

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Строгановой Елены Валерьевны

«Исследование, синтез и выращивание оптических градиентно-активированных кристаллов на основе ниобата лития»,

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика

Диссертационная работа **Строгановой Елены Валерьевны** посвящена комплексному экспериментальному и теоретическому изучению градиентно-активированных кристаллов ниобата лития, включая физико-технологические аспекты синтеза и выращивания монокристаллов с требуемым распределением активаторов, создания на их основе оптических лазерных элементов и анализа спектрально-люминесцентных и генерационных характеристик таких оптически неоднородных материалов.

Актуальность темы диссертации

Сегнетоэлектрические кристаллы ниобата лития, благодаря уникальному набору своих физических свойств и высокой технологичности, находят широкое применение в акустоэлектронике, акустооптике, интегральной и нелинейной оптике, и в других функциональных устройствах фотоники и оптоэлектроники. Лазерные элементы на основе ниобата лития могут существенно расширить функциональные возможности интегрально-оптических схем для перспективных телекоммуникационных и радиофотонных систем передачи и обработки информации, а также оптических сенсоров, в том числе с использованием ИК излучения с длиной волны до 5 мкм. Рассматриваемая диссертационная работа направлена на разработку нового способа синтеза и выращивания градиентно-активированных кристаллов ниобата лития, развитие методов теоретического анализа и экспериментального изучения генерационных свойств изготовленных из них оптических элементов, а также на исследование возможностей применения полученных результатов для разработки лазерных устройств, что в целом обуславливает ее актуальность и практическую значимость.

Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения, изложенных на 279 страницах машинописного текста. Диссертация включает в себя 122 рисунка, 28 таблиц и список литературы из 259 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 получения и контроля состава высокосовершенных монокристаллов ниобата лития. Автором описаны физико-химические свойства ниобата лития, рассмотрены методы, используемые для выращивания его монокристаллических образцов и разновидности их составов, проанализированы особенности получения и исследования высокосовершенных монокристаллов для оптических применений. В выводах по главе отмечено наличие ряда нерешенных задач и недостатков существующих методов синтеза монокристаллов ниобата лития, а также отсутствие полной ясности в вопросах о механизмах дефектообразования и о влиянии концентрации ионов нефоторефрактивной примеси на его оптические свойства.

Во второй главе приводится описание физико-технологических основ разработанного автором способа синтеза и выращивания градиентно-активированных монокристаллов ниобата лития с заданным составом по длине кристалла и результаты его применения для роста целого ряда экспериментальных образцов. Значительное внимание здесь уделяется описанию физико-математической модели процесса получения градиентно-активированных образцов предложенным способом, технической реализации схемы двухступенчатого регулирования подводимой к внешнему тиглю электрической мощности, с визуализацией и автоматизацией ростового процесса и контролем температуры на фронте кристаллизации. Разработанный способ позволил автору, во-первых, вырастить монокристаллы ниобата лития с постоянным составом, близким к стехиометрическому, что было подтверждено проведенными ею исследованиями спектров комбинационного рассеяния лазерного излучения с длиной волны 510,6 нм и ИК спектров поглощения, обусловленного валентными колебаниями ОН-групп. Во-вторых, и это представляется мне главным результатом данной главы, в процессе экспериментов были выращены оптические градиентно-активированные

кристаллы ниобата лития различного состава и диаметра. Проведенное автором сопоставление результатов, полученных различными методами по оценке распределения концентрационных профилей оптических центров в выращенных кристаллах, подтвердило их хорошее соответствие заданным при синтезе.

Третья глава диссертации посвящена описанию разработанных специализированных методов исследования закономерностей формирования дефектной структуры градиентно-активированных кристаллов ниобата лития при различном содержании нефоторефрактивных примесей. Для кристаллов с двойным легированием ионами Cr^{3+} и Mg^{2+} предложен метод, позволяющий определить положение центров тяжести и ширин элементарных линий поглощения Cr^{3+} гауссовой формы, с использованием восстановления самой длинноволновой компоненты в поляризованных спектра поглощения из спектра люминесценции, с последующим определением остальных компонент. Его применение позволило автору впервые получить значения пороговых концентраций ионов Mg^{2+} для градиентно-активированных кристаллов с составом, близким к стехиометрическому, при которых происходит смена доминирующих оптических центров для ионов Cr^{3+} , а также установить, что в таких кристаллах механизм изменения дефектной структуры является тем же самым, как и для однородно легированных образцов.

В **четвертой главе** описан предложенный автором метод спектрально-кинетических исследований оптических центров Cr^{3+} в градиентно-активированных кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Cr},\text{Mg}$ с двойным легированием, включающий пошаговое сканирование пластин, вырезанных из градиентно-активированных образцов; регистрацию кинетики люминесценции, возбуждаемой импульсом лазера на парах меди, в спектральном диапазоне от 700 до 1100 нм с шагом от 0,5 до 2,0 нм и временным разрешением от 0,02 до 0,16 мкс, при комнатной температуре и температуре жидкого азота. Обработка полученного трехмерного массива данных с помощью разработанного специализированного комплекса программных средств позволила впервые оценить люминесцентные параметры оптических центров Cr_{Nb} и Cr_{Li} в градиентно-активированных кристаллах ниобата лития с составом, близким к стехиометрическому.

Пятая глава диссертации посвящена спектрально-люминесцентным исследованиям градиентно-активированных кристаллов ниобата лития,

легированных редкоземельными ионами Yb^{3+} и Er^{3+} . Для кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Mg},\text{Yb}$ с концентрацией магния, изменяющейся от 0 до 3 ат.% и с вариациями в концентрации иттербия от 0,36 до 0,3 ат.%, установлено, что наряду с оптическими центрами Yb_{Li} в них существует примесный комплекс, состоящий из дефекта Yb_{Li} и междоузельного структурного дефекта Mg^{2+} . В тоже время, для градиентно-активированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$ были получены спектры поглощения и люминесценции, типичные для оптических центров Yb^{3+} и Er^{3+} . Автором также было получено, что в градиентно-активированном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$ свойства излучательных релаксационных каналов ионов Er^{3+} для длин волн 1,5 и 3 мкм не соответствуют изменению его концентрационного профиля.

В **шестой главе** представлены результаты исследования процессов излучательного и безызлучательного взаимодействия примесных ионов в градиентно-активированных кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$. Анализ безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения между центрами Yb^{3+} и Er^{3+} проводился в предположения о его прыжковом механизме, во-первых, безотносительно конкретной матрицы, для идеальных сенсibilизированных лазерных сред и стационарного состояния вблизи порога генерации. Во-вторых, эта же модель использовалась автором и при интерпретации результатов экспериментальных исследований процессов безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения в системе $\text{Er}-\text{Yb}$ градиентно-активированного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$, исследованного ранее в главах 2 и 5. В результате проведенных исследований установлена функциональная зависимость квантовой эффективности такого переноса от концентрационного профиля ионов-акцепторов Er^{3+} вдоль продольной координаты, имеющая тенденцию к насыщению, и получено, что процесс прямого переноса возбуждения $\text{Yb}\rightarrow\text{Er}$ характеризуется низкими значениями микропараметров C_{dd} и C_{da} , вследствие наличия нескольких релаксационных каналов возбуждения ионов-акцепторов Er^{3+} . Значительное внимание в данной главе уделено анализу динамики населенностей уровней в системе доноров (Yb) и акцепторов (Er) в градиентно-активированном ниобате лития. Проведенное численное моделирование такого лазера с продольной накачкой с использованием системы кинетических уравнений позволило автору

количественно оценить квантовую эффективность процессов ап-конверсии, как 10 % для зеленой области спектра и менее 1 % для красного диапазона.

Седьмая глава диссертации посвящена изучению возможностей применения полученных автором результатов для разработки лазерных элементов. Здесь обсуждаются способы увеличения эффективности оптической накачки лазерных элементов на основе градиентно-активированных материалов, и проводится сравнительный анализ распределения тепловых полей в матрице YAG, в которой заданы 3 различных профиля распределения ионов Yb^{3+} . Установлено, что минимальные тепловые нагрузки в лазерном элементе при использовании продольной накачки имеют место при некотором параболическом концентрационном профиле. Анализ эффективности продольной накачки излучением полупроводникового лазера показал, что в случае создания лазерного элемента со специальным профилем распределения активной примеси она может быть увеличена более чем на 25 %. Проведенный далее сравнительный анализ генерационных характеристик излучения с длиной волны 1,5 мкм в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$ позволил автору установить, что двойное легирование обеспечивает гораздо более низкие пороги генерации, чем для $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$. Для подтверждения перспектив использования градиентно-активированных кристаллов в качестве оптических усилителей автором была проведена серия экспериментов, результаты которых также изложены в данной главе. Здесь дано подробное описание экспериментального стенда и изложена методика проведения исследований; приведены спектры усиления кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$ при различных уровнях мощности накачки; представлена зависимость мощности усиленного сигнала от мощности накачки. На основании полученных результатов автор делает вывод о конкурентоспособности усилителя на основе градиентно-активированного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$ по отношению к волоконным усилителям EDFA.

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

Строгановой Е.В. диссертационного исследования, представляется целесообразным отметить следующие:

- Разработаны физико-технологические основы нового способа синтеза и выращивания градиентно-активированных кристаллов ниобата лития с распределением концентрации примесных центров вдоль оси роста, с заданной функциональной сложностью.

- Установлен пороговый характер влияния концентрационного профиля нефоторефрактивной примеси Mg^{2+} на образование дефектных центров Cr_{Nb} и Cr_{Li} в градиентно-активированных кристаллах $LiNbO_3:Cr,Mg$ с составом, близким к стехиометрическому, и получены значения пороговых концентраций Mg^{2+} , при которых для состава с $R = 0,97$ ниже порога доминирующими являются центры Cr_{Nb} , а выше его – Cr_{Li} .

- Развита методика анализа центрального состава дефектов Cr^{3+} в градиентно-активированных кристаллах $LiNbO_3:Cr,Mg$ с наличием концентрационных профилей для ионов Mg^{2+} и Cr^{3+} , применимый в условиях сильного спектрального пересечения полос поглощения и излучения оптических центров и основанный на методах пространственно-временного разделения их вкладов в кинетику затухания люминесценции.

- Разработана теоретическая модель, позволяющая описать динамику населенностей уровней в системе донорно-акцепторного взаимодействия $Yb \rightarrow Er$ в градиентно-активированном кристалле $LiNbO_3:Yb,Er$, с учетом основных релаксационных каналов для ионов-акцепторов Er^{3+} .

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 о физических процессах в лазерных элементах, легированных ионами переходных и редкоземельных металлов, а также соответствующих математических моделей; применением передовых экспериментальных методик и аппаратуры; согласием теоретических предсказаний с экспериментальными данными автора и 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 активированных ионами переходных и редкоземельных металлов монокристаллов ниобата лития, в исследованиях люминесцентных, генерационных и тепловых характеристик градиентно-активированных лазерных элементов, 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 градиентно-активированных монокристаллов ниобата лития с заданным распределением концентрации примесных центров вдоль оси роста. В результате его выполнения автору удалось синтезировать и вырастить градиентно-активированные образцы монокристаллов ниобата лития с постоянным составом по основным компонентам кристаллической матрицы (Li и Nb) по длине були и реализованными концентрационными профилями для одной или нескольких оптических и нефоторефрактивных примесей (Mg^{2+} , Cr^{3+} , Yb^{3+} , Er^{3+}).

Результаты по разработке модели процесса выращивания градиентно-активированных кристаллов ниобата лития, основанной на автоматическом управлении основными параметрами ростового процесса и реализации двухступенчатой схемы управления подводимой к индуктору электрической мощности, позволили достичь высокой степени стабилизации температуры на фронте кристаллизации, ставшие основой для созданной лабораторной технологии, имеют большое практическое значение и могут являться базой для развития отечественной промышленной технологии синтеза и выращивания легированных монокристаллов ниобата лития.

Рекомендации по использованию

Результаты диссертационной работы Строгановой Е.В. могут представлять интерес в исследованиях лазерных сред и оптических элементов на основе кристаллов ниобата и танталата лития, легированных как ионами одного типа, так и комбинацией ионов, 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 схемы Рунге-Кутты четвертого порядка для решения нелинейной системы кинетических уравнений, описывающей динамику населенностей уровней в системе донорно-акцепторного взаимодействия $Yb \rightarrow Er$ в градиентно-активированном кристалле $LiNbO_3:Yb,Er$.

В числе **недостатков диссертации** отмечу следующие.

1. Для проведения ряда экспериментов в работе использовалось импульсное излучение с длиной волны 510,6 нм, генерируемое лазером на парах меди, обладающим значительной мощностью. При этом возможно формирование в освещенной области поля пространственного заряда, с напряженностью в десятки кВ/см, и соответствующие изменения оптических свойств вследствие фоторефрактивного эффекта. Однако в диссертации влияние данного фактора на результаты экспериментальных исследований не обсуждается, как и не приводятся сведения об интенсивности воздействующего излучения и времени засветки.
2. В диссертации не содержится сведений о доменной структуре выращенных кристаллов ниобата лития, которая играет важную роль в оптических элементах, предназначенных, в частности: а) для модуляции лазерного излучения с использованием линейного электрооптического эффекта; б) для преобразования спектрального состава лазерного излучения (генерация второй гармоники, параметрическое усиление и генерация, и т.д.); в) для реализации пространственных солитонов. Подвергались ли используемые в экспериментах кристаллы и

изготовленные из них оптические элементы монодоменизации, контролировалась ли их доменная структура?

3. Хотя текст диссертации написан хорошим грамотным языком, в тексте встречаются опечатки. Например, в обозначениях экспериментальных точек на рис. 45 зеленым точкам должен соответствовать, по-видимому, дефект Cr_{Li} , а красным треугольникам – Cr_{Nb} .

Заключение

В диссертации последовательно излагаются все основные результаты, что позволило автору обосновать основные выводы и положения, выносимые на защиту. Рассматриваемая диссертационная работа является законченным 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 градиентно-активированных кристаллов ниобата лития, с различными концентрационными профилями для легирующих ионов переходных и редкоземельных металлов. Полученные в ней результаты свидетельствуют об их соответствии поставленной цели и задачам.

Отмеченные выше недостатки не влияют на общую **положительную оценку работы**, которая является законченным исследованием, выполненным на высоком научном и техническом уровне, вносящим весомый вклад в физику обсуждаемых в диссертации явлений и расширяющим представления о способах синтеза и выращивания легированных кристаллов ниобата лития и об исследованиях их оптических свойств. Работа 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 54 печатных работах, в том числе в **15** статьях в журналах из перечня ВАК, **12** статьях в журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, **7** патентах, **2** свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ, **25** докладах в трудах конференций и в **6** отчетах о НИР. Они неоднократно обсуждались на Российских и Международных конференциях и получили одобрение ведущих специалистов в области оптики.

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

В целом рассматриваемая диссертация по своему содержанию, объему выполненных исследований, новизне, научной и практической значимости результатов соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки РФ к докторским диссертациям по «Положению п. 9» о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Строганова Елена Валерьевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика.

Официальный оппонент,
заведующий кафедрой электронных приборов
Томского государственного университета
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

07 ноября 2017 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, <https://www.tusur.ru>)

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

Секретарь Ученого совета ТУСУР



Е.В. Прокопчук