

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

**Галуцкого Валерия Викторовича**

«Физико-технологическое моделирование, выращивание и свойства новых градиентных монокристаллов ниобата лития и ниобата калия», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Диссертационная работа **Галуцкого Валерия Викторовича** посвящена комплексному экспериментальному и теоретическому изучению градиентных монокристаллов ниобата лития и ниобата калия, включая их синтез и выращивание, исследование оптических и нелинейно-оптических свойств, разработку и физико-математическое моделирование фотонных элементов на основе выращенных монокристаллических образцов.

### Актуальность темы диссертации

Сегнетоэлектрические кристаллы ниобата лития и ниобата калия представляют значительный интерес как материалы для создания элементов, устройств и систем, использующих нелинейно-оптические преобразования спектральных характеристик лазерного излучения и модуляции его пространственных и временных характеристик. Лазерные элементы на основе этих кристаллов и их градиентных модификаций могут существенно расширить функциональные возможности интегрально-оптических схем для перспективных телекоммуникационных, квантовых и радиофотонных систем передачи и обработки информации, а также оптических сенсоров. Рассматриваемая диссертационная работа имеет своей целью разработку технологии выращивания градиентных монокристаллов ниобата лития и ниобата калия, исследование свойств этих сегнетоэлектрических материалов и выявление перспектив создания оптических функциональных элементов на их основе, что определяет ее актуальность и практическую направленность.

**Диссертация состоит** из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 252 страницах машинописного текста. Диссертация включает в себя 148 рисунков, 10 таблиц и список литературы из 249 наименований.

**Во введении** обосновывается актуальность темы, формулируются цели и задачи диссертационного исследования, отражаются сведения о его научной новизне и практической значимости, приводятся положения, выносимые на защиту, а также дается информация об апробации работы.

**Первая глава** посвящена анализу методов и способов выращивания монокристаллов ниобата лития и ниобата калия и вопросам разработки функциональных оптических элементов на их основе. Автором выявлены соответствующие проблемы и нерешенные задачи, которые и стали предметом исследований в последующих главах диссертации.

**Во второй главе** рассматривается синтез и выращивание сегнетоэлектрических кристаллов ниобата лития и ниобата калия модифицированным способом Чохральского. Здесь автором приведены результаты физико-технологического моделирования ростовых процессов инконгруэнтных кристаллов ниобата лития и ниобата калия, на основе которого им разработаны новые принципы выращивания градиентных монокристаллов ниобата лития и ниобата калия. Для их реализации создана система регистрации температуры и программатор линейного снижения/повышения мощности нагревательной системы; разработана система автоматического управления для выращивания кристаллов по разработанному В.В. Галуцким методу Чохральского с жидкостной подпиткой, позволяющая обеспечить поддержание формы градиентно-активированной кристаллической були в соответствии с заданными геометрическими параметрами; предложен экспресс-метод определения состава расплава, находящегося в тигле. Использование не только жидкостной, но и твердофазной подпитки при сохранении геометрии и конструкции ростового узла, позволило получить кристаллы с возрастающей и спадающей концентрацией основных компонентов, а также с чередованием таких участков их возрастания и убывания.

**Третья глава** диссертации посвящена исследованию оптических свойств полученных градиентных кристаллов ниобата лития и ниобата калия. Здесь автором был проведен рентгенофазовый анализ выращенных образцов, позволивший подтвердить градиентный характер распределения основных компонентов, соответствующий закладываемому алгоритму роста. Изучение влияния состава кристаллов ниобата лития на оптические свойства производилось на основе анализа различий между краем полосы поглощения образцов стехиометрического и

конгруэнтного составов; также для кристаллов ниобата лития и ниобата калия использовались известные калибровочные зависимости для полуволнового напряжения от концентрации основных компонентов. Значительное внимание было уделено изучению температурных зависимостей для ИК-спектров оптического поглощения и спектров комбинационного рассеяния ниобата лития и для спектрально-кинетических свойств градиентно-активированных кристаллов  $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{LiNbO}_3$  и  $\text{Er}^{3+}:\text{LiNbO}_3$  с концентрационными профилями оптических примесей. Проведенные температурные исследования позволили В.В. Галуцкому обнаружить в температурном интервале от 300 до 473 К для области  $\lambda \sim 1,5$  мкм увеличение интенсивности люминесценции на 15–20 % в градиентно-активированных кристаллах  $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{LiNbO}_3$  и её снижение в  $\text{Er}^{3+}:\text{LiNbO}_3$ , и связать последний эффект со снижением доли обратного переноса энергии от Er к Yb. Заметный интерес вызывают и представленные результаты исследований выращенных градиентных монокристаллов в терагерцовом диапазоне, позволивших обнаружить некоторые закономерности поведения температурных зависимостей показателей преломления кристаллов ниобата лития и ниобата калия в диапазоне от 0,4 до 1,1 ТГц.

**В четвертой главе** представлены результаты разработки и исследований фотонных элементов на основе градиентных сегнетоэлектриков ниобата лития и ниобата калия. Автором проведено физико-математическое моделирование оптической схемы и режима работы градиентного PPLN-преобразователя, позволившее предложить нелинейно-оптический элемент с градиентом концентрации ионов  $\text{Li}^+$ , в котором возможно одновременное преобразование на нескольких длинах волн или широкополосное преобразование геометрически расширенного пучка опорного сигнала. Им разработаны, как способ формирования регулярной доменной структуры в градиентных кристаллах ниобата лития, так и методика измерения для них градиента коэрцитивного поля. Предложенная методика позволила установить, что профиль изменения величины коэрцитивного поля в градиентных кристаллах ниобата лития совпадает с формой фронта кристаллизации. Важным, но, по-видимому, очевидным результатом данной главы является вывод о большей регулярности доменных структур, созданных с помощью процессов фотолитографии и приложения высоковольтного коэрцитивного поля в

послеростовых условиях, в сравнении со структурами, полученными при вытягивании кристалла ниобата лития из расплава.

**Пятая глава** диссертации посвящена физико-математическому моделированию функциональных фотонных элементов, созданных на основе градиентных кристаллов ниобата лития и ниобата калия. Здесь автором рассмотрены закономерности эффективности нелинейно-оптического преобразования при наличии градиента фазового рассогласования, на примерах градиентных PPLN для генерации второй гармоники (ГВГ) излучением мощных непрерывных волоконных лазеров и для выполнения логических операций с входными оптическими сигналами, а также для фазочувствительного усиления лазерного излучения. Он провозглашает своей целью рассмотрение основных преимуществ, получаемых при использовании градиентных функциональных элементов, по сравнению с аналогичными элементами, изготовленными из однородно легированного ниобата лития и ниобата калия. В результате проведенных исследований построена математическая модель градиентного PPLN для генерации второй оптической гармоники с учетом температурных эффектов, связанных с поглощением оптического излучения; определена эффективность ГВГ для PPLN с градиентом состава в виде гиперболического тангенса; разработана модель логического элемента, реализующего функции логического умножения оптических сигналов. Отдельного внимания заслуживают проведенные В.В. Галуцким работы по поиску технологических режимов изготовления протонообменных оптических волноводов в градиентных кристаллах ниобата лития. Им был получен образец градиентного ниобата лития со сформированными на нем канальными волноводами с шириной 15 мкм, что открывает перспективы создания эффективных волноводных нелинейно-оптических устройств с расширенными функциональными возможностями. Результаты представленных в конце данной главы измерений эффективности ГВГ на градиентном PPLN, достигающей 22 %, свидетельствуют об их соответствии разработанной автором математической модели.

В **заключении** приводятся основные результаты работы и выводы, которые представляются надежно обоснованными.

**Новизна полученных результатов, научных положений, выводов и рекомендаций**

Все основные результаты работы, сделанные по ним выводы и рекомендации, а также выносимые на защиту научные положения, являются новыми. Среди наиболее значимых результатов, полученным в ходе проведенного В.В. Галуцким диссертационного исследования, представляется целесообразным отметить следующие:

- предложен и разработан модифицированный метод Чохральского по выращиванию градиентных по основным компонентам ( $\text{Li}^+$ ,  $\text{Nb}^{5+}$ ) кристаллов ниобата лития  $\text{Li}_{f(z)}\text{Nb}_{2-f(z)}\text{O}_{5-2f(z)}$ , где  $0,94 < f(z) < 1$ , и по компонентам ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Nb}^{5+}$ ) ниобата калия  $\text{K}_{g(z)}\text{Nb}_{2-g(z)}\text{O}_{5-2g(z)}$ , где  $0,95 < g(z) < 1$ , с одновременно жидкостной и твердофазной подпиткой расплава;

- определены температурные коэффициенты показателя преломления градиентных кристаллов ниобата лития и ниобата калия в частотном диапазоне от 0,4 до 1,1 ТГц;

- разработан модифицированный метод исследования оптических свойств градиентных кристаллов ниобата лития и ниобата калия в видимом и ИК-диапазонах, основанный на температурных исследованиях спектрально-кинетических характеристик затухания люминесценции для возбужденного состояния оптических центров в области 1,5 мкм, позволяющий определять оптимальную для реализации лазерной генерации концентрацию ионов  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Er}^{3+}$ ;

- предложен новый кристаллический материал для фотонного элемента на базе градиентного PPLN для преобразования излучения непрерывных лазеров во вторую гармонику, эффективность которого определяется температурными эффектами, связанными как с однофотонным, так и с двухфотонным поглощением лазерного излучения.

#### **Достоверность полученных результатов, научных положений, выводов и рекомендаций**

подтверждается корректным использованием автором современных представлений о физико-технологических подходах к синтезу и выращиванию сегнетоэлектрических монокристаллов ниобата лития и ниобата калия и о физических процессах в функциональных оптических элементах, а также соответствующих математических моделей; применением передовых экспериментальных методик и аппаратуры; согласием теоретических предсказаний с экспериментальными данными автора и с результатами других исследовательских групп.

## **Научная и практическая значимость полученных в работе результатов**

Полученные результаты исследования представляют весомый вклад в физику обсуждаемых в диссертационной работе явлений и их применений в задачах синтеза монокристаллов ниобата лития и ниобата калия, в исследованиях люминесцентных, тепловых и нелинейно-оптических характеристик градиентных сегнетоэлектрических материалов, а также для создания на их основе лазерных генераторов, оптических усилителей и других функциональных элементов, в объемном и интегрально-оптическом исполнении. Особый интерес представляет комплекс экспериментальных работ по разработке физико-технологических основ нового способа синтеза и выращивания оптических градиентных монокристаллов ниобата лития и ниобата калия с заданным распределением концентрации основных компонентов вдоль оси роста. В результате его выполнения автору удалось синтезировать и вырастить такие градиентные образцы ниобата лития и ниобата калия, в том числе и легированные ионами  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$ .

Результаты по разработке модели процесса выращивания градиентных кристаллов ниобата лития и ниобата калия, основанной на методе Чохральского с жидкостной и твердофазной подпиткой, с автоматическим управлением основными параметрами ростового процесса, ставшие основой для созданной лабораторной технологии, имеют большое практическое значение и могут являться базой для развития отечественной промышленной технологии синтеза и выращивания градиентных монокристаллов ниобата лития.

## **Рекомендации по использованию**

Результаты диссертационной работы В.В. Галуцкого могут представлять интерес в исследованиях нелинейно-оптических сред и элементов на основе кристаллов ниобата лития и ниобата калия в учреждениях РАН, таких как ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ФНИЦ "Кристаллография и фотоника", ИПТМ, Институт физики им. Л.В. Киренского СО, а также в университетах ФГБОУ ВО «ТУСУР», ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», МГУ им. М.В. Ломоносова.

## **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, базируется на адекватном использовании

предшествующих результатов, большом объеме корректных физико-технологических и экспериментальных исследований, теоретическом анализе в рамках принятых приближений и грамотном применении методов численного моделирования, в том числе с использованием метода конечных элементов для решения систем нелинейных дифференциальных уравнений для амплитуд световых волн, и уравнения теплопроводности, для расчета температурного поля внутри образца PPLN.

В числе **недостатков диссертации** отмечу следующие.

1. На стр. 92 диссертации недостаточно полно описана типовая схема для определения полуволнового напряжения в выращенных градиентных кристаллах ниобата лития и ниобата калия, представленная здесь же на рис. 3.4. В частности, не ясна ориентация осей кристалла ниобата калия, вдоль которых прикладывалось электрическое поле и распространялся модулируемый по амплитуде лазерный пучок. Если речь идет о ниобате лития, принадлежащего к классу симметрии  $3m$ , то поле обычно прикладывается вдоль полярной оси  $Z$ . А для ниобата калия (класс симметрии  $mm2$ ) какой должна быть ориентация осей, и какая электрооптическая постоянная будет для него определять полуволновое напряжение? Кроме того, в оптической схеме почему-то отсутствует четвертьволновая пластинка. Может быть, именно ее отсутствие и приводит к достаточно далеким от теоретической кривой экспериментальным точкам на рис. 3.5?
2. На большинстве рисунков, где показаны экспериментальные точки, доверительные интервалы отсутствуют. Исключением является лишь рис. 4.23. Проводилась ли статистическая обработка результатов для других экспериментальных измерений?
3. Хотя диссертация написана хорошим грамотным языком, в тексте иногда встречаются опечатки. Например, на стр. 50 в пояснениях к формуле (2.5) диаметр внешнего тигля обозначен как  $D_0^2$ , вместо  $D_0$ .

### Заключение

В диссертации последовательно излагаются все основные результаты, что позволило автору обосновать основные выводы и положения, выносимые на защиту.

Рассматриваемая диссертационная работа является завершенным научно-исследовательским трудом, достойным претендовать на получение докторской степени по физико-математическим наукам. Она характеризуется **внутренним единством структуры**, основанным на последовательном и многостороннем рассмотрении методов исследований, синтеза и выращивания градиентных кристаллов ниобата лития и ниобата калия и создания с их использованием оптических функциональных элементов. Полученные в ней результаты свидетельствуют об их соответствии поставленной цели и задачам.

Недостатки, отмеченные выше, не влияют на общую **положительную оценку работы**, которая выполнена на высоком научном и техническом уровне и вносит весомый вклад в физику обсуждаемых в ней явлений; она существенно расширяет представления о способах синтеза и выращивания градиентных монокристаллов ниобата лития и ниобата калия и об исследованиях их оптических и нелинейно-оптических свойств. Диссертация базируется на достаточном числе исходных данных, примеров и расчетов. Она написана доходчиво и аккуратно оформлена. По каждой главе и работе в целом сделаны достаточно четкие выводы.

**Текст диссертации соответствует** как по содержанию, так и по качеству материалам, **опубликованным** автором в **28 работах** в изданиях, входящих в перечень ВАК и индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, **10 патентах** и свидетельствах о регистрации программ для ЭВМ. В целом результаты диссертации опубликованы в 72 работах; они неоднократно обсуждались на Российских и Международных конференциях и получили одобрение ведущих специалистов в области оптики и физики конденсированного состояния.

**Автореферат** соответствует всем требованиям ВАК Минобрнауки РФ, правильно и полно отражая основное содержание диссертации.

Считаю, что диссертация В.В. Галуцкого по своему содержанию, объему выполненных исследований, новизне, научной и практической значимости результатов соответствует требованиям п. 9–11 Положения № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Правительством Российской Федерации 24.09.2013 г. (редакция от 28.08.2017 г.). Диссертант Галуцкий Валерий Викторович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.



Официальный оппонент,  
главный научный сотрудник НОЦ «Нелинейная оптика,  
нанофотоника и лазерные технологии» Федерального  
государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования «Томский  
государственный университет систем управления и радиоэлектроники»,  
доктор физико-математических наук (01.04.03 – Радиофизика),  
профессор по кафедре электронных приборов



Шандаров Станислав Михайлович

тел.: +7 (3822) 41-38-87

e-mail: [stanislavshandarov@gmail.com](mailto:stanislavshandarov@gmail.com)

«10» сентября 2023 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (просп. Ленина, 40, Томск, Томская область, 634050, тел.: +7(3822) 51-05-30, e-mail: [office@tusur.ru](mailto:office@tusur.ru), <https://www.tusur.ru>)

Подпись доктора физико-математических наук, профессора Станислава Михайловича Шандарова УДОСТОВЕРЯЮ:

Нач. общего отдела  
Телефон: 8 (3822) 51-32-62



С.В. Мощанская