

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
ФГАО ВО «Санкт-Петербургский
национальный исследовательский
университет информационных тех-
нологий, механики и оптики» (Уни-
верситет ИТМО), профессор, док-
тор технических наук



Никифоров В.О.

10 октября 2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Строгановой Елены Валерьевны
«Исследование, синтез и выращивание оптических градиентно-активирован-
ных кристаллов на основе ниобата лития», представленную
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.05 – оптика

Актуальность

Исследование, синтез и выращивание оптических материалов, в которых оптические свойства определяются функциональной зависимостью изменяющегося в процессе выращивания состава кристалла, является актуальной задачей в области создания эффективных оптических компонентов и устройств. На сегодняшний день такая задача реализована в области градиентной оптики, тонкопленочных структурах и полупроводниковых гетероструктурах с изменяющейся шириной запрещенной зоны. Однако проблема получения оксидных диэлектрических и сегнетоэлектрических монокристаллов с плавным изменением оптических свойств решена не была.

В рамках данного направления особую актуальность приобретают фундаментальные и прикладные задачи, направленные на разработку технологического способа получения новых материалов для создания эффективных оптических устройств. В этой связи диссертационная работа Строгановой Е.В., посвященная установлению физических закономерностей и разработке физико-технологических основ нового способа выращивания монокристаллов с заданным распределением примесей по длине, является актуальной научной задачей с высоким прикладным потенциалом.

Общая характеристика работы

Основное содержание диссертации изложено в семи главах. Во введении сформулированы цели и задачи диссертации, обоснована актуальность исследований, представлены выносимые на защиту положения, отмечается новизна и практическая ценность полученных результатов.

Глава 1 посвящена рассмотрению физико-химических свойств и особенностей получения объемных монокристаллов ниобата лития. Рассмотрены современные подходы создания высокосовершенных и высокоэффективных сегнетоэлектрических материалов на основе ниобата лития. Отмечены особенности и недостатки методов современных ростовых процессов ниобата лития.

В главе 2 представлено описание физико-технологических основ получения объемных монокристаллов ниобата лития с неравномерным распределением примеси вдоль оси роста кристалла на основе метода Чохральского с жидкостной подпиткой. Разработан метод контроля состава расплавов в процессе роста кристалла ниобата лития. Получены образцы градиентно-активированных кристаллов различных составов и геометрических размеров.

В главе 3 приведены разработанные методы исследования закономерностей формирования дефектной структуры оптических градиентно-активированных кристаллов ниобата лития в зависимости от содержания нефоторефрактивных примесей. На основе разработанных методов впервые получены значения пороговых концентраций нефоторефрактивных примесей ионов Mg^{2+} для градиентно-активированных кристаллов, соответствующих составу $R=0,97$ при которых происходит смена доминирующих оптических центров ионов Cr^{3+} ; уточнены механизмы дефектообразования в градиентно-активированных кристаллах с двойным легированием ионами Cr^{3+} и Mg^{2+} .

В главе 4 описан разработанный метод спектрокинетических исследований, позволяющий устанавливать пространственно-временные характеристики оптических центров в условиях высокой степени пересечения спектральных полос поглощения и излучения.

В главе 5 проведены экспериментальные исследования влияния концентрационных профилей оптических центров ионов Yb^{3+} и Er^{3+} на спектрально-люминесцентные и генерационные параметры градиентно-активированных кристаллов ниобата лития. Установлено влияние дефектов на спектрально-люминесцентные характеристики кристалла $LiNbO_3:Yb, Mg$ ($R = 0,99$) с плавно меняющимся концентрационным профилем ионов Mg^{2+} от 0 ат.% до 3 ат.% и плавно меняющимся концентрационным профилем ионов Yb^{3+} от 0,36 ат.% до 0,3 ат.%. Впервые определено, что в градиентно-активированном кристалле $LiNbO_3:Yb,Er$ свойства излучательных релаксационных каналов ионов Er^{3+} в

спектральной области 1,5 мкм и 3 мкм не соответствуют изменению его концентрационного профиля.

В главе 6 предложена модель взаимодействия оптических центров и описаны основные релаксационные каналы в системе $\text{Yb}^{3+} \leftrightarrow \text{Er}^{3+}$. Проведена оценка квантовых эффективностей излучательных переходов, разработана физико-математическая модель динамики населенностей уровней в системе донорно-акцепторного взаимодействия $\text{Yb} \leftrightarrow \text{Er}$ градиентно-активированного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$ с учетом всех основных релаксационных каналов ионов-акцепторов Er^{3+} .

В главе 7 представлены исследования возможностей применения градиентно-активированных кристаллов для разработки оптических лазерных элементов и устройств. Разработан комплекс программных средств расчета тепловых и генерационных параметров градиентно-активированных кристаллов, при помощи которого получены распределения тепловых полей и пороговые значения развития генерационных процессов для различных конфигураций концентрационных профилей оптических центров. Впервые получены коэффициенты усиления градиентно-активированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Er, Yb}$.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по диссертационной работе.

Изложенные в диссертации результаты докладывались на профильных научных конференциях, прошли апробацию на научных семинарах. Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных журналах, запатентованы и реализованы в виде программ для ЭВМ. Автореферат диссертации и опубликованные работы полностью раскрывают ее содержание. В тексте диссертации степень личного участия автора в работах, написанных коллективно, отмечена.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в разработке технологического способа получения объемных оптических монокристаллов с заданным контролируемым распределением примеси, получении новых сведений о процессах и закономерностях влияния концентрационных профилей примесных ионов на формирование центрального состава и оптические свойства градиентно-активированных кристаллов. Среди основных результатов можно выделить следующие:

1. Впервые установлены закономерности влияния концентрационных профилей оптических центров ионов Yb^{3+} и/или Er^{3+} на спектрально-люминесцентные и генерационные параметры градиентно-активированных кристаллов ниобата лития.

2. Впервые определены квантовые эффективности люминесценции доминирующих оптических центров ионов Cr^{3+} . Обнаружено, что оптические центры ионов Cr^{3+} в кристаллографических позициях ионов Nb^{5+} (Cr_{Nb}) обладают вероятностью температурного тушения более чем в 4 раза превосходящую вероятность температурного тушения оптических центров Cr^{3+} в позиции ионов Li^+ (Cr_{Li}).

3. Разработана физико-математическая модель динамики населенностей уровней в системе донорно-акцепторного взаимодействия $\text{Yb} \leftrightarrow \text{Er}$ градиентно-активированного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$ с учетом всех основных релаксационных каналов ионов-акцепторов Er^{3+} , позволяющая определять квантовую эффективность процессов ап-конверсии ионов Er^{3+} в видимой области спектра.

4. Разработан метод определения дефектной структуры и механизмов их формирования в градиентно-активированных кристаллах LiNbO_3 с концентрационными профилями ионов Mg^{2+} и Cr^{3+} , при помощи которого уточнена физическая модель дефектообразования в градиентно-активированных кристаллах ниобата лития ($R = 0,97$) с примесью хрома и магния; определены пороговые концентрации магния и интервал концентраций магния ΔMg , при которых происходит изменение центрового состава.

5. Установлена закономерность влияния концентрационного профиля ионов Mg^{2+} на формирование центрового состава Cr^{3+} в градиентно-активированных кристаллах ниобата лития ($R = 0,97$), которая носит пороговый характер. Обнаружено, что для концентрационного профиля ионов Mg^{2+} , плавно меняющегося от 3 ат.% до 1 ат.% и от 7 ат.% до 3 ат.%, концентрационный интервал ионов Mg^{2+} , при котором происходит перестройка доминирующих оптических центров, составляет 0,13 ат.% и 0,029 ат.%, соответственно.

6. Разработаны методы пространственно-временного разделения доминирующих оптических центров ионов Cr^{3+} в градиентно-активированных кристаллах ниобата лития с концентрационными профилями ионов Mg^{2+} и ионов Cr^{3+} при условиях сильного спектрального пересечения полос поглощения и излучения оптических центров, позволившие установить пространственно-временную локализацию центров Cr_{Nb} и Cr_{Li}

7. Разработан и физически обоснован технологический способ синтеза и выращивания оптических градиентно-активированных монокристаллов ниобата лития с продольным распределением концентрационных профилей примесных центров заданной функциональной зависимостью.

8. Разработаны методики контроля температуры на фронте кристаллизации, а также параметров концентрационной релаксации расплавов в способе получения градиентно-активированных кристаллов.

9. Впервые синтезированы и выращены градиентно-активированные кристаллы ниобата лития с постоянным составом по основным компонентам кристаллической матрицы $R = \text{Li/Nb}$ по длине кристаллической були и реализованными концентрационными профилями одной или нескольких оптических и нефоторефрактивных примесей (Mg^{2+} , Cr^{3+} , Yb^{3+} , Er^{3+}).

Научная значимость диссертационной работы:

1. Экспериментально продемонстрирована воспроизводимость разработанного способа получения градиентно-активированных кристаллов, получены образцы градиентно-активированных кристаллов ниобата лития различного состава ($R = 0,94 \div 0,97$) с одним или несколькими концентрационными профилями примесных центров диаметром 2 см и 5 см.

2. Определены пороговые концентрации нефоторефрактивной примеси ионов Mg^{2+} и концентрационный интервал перестройки центровых составов градиентно-активированных кристаллов.

3. Уточнены механизмы дефектообразования в градиентно-активированных кристаллах с двойным легированием ионами Cr^{3+} и Mg^{2+} .

4. Установлены закономерности влияния концентрационных профилей ионов доноров (Yb^{3+}) и акцепторов (Er^{3+}) на параметры безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения и распределения теплового поля внутри активных лазерных элементов на основе градиентно-активированных кристаллов.

5. Разработана модель динамики населенностей энергетических уровней в системе донорно-акцепторного взаимодействия градиентно-активированного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$. Проведена количественная оценка квантовой эффективности процессов ап-конверсии ионов Er^{3+} .

Практическая ценность полученных результатов

Разработанные теоретические и экспериментальные методы исследований оптических материалов расширяют арсенал инструментария спектрально-люминесцентного и кинетического анализа и средств прогнозирования эффективных фотонных и лазерных сред.

Градиентно-активированные кристаллы $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$, впервые изученные и предложенные в качестве лазерной среды, характеризуются увеличением эффективности продольной оптической накачки более чем на 25%, по сравнению с традиционными однородно легированными кристаллами и усиливают сигнал на длине волны 1546 нм до 17 дБ, что определяет возможность

дальнейшего расширения их использования в качестве компонентов фотоники и оптоэлектроники, и, в частности, для атмосферных оптических линий связи, работающих на длинах волн в области 1,5 мкм.

Разработан и физически обоснован технологический способ синтеза и выращивания оптических градиентно-активированных монокристаллов ниобата лития с продольным распределением концентрационных профилей примесных центров заданной функциональной зависимостью. Разработанная лабораторная технология синтеза и выращивания градиентно-активированных кристаллов может служить основой для развития промышленной технологии выращивания градиентно-активированных монокристаллов.

Рекомендации по использованию результатов

Результаты диссертационной работы представляют интерес для использования в учреждениях РАН, на предприятиях, специализирующихся на создании приборов фотоники и оптоэлектроники: ИОФ РАН, АО «НИТИОМ ВНИЦ ГИИ им. С.И.Вавилова», АО «Казанский оптико-механический завод», АО «Красногорский механический завод им. С.А.Зверева», АО «Уральский оптико-механический завод», АО «Астрофизика».

Замечания и недостатки:

1. В части работы, посвященной исследованию и рассмотрению градиентно-активированных кристаллов ниобата лития парой «магний-хром», недостаточно обосновано рассмотрение только двух типов оптических центров «хром в литиевой позиции» и «хром в ниобиевой позиции», образованных ионами хрома.
2. Недостаточно обоснован выбор хрома в качестве соактиватора магния в градиентно-активированном кристалле ниобата лития.
3. В части работы, посвященной исследованию кристаллов ниобата лития, градиентно-активированных иттербием и эрбием, рассмотрен только один фактор влияния на эффективность продольной накачки – градиент концентрации. В то же время на эффективность продольной накачки может также оказывать влияние изменение показателя преломления и градиент температуры в генерационном канале.
4. В первой главе присутствует большое количество стилистически некорректных оборотов, как на пример “...зона расплава медленно расплавляется...”, “...в ростовом узле необходимо поддерживать необходимую конфигурацию температуры...” (стр.43).

Отмеченные замечания не носят принципиального характера, не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и не снижают научной и практической значимости выполненной работы.

Заключение

На основании выполненных исследований в диссертационной работе Строгановой Е.В. обоснованы теоретические положения и получены новые практические результаты, совокупность которых следует квалифицировать как решение научной проблемы, имеющей важное значение для развития физики и технологии оптических материалов, использующихся в фотонике и оптоэлектронике.

Диссертационная работа «Исследование, синтез и выращивание оптических градиентно-активированных кристаллов на основе ниобата лития» полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук (пп.9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.), а ее автор, Строганова Елена Валерьевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

Отзыв составлен доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой оптоинформационных технологий и материалов, директором научно-исследовательского центра оптического материаловедения Никоноровым Николаем Валентиновичем (Место работы: ФГАО ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики». Адрес: 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49, тел. +7(812)337-68-81, e-mail: nikonorov@oi.ifmo.ru), доктором химических наук, профессором Колобковой Еленой Вячеславовной (Место работы: ФГАО ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики». Адрес: 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49, тел. +7-911-247-16-06, e-mail: kolobok106@rambler.ru), доктором физико-математических наук, профессором Сидоровым Александром Ивановичем (Место работы: ФГАО ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики». Адрес: 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49, тел. +7-911-920-59-38, e-mail: sidorov@oi.ifmo.ru).

Результаты диссертационной работы Строгановой Е.В. обсуждены и одобрены на совместном семинаре кафедры оптоинформационных технологий и материалов и научно-исследовательского центра оптического материаловедения Университета ИТМО 12 октября 2017 г., протокол № 11.

Заведующий кафедрой ОТиМ
д-р физ.-мат. наук


Никоноров Н.В.

профессор кафедры ОТиМ
д-р хим. наук


Колобкова Е.В.

профессор кафедры ОТиМ
д-р физ.-мат. наук


Сидоров А.И.

