

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Цема Александра Алексеевича

«Спектрально-люминесцентные и кинетические исследования градиентно-активированных кристаллов ниобата лития с оптическими центрами Yb^{3+} , Er^{3+} », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика

Диссертационная работа **Цема Александра Алексеевича** посвящена важной задаче синтеза лабораторных образцов кристаллов LiNbO_3 для оптических применений, градиентно-активированных ионами Yb^{3+} , Er^{3+} , Ce^{+3} и Zn^{2+} в некоторых комбинациях, и исследованию их спектрально-люминесцентных, спектрально-кинетических и генерационных характеристик, с целью повышения эффективности продольной оптической накачки лазерных элементов для ближнего и среднего ИК-диапазонов.

Актуальность темы диссертации

Кристаллы ниобата лития обладают уникальными функциональными возможностями для реализации элементов и устройств фотоники различного назначения, позволяющими сочетать в одном образце его нелинейные, электрооптические, акустооптические и сегнетоэлектрические свойства, однако сравнительно слабо исследованными в настоящее время являются его возможности активации примесями, позволяющими осуществить в таком образце и эффективную лазерную генерацию. Рассматриваемая диссертационная работа направлена на синтез лабораторных образцов оптических градиентно-активированных кристаллов LiNbO_3 с реализацией концентрационных профилей оптических центров Yb^{3+} , Er^{3+} и примесных центров ионов релаксаторов Ce^{+3} , а также ионов нефоторефрактивной примеси Zn^{2+} , распределенных относительно продольной координаты монокристалла; на установление закономерностей влияния этих концентрационных профилей на спектрально-люминесцентные и кинетические свойства градиентно-активированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$, $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce,Zn})$; на разработку макета оптического усилителя и лазера с активным элементом, выполненным на основе оптического градиентно-активированного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$. Такая направленность проводимых

автором исследований определяет её актуальность, а также научную и практическую значимость.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы. Она изложена на 147 страницах машинописного текста, включает в себя 95 рисунков и 18 таблиц; в списке литературы автор использует 131 источник.

Во введении обосновывается актуальность и значимость темы диссертационной работы, раскрывается мотивация, как к проведению самого исследования, так и к выбору спектрального диапазона и используемых методов. Автор характеризует теоретическую и практическую значимость результатов, полученных в работе; формулирует цели и задачи исследования и положения, выносимые на защиту. Он также представляет здесь сведения по новизне и апробации полученных результатов.

Первая глава диссертации посвящена обзору литературы по спектральным и оптическим характеристикам материалов для лазерной генерации в области длин волн $\sim 1,5$ мкм. Здесь автором рассмотрены спектрально-люминесцентные свойства эффективных твердотельных матриц в области $\sim 1,5$ мкм (**подраздел 1.1**); спектрально-люминесцентные свойства световодов, легированных ионами Yb и Er (**подраздел 1.2**); спектрально-люминесцентные свойства ниобата лития, легированного ионами Yb и Er (**подраздел 1.3**). Основной вывод, относящийся к ниобату лития и сделанный по результатам, рассмотренным в данной главе, состоит в том, что его использование имеет высокий потенциал при разработке и создании многоканальных фотонных устройств, построенных по принципу генерации суммарных и разностных частот. А.А. Цема отмечает, что сложные процессы безызлучательного взаимодействия между оптическими ионами требуют проведения исследований по изучению влияния прямого и обратного переноса энергии с целью определения оптимально эффективных концентраций ионов Yb³⁺ и/или Er³⁺ в кристаллах ниобата лития.

Во второй главе диссертации описаны результаты работ автора по получению градиентно-активированных кристаллов LiNbO₃:Er(Ce,Zn). В **подразделе 2.1**, имеющем важное значение для решения основной задачи данной главы, представлены результаты физико-математического моделирования процесса синтеза градиентно-активированных кристаллов ниобата лития. Здесь выявлено,

что создание концентрационных профилей примеси возможно путем изменения при росте кристалла подпитки в соответствии с заданной функциональной зависимостью изменения скорости расплава (компонента расплава), поступающего из основного тигля в тигель-реактор, от массовой скорости вытягивания кристалла. Отмечается, что такой результат может достигаться изменением скорости вытягивания кристалла, либо варьированием скорости движения тигля-реактора относительно основного тигля. Получению лабораторных образцов градиентно-активированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce},\text{Zn})$ с концентрационными профилями примесных центров посвящен **подраздел 2.2**, где установлено, что синтезированные градиентно-активированные кристаллы $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce},\text{Zn})$ обладают хорошим оптическим качеством. В **подразделе 2.3** описаны методики получения экспериментальных данных и обработки результатов по измерениям спектров поглощения синтезированных кристаллов, спектров люминесценции и кинетики её затухания. В выводах по данной главе суммируются сведения о выращенных лабораторных образцах с различными концентрационными профилями примесных центров Er^{3+} , Zn^{2+} и Ce^{3+} .

Глава 3 диссертации посвящена спектрально-люминесцентным и кинетическим исследованиям градиентно-активированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$. Здесь изучено влияние концентрационных профилей оптических центров на спектральные характеристики этих кристаллов (**подраздел 3.1**); исследована люминесценция в области 1,5 мкм и 2,8 мкм градиентных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce},\text{Zn})$ (**подраздел 3.2**) и кинетика затухания люминесценции для образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce},\text{Zn})$. Исследования поглощения градиентно-активных кристаллов показали, что интегральные интенсивности поглощенной энергии коррелируют с концентрационными профилями оптических центров. Однако зависимость интегральной интенсивности излучения от продольной координаты в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$ в области 1,5 мкм не коррелирует с концентрационным профилем эрбия, а имеет вид, определяемый концентрационным профилем иттербия, являющимся центром донорного типа. Важным результатом данной главы является количественная оценка оптической мощности процесса излучения в спектральной области 1,5 мкм при накачке полупроводниковым лазером с длиной волны 980 нм, выявившая, что квантовая эффективность на данной длине волны составляет величину порядка 70 %. Из

исследований кинетики затухания люминесценции получено, что для градиентно-активированного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce},\text{Zn})$ сенсбилизация ионами цинка снижает люминесцентное время жизни возбужденного состояния ${}^4\text{I}_{13/2}$ иона Er^{3+} аналогично тому, как и ионы релаксаторы Ce^{3+} влияют на это время жизни. При этом синтезированные автором градиентно-активированные кристаллы $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(\text{Ce},\text{Zn})$ демонстрируют снижение данного люминесцентного времени жизни состояния ${}^4\text{I}_{13/2}$ иона Er^{3+} до 480–500 мкс.

Квантовая эффективность градиентно-активированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ исследуется автором в главе 4. Здесь представлены результаты определения параметров генерации на длине волны 1,5 мкм в синтезированных образцах (подраздел 4.1); исследования для них спектров сечений поглощения, излучения и расчета спектров усиления (подраздел 4.2); сравнительного анализа параметров генерации для однородно легированных и градиентно-активированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ на той же длине волны 1,5 мкм (подраздел 4.3); экспериментальных исследований спектров усиления градиентно-активированных образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ (подраздел 4.4). На основании проведенных экспериментальных исследований и выполненных расчетов выявлено, что скорость переноса энергии электронного возбуждения имеет функциональную зависимость от продольной координаты градиентно-активированного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$ и в области концентраций акцепторов Er от $4 \cdot 10^{19}$ до $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и доноров Yb от $1,2 \cdot 10^{20}$ до $0,9 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ характеризуется эффектом насыщения, что определяет оптимальный диапазон концентраций доноров и акцепторов для полученного лабораторного образца активного лазерного элемента. Из сравнительного анализа генерационных параметров градиентно-активированных кристаллов и однородно легированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$ автором получено, что для образцов градиентного типа пороговая мощность накачки ниже, чем для случая однородного легирования. Итоговым результатом данной главы является разработка макета оптического усилителя и лазера с активным элементом, выполненным на основе оптического градиентно-активированного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$. Автором получено, что при концентрациях ионов Yb 0,85 ат.% и Er 0,19 ат.% коэффициент усиления оптического сигнала находится в диапазоне значений 4–12 дБ, а пороговое значение мощности оптического сигнала при развитии генерации (порог

генерации) составляет 0,16 Вт. При концентрациях оптических центров Yb 0,69 ат.% и Er 0,26 ат.% пороговое значение мощности оптического сигнала возрастает до 0,21 Вт, при этом коэффициент усиления составляет от 14 до 18 дБ.

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 А.А. Цемой диссертационного исследования, представляется целесообразным отметить следующие:

- проведено физико-математическое моделирование процесса подпитки расплава с целью получения градиентно-активированных кристаллов ниобата лития LiNbO_3 с одним или одновременно двумя концентрационными профилями примесных центров Li^+ , Nb^{5+} , Mg^{2+} (Zn^{2+});

- получены лабораторные образцы градиентно-активированных кристаллов ниобата лития с нефоторефрактивной примесью Zn, улучшающей лучевую стойкость кристалла;

- проведен сравнительный анализ генерационных параметров однородно легированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$, $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ и градиентно-активированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$ (изменение концентрации Yb^{3+} от 1,2 до 0,6 ат.%; изменение концентрации Er^{3+} от 0,02 до 0,3 ат.%), $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ (изменение концентрации Er^{3+} от 4,1 до 2,5 ат.%), который показал, что градиентно-активированный кристалл $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$ обладает минимальной пороговой мощностью накачки 0,49 кВт/см²;

- разработан макет активного лазерного элемента на основе градиентно-активированного кристалла с реализацией одновременных концентрационных профилей оптических центров ионов Yb^{3+} и Er^{3+} . При уровне опорного сигнала от 0,12 мВт до 0,41 мВт получен диапазон изменения значения усиления оптического сигнала от 10 до 18 дБ на длине волны 1546 нм.

Достоверность полученных результатов, научных положений, выводов и рекомендаций

- подтверждается корректным использованием автором современных представлений о физико-математических моделях исследуемых явлений и физико-технологических подходах к синтезу легированных монокристаллов ниобата лития; подходов к методам расчета параметров процессов переноса энергии электронного возбуждения и эффективности переноса энергии между донорными и акцепторными центрами в лазерных материалах; согласованностью результатов расчетов и моделирования с экспериментальными данными;

- обеспечивается применением известных методов исследования и измерения спектрально-люминесцентных и кинетических характеристик лазерных материалов и их генерационных параметров.

Научная и практическая значимость полученных в работе результатов

Результаты проведенного исследования представляют собой заметный вклад в физику обсуждаемых в диссертационной работе явлений и эффектов и в технологию синтеза multifunctional материалов лазерной физики и интегральной фотоники, заключающийся, в частности, в реализации моделирования процесса подпитки расплава с целью получения градиентно-активированных кристаллов ниобата лития LiNbO_3 с одним или одновременно двумя концентрационными профилями примесных центров; в синтезе лабораторных образцов градиентно-активированных кристаллов ниобата лития с нефоторефрактивной примесью Zn с целью улучшения их лучевой стойкости; в проведении сравнительного анализа генерационных параметров однородно легированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$, $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ и градиентно-активированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$; в разработке макета лазерного элемента на основе градиентно-активированного кристалла ниобата лития с реализацией одновременных концентрационных профилей для ионов Yb^{3+} и Er^{3+} . Разработанные автором макеты оптического усилителя и лазера на базе градиентно-активированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$ могут служить основой для разработки экспериментальных устройств, а методики спектрально-кинетических и люминесцентных исследований градиентно-активированных кристаллов позволили расширить базу инструментария анализа оптических материалов.

Рекомендации по использованию

Результаты диссертационной работы Цема А.А. могут представлять интерес для фундаментальных и прикладных научных исследований лазерных сред и оптических элементов на основе кристаллов ниобата и танталата лития, легированных как ионами одного типа, так и комбинацией ионов, проводимых 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 А.А. Цема, базируется на адекватном использовании предшествующих результатов, достаточном объеме корректных физико-технологических и экспериментальных исследований, теоретических расчетов в рамках принятых приближений и грамотном применении методов численного моделирования.

Диссертационная работа А.А. Цема выполнена в соответствии с планами госбюджетных научно-исследовательских работ Кубанского государственного университета, по проектам РФФИ и в рамках других государственных НИР.

В числе **недостатков диссертации** отмечу следующие.

1. В диссертации не содержится сведений о доменной структуре выращенных градиентно-активированных образцов, которая играет важную роль в оптических элементах, использующих одновременно лазерную генерацию излучения и его преобразование за счет нелинейно-оптических или электрооптических свойств кристаллов ниобата лития. Подвергались ли используемые в экспериментах кристаллы и изготовленные из них оптические элементы процедуре монодоменизации, изучалась ли их доменная структура?
2. Для реализации элементов волноводной фотоники на основе градиентно-активированных образцов необходимо обеспечить создание в них планарных и канальных волноводов, с использованием для ниобата лития некоторых технологических процессов, из которых самыми

простыми и недорогими является высокотемпературная диффузия и протонный обмен. При этом в кристалле создаются дополнительные дефектные центры, которые могут изменить условия лазерной генерации в градиентно-активированных кристаллах. Однако эти вопросы, важные как в фундаментальном плане, так и для решения прикладных задач, в диссертации не обсуждаются.

3. На рисунке 33 (стр. 54) используется неудачный термин «интенсивность поглощения», принимающая отрицательные значения. Кроме того, на поле данного рисунка используются надписи на двух языках – русском и английском, что также не является удачным вариантом представления результатов из русскоязычных публикаций [22, 23, 35].

Заключение

В диссертации последовательно излагаются все основные результаты, что позволило автору обосновать выводы по работе и положения, выносимые на защиту. Рассматриваемая диссертационная работа является законченным научно-исследовательским трудом, достойным претендовать на получение кандидатской степени по физико-математическим наукам. Она характеризуется внутренним единством структуры, основанным на последовательном и комплексном решении проблемы синтеза градиентно-активированных кристаллов LiNbO_3 , предназначенных для реализации оптических усилителей и лазерных источников излучения. Полученные в ней результаты свидетельствуют об их соответствии поставленной цели и задачам.

Недостатки, отмеченные выше, 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. 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 10 печатных работах, в том числе в 3 статьях в научных журналах из перечня ВАК; в патенте на изобретение и свидетельстве о регистрации программы для ЭВМ; в отчете по НИР и в 3 статьях в материалах Международных и Всероссийских конференций.

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

Считаю, что диссертационная работа Цема Александра Алексеевича «Спектрально-люминесцентные и кинетические исследования градиентно-активированных кристаллов ниобата лития с оптическими центрами Yb^{3+} , Er^{3+} » удовлетворяет критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (в редакции от 01.10.2018 г.) (пп. 9 – 14), а её автор, Цема Александр Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата 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

«24» сентября 2019 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