

ОТЗЫВ

официального оппонента

о диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Галуцкого Валерия Викторовича

на тему: «Физико-технологическое моделирование, выращивание и свойства новых
градиентных монокристаллов ниобата лития и ниобата калия»
по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Диссертация В.В. Галуцкого выполнена в области физики разупорядоченных кристаллических сред и посвящена экспериментальным и теоретическим исследованиям условий получения, физических характеристик и особенностей формирования структуры новых градиентных нелинейно-оптических монокристаллов ниобата лития (LiNbO_3) и ниобата калия (KNbO_3), номинально чистых и активированных оптическими центрами Yb^{3+} , Er^{3+} , Cr^{3+} . В работе также затронуты актуальные вопросы фундаментального физического материаловедения касательно материалов нелинейной оптики на базе кристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 , необходимые для разработки физических основ технологий градиентных монокристаллов с заданными свойствами и для разработки функциональных нелинейно-оптических элементов для преобразования оптического излучения. Получение градиентных кристаллов с заданными физическими характеристиками требуют создания совершенно новых технологий, существенно отличных от технологий композиционно однородных монокристаллов. Исследования в области технологий градиентных монокристаллов и функциональных элементов на их основе за рубежом начали развиваться сравнительно недавно, в последние 30 лет. В России в настоящее время отсутствуют промышленные технологии получения градиентных кристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 и функциональных элементов на их основе.

Актуальность темы диссертации обусловлена, прежде всего, тем, что в современной электронной отечественной и зарубежной промышленности существует острая необходимость создания эффективных функциональных оптических материалов для генерации, преобразования и модуляции лазерного излучения. Основным объектом диссертационного исследования В.В. Галуцкого, сегнетоэлектрический монокристалл LiNbO_3 , синтезированный еще в середине прошлого века, и в настоящее время является одним из наиболее востребованных функциональных материалов оптоэлектроники и акустоэлектроники. Он по-прежнему продолжает занимать лидирующие позиции в качестве материала для различных приложений в оптике – от генерации гармоник

излучения из ИК-области в видимую область до скоростной модуляции лазерного излучения для целей коммуникаций. Получение монокристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 с заданными оптимальными физическими характеристиками в настоящее время актуально также в связи с проблемой импортозамещения, поскольку подавляющее большинство монокристаллов и функциональных элементов на их основе закупаются за рубежом, в основном, в Китае. Современные исследования, в том числе, выполненные ведущими отечественными и зарубежными лабораториями, монокристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 направлены, в основном, на создание технологий высокосоввершенных крупногабаритных композиционно однородных номинально чистых и легированных монокристаллов. Однако воздействие мощного лазерного излучения накачки на функциональный оптический элемент, изготовленный из такого кристалла, вносит существенные температурные искажения в эффективность нелинейно-оптического преобразования оптическим элементом.

Главным преимуществом градиентных монокристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 , разрабатываемых в диссертации В.В. Галуцкого, по сравнению с композиционно однородными монокристаллами, является возможность компенсации температурных искажений при нелинейно-оптическом преобразовании за счет неравномерного распределения температуры по длине кристалла. Разработанные в диссертации физико-математические и технологические подходы к формированию градиента нелинейно-оптических характеристик кристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 позволяют существенно расширить возможности функциональных оптических элементов для оптоэлектронных систем обработки и передачи информации. Однако эти подходы в литературе мало разработаны и требуют, прежде всего, фундаментальной теоретической проработки. Задача усложняется еще и тем, что объекты исследования – сложные нестехиометрические фазы переменного состава с широкой областью гомогенности на фазовой диаграмме. В этой связи для создания технологий градиентных монокристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 заданного качества необходимо создание физических и математических моделей, направленных на выявление, понимание и эффективную регулировку механизмов компенсации температурных искажений, приводящих к повышению эффективности преобразования излучения градиентным кристаллом. В настоящее время в существующих технологиях градиентных монокристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 градиент их состава формируется опытным путем, основываясь только на особенностях фазовых диаграмм номинально чистых объектов, которые для слабо легированных кристаллов являются достаточно грубыми. Для решения поставленных задач в диссертации В.В. Галуцкого сформулировано, по существу, новое технологическое направление,

учитывающее особенности строения и получения градиентных монокристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 , как фаз переменного состава. В связи с вышеуказанным, тематика диссертации В.В. Галуцкого, несомненно, является актуальной.

Соединение актуальной темы исследований с современными технологическими подходами, с теоретическими и экспериментальными методами исследования свойств материалов позволило автору диссертации получить оригинальные фундаментальные и практически значимые научные результаты и сформулировать выводы, имеющие важное значение для разработки эффективных технологий градиентных монокристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 с заданными физическими характеристиками. В диссертации разработана и научно обоснована новая технология выращивания градиентных монокристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 с заданными физическими характеристиками при условии постоянства и переменности состава по длине кристалла. На технологию и материал получены патенты РФ. По этой технологии получены и исследованы образцы градиентных монокристаллов, различной стехиометрии, при условиях постоянства концентрации элементов К или Li по длине монокристаллической були. Для подтверждения соответствия физических характеристик, полученных реальных градиентных монокристаллов, заранее заданным характеристикам разработаны методики, физические и математические модели исследования оптических и нелинейно-оптических свойств градиентных кристаллов, по которым выявлены основные закономерности концентрационного влияния градиента примесных центров K^+/Li^+ на некоторые оптические свойства монокристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 . Разработана физико-математическая модель градиентного нелинейно-оптического преобразователя и создан принципиально новый преобразователь лазерного излучения на основе градиентного кристалла LiNbO_3 .

Диссертация В.В. Галуцкого состоит из введения, 5-ти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка цитированной литературы из 249 наименований. Объем диссертации составляет 252 страницы, включая 148 рисунков и 10 таблиц. Работа выполнена при поддержке 7-ми проектов и государственных заданий Минобрнауки Российской Федерации, гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и двух грантов РФФИ.

Во введении дается анализ проблем получения градиентных монокристаллов с заданными параметрами, обосновывается их актуальность, сформулирована гипотеза о связи свойств функциональных оптических элементов, с градиентным составом и особенностями структуры кристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 , сформулирована цель диссертационной работы, пути достижения цели, научная новизна и практическая

значимость работы, приведено обоснование достоверности полученных результатов, выдвинуты положения, выносимые на защиту, сформулирован личный вклад соискателя.

Первая глава диссертации является литературным обзором в котором выполнен подробный анализ существующих в настоящее время методов выращивания монокристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 разной стехиометрии, а также анализ особенностей функциональных оптических элементов на их основе, выявлен ряд нерешенных актуальных проблем и задач по разработке новых принципов получения оптических градиентно-активированных монокристаллов разной стехиометрии с градиентом концентрации по основным компонентам K^+ или Li^+ по длине монокристаллической були. Сформулировано, как решение поставленных фундаментальных и технологических задач позволит прогнозировать эффективность функционирования разрабатываемых градиентных материалов в устройствах преобразования информации. Сформулированы пути формирования практически значимых физических свойств градиентных монокристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 в зависимости от внешних условий. Показано, что для создания функциональных нелинейно-оптических устройств, работающих в терагерцовом частотном диапазоне, требуется учет градиента концентраций в условиях фазового согласования. Последнее, в свою очередь, требует создания экспериментальных методик, физических и математических моделей, обеспечивающих прогнозирование и контроль изменений нелинейно-оптических свойств при градиентном изменении состава материала.

Во второй главе приведены и обсуждаются полученные автором результаты моделирования ростовых процессов инконгруэнтных кристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 , результаты синтеза градиентных кристаллов и результаты выращивания градиентных кристаллов с однонаправленным и двунаправленным изменением концентрации лития, подробно описаны методики выращивания монокристаллов с градиентом концентрации по основным компонентам, а также кристаллов с градиентом концентрации оптических примесей. Для описания в растущем кристалле неравномерного управляемого распределения основных компонентов по длине кристаллической були автором использована оригинальная модель, в которой разделение объемов расплава на части с разной стартовой концентрацией оксида ниобия и управление скоростью перемешивания этих объемов происходит за счет относительного перемещения внутреннего и внешнего тиглей, а также отвода части расплава с различным коэффициентом сегрегации по основным примесям за счет его кристаллизации. В этой модели учитывается также масса мениска, масса сегмента кристалла, погруженного в расплав, и строится график теоретической кривой веса растущего кристалла в зависимости от его задаваемой геометрии и системы внутреннего и внешнего тиглей. Показано, что при выращивании

методом Чохральского с жидкостной подпиткой градиентных кристаллов ниобата лития с однонаправленным и двунаправленным изменением концентрации лития необходимо перемещение внутреннего тигля. При этом при задании оптимальной скорости перемещения внутреннего тигля учитывается скорость падения уровня расплава во внешнем тигле. Автором получена общая формула, определяющая скорость перемещения внутреннего тигля относительно внешнего. При получении градиентных кристаллов использованы методы жидкостной и твердофазной подпитки с использованием керамики при сохранении и внешнего и внутреннего тигля и показано, что твердофазная керамика при плавлении и повышении однородности расплава во внешнем и внутреннем тигле конвекционными потоками компенсирует избыток лития или калия на фронте кристаллизации.

В третьей главе обсуждаются результаты исследования оптических свойств полученных градиентных кристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 . Для оценки оптического качества и стехиометрии кристаллов автор выполнил сравнительные исследования края фундаментального поглощения, а также использовал калибровочные зависимости для полуволнового напряжения от концентрации основных компонентов. Подробно изучены температурные зависимости спектрально-кинетических свойств градиентно-активированных монокристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ с концентрационными профилями примесей. Описана разработанная автором новая методика исследования люминесцентных свойств кристаллов, существенно сокращающая время проведения эксперимента, в которой для монотонно меняющегося времени затухания люминесценции по спектру не требуется температурная стабилизация исследуемого образца. Исследованы терагерцовые (ТГц) спектры поглощения и показатели преломления градиентных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$, Yb^{3+} , Cr^{3+} , полученных методом Чохральского с жидкостной подпиткой. Для этих кристаллов установлена и объяснена различная температурная зависимость обыкновенного и необыкновенного показателя преломления, что важно при расчетах температурной подстройки условий синхронизма.

В четвертой главе обсуждаются результаты моделирования режимов работы разработанных автором градиентного PPLN-преобразователя и методик создания периодически поляризованных структур в градиентном кристалле LiNbO_3 . Описана модель фотонного устройства на основе преобразователя оптического излучения с активным элементом с градиентом концентрации ионов Li^+ . Показано, что помощью предложенного устройства возможно одновременное преобразование на нескольких длинах волн или широкополосное преобразование геометрически расширенного пучка

опорного сигнала. Составлены карты величины коэрцитивного поля по поверхности пластин LiNbO_3 , вырезанных из градиентных кристаллов.

В пятой главе обсуждаются результаты моделирования функциональных фотонных структур из градиентных кристаллов LiNbO_3 KNbO_3 и результаты исследования технологических приемов создания волноводов в градиентном LiNbO_3 , важные для разработки функциональных оптических элементов. Для моделирования влияния температуры на процесс распространения излучения вдоль периодически поляризованного LiNbO_3 использовались уравнения для процесса преобразования излучения во вторую гармонику в которые были введены различные распределения состава вдоль поверхности периодов доменной структуры. При этом рассмотрены несколько типов градиентов концентрации основных компонентов: постоянная концентрация, нарастающая концентрация и спадающая концентрация. Выполнен подробный расчет эффективности градиентных преобразователей и показано, что значения эффективности преобразования меняются в пределах 0.3-0.6. При этом эффективность преобразователя, изготовленного с градиентом концентрации Li^+ в виде нарастающего гиперболического тангенса, и мощность второй гармоники больше, чем для кристалла с постоянной концентрацией Li^+ . Обнаружен разогрев преобразователя, приводящий к нарушению синхронизма, за счет поглощения излучения на частоте первой и второй гармоники и двухфотонного поглощения излучения второй гармоники. По результатам моделирования прохождения оптических импульсов через градиентные структуры кристаллов LiNbO_3 различного состава предложена новая схема градиентного фазочувствительного усилителя и показано, что при одинаковых условиях большие значения коэффициента усиления наблюдаются у градиентов спадающих, чем у нарастающих

В заключении сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

Научная новизна результатов исследований, полученных в работе В.В. Галуцкого, заключается в следующем:

1 Предложены, физико-химически обоснованы и реализованы новые принципы выращивания методом Чохральского с одновременно жидкостной и твердофазной подпиткой расплава оптических градиентно-активированных монокристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 , основанные на кристаллизации расплава с естественной скоростью при оптимальном сочетании составов расплава во внешнем тигле, во внутреннем тигле и геометрии системы тигля и расплава. Для определения точного состава и температуры расплава разработана новая методика и создана экспериментальная установка. При этом

рост кристалла осуществляется с сохранением задаваемого градиента концентрации по основным компонентам кристаллической матрицы.

2. Определены температурные коэффициенты показателя преломления градиентных кристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 в ТГц частотном диапазоне 0,3...1,1 ТГц и установлена закономерность, что активирование оптическими центрами Yb^{3+} , Er^{3+} , Cr^{3+} кристаллов состава $\text{Li}_x\text{Nb}_{2-x}\text{O}_{5-2x}$ ($0,94 < x < 1$), увеличивает температурный коэффициент показателя преломления в ТГц частотном диапазоне $\Delta n/\Delta T$ с $0,7 \cdot 10^{-3}$ до $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ по сравнению с неактивированными кристаллами такого же состава. При этом впервые установлено, что использование кристалла KNbO_3 для генерации излучения в ТГц-диапазоне характеризуется температурным коэффициентом показателя преломления, сопоставимым с таковым для кристалла LiNbO_3 .

3 Разработан новый эффективный метод исследования оптических свойств градиентных кристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 в видимом и ИК-диапазоне, основанный на температурных исследованиях кинетики затухания люминесцентного времени жизни возбужденного состояния оптических центров в области 1,5 мкм, позволяющий определять оптимальную концентрацию оптических центров ионов Yb^{3+} и Er^{3+} в кристалле. С использованием этого метода впервые в градиентных кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Yb}$, Er обнаружено существенное (на 15-20%) увеличение интенсивности люминесценции в температурном интервале 300-473 и существенное снижение полуторамикронной люминесценции.

4 Разработаны новая методика формирования регулярной доменной структуры в градиентном кристалле LiNbO_3 и методика измерения градиента коэрцитивного поля с использованием которых разработан и создан преобразователь оптического излучения на основе периодически поляризованного градиентного кристалла LiNbO_3 с заданным в соответствии с формулой $\text{Li}_a(x)\text{Nb}_b(x)$ градиентом концентрации ионов Li^+ .

5. Предложен новый кристаллический материал для функционального фотонного элемента на базе периодически поляризованного градиентного кристалла LiNbO_3 для преобразования излучения непрерывных лазеров во вторую гармонику на основе температурных эффектов, связанных с поглощением в преобразователе излучения на длине волны накачки, длине волны второй гармоники и с двухфотонным поглощением.

6. Разработана новая физико-математическая модель фотонного элемента для преобразования оптического излучения, реализующего дискретные математические операции в элементе на базе периодически поляризованного градиентного кристалла LiNbO_3 с концентрационным градиентом Li в кристаллической пластине состава $\text{Li}_x\text{Nb}_{2-x}\text{O}_{5-2x}$ ($0,94 < x < 1$), с использованием которой в для градиентного преобразователя

рассчитаны коэффициенты затухания сигнала на выходе и коэффициент экстинкции при различных направлениях концентрационного градиента Li.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что на основе выявленных в работе закономерностей впервые в России разработана научно-обоснованная лабораторная технология выращивания градиентных материалов на основе кристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 с концентрационными профилями основных компонентов, зависящими от координаты кристалла по которой получены новые функциональные градиентные оптические элементы для преобразования излучения. Экспериментально доказана эффективность полученных по новой технологии градиентных материалов LiNbO_3 и KNbO_3 для температурных, концентрационных и спектрально-кинетических характеристик в оптическом (300...2000 нм) и в терагерцовом (0,4...1,1 ТГц) диапазонах. Практическая значимость результатов убедительно также подтверждается пятью патентами Российской Федерации и пятью свидетельствами о государственной регистрации программ ЭВМ для обработки экспериментальных данных.

Достоверность и обоснованность полученных научных результатов выводов и рекомендаций диссертационного исследования сомнений не вызывает. Они обеспечены достаточным количеством экспериментального материала, его высоким теоретическим и экспериментальным уровнем, корректным применением комплекса взаимодополняющих экспериментальных методов: модернизированной установки для выращивания кристаллов «Кристалл 3М», терагерцового спектрографа Tera K15 Kit фирмы MenloSystems, комплекса безмасковой фотолитографии для формирования топологий фотонных структур, спектрометрического комплекса на основе монохроматоров MSDD1000 и МДР204 с набором приемников в диапазоне 190...20 000 нм, применением для возбуждения сигнала когерентных источников накачки YAG:Nd- и YLF:Nd-лазеров, полупроводниковых непрерывных и импульсных лазеров в диапазоне мощности до 30 Вт в непрерывном режиме и с длительностями импульсов накачки 90 фс и 7...15 нс. Все измерения проведены на больших выборках при помощи адаптированных к решаемым задачам методик экспериментального и теоретического исследования, привлечением для анализа обширного экспериментального материала и его подробным количественным и качественным анализом. Научные положения и выводы, представленные в диссертации, четко аргументированы, строго обоснованы. Достоверность выводов подтверждается также сравнительным анализом результатов, полученных автором, и аналогичных результатов, приведенных в публикациях других авторов. Все результаты, полученные в диссертации, подробно докладывались на многочисленных научных конференциях и семинарах. Достоверность научных результатов диссертационной работы подтверждается

получением и успешным выполнением по данному направлению исследований 7-ми проектов и государственных заданий Минобрнауки Российской Федерации, гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и двух грантов РФФИ.

Основные результаты диссертации, сформулированные в разделе Заключение, закономерно и логично вытекают из основных научных положений, выносимых на защиту, сформулированы четко и кратко, имеют несомненную существенную научную и практическую значимость.

Основные результаты диссертационного исследования, выполненного автором, хорошо систематизированы, опубликованы в 62-х печатных работах, из них 28 статей в журналах, индексирующихся в Scopus и Web of Science и из списка ВАК. При этом 9 статей опубликованы в журналах высокого квартиля (Q_1 и Q_2). 34 статьи опубликованы в изданиях РИНЦ. По теме диссертационного исследования получено пять патентов Российской Федерации и пять свидетельств о государственной регистрации программ ЭВМ для обработки экспериментальных данных.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует следующим пунктам направления исследований специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния: пункту 1 (Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы и свойств неорганических и органических соединений как в кристаллическом (моно- и поликристаллы), так и в аморфном состоянии, в том числе, композитов и гетероструктур, в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления); пункту 2 (Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств упорядоченных и неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы, дисперсные и квантовые системы, системы пониженной размерности); пункту 5 (разработка математических моделей построения фазовых диаграмм состояния и прогнозирования изменения физических свойств конденсированных веществ в зависимости от внешних условий их нахождения; пункту 6 (Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами).

Замечания по содержанию диссертационной работы:

1. Многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что оптические характеристики кристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 существенно зависят от технологии получения шихты и исходных компонентов для приготовления шихты. К сожалению, в диссертации не уделено внимание вопросам влияния особенностей шихты

на физические параметры градиентных кристаллов и не указано, шихта каких производителей использовалась при получении градиентных кристаллов.

2. Поскольку технология получения градиентных кристаллов с воспроизводимыми характеристиками намного сложнее и дороже технологии композиционно-однородных кристаллов, следовало бы во введении к диссертации или в виде отдельного небольшого раздела кратко изложить преимущества для преобразования лазерного излучения градиентных материалов с периодически поляризованными структурами по сравнению с аналогичными материалами, полученными с использованием композиционно однородных кристаллов.

3. В диссертации не затронуты вопросы формирования электронной зонной структуры в градиентных кристаллах, которые, как известно из многочисленных экспериментальных данных, существенно влияют на люминесцентные свойства и электропроводность материалов. Объяснение особенностей люминесценции с позиций электронной зонной структуры существенно бы усилило работу.

4. К сожалению, в диссертации не проводились тщательные рентгеноструктурные исследования изменений особенностей структуры и состояния дефектности градиентных кристаллов, полученных в диссертации, возникающие при изменении состава. Выполнен только рентгенофазовый анализ, определены параметры элементарной ячейки. Но не было выполнено методом Ритвельда исследование распределение основных (Li^+ , K^+ , Nb^{5+}) и легирующих катионов по позициям вдоль полярной оси. Такие рентгеноструктурные данные, полученные для градиентных кристаллов, существенно бы усилили информацию о состоянии дефектной структуры исследованных кристаллов. Разработка градиентных кристаллов с заданными физическими параметрами в первую очередь требует тщательного изучения особенностей их структуры, как фаз переменного состава, поскольку состав кристалла определяет особенности его структуры, которые, в свою очередь, определяют особенности физических характеристик.

5. Почему-то автор указывает частоты колебаний ОН-связей в тексте диссертации и на рисунках (стр.94-99) то в нанометрах (нм), то в обратных сантиметрах (см^{-1}). Это вносит серьезную путаницу в понимание материала. Общепринятым является использование обратных сантиметров (см^{-1}). Кроме того, на стр. 94-95 диссертации ошибочно сказано, что в спектре ИК кристалла ниобата лития конгруэнтного состава наблюдается одна широкая полоса с максимумом около 2874 нм. Кроме того, здесь непонятно, о спектре поглощения или о спектре пропускания идет речь? При увеличении отношения R интенсивность этой полосы уменьшается, а интенсивность полосы с максимумом 2886 нм увеличивается, в предельном случае, когда $R = 1$

(стехиометрический состав), в спектре присутствует только эта полоса. При этом сделаны ссылки [116; 117] на научные отчеты, выполненные с участием автора. На самом деле, согласно многочисленным литературным данным (см. напр. обзор [72] и работы [31, 169, 170]), в ИК-спектре поглощения конгруэнтного кристалла ниобата лития наблюдаются 3 полосы с максимумами при 3466, 3483, 3488 см^{-1} . При увеличении отношения R интенсивность полос с максимумами 3483 и 3486 см^{-1} уменьшается, а интенсивность полосы с максимумом при 3466 см^{-1} увеличивается и в предельном случае, когда $R = 1$ (стехиометрический состав), в спектре присутствует только очень узкая полоса (ширина $\approx 3 \text{ см}^{-1}$) с максимумом при 3466 см^{-1} .

Необходимо также отметить и следующее. В сильно разупорядоченных кристаллах, какими являются градиентные кристаллы LiNbO_3 и KNbO_3 , линии в колебательном спектре существенно уширены. Поэтому группа отдельных широких полос в ИК-спектре поглощения градиентного нестехиометрического кристалла (рис. 3.7) может выглядеть как одна широкая полоса, характерная для спектра кристалла стехиометрического состава. В таком случае может создаться ложное впечатление, что мы имеем дело со стехиометрическим кристаллом, в котором, согласно данным работы [72], присутствуют только одна полоса с частотой 3466 см^{-1} . Существенно заметить также и то, что в ИК-спектре поглощения стехиометрического кристалла линия с частотой 3466 см^{-1} очень узкая, ее ширина согласно данным работы [72], составляет всего $\approx 3 \text{ см}^{-1}$, что намного меньше ширины линий в спектре конгруэнтного кристалла.

Указанные замечания не ставят под сомнение сделанные в работе выводы и не снижают ценности полученных результатов, не снижают высокую оценку работы, как серьезного научного исследования. Замечания могут рассматриваться как пожелания, которые необходимо иметь в виду при проведении дальнейших исследований. Поставленные автором цели диссертационной работы достигнуты.

Общее впечатление о диссертации В.В. Галуцкого хорошее. Содержание диссертационной работы оставляет впечатление завершеного научного исследования, в котором грамотно систематизированы, сопоставлены с имеющимися литературными данными и интерпретированы экспериментальные данные, сформулированы и запатентованы конкретные технические решения, которые использованы при разработке и изготовлении новых функциональных оптических элементов на основе градиентных кристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 . В диссертации приведен достаточно полный и тщательно выверенный список ссылок на работы других авторов и на источники, откуда заимствованы материалы и отдельные результаты, необходимые для получения и обсуждения собственных результатов. Результаты, полученные другими авторами,

грамотно обсуждаются и сопоставляются с собственными результатами. Существенным является и то, что подавляющее большинство ссылок по фундаментальным и технологическим исследованиям сделаны на работы, опубликованные за последние 15 лет. Большим достоинством работы являются конкретные технические решения, основанные на проведенных автором тщательных исследованиях, воплощенные в разработанные и изготовленные экспериментальные устройства и установки. Диссертация отличается высоким физико-математическим уровнем и оригинальными техническими решениями в постановке физического эксперимента.

Основные положения, выдвигаемые на защиту, сформулированы четко и грамотно. К числу весомых достоинств диссертации, несомненно, относится ее высокий экспериментаторский уровень и наличие запатентованных оригинальных технических решений. Подавляющее число результатов отличаются существенной научной новизной и практической значимостью.

Диссертация и автореферат изложены достаточно строгим научным языком, хорошо оформлены и имеют достаточное количество грамотно представленного иллюстративного материала. Автореферат с достаточной полнотой отражает результаты диссертационного исследования.

Заключение


В диссертация В.В. Галуцкого «Физико-технологическое моделирование, выращивание и свойства новых градиентных монокристаллов ниобата лития и ниобата калия» на основании выполненных автором комплексных исследований сформулированы и убедительно обоснованы оригинальные научные положения и технические решения, совокупность которых можно квалифицировать как актуальное и важное научное достижение в области исследований фундаментальных свойств и технологий оптических материалов. Считаю, что диссертационная работа «Физико-технологическое моделирование, выращивание и свойства новых градиентных монокристаллов ниобата лития и ниобата калия», выполнена на высоком научном уровне, является законченным научным исследованием. По актуальности темы, количеству и качеству содержащегося в ней экспериментального и теоретического материала, обоснованности научных положений, сформулированным выводам, научной новизне и практической значимости диссертация полностью соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 в ред. 26.09.2022 № 1690) и соответствует паспорту специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния. В.В. Галуцкий за фундаментальные исследования в области получения градиентных кристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 и разработки новых

технологических подходов при создании функциональных оптических элементов и установок на основе градиентных кристаллов LiNbO_3 и KNbO_3 заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Я, Сидоров Николай Васильевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку

Официальный оппонент:

главный научный сотрудник лаборатории материалов электронной техники Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева - обособленного подразделения Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ИХТРЭМС КНЦ РАН), доктор физико-математических наук, профессор

 Сидоров Николай Васильевич

Контактные данные:

14.07.2023г.

184209, г. Апатиты, Мурманская область,
ул. Академгородок, 26А, ИХТРЭМС КНЦ РАН.
тел. (81555)79194; +7-921-27-68-188
E-mail: n.sidorov@ksc.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом была защищена диссертация:
01.04.01 – «Техника физического эксперимента, физика приборов, автоматизация физических исследований»

Подпись главного научного сотрудника лаборатории материалов электронной техники ИХТРЭМС КНЦ РАН доктора физико-математических наук, профессора Сидорова Николая Васильевича заверяю. Ученый секретарь Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В.Тананаева – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ИХТРЭМС КНЦ РАН)



Т.Н.Васильева