

УТВЕРЖДАЮ

Врио ректора БФУ им. И. Канта

А.А. Федоров

« 20 » апреля 2020 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Куликова Антона Геннадьевича

**«Образование приповерхностных структур в кристаллах парателлурита
и тетрабората лития при миграции носителей заряда
во внешнем электрическом поле»,**

представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

01.04.18 – «Кристаллография, физика кристаллов».

Диссертационная работа Куликова А. Г. посвящена изучению приповерхностных структурных изменений, индуцированных внешним электрическим полем, в диэлектрических монокристаллах посредством разработанного комплекса методик на основе рентгеновской дифракционной диагностики.

Актуальной задачей современного материаловедения является создание структур с перестраиваемыми свойствами за счет внешних воздействий, что имеет прикладное значение для разработки новейших систем записи информации, накопления энергии, а также создания сенсоров и элементов микроэлектроники.

Одним из механизмов оперативной вариации свойств и характеристик материала является локальное изменение его структурной организации за счет перераспределения дефектов. Формирование тонких заряженных слоев у поверхности монокристалла за счет миграции и скопления носителей заряда под воздействием внешнего электрического поля является принципиально новым подходом для решения поставленной задачи. Большой интерес представляет также развитие методической базы для характеристики подобных слоев. Рентгеновские методы дают возможность проведения количественных исследований с высоким пространственным и временным разрешением. Исследования в милли- и микросекундном временном диапазоне особенно актуальны для изучения свойств перспективных мультиферроиков, полупроводников и диэлектриков с ионным типом проводимости.

В связи с этим, диссертация Куликова А. Г., посвящённая исследованию процесса образования тонких заряженных слоев в монокристаллах парателлурита и тетрабората ли-

тия за счет миграции ионов и вакансий, является весьма **актуальной** и имеет как фундаментальное, так и прикладное значение.

Диссертационная работа Куликова А. Г. изложена на 205 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, общих выводов работы и списка цитируемой литературы из 226 наименований.

Во **введении** содержится обоснование актуальности диссертационной работы, сформулированы **цели** и приведены решаемые в ее рамках **задачи**, отмечена новизна и практическая значимость работы.

Первая глава носит обзорный характер и посвящена рассмотрению существующих методов контроля структурных изменений в кристаллах, включая электрофизические методы исследования, рамановскую спектроскопию, электронную микроскопию, а также рентгенодифракционные методы исследования структуры кристаллических материалов. Проанализирована возможность применения этих методов для исследования влияния внешних воздействий на структуру кристаллов. Подробно рассматриваются возможности формирования приповерхностных структур за счет миграции носителей заряда. Особое внимание уделяется недавно обнаруженной в монокристаллах титаната стронция полярной фазе, формируемой под воздействием внешнего электрического поля.

Вторая глава посвящена методической части и разработке подходов времяразрешающей рентгеновской дифрактометрии для изучения обратимых и необратимых процессов структурных изменений в монокристаллах в условиях внешних воздействий с высоким пространственным разрешением и локализацией по глубине.

Основным результатом данной главы является разработка методики времяразрешающей рентгеновской дифрактометрии для изучения влияния воспроизводимых процессов в условиях воздействия внешним электрическим полем на кристалл и модернизация аппаратного комплекса на базе лабораторного дифрактометра ТРС с интеграцией быстродействующей системы накопления интенсивности и TTL-синхронизации. С помощью данной методики впервые определены временные и частотные характеристики элемента адаптивной изгибной рентгеновской оптики для осуществления скоростной перестройки спектрально-угловых параметров рентгеновского пучка.

В **третьей главе** с помощью *in-situ* рентгенодифракционных измерений исследован процесс образования приповерхностных структур (перестройки реальной структуры кристаллов парателлуриата в приповерхностном слое) в кристалле парателлуриата (α -TeO₂) при приложении к нему постоянного внешнего электрического поля, проявляющийся в виде изменения параметров и формы дифракционных пиков. При помощи электрофизических измерений установлена связь описываемых явлений с миграцией носителей заряда (кис-

лородных вакансий) во внешнем электрическом поле. Изучена кинетика и анизотропия процесса.

Из полученных в данной главе результатов хотелось бы отметить регистрацию двух типов приповерхностных структурных изменений в парателлурите за счет локализации носителей заряда у границ раздела кристалл-электрод и, как следствие, сильного увеличения напряженности электрического поля вблизи электродов. Кроме того, предложена и реализована рентгенодифракционная методика оценки распределения деформаций, возникающих за счет скопления зарядов у поверхности диэлектрических монокристаллов под воздействием электрического поля, путем сравнения изменения параметров КДО от кратных порядков отражения.

В **четвертой главе** представлены результаты рентгенодифракционного *in-situ* исследования с различным временным разрешением процесса перестройки дефектной структуры кристалла тетрабората лития ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) во внешнем электрическом поле, приложенном вдоль полярного направления $[001]$, дополненные измерениями кинетики проводимости для установления связи наблюдаемых изменений параметров КДО с движением носителей зарядов.

Особый интерес представляет обнаружение локализации слоя с повышенной концентрацией ионов лития у поверхности по изменению соотношения интегральных интенсивностей кратных дифракционных порядков под действием электрического поля обеих полярностей. Это в частности позволило впервые определить различия структуры приповерхностных слоев для разных типов носителей заряда.

В **заключении** изложено обобщение проведенных исследований, в **выводах** приведены основные результаты работы.

Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Научной новизной работы является то, что впервые в диэлектрических монокристаллах парателлурита и тетрабората лития продемонстрирована возможность образования тонких заряженных слоев, изучены их пространственные характеристики, исследована кинетика формирования и анизотропия процесса. Также впервые на лабораторном источнике излучения реализован комплексный подход времяразрешающей рентгеновской дифрактометрии для изучения динамики процессов, вызванных воздействием внешнего электрического поля в кристаллах в широком диапазоне временного разрешения (до 100 нс).

Материал диссертации изложен достаточно четко и последовательно. Наглядные рисунки, графики и таблицы хорошо иллюстрируют полученные автором результаты.

Сформулированные к каждой главе выводы позволяют целостно воспринимать материал. Диссертация представляет собой цельную, завершённую научно-исследовательскую работу по актуальной тематике и обладает существенной **практической значимостью**.

Достоверность представленных в работе результатов подтверждается использованием современного экспериментального оборудования и современного программного обеспечения, а также наличием публикаций в рецензируемых научных изданиях и докладами на различных национальных и международных конференциях.

По представленным в диссертации материалам можно четко выделить **личный вклад** соискателя. Автором проведена модернизация экспериментальной установки трехкристального рентгеновского спектрометра (ТРС-К) для реализации на ней времяразрешающих экспериментов по исследованию кристаллов в условиях внешнего воздействия электрическим полем. Все экспериментальные результаты получены автором диссертации лично или при его непосредственном участии в том числе и при использовании вспомогательных методов. Также автором проведена обработка экспериментальных данных и сопоставление с расчетами.

По диссертации Куликова А. Г. можно сделать **следующие замечания**:

1. В работе отсутствуют данные и не обсуждается шероховатость поверхности измеряемых образцов. Качество поверхности может влиять на распределение создаваемого экранирующего заряженного слоя в кристалле.

2. Не совсем очевидно, почему в работе не проведено исследование анизотропии проводимости и изменения рентгенодифракционных характеристик в тетраборате лития в условиях электрического воздействия. Анизотропия изучалась только для кристалла парателлурита. Неясно почему в работе исследование анизотропии изменения рентгенодифракционных характеристик при миграции носителей заряда проведено только для кристаллов парателлурита, тогда как в кристаллах тетрабората лития есть основания ожидать существенно более сильной анизотропии изменения рентгенодифракционных характеристик при миграции носителей заряда за счет особенностей проводимости.

3. Диссертация написана на хорошем научном языке, однако присутствует ряд стилистических, орфографических и пунктуационных ошибок, которые затрудняют восприятие текста.

Отмеченные замечания не снижают высокой научной ценности работы, не затрагивают основные выводы, практическую значимость, и поэтому не влияют на общую положительную оценку.

Результаты диссертационной работы изложены в 16 публикациях из которых 6 - статьи в рецензируемых научных изданиях из списка ВАК. Также результаты работы

прошли апробацию на семинарах научных школах, российских и международных конференциях.

Диссертация Куликова А. Г. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, соответствующую всем критериям и требованиям раздела II Положения о присуждении ученых степеней утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Куликов Антон Геннадьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.18 – «Кристаллография, физика кристаллов».

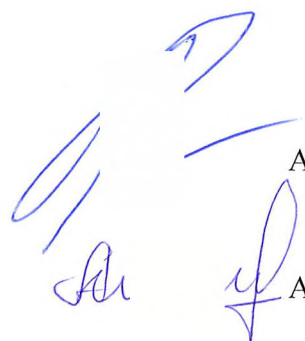
Диссертационная работа Куликова А. Г. «Образование приповерхностных структур в кристаллах парателлурита и тетрабората лития при миграции носителей заряда во внешнем электрическом поле» заслушана и обсуждена на заседании Ученого совета Института физико-математических наук и информационных технологий Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта, протокол № 3/20 от «19» марта 2020 года.

Отзыв заслушан и утвержден на заседании Ученого совета Института физико-математических наук и информационных технологий Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта, протокол № 3/20 от «19» марта 2020 года.

Отзыв составили:

Председатель ученого совета ИФМН и ИТ,
директор института, д.ф.-м.н., профессор

Ученый секретарь ученого совета ИФМН и ИТ,
к.ф.-м.н.



А. В. Юров
А.А. Шпилевой

«23» марта 2020 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»
Почтовый адрес: 236016, ул. Александра Невского, д.14, г. Калининград, Россия
Телефон: +7(4012)595-595
E-mail: post@kantiana.ru
Официальный сайт: <https://kantiana.ru/>