O_3 , детально проанализировано влияние условий роста на свойства полупроводника, изучено влияние глубоких уровней на характеристики приборных структур. Подобные исследования представляют огромный интерес для развития физики полупроводников и технологий микро- и оптоэлектроники, фотоники. На основании вышеизложенного следует заключить, что диссертационная работа Васильева А. А. является **актуальной** и востребованной как с научной, так и с практической точек зрения.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 220 наименований. По материалам диссертации опубликовано 24 статьи в рецензируемых научных журналах, четыре публикации в тезисах докладов и зарегистрировано пять программ для ЭВМ.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, описана методология и методы исследований.

Первая глава содержит аналитический обзор литературы по теме диссертационной работы. Приведено сравнение свойств различных полупроводников, используемых в современной силовой электронике. Описаны физические свойства и технологии получения термически стабильных полиморфов оксида галлия. Детально описаны различные методы выращивания объемных кристаллов оксида галлия, сформулированы основные преимущества эпитаксиального роста тонких пленок методами молекулярно-лучевой и газофазной эпитаксии, химического осаждения из паровой фазы и галоидной газофазной эпитаксии. Приведены данные о термодинамике точечных дефектов в оксиде галлия и способах анализа

энергий образования глубоких центров в полупроводнике. Сформулированы основные проблемы, связанные с легированием оксида галлия, описаны детали зонной структуры различных полиморфов Ga_2O_3 . Проанализированы конструкции и принципы работы приборов на основе оксида галлия, таких как выпрямители на барьерах Шоттки и гетеропереходах, полевые транзисторы и фотодетекторы.

Во второй главе представлен обзор основных экспериментальных методов исследования глубоких уровней в широкозонных полупроводниках, приведен анализ пределов применимости методов и подходов, использованных при выполнении работы.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию глубоких уровней в различных полиморфах Ga_2O_3 . Исследования проводились как на объемных образцах, выращенных методами Чохральского и Степанова, так и на эпитаксиальных пленках. Получены данные о энергетических положениях уровней, концентрациях носителей заряда, проанализирована возможная природа обнаруженных уровней путем сравнения с расчетными данными, доступными в литературе. Изучено влияние облучения образцов протонами и нейтронами высоких энергий на образование глубоких уровней. На основании проведенного анализа сделаны выводы о влиянии собственных точечных дефектов на электрические свойства и радиационную стойкость образцов оксида галлия. Изучено влияние водородной плазмы на электрические свойства β - Ga_2O_3 .

В четвертой главе рассмотрено влияние глубоких уровней на характеристики устройств на основе полиморфов оксида галлия. Детально исследованы барьеры Шоттки, формирующиеся при осаждении никеля на подложки β - и γ - Ga_2O_3 . Измеренные автором электрические параметры (пробивные напряжения) находятся на мировом уровне для устройств силовой электроники подобного типа. Детально исследована радиационная стойкость созданных приборных структур. Заслуживает внимания проведенное автором

исследование эффекта коллапса электрического тока в полевом транзисторе с изолированным затвором на основе пленки β - Ga₂O₃. Сделанный автором вывод о влиянии концентрации железа в канале транзистора на характеристики полевого транзистора может быть использован для уменьшения эффекта коллапса тока в таких устройствах. Несомненно, большой интерес представляет исследование свойств фотодетектора на основе нелегированной пленки α - Ga₂O₃, выращенной на подложке сапфира. Автором предложена феноменологическая модель, описывающая высокую фоточувствительность устройства, а также качественно объясняющую кинетику нарастания и спада фототока в рамках модели рециклинга.

В **заключении** подводятся итоги исследования, сформулированы основные результаты диссертации.

Научная новизна диссертационной работы не вызывает сомнений, и определяется рядом новых данных, полученных при выполнении работы. В частности, автором **впервые** получены энергии активации, сечения захвата и концентрации глубоких уровней в различных полиморфах оксида галлия. Следует отметить разработанную автором феноменологическую модель, описывающую эффект аномально высокой фотопроводимости оксида галлия, что может быть использовано при разработке фотодетекторов на основе этого материала.

Достоверность представленных результатов подтверждается высоким уровнем выполненных экспериментальных исследований с использованием современных методов рентгеноструктурного анализа, спектроскопии глубоких уровней, а также сопоставлением полученных экспериментальных результатов с имеющимся литературными данными.

Практическая значимость представленных результатов не вызывает сомнений, заключается в развитии методов формирования и оптимизации силовых и оптоэлектронных приборов на основе оксида галлия, которые

могут иметь потенциально применение в современных полупроводниковых технологиях.

Результаты проведенного диссертационного исследования представляется целесообразным **внедрить** на предприятиях, разрабатывающих и производящих перспективные материалы и приборы силовой электроники, таких как АО «ЭЗАН», АО НПО «Орион», НПП «Пульсар», АО НПП «Исток», для отработки и оптимизации отечественной технологий синтеза кристаллов, эпитаксиальных структур, легирования, формирования контактов и пассивации дефектов, что критически важно для создания высокоэффективных и надежных Ga₂O₃-приборов (диодов Шоттки, транзисторов) нового поколения. Эти устройства найдут применение в энергетике (снижение потерь в преобразователях, управление электроприводом, ВИЭ), высоковольтной и высокочастотной электронике, а также в системах безопасности и мониторинга благодаря разработке чувствительных УФ-детекторов.

Для углубленного изучения выявленных закономерностей и дальнейшего развития тематики **рекомендуется продолжить исследования** в научных коллективах, специализирующихся на исследованиях широкозонных полупроводников, росте Ga₂O₃ кристаллов и пленок, силовой электронике. Ключевыми направлениями являются изучение влияния дефектов на свойства и надежность приборов, разработка технологий формирования гетероструктур и диэлектриков на Ga₂O₃, а также схемотехнических решений. Активное сотрудничество целесообразно с ведущими научными центрами: ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Томский государственный университет, университет ИТМО.

По диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**:

1. В Главе 2 на странице 61 приводится описание процессов захвата и эмиссии носителей заряда глубокими уровнями. Однако ряд обозначений

(c_n, c_p, c_n^{th}, n_t и др.), приведенных на рисунке 27, не расшифрованы в тексте диссертации. Это затрудняет понимание того, что хотел сказать автор. В частности, в одном предложении автор утверждает, что «вероятность захвата дырки и электрона примерно равны $c_n n p_t \approx c_p p n_t$ », а двумя предложениями ниже утверждается, что «вероятности эмиссии с уровня для электрона и дырки примерно равны ($e_n n_t \approx e_p p_t$)». Если оба выражения описывают вероятности, то размерности e_n и c_n должны отличаться, но судя по рисунку 27, эти величины описывают коэффициенты перехода, и вероятно имеют одинаковую размерность. Предполагаю, что в первом предложении речь идет не о вероятностях, а о скоростях захвата электрона и дырки. Для устранения двусмысленных трактовок автору следовало бы расшифровать все приводимые в тексте обозначения.

2. В разделе 1.1.3.1 на странице 32 приведено уравнение (5), которое по утверждению автора описывает формирование дефекта Шоттки. Далее в тексте вводится параметр « n – число пар Шоттки» и выводится уравнение (7), описывающее «равновесную концентрацию пар Шоттки». Согласно классическим представлениям эти уравнения описывают процесс рождения и аннигиляции пар Френкеля в твердом теле, а в механизме Шоттки не происходит генерация пар дефектов, так как сток и исток дефектов осуществляется с участием поверхности кристалла.
3. В работе, в Главе 3 экспериментально получены значения энергий глубоких уровней в различных полиморфах оксида галлия. Автором отмечается, что некоторые уровни имеют одинаковую природу. Однако величины энергий для этих уровней зачастую отличаются. Автору следовало бы указать пределы точности измерений энергий глубоких уровней для корректного сравнения их между собой.

4. Текст диссертации написан в хорошем стиле, с небольшим количеством опечаток, однако для полноты восприятия в тексте диссертации не хватает выводов в конце каждой главы.

Заключение

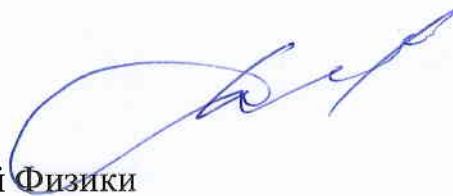
Обозначенные замечания не носят принципиального характера, не влияют на общую высокую положительную оценку работы и не снижают ценность полученных результатов. Диссертационная работа Васильева Антона Андреевича представляет собой законченное научное исследование. Содержание диссертационной работы соответствует указанной специальности. Автореферат полно и правильно отражает основные результаты и выводы работы. Представленный список научных работ соискателя показывает, что полученные результаты достаточно полно опубликованы в российских и зарубежных научных журналах. Результаты прошли апробацию на российских и международных научных конференциях. Основные результаты, полученные в диссертационной работе, вносят значимый вклад в область изучения глубоких центров в широкозонном полупроводнике Ga_2O_3 , что имеет важное значение для развития методов создания полупроводниковых силовых и оптоэлектронных приборов.

Диссертационная работа «Глубокие центры в оксиде галлия различных полиморфов», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС».

Отзыв на диссертационную работу обсужден и одобрен на Физическом семинаре Автономной некоммерческой организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий» 25 июня 2025 года.

Косолобов Сергей Сергеевич,
доктор физико-математических наук,
доцент Центра Инженерной Физики

Драчев Владимир Прокопьевич,
доктор физико-математических наук,
профессор, директор Центра Инженерной Физики



Автономная некоммерческая организация высшего образования
«Сколковский институт науки и технологий» (Сколтех)
121205, г. Москва, Территория Инновационного Центра Сколково, Большой
б-р, д. 30, стр. 1
электронная почта: inbox@skoltech.ru
Контактный телефон: +7 495 280 1481