

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.114.01 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КРИСТАЛЛОГРАФИЯ И  
ФОТОНИКА» РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» ПО ДИССЕРТАЦИИ  
КУЛИКОВА АНТОНА ГЕННАДЬЕВИЧА НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ  
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 21 июля 2020 г., протокол № 10

О присуждении **Куликову Антону Геннадьевичу**, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Образование приповерхностных структур в кристаллах парателлурита и тетрабората лития при миграции носителей заряда во внешнем электрическом поле» по специальности 01.04.18 – «кристаллография, физика кристаллов» принята к защите 11.02.2020 г., протокол № 5, диссертационным советом Д 002.114.01 на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН), Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России), 119333, г. Москва, Ленинский проспект, дом 59. Диссертационный совет Д 002.114.01 создан приказом Федеральной службы по надзору в сфере образования и науки № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель **Куликов Антон Геннадьевич**, 1990 г.р., в 2013 г. окончил кафедру физики наносистем физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» по специальности физика. В настоящее время работает в лаборатории рентгеновских методов анализа и синхротронного излучения структурного подразделения ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН – «Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН» (ИК РАН), Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в должности младшего научного сотрудника.

Диссертационная работа выполнена в лаборатории рентгеновских методов анализа и синхротронного излучения структурного подразделения ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН – ИК РАН, Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – **Ковальчук Михаил Валентинович**, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, президент

Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

Официальные оппоненты:

**Менушенков Алексей Павлович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твёрдого тела и наносистем Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»;

**Солдатов Александр Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор, директор Международного исследовательского института интеллектуальных материалов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет».

– дали **положительные отзывы** на диссертацию.

Ведущая организация **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» (БФУ им. И. Канта)**, г. Калининград, в своём **положительном отзыве**, подписанном доктором физико-математических наук, профессором, директором Института физико-математических наук и информационных технологий Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта А. В. Юровым и кандидатом физико-математических наук, ученым секретарем ученого совета Института физико-математических наук и информационных технологий А. А. Шпилевым, и утвержденном д.филос.н, профессором, врио ректора БФУ им. И. Канта А. А. Федоровым, указала, что диссертационная работа Куликова А. Г. «Образование приповерхностных структур в кристаллах парателлурита и тетрабората лития при миграции носителей заряда во внешнем электрическом поле» 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.

Научной новизной работы является то, что впервые в диэлектрических монокристаллах парателлуриата 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, завершенную научно-исследовательскую работу по актуальной тематике и обладает существенной практической значимостью.

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».

Основные результаты диссертации опубликованы в 16 научных работах, из которых 6 статей в рецензируемых российских и международных журналах и 10 публикаций в сборниках международных и национальных конференций и научных школ. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Marchenkov N.V., **Kulikov A.G.**, Petrenko A.A., Pisarevsky Yu.V., Blagov A.E. Laboratory time-resolved X-ray diffractometry for investigation of reversible

- structural changes induced in single crystals by external electric field // Review of Scientific Instruments – 2018. – V. 89 – id. 095105, DOI: 10.1063/1.5036955.
2. Марченков Н.В., **Куликов А.Г.**, Аткин И.И., Петренко А.А., Благов А.Е., Ковальчук М.В., Метод времяразрешающего рентгенодифракционного картирования обратного пространства в условиях воздействия электрического поля на кристалл // Успехи физических наук – 2019. – Т. 189 – № 2 – С.187–194, DOI: 10.3367/UFNr.2018.06.038348.
  3. Blagov A.E., **Kulikov A.G.**, Marchenkov N.V., Pisarevsky Y.V., Kovalchuk M.V. Bimorph Actuator: A New Instrument For Time-Resolved X-Ray Diffraction And Spectroscopy // Experimental Techniques – 2017. – V. 41 – Iss. 5 – P.517–523, DOI: 10.1007/s40799-017-0194-1.
  4. **Kulikov A.G.**, Blagov A.E., Marchenkov N.V., Targonsky A.V., Eliovich Ya.A., Pisarevsky Yu.V., Kovalchuk M.V. LiNbO<sub>3</sub>-based Bimorph Piezoactuator for Fast X-Ray Experiments: Static and Quasistatic Modes // Sensors and Actuators A: Physical – 2019. – V. 291 – P. 68–74, DOI: 10.1016/j.sna.2019.03.041.
  5. **Куликов А.Г.**, Благов А.Е., Марченков Н.В., Ломонов В.А., Виноградов А.В., Писаревский Ю.В., Ковальчук М.В. Перестройка структуры кристаллов парателлуриата в приповерхностном слое, вызванная миграцией носителей зарядов во внешнем электрическом поле // Письма в ЖЭТФ – 2018. – Т. 107 – № 10 – С.679–683, DOI: 10.7868/S0370274X18100119.
  6. **Куликов А.Г.**, Писаревский Ю.В., Благов А.Е., Марченков Н.В., Ломонов В.А., Петренко А.А., Ковальчук М.В. Перестройка дефектной структуры тетрабората лития (Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>) во внешнем электрическом поле // Физика твердого тела – 2019. – Т. 61 – № 4 – С.671–677, DOI: 10.21883/FTT.2019.04.47411.250.

На диссертацию и автореферат поступило 7 **положительных отзывов**.

**Форш Павел Анатольевич** – д.ф.-м.н., доцент, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» отметил в качестве замечания, что подвижность носителей заряда оценивалась исходя из средней дрейфовой скорости носителей заряда. Для более точной оценки подвижности было бы полезно определить подвижность и каким-то другим способом, например, с помощью эффекта Холла.

**Пожар Витольд Эдуардович** – д.ф.-м.н., заведующий отделом акустооптических информационных технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научно-технологического центра уникального приборостроения Российской академии наук в качестве замечания отметил, что в

автореферате имеется несколько неточностей в формулировках («Создание и управление параметрами ...» в разделе Практическая значимость на стр. 6) и в рисунках (удельная проводимость на рис. 10 обозначена буквой «дельта» ( $\delta$ ), тогда как рядом в тексте - другой буквой, «сигма» ( $\sigma$ )).

**Труни Карапет Григоревич** – д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник Института прикладных проблем физики Национальной академии наук Республики Армения (ИППФ НАН РА) и **Кочарян Ваган Рашидович** – к.ф.-м.н., заведующий лабораторией ИППФ НАН РА прислали отзыв **без замечаний**.

**Носик Валерий Леонидович** – д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Института кристаллографии им. А.В. Шубникова Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» отметил, что в автореферате детально обсуждается разработка аппаратно-методического комплекса времяразрешающей рентгеновской дифрактометрии для исследования влияния внешнего электрического поля на структуру образца. Однако вопрос о степени влияния других внешних факторов, таких как температура или магнитное поле, не обсуждается. В качестве пожелания на будущее было бы интересным применить данную методику для исследования некристаллических образцов, и анализа не только дифракционных картин, но и данных по рассеянию без дифракции.

**Стругацкий Марк Борисович** – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физики конденсированных сред, физических методов и информационных технологий в медицине Физико-технического института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского» прислал отзыв **без замечаний**.

**Суворов Эрнест Витальевич** – д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики твердого тела Российской академии наук (ИФТТ РАН)» отметил в качестве замечания, что некоторые рисунки в печатной версии автореферата воспринимаются затруднительно ввиду их плохой детализации, что приводит к необходимости использования электронной версии. Автору стоило заранее предусмотреть соответствие своего автореферата необходимому формату печати.

**Бублик Владимир Тимофеевич** – д.ф.-м.н., профессор кафедры материаловедения полупроводников и диэлектриков Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» отметил, что при приложении сильного электрического поля к кристаллам, автор наблюдает существенное искажение дифракционного пика за

счет реорганизации дефектов и образования сильного электрического поля в приповерхностной области кристалла. Так как исследуемые кристаллы являются диэлектриками, то следовало бы оценить возможный вклад эффекта электрострикции.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается** тем, что оппоненты являются ведущими специалистами в области исследования структуры перспективных функциональных материалов рентгеновскими методами, а в ведущей организации активно проводятся работы по изучению взаимодействия рентгеновского излучения с веществом и созданию элементов преломляющей рентгеновской оптики.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований разработан и реализован** аппаратно-методический комплекс времяразрешающей рентгеновской дифрактометрии на базе лабораторного дифрактометра ТРС с использованием быстродействующей системы накопления импульсов и TTL-синхронизации в условиях воздействия внешним электрическим полем на кристалл. **Разработан** метод времяразрешающего рентгенодифракционного картирования обратного пространства в условиях воздействия внешнего электрического поля на кристалл. С помощью метода времяразрешающей рентгеновской дифрактометрии впервые **определены** временные и частотные характеристики элемента адаптивной изгибающей рентгеновской оптики для осуществления скоростной перестройки спектрально-угловых параметров рентгеновского пучка. **Предложена и применена** 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. **Выявлены** два типа приповерхностных эффектов в парателлурите за счет локализации носителей заряда у границ раздела кристалл-электрод. Первый приводит к уширению пика и вызван пьезоэлектрической деформацией из-за сильного увеличения напряженности электрического поля вблизи электродов. Второй приводит к сдвигу пика и вызван деформацией решетки из-за скопления дефектов. **Обнаружена** перестройка дефектной структуры тетрабората лития за счет внешнего электрического поля. Эффект обусловлен двумя типами носителей заряда ( $\text{Li}^+$  и  $\text{VO}^{2+}$ ), имеет пороговое значение и сильно зависит от напряженности поля. **Получены данные** о локализации областей пространственного заряда у анода и катода по изменению соотношения интегральных интенсивностей кратных дифракционных порядков, отличающихся по глубине экстинкции рентгеновских лучей. **Показано**, что наиболее сильные различия наблюдаются у катода, что соответствует накоплению ионов лития.

**Значение полученных соискателем результатов исследований для практики подтверждается тем, что:** создание и управление параметрами перестраиваемых внешним воздействием двумерных структур в монокристаллах перспективно для микроэлектроники и энергетики. Методика бесконтактной оценки распределения деформаций, индуцированных изменением концентрации носителей заряда по глубине, может быть использована для неразрушающего контроля структурной организации кристаллических материалов. Методика лабораторной времяразрешающей дифрактометрии представляет интерес для изучения процесса миграции носителей заряда и дефектов при внешних воздействиях; в частности, актуальна для изучения динамики процессов во внешнем электромагнитном поле в кристаллах-мультиферроиках и перовскитах.

**Оценка достоверности результатов** диссертационной работы выявила, что соискателем с использованием широкого набора взаимодополняющих методов получен большой объем хорошо согласующихся экспериментальных результатов. Достоверность результатов обеспечивается применением современного экспериментального оборудования, сертифицированного в соответствии с международными стандартами, и современного программного обеспечения, подтверждается публикацией результатов в рецензируемых научных изданиях и в докладах на различных национальных и международных конференциях. Обоснованность положений, выносимых соискателем на защиту, подтверждается хорошей согласованностью интерпретации полученных экспериментальных данных и предлагаемой модели с литературными источниками.

**Личный вклад соискателя** состоял в проведении экспериментов, анализе и интерпретации результатов, полученных методами рентгеновской дифракции и электрофизических изменений. Все экспериментальные результаты получены автором диссертации лично или при его непосредственном участии, в том числе и при использовании вспомогательных методов. Соискателем проведена модернизация экспериментальной установки трехкристального рентгеновского спектрометра (ТРС-К) для реализации на ней времяразрешающих экспериментов по исследованию кристаллов в условиях внешнего воздействия электрическим полем. Автор также принимал активное участие в написании статей по материалам исследований, в подготовке публикаций и научных докладов на многочисленных национальных и международных конференциях.

Диссертация отвечает на ключевые вопросы поставленной научной проблемы и соответствует критерию внутреннего единства. Объединяющим фактором и основной идейной линией являются исследования разработанным методическим подходом на основе рентгеновской дифрактометрии

приповерхностных структур в диэлектрических монокристаллах парателлурита и тетрабората лития в условиях внешнего воздействия электрическим полем. Данный подход позволяет регистрировать процессы структурных изменений с высоким пространственным и временным разрешением и представляет большой интерес с точки зрения изучения взаимосвязи контролируемого локального изменения структурной организации материала и его свойствами.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая полностью соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

На заседании 21 июля 2020 года диссертационный совет принял решение присудить Куликову Антону Геннадьевичу учёную степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.18 – «кристаллография, физика кристаллов».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 5 докторов наук по специальности 01.04.18 – «кристаллография, физика кристаллов», участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 17, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель диссертационного совета,  
член-корреспондент РАН

М.В. Ковальчук

Учёный секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук

К.В. Фролов

«21» июля 2020 г.

Учёный секретарь ФНИЦ  
«Кристаллография и фотоника» РАН  
кандидат физико-математических наук



Л.А. Дадинова