



Акционерное общество  
«Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха»  
АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха»

Введенского ул., д.3, корп.1, г. Москва, 117342  
Телефон: (495) 333-91-44 факс: (495) 333-00-03

ОГРН 1127746646510, ИНН/КПП 7728816598/772801001  
e-mail: bereg@niipolyus.ru, http://www.polyus.info

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»

доктор технических наук, профессор

Кузнецов Е.В.

«24» 05 2021 г.



**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

АО «Научно-исследовательский институт «Полюс» имени М.Ф. Стельмаха» на диссертацию Пирпоинт К.А. «Исследование спектральных и генерационных свойств оптических центров ионов Тm и Но во фторидных кристаллах и керамиках для лазеров ИК-диапазона», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

В последние годы благодаря развитию новых источников накачки твердотельных лазеров и техники фотоприема в среднем инфракрасном спектральном диапазоне значительно вырос интерес к лазерам, излучающим в области 2 микрон. Лазеры такого типа в настоящее время находят применение не только в медицине, но и в лидарных и дальномерных комплексах и поэтому диссертационная работа Пирпоинт Ксении Александровны, посвященная исследованию спектроскопических и генерационных свойств ионов  $Tm^{3+}$  и  $Ho^{3+}$  в кристаллах и керамиках на основе фторидов кальция, обладает научной и практической ценностью.

Фториды щелочноземельных элементов, легированные ионами  $Tm^{3+}$  и  $Ho^{3+}$  зарекомендовали себя в качестве перспективных лазерных сред и широко изучаются на предмет получения двух лазерной генерации в различных режимах. Особенностью

данных материалов является их многоцентровость, при этом состав образующихся центров в кристаллах меняется в зависимости от таких параметров, как концентрация легирующей примеси, содержание оптически неактивной примеси в кристалле и ряда других. С изменением состава центров изменяются и генерационные свойства кристалла. Поэтому изучение закономерностей формирования оптических центров ионов  $Tm^{3+}$  и  $Ho^{3+}$  во фторидных кристаллах, изучение их спектральных и генерационных характеристик, в особенности для переходов  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$  ионов  $Tm^{3+}$  и  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$  ионов  $Ho^{3+}$ , является важной и актуальной научной задачей для современной лазерной физики.

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи диссертации, отмечена научная новизна и научно-практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации работы, личном вкладе автора, изложена структура диссертации.

**Глава 1** является обзорной и содержит анализ литературы по теме исследования. В данной главе отмечены достоинства щелочноземельных фторидов для лазеров ИК-диапазона: низкая энергия фононов, хорошие механические свойства, широкая область прозрачности, большое время жизни редкоземельных ионов и др. Описаны основные структурные модели оптических центров редкоземельных ионов, образующихся в простых фторидах. Приведены известные из литературных источников данные о спектральных свойствах различных оптических центров ионов  $Tm^{3+}$  и  $Ho^{3+}$  в кристаллах  $CaF_2$  на различных переходах. Отмечена недостаточность исследований в данной области для двухмикронных лазерных переходов ионов  $Tm^{3+}$  и  $Ho^{3+}$ .

**Глава 2** посвящена описанию технологии роста фторидных кристаллов методом Бриджмена–Стокбаргера и метода горячего формования фторидной керамики, а также описанию метода низкотемпературной времяразрешённой селективной лазерной спектроскопии в концентрационной серии кристаллов, с помощью которого проводились исследования. Приведена схема установки для измерения люминесцентных свойств кристаллов; указаны основные характеристики оборудования, использованного для исследований.

**Глава 3** посвящена исследованию спектроскопических свойств тулиевых оптических центров в концентрационной серии кристаллов  $CaF_2:Tm^{3+}$  на лазерном переходе  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$  и на переходе  ${}^1G_4 \rightarrow {}^3H_5$ . Исследования магнитодипольно разрешённого перехода  ${}^1G_4 \rightarrow {}^3H_5$  позволили впервые выделить новый тип долгоживущего оптического центра, определить его время жизни на уровне  ${}^1G_4$  и выделить полосы возбуждения и люминесценции. На 2-мкм лазерном переходе впервые были выделены индивидуальные спектры люминесценции и определены времена жизни верхнего лазерного уровня  ${}^3F_4$  для трёх типов оптических центров

иона  $Tm^{3+}$  - кластеризованного, тетрагонального и долгоживущего. Показано, что при больших концентрациях тулия ( $> 1$  мол. %), концентрация долгоживущих оптических центров может превышать концентрацию кластеризованных центров. В последнем разделе главы исследованы спектры генерации  $CaF_2:Tm^{3+}$  на 2-мкм переходе  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$  при возбуждении стандартным лазерным диодом с длиной волны  $\sim 795$  нм. Показано, что более длинноволновая линия генерации в наблюдаемых спектрах соответствует одному из максимумов спектра люминесценции нового долгоживущего оптического центра.

В главе 4 представлены результаты исследования спектроскопических свойств лазерной фторидной керамики  $CaF_2:Tm^{3+}$ , изготовленной методом горячего формования из монокристаллов  $CaF_2:Tm^{3+}$ . Показаны отличия в спектральных свойствах керамики и монокристаллов аналогичного состава. Выделен новый тип оптического центра иона Tm, наблюдаемый только в керамике. Показано отличие перестроечных кривых для кристалла и керамики  $CaF_2:Tm(0.4\%)$ , полученных в аналогичных условиях.

В Главе 5 рассмотрено влияние неактивной примеси ( $Y^{3+}$ ) на формирование оптических центров иона  $Tm^{3+}$  и их спектральные свойства в кристалле  $CaF_2:Y,Tm$ . Проведенные исследования на 2-мкм переходе в концентрационной серии кристаллов  $CaF_2:Y,Tm$  позволили выделить в них долгоживущий центр иона  $Tm^{3+}$ , аналогичный обнаруженному ранее в кристаллах, не солегированных иттрием, а также три типа кластеризованных центров с близкими временами жизни верхнего лазерного уровня, но имеющих существенно различные спектры люминесценции.

Глава 6 посвящена исследованию спектральных свойств оптических центров иона  $Ho^{3+}$  в кристаллах  $CaF_2$  на 2-мкм переходе  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$  при резонансном возбуждении. Резонансное возбуждение имеет большое практическое значение в современной лазерной физике при проектировании 2-мкм источников излучения на ионах  $Ho^{3+}$  из-за использования в качестве источника накачки тулиевых лазеров. В результате проведенного исследования в кристаллах  $CaF_2:Ho^{3+}$  на двухмикронном переходе  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$  были впервые выделены спектры люминесценции и возбуждения и измерены времена жизни для трех типов оптических центров (кластеризованного, тетрагонального и кубического).

В заключении сформулированы выводы по диссертационной работе. Сделанные по результатам работы основные выводы о процессах формирования оптических центров ионов тулия и гольмия во фторидных материалах и их спектроскопических и генерационных свойствах на лазерном двухмикронном переходе могут представлять большой интерес для разработки и создания новых эффективных лазеров среднего ИК диапазона длин волн.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается высоким уровнем экспериментальной техники, использованием известных отработанных методов, сопоставлением экспериментальных данных с численными расчётами и

имеющимися литературными данными, применением современных теоретических представлений и методов обработки при анализе данных.

Содержание диссертационной работы соответствует указанной специальности, а автореферат в полной мере отражает ее содержание.

Существенных или принципиальных возражений по работе не имеется. Отметим лишь следующие замечания, возникшие в ходе ознакомления с работой:

1. В работе исследованы спектральные свойства ряда различных оптических центров ионов тулия и гольмия в кристаллах и керамиках на основе  $\text{CaF}_2$ , однако лазерная генерация продемонстрирована только для долгоживущего центра в кристаллах  $\text{CaF}_2:\text{Tm}^{3+}$  и для новых оптических центров в керамике  $\text{CaF}_2:\text{Tm}^{3+}$ .

2. В тексте диссертации не указано, каким способом решалась проблема перепоглощения в объемных кристаллах, которое может искажать экспериментальные результаты и затруднять их интерпретацию. Например, для иона гольмия  $\text{Ho}^{3+}$ , имеющего высокое сечение поглощения, данный фактор может существенно повлиять на вид спектров и измеряемое время жизни, в особенности при низких температурах.

3. В результатах лазерных экспериментов фигурируют только спектры генерации и кривые перестройки, однако отсутствуют другие важные лазерные характеристики, такие как энергетические параметры выходного излучения, КПД, профиль пучка и т.д.

4. Отсутствует как теоретическое, так и экспериментальное сравнение лазерных характеристик исследованных фторидных материалов с оксидными кристаллами и стеклами, которые уже используются на практике.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки рецензируемой диссертационной работы.

Представленная к защите диссертация представляет собой законченную работу, в которой получены важные и интересные результаты. Научная и практическая значимость полученных в диссертационной работе результатов и выводов не вызывает сомнений. Материал диссертации понятно изложен и наглядно проиллюстрирован. Основные результаты диссертации опубликованы в 8 статьях ведущих научных изданий, рецензируемых в Web of Science Core Collection и Scopus, докладывались на международных и всероссийских конференциях.

Диссертационная работа Ксении Александровны Пирпойнт «Исследование спектральных и генерационных свойств оптических центров ионов Tm и Ho во фторидных кристаллах и керамиках для лазеров ИК-диапазона» полностью соответствует требованиям пункта 9 Положения ВАК РФ о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. (ред. от 01.10.2018), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Доклад по диссертации К.А. Пирпоинт был заслушан и обсужден на заседании секции НТС АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» 23 апреля 2021 г., протокол 4/21.

Председатель секции НТС  
Лауреат Ленинской и Государственной премий  
Доктор физ.-мат. наук профессор



Зверев Г.М.

Отзыв подготовил  
Главный научный сотрудник  
к.ф.-м.н.



Шестаков А.В.

Ученый секретарь



Кротов Ю.А

