

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Титова Романа Алексеевича «Технологические и структурные факторы
формирования физических характеристик нелинейно-оптических
монокристаллов ниобата лития, легированных цинком и бором», представленной
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.6.7 – Технология неорганических веществ

Актуальность темы. Кристаллы ниобата лития занимают лидирующие позиции среди нелинейно-оптических сред, использующихся для разработки функциональных оптических элементов генерации и преобразования лазерного излучения, а также создания на их основе фотонных устройств. Оптическое качество и дефектная структура монокристаллов ниобата лития определяют параметры и характеристики конечных функциональных элементов, изготовленных на их основе, что задает высокие требования к совершенству структуры кристаллов и высокой лучевой стойкости. В связи с этим решение проблемы по совершенствованию методик и технологий получения высококачественных монокристаллов с установлением закономерностей формирования особенностей структуры и физических характеристик имеет большое значение для развития отечественного материаловедения, компонентной базы фотоники и оптоэлектроники.

В связи с этим исследования, представленные в диссертации Титова Р.А., направленные на изучение дефектной структуры, причин возникновения дефектов в кристаллах ниобата лития, легированных металлическими (Zn) и неметаллическими (B) примесями в различных концентрационных сериях, **являются актуальными** и имеющими высокий потенциал прикладного применения в части отработки промышленной технологии получения высокосовершенных монокристаллов ниобата лития с высокой лучевой стойкостью.

Научная новизна и практическая значимость исследований. В диссертации Титова Р.А. представлены результаты, обладающие научной новизной:

- установлено, что количество изломов в концентрационном поведении ширин некоторых линий спектров КРС (пять изломов при 1.39, 3.43, 3.95, 5.19^{II} и 5.19^{III} мол. % ZnO в кристалле) существенно превышает количество порогов (два порога при 3.95 и 5.19^{II} мол. % ZnO в кристалле), известных из литературных данных. Этот факт свидетельствует о наличии в кристаллах LiNbO₃:Zn как минимум ещё трёх слабовыраженных порогов при 1.39, 3.43 и 5.19^{III} мол. % ZnO в кристалле;

- исследованы особенности дефектной структуры и физических характеристик монокристаллов LiNbO₃:B, выращенных с применением химически активного флюса B₂O₃. Показано, что вне зависимости от технологии введения катионов бора в шихту конгруэнтного состава (с использованием прямого твёрдофазного легирования (B₂O₃, H₃BO₃) или методом гомогенного легирования (H₃BO₃)) неметаллический элемент бор входит в структуру кристалла только в следовых количествах (~ 4·10⁻⁴ мол. %);

- установлено, что катионы бора B³⁺ в следовых количествах (~ 4·10⁻⁴ мол. %) встраиваются в тетраэдрические пустоты структуры кристаллов LiNbO₃, локализуясь в составе группы [BO₃]³⁻ в гранях тетраэдрических пустот, граничащих с вакантными или литиевыми кислородными октаэдрами O₆, либо в кислородной плоскости O₃, общей для смежных октаэдров. Это приводит к заметному изменению длин связей <O-O> и <Me-O> кислородно-октаэдрических кластеров MeO₆, искажению кислородного каркаса кристалла, увеличению величины $R=[Li]/[Nb]$ и к повышению упорядочения структурных единиц катионной подрешётки кристаллов.

- установлено, что монокристалл LiNbO₃:B (1.24 мол. % B₂O₃ в шихте), близкий по составу к стехиометрическому кристаллу, полученный по технологии прямого твёрдофазного легирования шихты конгруэнтного состава борной кислотой, наиболее композиционно и структурно однороден и обладает более

высоким оптическим качеством по сравнению с кристаллами $\text{LiNbO}_3:\text{B}$ (0.55, 0.69 и 0.83 мол. % B_2O_3 в шихте), полученными по технологии прямого твёрдофазного легирования шихты конгруэнтного состава оксидом бора. Впервые показано, что кристаллы $\text{LiNbO}_3:\text{B}$ (0.55, 0.69, 0.83 и 1.24 мол. % B_2O_3 в шихте) отличаются более низким эффектом фоторефракции по сравнению с кристаллом $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$ и более близким к таковому для кристалла $\text{LiNbO}_{3\text{конг}}$.

Результаты, имеющие практическую значимость:

- предложен новый способ легирования монокристаллов LiNbO_3 путём внедрения следовых количеств ($\sim 4 \cdot 10^{-4}$ мол. %) неметаллического элемента бора в тетраэдрические O_4 пустоты кристалла;

- показано, что технология использования химически активного флюса B_2O_3 для получения близких по составу к стехиометрическим композиционно однородных кристаллов LiNbO_3 является наиболее оптимальной среди других технологий с точки зрения временных и материальных затрат для получения оптически совершенных, композиционно однородных крупногабаритных монокристаллов ниобата лития для нелинейной, лазерной и интегральной оптики.

Полученные результаты диссертационного исследования используются в лаборатории материалов электронной техники ИХТРЭМС КНЦ РАН при отработке технологий монокристаллов, а также в качестве учебного материала при чтении курсов лекций «Технология неорганических веществ» и «Фундаментальные научные основы технологии монокристаллических и керамических материалов электронной техники» в Мурманском государственном техническом университете при подготовке магистров по специальности «Химия» и аспирантов по специальности «Технология неорганических веществ».

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечена использованием запатентованных технологий синтеза шихты и выращивания монокристаллов, разработанных авторским коллективом лаборатории материалов электронной техники ИХТРЭМС КНЦ РАН; применением аттестованного современного научно-исследовательского оборудования, а также хорошо

зарекомендовавших себя установок оригинальной конструкции; использованием высокоточных лицензионных программ для обработки экспериментальных данных.

Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на многочисленных конференциях и научных семинарах, опубликованы в 24 научных работах (16 статей в научных журналах из перечня ВАК, 15 статей в журналах индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus). Подана заявка 2022107480 РФ, МПК С30В 29/30, 15/00, 15/02 (2006.01). Способ получения борсодержащего монокристалла ниобата лития / Р.А. Титов, Бирюкова И.В., Палатников М.Н., Сидоров Н.В., Кравченко О.Э., Кадетова А.В.; Федер. гос. бюджетное учреждение науки Федер. исследоват. центр «Кольский научный центр РАН» (ФИЦ КНЦ РАН). – № 2022107480; заявл. 21.03.2022.

Рекомендации по использованию результатов диссертации. Прикладной аспект научных исследований Титова Р.А. напрямую связан с разработкой технологий получения высокосовершенных оптически однородных монокристаллов для компонентной базы фотоники. Результаты диссертационной работы представляют интерес для научно-образовательных центров, специализирующихся на получении компонентов фотоники и оптоэлектроники, а также учреждений РАН и предприятий, специализирующихся на создании приборов фотоники и оптоэлектроники.

Краткая характеристика основного содержания диссертации. Диссертация Титова Р.А. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка цитируемой литературы и четырех приложений.

Во введении обосновывается актуальность диссертационного исследования, формулируется цель и основные задачи работы. Представлено описание предлагаемого автором подхода к решению поставленных задач, характеризуется степень новизны полученных результатов и их апробация.

В первой главе проведен подробный обзор технологий прекурсоров и гранулированной шихты номинально чистых и легированных металлическими элементами (Mg, Zn и др.) монокристаллов ниобата лития. Проведен анализ

фазовых диаграмм двойных и тройных систем ниобата лития, описаны особенности строения и состояния дефектной (вторичной) структуры кристаллов LiNbO_3 как кислородно-октаэдрической фазы переменного состава. Показано, что флюс V_2O_5 оказывает многофакторное воздействие на структуру расплава, его физико-химические свойства и, как следствие, на структуру и практически значимые физические характеристики кристалла ниобата лития. Рассмотрены особенности порогового вхождения легирующих катионов металлов в кислородно-октаэдрическую структуру кристалла ниобата лития и их влияние на упорядочение структурных единиц катионной подрешётки кристалла.

Во второй главе представлены особенности приготовления объектов исследований. Рассмотрена материально-техническая база для получения и исследования образцов и комплекс методов изучения полученных объектов. В главе приведено описание синтеза шихты для выращивания кристаллов LiNbO_3 _{стех}, LiNbO_3 _{конг}, а также кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ (0.04-5.84 мол. % ZnO в кристалле) и $\text{LiNbO}_3:\text{V}$ (0.02-1.24 мол. % V_2O_5 в шихте). Приведена технологическая схема получения монокристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{V}$. Описаны методики исследования композиционной однородности, особенностей структуры и оптических свойств монокристаллов ниобата лития разного состава и генезиса: спектроскопии КРС, ИК-спектроскопии поглощения, лазерной коноскопии, ФИРС, оптической спектроскопии и рентгеноструктурного анализа. Приведено описание методики определения фотоэлектрических полей (фотовольтаического и диффузионного) по параметрам индикатрисы ФИРС.

В третьей главе диссертации представлены результаты исследований особенностей формирования дефектной структуры и оптических свойств серии кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ (0.04-5.84 мол. % ZnO в кристалле). Показано, что концентрационная зависимость эффективного коэффициента распределения имеет три явно выраженных участка: 4.02-5.38(I), 5.38-6.76(II) и 6.76-8.91(III) мол. % ZnO в расплаве. Выявлено, что кристаллы $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$, выращенные из расплавов, соответствующих I и II концентрационным участкам (до 6.76 мол. % ZnO в расплаве), отличаются высокой композиционной однородностью по

сравнению с кристаллами, выращенными из расплавов, соответствующих III концентрационному участку. Исследованы изменения ширин линий в спектрах КРС с частотами $630(A_1(TO))$ и $876\text{ см}^{-1}(A_1(LO))$, отвечающих, соответственно, колебаниям атомов кислорода кислородных октаэдров структуры $A_1(TO)$ -типа симметрии и валентным мостиковым колебаниям атомов кислорода $A_1(LO)$ -типа симметрии в кристаллах с концентрациями примеси Zn, близких к пороговым (3.0 и 6.76 мол.% ZnO). Обнаружено, что количество изломов в концентрационном поведении ширин этих линий (пять изломов) существенно превышает количество порогов (3.95 и 5.19^{II} мол. % ZnO в кристалле), что свидетельствует о наличии, помимо известных порогов, ещё трёх слабовыраженных: 1.39, 3.43 и 5.19^{III} мол. % ZnO в кристалле. Проведены исследования оптического качества и эффекта фоторефракции в кристаллах $LiNbO_3:Zn(0.04-5.84\text{ мол. \% ZnO в кристалле})$, полученных по технологии прямого легирования расплава, методами лазерной коноскопии и ФИРС.

В четвертой главе представлены результаты исследования влияния технологий легирования на композиционную однородность, оптические свойства и состояние дефектности структуры двух серий монокристаллов: $LiNbO_3:B(0.55, 0.69\text{ и }0.83\text{ мол. \% }B_2O_3\text{ в шихте})$ и $LiNbO_3:B(0.547\text{ и }1.24\text{ мол. \% }B_2O_3\text{ в шихте})$, полученных, соответственно, по технологии прямого твёрдофазного легирования оксидом бора и борной кислотой, и монокристалла $LiNbO_3:B(0.02\text{ мол. \% }B_2O_3\text{ в шихте})$, полученного по технологии гомогенного легирования с использованием прекурсора $Nb_2O_5:B$. Показано, что легирование химическим составом легирующего компонента (B_2O_3, H_3BO_3) проявляется в увеличении содержания Li_2O в кристаллах $LiNbO_3:B(0.83\text{ и }1.24\text{ мол. \% }B_2O_3\text{ в шихте})$ по сравнению с кристаллом конгруэнтного состава: $\approx 49.83, 49.86\text{ и }48.59\text{ мол. \% }Li_2O$ в кристалле, соответственно. В главе представлены результаты исследований методом спектроскопии КРС серии полученных кристаллов $LiNbO_3:B$; определены края фундаментального поглощения и ширины запрещённой зоны кристаллов $LiNbO_3:B(0.55\text{ и }0.83\text{ мол. \% }B_2O_3\text{ в шихте})$; приведены подробные результаты исследований композиционной однородности и эффекта фоторефракции

кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{B}(0.55-1.24 \text{ мол. \% } \text{B}_2\text{O}_3 \text{ в шихте})$ методами лазерной коноскопии и ФИРС. Представлены результаты исследований фотовольтаического (E_{pv}) и диффузионного электрических полей кристаллов $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$, $\text{LiNbO}_{3\text{конг}}$ и кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{B}(0.55 \text{ и } 0.83 \text{ мол. \% } \text{B}_2\text{O}_3 \text{ в шихте})$, полученных по технологии прямого твёрдофазного легирования оксидом бора. Установлено проявление диффузионного (E_{D}) механизма переноса заряда в исследуемых образцах. Проведены расчеты изобарно-изотермического потенциала (ΔG_{T} , кДж/моль) образования боратов регламентируемых примесных металлов в расплаве системы $\text{Li}_2\text{O}-\text{Nb}_2\text{O}_5-\text{B}_2\text{O}_3$, подтверждающие концепцию о способности бора как химически активного элемента, обладающего высокой комплексообразующей способностью, связывать следовые количества примесных металлов (Al, Ca, Pb и др.) в расплаве, тем самым предотвращая их переход в структуру кристалла. Проведено компьютерное моделирование пространственного расположения следовых количеств катионов бора ($\sim 4 \cdot 10^{-4}$ мол. %) в структуре кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{B}$. Модельные расчеты показывают, что катионы B^{3+} способны встраиваться в процессе роста кристалла в грани вакантных тетраэдрических пустот структуры кристалла в составе группы $[\text{BO}_3]^{3-}$ (в центры граней тетраэдрических пустот, общих с литиевыми либо вакантными октаэдрами, либо в кислородную плоскость O_3 , общую для смежных тетраэдров). Часть исследований, представленных в главе, посвящена результатам полнопрофильного рентгеноструктурного анализа кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{B}(0.02 \text{ и } 0.547 \text{ мол. \% } \text{B}_2\text{O}_3 \text{ в шихте})$, полученных по технологии гомогенного легирования прекурсора $\text{Nb}_2\text{O}_5:\text{B}$ и по технологии прямого твёрдофазного легирования борной кислотой.

В целом диссертация Титова Р.А. является законченным исследованием, в котором представлено решение актуальных научных технологических и технических задач в области технологии неорганических веществ.

Однако к работе имеются следующие **замечания**:

1 В технологии выращивания концентрационной серии монокристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ из одного тигля в работе описан контроль концентрации примесных

центров Zn в каждом последовательно выращенном кристалле при известном параметре $R=[Li_2O]/[Nb_2O_5]$ основной кристаллической матрицы перед первым ростовым процессом. В диссертации не акцентируется внимание на том, как на протяжении всего процесса получения концентрационной серии монокристаллов производится контроль параметра R расплава и кристалла перед очередным ростовым процессом.

2 Одним из основных выводов работы является тезис об определении трех дополнительных пороговых значений концентрации примесных центров Zn, при которых происходит скачкообразное изменение оптических свойств кристаллов $LiNbO_3:Zn(0.04-5.84 \text{ мол. \% ZnO в кристалле})$ наряду с известными из литературных данных концентрационными порогами в области 1.39, 3.43 и 5.19 мол% Zn. Вывод базируется на исследованиях спектров КРС и основан на наличии «изломов» в концентрационном поведении ширин спектральных линий. Однако никакой информации о погрешностях проведения экспериментальных исследований спектров КРС, а также погрешностей и доверительных интервалов в определении пороговых концентраций в работе не представлено.

3 В работе приведен анализ композиционной однородности и оценочного эффективного коэффициента распределения ($K_{эф}$) кристаллов $LiNbO_3:Zn$. Отмечено, что концентрационная зависимость $K_{эф}$ имеет три выраженных участка: 4.02-5.38(I), 5.38-6.76(II) и 6.76-8.91(III) мол. % ZnO в расплаве. Однако в работе нет пояснений о принципе определения концентрационных границ между участками, и поэтому переход между II и III участком требует комментария (стр.201, приложение 2.1).

4 В работе приводится анализ процесса фоторефракции полученных кристаллов и делается вывод о том, что некоторые образцы концентрационной серии $LiNbO_3:Zn$ и $LiNbO_3:В$ обладают достаточно высокими параметрами лучевой стойкости. Однако в работе не представлен наглядный сравнительно-сопоставительный анализ указанного параметра для данных кристаллов.

5 В работе есть неточности. Так, например, на странице 94 содержится упоминание о линиях с частотами 254 см^{-1} и 274 см^{-1} к рисунку 3.4, однако, на

рисунке эти частоты не указаны. На странице 97 нет пояснений к рисунку 3.5 о том, какой график к какой оси относится и что обозначает. На странице 145, рисунок 4.12 представлены спектры пропускания, но в тексте идет ссылка на спектры поглощения.

Указанные замечания не снижают высокой значимости полученных результатов и не влияют на общую высокую положительную оценку диссертационного исследования Титова Р.А.

Общее заключение. Основные результаты диссертации опубликованы в 24 научных работах, из них 16 статей в научных журналах из перечня ВАК, 15 статей в журналах индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. Подана заявка 2022107480 РФ, МПК С30В 29/30, 15/00, 15/02 (2006.01). Способ получения борсодержащего монокристалла ниобата лития / Р.А. Титов, Бирюкова И.В., Палатников М.Н., Сидоров Н.В., Кравченко О.Э., Кадетова А.В.; Федер. гос. бюджетное учреждение науки Федер. исследоват. центр «Кольский научный центр РАН» (ФИЦ КНЦ РАН). – № 2022107480; заявл. 21.03.2022.

Результаты диссертационного исследования прошли апробацию на российских, международных конференциях и форумах.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают основное содержание диссертации, характеризуют результаты проведенных исследований.

Уровень решаемых задач представляется соответствующим требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. Содержание диссертации соответствует специальности 2.6.7 – Технология неорганических веществ.

Считаю, что диссертация Титова Романа Алексеевича «Технологические и структурные факторы формирования физических характеристик нелинейно-оптических монокристаллов ниобата лития, легированных цинком и бором» является завершенной научно-квалификационной работой, которая по критериям актуальности, научной новизны, обоснованности и достоверности выводов соответствует требованиям п. 9–11 Положения № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Правительством Российской Федерации

24.09.2013 г. (редакция от 11.09.2021 г.). Диссертант Титов Роман Алексеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.7 – Технология неорганических веществ.

Согласна на включение персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

профессор кафедры оптоэлектроники
д-р физ.-мат. наук (01.04.05 – Оптика),
доцент

01 «июня» 2022 г.

Е.В. Строганова

Строганова Елена Валерьевна
ФГБОУ ВО «Кубанский
государственный университет»
350049, г. Краснодар,
ул. Ставропольская, д. 149
тел.: + 7(928)423-12-35
факс: +7(861)219-95-17
stroganova@phys.kubsu.ru

Подпись д-ра физ.-мат. наук Е.В. Строгановой

УДОСТОВЕРЯЮ

Ученый секретарь



Е.М. Касьянова

СВЕДЕНИЯ

об официальном оппоненте по диссертации Титова Романа Алексеевича «Технологические и структурные факторы формирования физических характеристик нелинейно-оптических монокристаллов ниобата лития, легированных цинком и бором», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.7 – Технология неорганических веществ.

Ф.И.О.: Строганова Елена Валерьевна

Ученая степень: доктор физико-математических наук

Ученое звание: доцент

Научная(ые) специальность(и): 01.04.05 – Оптика

Должность: проректор по цифровому развитию университета, декан физико-технического факультета

Место работы: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный университет»

Адрес места работы: 350049, г. Краснодар, ул. Ставропольская д. 149,

Тел.: +7(928)423-12-35

E-mail: stroganova@kubsu.ru

Список наиболее значимых публикаций за последние пять лет:

1. Galutskiy V.V., Ponetaeva I.G., Puzanovskiy K.V., Stroganova E.V. Polarization and temperatures studies of the spectral luminescent properties of Er:LiNbO₃ ceramics on Yb substrate, Er:LiNbO₃ // *Optics Communications*. V.501. 2021. P.127386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127386>.
2. V.A. Petrov, V.V. Petrov, G.V. Kuptsov, A.V. Laptev, V.V. Galutskiy and E.V. Stroganova. YAG:Yb crystal with non-linear doping ions distribution as promising active element for high average power laser systems // *Laser Phys*. V.31. 2021. P.035003. DOI: <https://doi.org/10.1088/1555-6611/abe235>.
3. Babenko I.D., Galutskiy V.V., Ivashko S.S., Stroganova E.V. Temperature dependence of Er³⁺, Yb³⁺ kinetic spectra in the gradient crystals of lithium niobate // *Optical Materials*. V.102, 2020, P.109818. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.109818>.
4. V.V. Galutskiy, S.S. Ivashko, E.V. Stroganova. Growth of lithium niobate and potassium niobate single crystals using the Czochralski method with liquid and ceramic charging // *Solid State Sciences*, V.108, 2020, P.106355. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2020.106355>.
5. E.V. Stroganova, V.V. Galutskiy, I.G. Ponetaeva, K.V. Puzanovskiy. Optical properties of Er:LiNbO₃ ceramics on Yb,Er:LiNbO₃ substrate // *Journal of Physics: Conference Series*, V. 2131, 2021, P. 042051. DOI 10.1088/1742-6596/2131/4/042051. ISSN 17426588.
6. E.V. Stroganova, V.V. Galutskiy, S.A. Shmargilov, K.V. Puzanovskiy. Phase-sensitive amplification based on gradient Er:PPLN // *Journal of Physics:*

Conference Series, V. 2103, 2021, P. 012183. DOI 10.1088/1742-6596/2103/1/012183. ISSN 17426588.

7. V.A. Petrov, V.V. Petrov, G.V. Kuptsov, A.V. Laptev, E.V. Stroganova. Modeling of fields in active elements with a volume inhomogeneous distribution of concentration of laser ions // XXVII CONFERENCE ON HIGH-ENERGY PROCESSES IN CONDENSED MATTER "HIGH-ENERGY PROCESSES IN CONDENSED MATTER (HEPCM 2020)". 2020, P. 030032, DOI: [10.1063/5.0028809](https://doi.org/10.1063/5.0028809).

8. Галуцкий В.В., Строганова Е.В., Яковенко Н.А., Судариков К.В., Рассейкин Д.А., Юрова Н.А. Структура кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Mg},\text{Cr}$ и его свойства в видимом и терагерцовом диапазоне длин волн // Оптический журнал. 2018, Т. 85, № 4, С. 75-80.

9. Куплевич М. А., Стрикица Н.В., Шостак Е.С., Кравченко К.В., Строганова Е.В. Применение метода оптической спектроскопии в ТГц диапазоне для оценки влияния на кожу некоторых косметических средств // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2021, Т. 18, № 2, С. 48-55.

10. Куксенко М.Б., Судариков К.В., Строганова Е.В. Терагерцовая спектроскопия градиентно-активированных кристаллов ниобата лития с развитой изоморфной структурой // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018, Т. 2, № 5, С. 103-110.

11. Налбантов Н.Н., Квас А.А., Строганова Е.В. Оптимизация квантовой эффективности и спектральная селекция ИК-излучения неоднородно легированных кристаллов $\text{Yb}, \text{Er}:\text{LiNbO}_3$ // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018, Т. 2, № 5, С. 237-243.

Основание: Приказ Минобрнауки РФ № 326 от 16 апреля 2014 г, п. 10

Официальный оппонент:

Профессор кафедры оптоэлектроники, д.физ.-мат.н (специальность 01.04.05 – Оптика), доцент ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет»



Строганова Е.В.

350049, г. Краснодар, ул. Ставропольская д. 149,
+7(928)423-12-35, stroganova@kubsu.ru

Подпись д-ра физ.-мат. наук Е.В. Строгановой

УДОСТОВЕРЯЮ

Ученый секретарь

Е.М. Касьянова