

На правах рукописи

**БОЛЬЩИКОВ ФЕДОР АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ И ГЕНЕРАЦИОННЫЕ  
СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ НАТРИЙ-ЛАНТАН (ГАДОЛИНИЙ)  
МОЛИБДАТОВ И ВОЛЬФРАМАТОВ, АКТИВИРОВАННЫХ  
ИОНАМИ  $Tm^{3+}$**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Н. Новгород 2010

Работа выполнена в Мордовском государственном университете  
им. Н.П. Огарева

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Рябочкина Полина Анатольевна кандидат физико-математических наук,  
доцент,  
МГУ им. Н.П. Огарева, г. Саранск

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Попова Марина Николаевна доктор физико-математических наук,  
профессор,  
Институт спектроскопии РАН, г. Троицк

Горшков Олег Николаевич кандидат физико-математических наук,  
доцент,  
НИФТИ при ННГУ  
им. Н.И Лобачевского, г. Н. Новгород

Ведущая организация: Институт общей физики  
им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва

Защита диссертации состоится «24» марта 2010 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.01 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ННГУ им. Н.И Лобачевского.

Автореферат разослан «16» февраля 2010 г.

Отзывы направлять по адресу: 603950 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 3.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор



А.И. Машин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТ

### Актуальность темы

Кристаллы и стекла, активированные ионами  $Tm^{3+}$  (переход  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ ) выступают в качестве активных сред для создания лазеров двухмикронной области спектра, которые используются в медицине, системах дистанционного зондирования атмосферы, при проведении научных исследований. Эффективность лазерной генерации в различных кристаллах, активированных ионами  $Tm^{3+}$ , во многом определяется процессом кросс-релаксации между ионами  $Tm^{3+}$  ( ${}^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$ ,  ${}^3H_6 \rightarrow {}^3F_4$ ), который обеспечивает эффективное заселение верхнего лазерного уровня  ${}^3F_4$  ионов  $Tm^{3+}$  с квантовой эффективностью равной 2. Двухмикронная лазерная генерация на переходе  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$  ионов  $Tm^{3+}$  в кристаллах ИАГ:Cr, Tm и ГСГГ:Cr, Tm при таком способе заселения уровня  ${}^3F_4$  в условиях широкополосной ламповой накачки впервые была получена авторами [1].

В настоящее время для накачки твердотельных лазеров широкое распространение получила полупроводниковая лазерная накачка. В условиях лазерной полупроводниковой накачки двухмикронная лазерная генерация получена на кристаллах YAG:Tm, YAlO<sub>3</sub>:Tm, которые характеризуются высокими термомеханическими параметрами, что обеспечивает их привлекательность в качестве активных лазерных сред. Наряду с кристаллами YAG:Tm и YAlO<sub>3</sub>:Tm двухмикронная лазерная генерация получена на кристаллах YVO<sub>4</sub>:Tm и YLF:Tm и в ряде других кристаллических матриц.

В то же время представляет интерес получение двухмикронной генерации на переходе  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$  ионов  $Tm^{3+}$  в кристаллах с разупорядоченной кристаллической структурой, активированных редкоземельными (РЗ) ионами. Широкие полосы поглощения РЗ ионов активаторов, вследствие разупорядоченности кристаллической структуры данных материалов, способствуют эффективному преобразованию энергии лазерной

полупроводниковой накачки, обеспечивая меньшую критичность к спектральным вариациям источников накачки. Широкие полосы люминесценции ионов активаторов обеспечивают возможность перестройки длины волны лазерного излучения и получение генерации в режиме синхронизации мод.

К кристаллам с разупорядоченной кристаллической структурой относятся кристаллы шеелитоподобных двойных вольфраматов и молибдатов. В соединениях такого класса существует возможность изменения параметров кристаллической решетки в широких пределах без изменения типа кристаллической структуры, что позволяет найти матрицу, в которой характер спектров поглощения и излучения активных ионов привел бы к максимальной эффективности преобразования энергии накачки в энергию излучения. Обладая большой изоморфной емкостью, вольфраматы и молибдаты редкоземельных элементов при их активации другими РЗ ионами, часто образуют непрерывный ряд растворов замещения. Это позволяет вводить в эти соединения примеси РЗ ионов в широком диапазоне концентраций от 0 до 100 %.

В настоящее время в научной литературе имеются работы по исследованию спектрально-люминесцентных и генерационных свойств кристаллов шеелитоподобных натрий-лантан (гадолиний) вольфраматов [2–7] и молибдатов [8–11], активированных ионами  $Tm^{3+}$ . Однако в научной литературе нами не обнаружены работы по исследованию спектрально-люминесцентных и генерационных свойств кристаллов натрий-лантан (гадолиний) смешанных шеелитоподобных вольфраматов и молибдатов с вариацией состава La-Gd, активированных ионами  $Tm^{3+}$ . Исследование концентрационного ряда кристаллов  $NaLa_xGd_{1-x}(WO_4)_2$  и  $NaLa_xGd_{1-x}(MoO_4)_2$  ( $x=0-1$ ), активированных ионами  $Tm^{3+}$ , являлось важным для поиска оптимального состава шеелитоподобных натрий-лантан (гадолиний) вольфраматов и молибдатов, активированных ионами  $Tm^{3+}$ , а также способствовало уточнению значений ряда важных спектроскопических

характеристик, полученных для предельных членов данного концентрационного ряда:  $\text{NaLa}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  [6, 7],  $\text{NaGd}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  [2–5],  $\text{NaLa}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  [8, 11],  $\text{NaGd}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  [9, 10], так как полученные различными авторами значения некоторых спектроскопических характеристик, в ряде случаев являются противоречивыми.

**Целью диссертационной работы являлось** исследование спектрально-люминесцентных свойств кристаллов разупорядоченных шеелитоподобных натрий-лантан (гадолиний) вольфраматов  $\text{NaLa}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{WO}_4)_2$  ( $x=0-1$ ) и молибдатов  $\text{NaLa}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{MoO}_4)_2$  ( $x=0-1$ ), активированных ионами  $\text{Tm}^{3+}$ , и возможности их использования в качестве активных сред для лазеров двухмикронной области спектра в условиях лазерной диодной накачки.

**Для достижения поставленной цели в данной работе ставились и решались следующие задачи:**

1) исследование спектрально-люминесцентных свойств концентрационных рядов кристаллов  $\text{NaLa}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{WO}_4)_2$  ( $x=0-1$ ) и  $\text{NaLa}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{MoO}_4)_2$  ( $x=0-1$ ), активированных ионами  $\text{Tm}^{3+}$ ;

2) проведение генерационных экспериментов на кристаллах  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %),  $\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=4,8$  ат. %) в условиях лазерной диодной накачки;

3) моделирование процессов заселения и релаксации энергетических уровней ионов  $\text{Tm}^{3+}$  в кристаллах  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %),  $\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=4,8$  ат. %) и определение плотности потока фотонов в резонаторе при получении лазерной генерации на переходе  ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$  в условиях накачки на уровень  ${}^3\text{H}_4$ ;

4) исследование дисперсионных и температурных зависимостей показателя преломления кристаллов шеелитоподобных двойных натрий-лантан (гадолиний) молибдатов.

## Научная новизна и практическая значимость работы

Впервые исследованы спектроскопические характеристики (силы осцилляторов, вероятности переходов) концентрационных рядов кристаллов смешанных шеелитоподобных двойных вольфраматов  $\text{NaLa}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{WO}_4)_2$  ( $x=0-1$ ) и молибдатов  $\text{NaLa}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{MoO}_4)_2$  ( $x=0-1$ ), активированных ионами  $\text{Tm}^{3+}$ .

Получены спектральные зависимости сечения усиления для лазерного перехода  ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$  в кристаллах  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  и  $\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$ .

Впервые реализована лазерная генерация на переходе  ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$  в кристаллах  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %) в условиях лазерной диодной накачки. Получено лазерное излучение  $\pi$ - и  $\sigma$ -поляризаций на длинах волн 1908 нм и 1918 нм при дифференциальной эффективности 34 % и 30 % соответственно. В данных кристаллах реализована перестраиваемая лазерная генерация в спектральном диапазоне 1860–1940 нм. Впервые реализована лазерная генерация на переходе  ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$  в кристаллах  $\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=4,8$  ат. %) в условиях лазерной диодной накачки. Получено лазерное излучение  $\pi$ - и  $\sigma$ -поляризаций на длинах волн 1910 нм и 1918 нм при дифференциальной эффективности 27 % и 23 % соответственно.

В результате численного решения системы балансных уравнений для кристаллов  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %) и  $\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=4,8$  ат. %) получены временные зависимости населенности энергетических уровней  ${}^3\text{H}_4$ ,  ${}^3\text{F}_4$  и  ${}^3\text{H}_6$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$ , участвующих в получении лазерной генерации на переходе  ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$ , и плотности потока фотонов в резонаторе. Получены зависимости времени начала генерации и выходной мощности лазерного излучения от мощности излучения лазерного диода накачки.

Впервые получены дисперсионные зависимости и значения температурного коэффициента показателей преломления ( $\lambda=546,07$  нм) для

кристаллов  $\text{NaLa}_{0,465}\text{Gd}_{0,465}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=3,5$  ат. %) и  $\text{NaLa}_{0,495}\text{Gd}_{0,469}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=0,5$  ат. %).

Результаты, полученные в работе, могут быть использованы при создании твердотельных лазеров средней и малой мощности с полупроводниковой накачкой, генерирующих в ближней ИК-области (около 2 мкм), перестраиваемых по длине волны излучения.

### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1) значения сил осцилляторов, вероятностей излучательных переходов между энергетическими уровнями ионов  $\text{Tm}^{3+}$ , коэффициентов ветвления люминесценции и квантового выхода люминесценции с уровня  $^3\text{H}_4$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$  для концентрационных рядов кристаллов  $\text{NaLa}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $x=0-1$ ) и  $\text{NaLa}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $x=0-1$ );

2) спектральные зависимости сечения усиления для лазерного перехода  $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$  кристаллов  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %) и  $\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=4,8$  ат. %) для значений параметра относительной инверсной населенности  $P=0,1; 0,2$  и  $0,3$ , полученные из спектральных зависимостей сечений поглощения и люминесценции переходов  $^3\text{F}_4 \leftrightarrow ^3\text{H}_6$ ;

3) результаты генерационного эксперимента на переходе  $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$  в кристаллах  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %) и  $\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=4,8$  ат. %);

4) временные зависимости населенностей уровней, участвующих в получении лазерной генерации на переходе  $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$ , и плотности потока фотонов в резонаторе лазера на основе кристаллов  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %) и  $\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=4,8$  ат. %), полученные в ходе численного решения системы балансных уравнений.

### **Апробация работы и публикации**

По материалам диссертации опубликовано 13 печатных работ. Из них 8 статей, в том числе 6 – в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, статья в сборнике Proceeding of SPIE, статья в сборнике научных трудов VII Международной конференции «Лазерная физика и оптические технологии», 5 тезисов докладов на международных и общероссийских конференциях. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ проекта 07-02-00055а).

Результаты были представлены в виде докладов на следующих конференциях:

1) 6-ой и 7-ой Всероссийских научных школах для студентов и аспирантов: «Материалы микро,-оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение» (Саранск, 2007, 2008);

2) Международных научных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2007», «Ломоносов-2008» (Москва, 2007, 2008);

3) VII Международной конференции «Лазерная физика и оптические технологии» (Минск, 2008);

4) XIV Всероссийской конференции «Оптика и спектроскопия конденсированных сред» (Краснодар, 2008);

5) XIII International Conference «Laser Optics 2008» (Санкт-Петербург, 2008).

### **Личный вклад.**

Основные результаты работы получены автором лично. А именно: проведение спектрально-люминесцентных и генерационных исследований кристаллов шеелитоподобных натрий-лантан (гадолиний) вольфраматов и молибдатов, активированных ионами  $Tm^{3+}$ , обработка экспериментальных данных, интерпретация результатов исследований и формулировка выводов (совместно с научным руководителем). Следует отметить, что при



непосредственном участии автора работы была модернизирована установка для исследования спектров поглощения и люминесценции. По результатам технического решения получен патент РФ 2373629/32, 20.11.2009 «Устройство для управления шаговым двигателем монохроматора» (авторы Ф.А. Большиков, А.В. Малов, П.А. Рябочкина).

Кристаллы, исследованные в работе, были предоставлены Е.В. Жариковым, К.А. Субботиным, Д.А. Лисом.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 117 страниц, включая 40 рисунков, 26 таблиц и библиографию, содержащую 69 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи диссертации, научная новизна, положения, выносимые на защиту, практическая значимость работы, приведены сведения об апробации работы и публикациях автора, излагается структура диссертации.

**Первая глава** является обзорной. В первом параграфе этой главы рассмотрены физические процессы, обеспечивающие формирование инверсной населенности уровня  ${}^3F_4$  при получении двухмикронной генерации на переходе  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$  ионов  $Tm^{3+}$  в твердотельных матрицах, активированных  $Tm^{3+}$ . Физические процессы, обеспечивающие заселение и разгрузку энергетических уровней  ${}^3H_6$ ,  ${}^3F_4$ ,  ${}^3H_4$ ,  ${}^3H_5$  ионов  $Tm^{3+}$ , на рис. 1 обозначены условными стрелками и цифрами: накачка на уровень  ${}^3H_4$  (1); внутрицентровая релаксация ионов  $Tm^{3+}$  (2), сплошные стрелки обозначают излучательные переходы, пунктирные – безызлучательные; процесс кросс-релаксации  ${}^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$ ,  ${}^3H_6 \rightarrow {}^3F_4$  (3); генерация на переходе  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$  (4). Из рисунка следует, что основную роль в формировании населенности верхнего

лазерного уровня  ${}^3F_4$  ионов  $Tm^{3+}$  при накачке на уровень  ${}^3H_4$  играет процесс кросс-релаксации между двумя взаимодействующими ионами  $Tm^{3+}$  ( ${}^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$ ,  ${}^3H_6 \rightarrow {}^3F_4$ ).

В параграфе 1 главы 1 представлены также результаты исследования спектрально-люминесцентных свойств и генерационных экспериментов в условиях лазерной диодной накачки для ряда кристаллических матриц ( $YAG:Tm$ ,  $YAlO_3:Tm$ ,  $YVO_4:Tm$ ,  $YLF:Tm$ ), известные из научных источников.

В параграфе 2 главы 1 приводятся данные о кристаллографической структуре, спектрально-люминесцентных и генерационных свойствах кристаллов натрий-лантан (гадолиний) вольфраматов и молибдатов, активированных ионами  $Tm^{3+}$ .

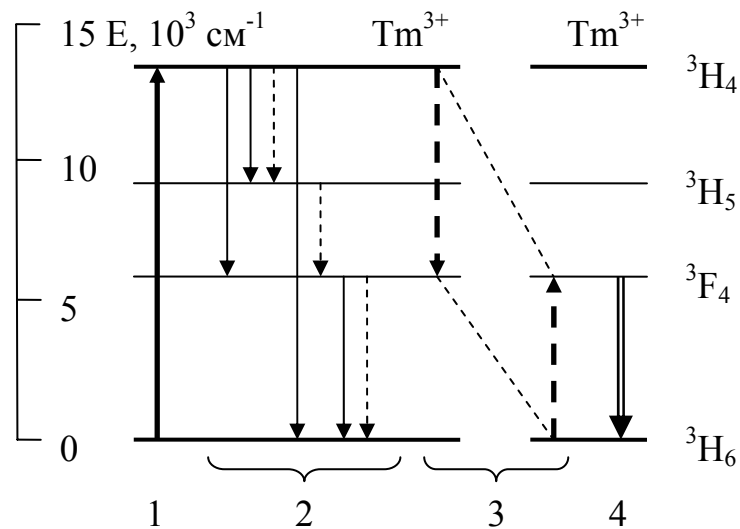


Рис. 1. Физические процессы, обеспечивающие заселение и разгрузку энергетических уровней ионов  $Tm^{3+}$

**Во второй главе** описаны методы получения и исследования оптических, спектрально-люминесцентных и генерационных свойств концентрационных рядов кристаллов  $NaLa_xGd_{1-x}(WO_4)_2$  ( $x=0-1$ ) и  $NaLa_xGd_{1-x}(MoO_4)_2$  ( $x=0-1$ ), активированных ионами  $Tm^{3+}$ . В параграфе 1 главы 2 описаны методы выращивания кристаллов  $NaLa_xGd_{1-x}(WO_4)_2:Tm$  ( $x=0-1$ ) и

$\text{NaLa}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $x=0-1$ ), определения количественного состава кристаллов, а также способы подготовки образцов для измерения показателей преломления, спектрально-люминесцентных и генерационных исследований. Состав шихт исследованных образцов кристаллов с вариацией состава La-Gd приведен в табл. 1 и 2. В таблицах соответствующие кристаллы обозначены номерами. Подобная нумерация используется в работе. Значения концентраций ионов  $\text{Tm}^{3+}$  для исследованных кристаллов концентрационного ряда  $\text{NaLa}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $x=0-1$ ) и  $\text{NaLa}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $x=0-1$ ), приведенные в табл. 1 и 2, получены в результате количественного анализа соответствующих кристаллов. Ошибка в определении концентраций ионов  $\text{Tm}^{3+}$  не превышала 5 %.

Табл. 1. Состав исследованных образцов (вольфраматы)

№ обр.	Состав шихты	C(Tm), ат. %	C(Tm)·10 <sup>20</sup> , см <sup>-3</sup>
1	$\text{NaGd}_{0,93}\text{Tm}_{0,07}(\text{WO}_4)_2$	4,8	1,47
2	$\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}\text{Tm}_{0,07}(\text{WO}_4)_2$	2,6	2,26
3	$\text{NaLa}_{0,62}\text{Gd}_{0,31}\text{Tm}_{0,07}(\text{WO}_4)_2$	3,8	3,09
4	$\text{NaLa}_{0,93}\text{Tm}_{0,07}(\text{WO}_4)_2$	5,8	5,07

Табл. 2. Состав исследованных образцов (молибдаты)

№ обр.	Состав шихты	C(Tm), ат. %	C(Tm)·10 <sup>20</sup> , см <sup>-3</sup>
5	$\text{NaGd}_{0,93}\text{Tm}_{0,07}(\text{MoO}_4)_2$	3,8	2,30
6	$\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}\text{Tm}_{0,07}(\text{MoO}_4)_2$	4,8	2,61
7	$\text{NaLa}_{0,465}\text{Gd}_{0,465}\text{Tm}_{0,07}(\text{MoO}_4)_2$	3,5	2,13
8	$\text{NaLa}_{0,62}\text{Gd}_{0,31}\text{Tm}_{0,07}(\text{MoO}_4)_2$	3,0	1,84
9	$\text{NaLa}_{0,96}\text{Tm}_{0,04}(\text{MoO}_4)_2$	1,8	1,11

В параграфе 2 главы 2 описана методика измерения показателей преломления и температурного коэффициента показателей преломления. В параграфе 3 данной главы представлены методики исследования

спектрально-люминесцентных свойств кристаллов  $\text{NaLa}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $x=0-1$ ) и  $\text{NaLa}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $x=0-1$ ). В данном параграфе приводится также описание метода Джадда-Офельта для определения спектроскопических характеристик ионов  $\text{Tm}^{3+}$  в кристаллах  $\text{NaLa}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $x=0-1$ ) и  $\text{NaLa}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $x=0-1$ ). Отмечается, что исследованные кристаллы характеризуются разупорядоченной кристаллической структурой, и, следовательно, характеризуются наличием нескольких типов оптических центров ионов  $\text{Tm}^{3+}$ . Определение оптического спектра и абсолютной концентрации каждого типа центра в кристаллах с разупорядоченной структурой представляет собой крайне сложную задачу. В настоящей работе при определении параметров интенсивности  $\Omega_t$  ( $t=2, 4, 6$ ) использовались интегральный спектр поглощения и полная концентрация ионов  $\text{Tm}^{3+}$ . Поэтому полученные значения параметров интенсивности, либо представляют собой средние значения параметров, соответствующих различным типам оптических центров ионов  $\text{Tm}^{3+}$ , либо соответствуют преобладающему типу центров  $\text{Tm}^{3+}$  в данном кристалле.

В параграфе 4 главы 2 описаны методики регистрации кинетик затухания люминесценции с уровней  $^3\text{H}_4$ ,  $^3\text{F}_4$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$ .

В параграфе 5 данной главы представлены методики проведения генерационных экспериментов на кристаллах  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %) и  $\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=4,8$  ат. %).

**В третьей главе** представлены результаты исследования дисперсионных и температурных зависимостей показателя преломления кристаллов шеелитоподобных натрий-лантан (гадолиний) молибдатов. Целесообразность таких исследований обусловлена тем, что зависимости  $n_o(\lambda)$  и  $n_e(\lambda)$  для кристаллов шеелитоподобных натрий-лантан (гадолиний) молибдатов, в отличие от аналогичных зависимостей для кристаллов шеелитоподобных двойных вольфраматов, в научных источниках нами обнаружены не были. При этом значения показателей преломления данных кристаллах нам были необходимы при определении спектроскопических

характеристик, а также при нанесении просветляющего покрытия на торцы активных элементов. В параграфе 1 третьей главы приводятся дисперсионные кривые показателей преломления для кристаллов  $\text{NaLa}_{0,465}\text{Gd}_{0,465}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=3,5$  ат. %),  $\text{NaLa}_{0,495}\text{Gd}_{0,495}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=0,5$  ат. %), полученные с помощью гониометра-спектрометра ГС-5 в видимой области спектра. С использованием приближенной формулы Зельмейера сделаны оценки показателей преломления для кристалла  $\text{NaLa}_{0,465}\text{Gd}_{0,465}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=3,5$  ат. %) на длине волны генерации ( $\lambda=1,9$  мкм) перехода  ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$ . В параграфе 1 главы 3 приведены также результаты сравнительного анализа показателей преломления кристаллов  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=0,5$  ат. % и  $C_{\text{Tm}}=3,5$  ат. %) с аналогичными характеристиками для кристаллов  $\text{NaLa}(\text{MoO}_4)_2:\text{Nd}$  ( $C_{\text{Nd}}=0,2$  ат. %), полученными в настоящей работе, а также известных из литературных источников.

В параграфе 2 главы 3 представлены результаты исследования температурной зависимости показателя преломления кристаллов шеелитоподобных натрий-лантан (гадолиний) молибдатов. Графики зависимостей  $n_o(T)$  и  $n_e(T)$  для  $\lambda=546,07$  нм в случае исследованных кристаллов хорошо аппроксимируются линейной зависимостью. С ростом температуры значения показателя преломления  $n_o$  и  $n_e$  уменьшаются, что приведет к образованию отрицательной термической линзы в активных элементах из исследуемых кристаллов.

**В четвертой главе** описаны спектрально-люминесцентные и кинетические свойства концентрационного ряда кристаллов  $\text{NaLa}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{WO}_4)_2$  и  $\text{NaLa}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{MoO}_4)_2$ , активированных ионами  $\text{Tm}^{3+}$ .

В параграфе 1 четвертой главы представлены результаты исследования спектроскопических характеристик кристаллов  $\text{NaLa}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $x=0-1$ ) и  $\text{NaLa}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $x=0-1$ ). Из анализа спектров поглощения, обусловленных переходами с основного состояния  ${}^3\text{H}_6$  на возбужденные мультиплеты  ${}^1\text{G}_4$ ,  ${}^3\text{F}_2$ ,  ${}^3\text{F}_3$ ,  ${}^3\text{H}_4$ ,  ${}^3\text{H}_5$ ,  ${}^3\text{F}_4$ , зарегистрированных при  $T=300$  К, не

обнаружено значительного изменения контуров спектров поглощения, а также значений пиковых сечений поглощения переходов с основного состояния  $^3H_6$  на возбужденные мультиплеты ионов  $Tm^{3+}$  как для концентрационного ряда кристаллов  $NaLa_xGd_{1-x}(WO_4)_2:Tm$  ( $x=0-1$ ), так и для концентрационного ряда кристаллов  $NaLa_xGd_{1-x}(MoO_4)_2:Tm$  ( $x=0-1$ ). Из спектров поглощения были определены экспериментальные значения сил осцилляторов соответствующих переходов. По методу Джадда-Офельта [12, 13] найдены параметры интенсивности  $\Omega_t$  ( $t=2, 4, 6$ ). Полученные значения  $\Omega_t$  ( $t=2, 4, 6$ ) для соответствующих кристаллов  $NaLa_xGd_{1-x}(WO_4)_2:Tm$  ( $x=0-1$ ) и  $NaLa_xGd_{1-x}(MoO_4)_2:Tm$  ( $x=0-1$ ) представлены в табл. 3 и 4.

Табл. 3. Параметры интенсивности ионов  $Tm^{3+}$  в кристаллах  $NaLa_xGd_{1-x}(WO_4)_2$  ( $x=0-1$ )

Параметр	Обр. № 1	Обр. № 2	Обр. № 3	Обр. № 4
$\Omega_2 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$	10,98	8,98	9,16	7,68
$\Omega_4 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$	1,42	1,35	1,59	1,73
$\Omega_6 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$	1,01	1,28	1,26	1,28

Табл. 4. Параметры интенсивности ионов  $Tm^{3+}$  в кристаллах  $NaLa_xGd_{1-x}(MoO_4)_2$  ( $x = 0-1$ )

Параметр	Обр. № 5	Обр. № 6	Обр. № 7	Обр. № 8	Обр. № 9
$\Omega_2 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$	14,80	14,48	13,87	12,46	13,38
$\Omega_4 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$	1,12	1,23	1,58	2,16	2,67
$\Omega_6 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$	2,08	1,98	1,76	1,63	1,16

Из сравнения значений параметров интенсивности  $\Omega_2$  для кристаллов соответствующих концентрационных рядов видно, что вариации данного параметра невелики как для образцов №№ 1–4, так и для образцов №№ 5–9. Данный факт, по-видимому, свидетельствует о том, что в кристаллах соответствующих концентрационных рядов смешанных шеелитоподобных

двойных вольфраматов и молибдатов вариация состава La-Gd не приводит к значительному изменению симметрии локального окружения оптических центров  $Tm^{3+}$ .

С использованием соответствующих параметров интенсивности  $\Omega_t$  ( $t=2, 4, 6$ ) выполнена оценка вероятностей излучательных переходов ионов  $Tm^{3+}$  и коэффициентов ветвления люминесценции между энергетическими уровнями для кристаллов концентрационных рядов  $NaLa_xGd_{1-x}(WO_4)_2:Tm$  ( $x=0-1$ ) и  $NaLa_xGd_{1-x}(MoO_4)_2:Tm$  ( $x=0-1$ ).

Оцененное из расчета с использованием параметров Джадда-Офельта время жизни уровня  $^3F_4$  составляет 1,20 мс и 1,49 мс для образцов № 1 и № 4, соответственно. Данные значения удовлетворительно соответствуют экспериментальным значениям, определенным из кривых затухания люминесценции с уровня  $^3F_4$  для данных кристаллов и равным соответственно 1,43 мс и 1,45 мс.

Используя значения времени жизни уровня  $^3H_4$  ионов  $Tm^{3+}$ , определенные из кривых затухания люминесценции для образцов №№ 1, 2 и 4, а также значения вероятностей излучательных переходов с уровня  $^3H_4$  ионов  $Tm^{3+}$ , для данных кристаллов определены значения квантового выхода люминесценции с уровня  $^3H_4$ , равные соответственно 91 %, 86 % и 76 %.

Оцененное из расчета с использованием параметров Джадда-Офельта время жизни  $\tau_{рад}=1/A_{calc}$  уровня  $^3F_4$  ионов  $Tm^{3+}$  составляет 0,9 мс для кристаллов  $NaGd(MoO_4)_2:Tm$  (образец №5),  $NaLa_{0,31}Gd_{0,62}(MoO_4)_2:Tm$  (образец № 6) и  $NaLa(MoO_4)_2:Tm$  (образец № 9). Эта величина удовлетворительно совпадает со значениями времени жизни уровня  $^3F_4$ , экспериментально измеренными из кривой затухания люминесценции с уровня  $^3F_4$  ионов  $Tm^{3+}$  для образцов № 5 (1,2 мс), № 6 (1,2 мс), № 9 (1,1 мс).

Используя значения времени жизни уровня  $^3H_4$  ионов  $Tm^{3+}$ , определенные из кривых затухания люминесценции с уровня  $^3H_4$ , а также значения вероятностей излучательных переходов с уровня  $^3H_4$  на нижележащие мультиплеты для образцов №№ 6–9 были определены

значения квантового выхода люминесценции с уровня  $^3H_4$ , равные соответственно 96 %, 95 %, 92 % и 88 %.

В параграфе 1 главы 4 также приводятся результаты сравнительного анализа спектроскопических характеристик для кристаллов смешанных шеелитоподобных двойных вольфраматов и молибдатов с аналогичными характеристиками для кристаллов иттрий-алюминиевого граната (YAG) и кальций-ниобий-галлиевого граната (CNGG), активированных ионами  $Tm^{3+}$ .

В параграфе 2 главы 4 получены спектральные зависимости сечений люминесценции и усиления для лазерного перехода  $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$  в кристаллах  $NaLa_{0,46}Gd_{0,46}(WO_4)_2:Tm$  ( $C_{Tm}=2,6$  ат. %) и  $NaLa_{0,31}Gd_{0,62}(MoO_4)_2:Tm$  ( $C_{Tm}=2,6$  ат. %), которые использовались в генерационном эксперименте.

**В пятой главе** описаны генерационные свойства кристаллов  $NaLa_{0,46}Gd_{0,46}(WO_4)_2:Tm$  ( $C_{Tm}=2,6$  ат. %) и  $NaLa_{0,31}Gd_{0,62}(MoO_4)_2:Tm$  ( $C_{Tm}=4,8$  ат. %).

В параграфе 1 главы 5 представлены результаты генерационного эксперимента на переходе  $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$  ионов  $Tm^{3+}$  в кристаллах  $NaLa_{0,46}Gd_{0,46}(WO_4)_2:Tm$  ( $C_{Tm}=2,6$  ат. %) и  $NaLa_{0,31}Gd_{0,62}(MoO_4)_2:Tm$  ( $C_{Tm}=4,8$  ат. %).

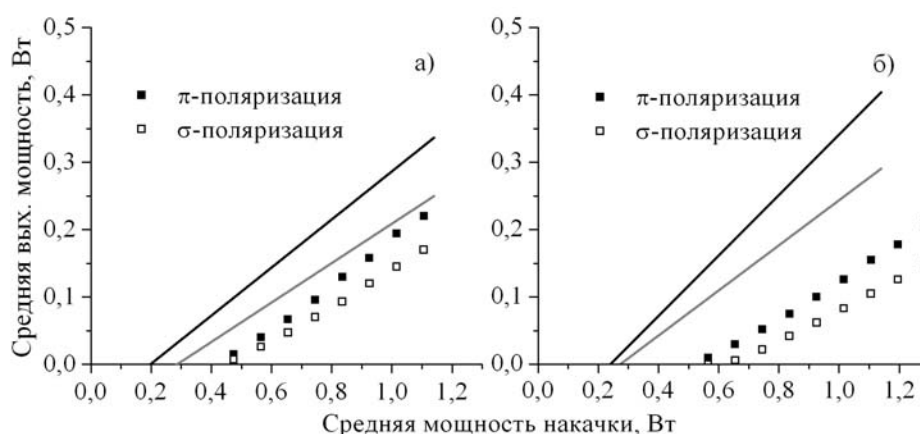


Рис. 2. Зависимость средней выходной мощности генерации от средней мощности накачки для кристаллов: а)  $NaLa_{0,46}Gd_{0,46}(WO_4)_2:Tm$  ( $C_{Tm}=2,6$  ат. %), б)  $NaLa_{0,31}Gd_{0,62}(MoO_4)_2:Tm$  ( $C_{Tm}=4,8$  ат. %). Точки – экспериментальные данные, сплошные линии – результаты моделирования



Графики зависимостей средней выходной мощности генерации от средней мощности накачки для кристаллов: а)  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %), б)  $\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=4,8$  ат. %) приведены на рис. 2.

Параметры лазерной генерации в случае  $\pi$ - и  $\sigma$ -поляризаций, полученной для кристаллов  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %) и  $\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=4,8$  ат. %) представлены в таблице 5.

Табл. 5. Параметры генерации

Параметр генерации	$\pi$ -поляризация		$\sigma$ -поляризация	
	NLGM:Tm	NLGM:Tm	NLGM:Tm	NLGM:Tm
Дифференциальная эффективность, %	34	30	27	23
Полная эффективность, %	19	16	15	12
Длина волны генерации, нм	1908	1910	1918	1918

В настоящей работе для кристалла  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %) была реализована перестраиваемая генерация. На рис. 3 приведена зависимость средней выходной мощности от длины волны для лазера на основе кристалла  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %) при средней мощности накачки лазерного диода  $P=1,0$  Вт. Мощность накачки  $P=1,0$  Вт, реализованная в эксперименте по получению перестраиваемой генерации, соответствует значению параметра относительной инверсной населенности 0,3. Из сравнения спектральной зависимости сечения усиления для кристалла  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %) следует, что область перестройки генерации (рис. 3) соответствует области положительного усиления в случае значения параметра относительной инверсной населенности равного 0,3.

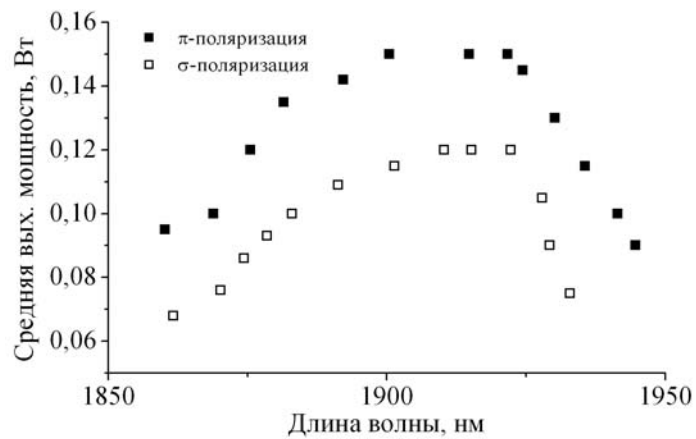


Рис. 3. Зависимость средней выходной мощности  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %) лазера от длины волны при средней мощности накачки  $P=1,0$  Вт

В параграфе 2 главы 5 рассмотрены кинетические модели лазеров на основе кристаллов  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %) и  $\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=4,8$  ат. %) с использованием приближения скоростных уравнений.

Система скоростных уравнений для энергетических уровней  $^3\text{H}_6$ ,  $^3\text{F}_4$ ,  $^3\text{H}_4$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$ , с учетом особенностей их заселения и релаксации (без учета процесса ап-конверсии  $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$ ,  $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_4$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$ ) при наличии генерации на переходе  $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$  в случае лазерной диодной накачки на уровень  $^3\text{H}_4$ , записана аналогично системе уравнений, приведенной в [14]. Константы, входящие в систему уравнений, были получены нами в ходе проведения спектрально-люминесцентных и генерационных исследований. В диссертационной работе представлены методики определения соответствующих констант, а также их значения.

В ходе решения системы уравнений нами были получены временные зависимости населенностей уровней  $^3\text{H}_6$ ,  $^3\text{F}_4$  и  $^3\text{H}_4$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$  и плотности потока фотонов в резонаторе лазеров на основе кристаллов  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %) и  $\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=4,8$  ат. %). Из временной зависимости плотности потока фотонов в резонаторе, для соответствующих кристаллов были получены зависимости выходной

мощности излучения генерации от мощности диода накачки, поглощенной в активном элементе (сплошные линии на рис. 2). По результатам генерационного эксперимента и моделирования, проведен сравнительный анализ зависимостей выходной мощности генерации от мощности излучения диода накачки в активном элементе для кристаллов  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %) и  $\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=4,8$  ат. %). Также проводится сравнение зависимости времени начала генерации от мощности диода накачки, полученной в эксперименте и в ходе моделирования для кристалла  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %).

Из графиков зависимости выходной мощности генерации от мощности накачки, полученных как в эксперименте, так и в процессе моделирования следует, что наиболее эффективным для обоих кристаллов является лазерное излучение  $\pi$ -поляризации.

Из сравнения экспериментальных зависимостей мощности генерации от мощности накачки для  $\pi$ - и  $\sigma$ -поляризаций с соответствующими зависимостями, полученными в результате моделирования (рис. 2) следует, что совпадает лишь качественный характер данных зависимостей. Количественные оценки выходной мощности лазерной генерации, полученные в ходе моделирования примерно в 2 раза выше значений, полученных экспериментально. Данный результат, на наш взгляд, можно объяснить следующими факторами:

1) при выполнении моделирования нами учитывались лишь логарифмические потери за проход, обусловленные пропусканием зеркал, и не учитывались внутренние потери в активном элементе;

2) при выполнении моделирования нами не учитывались процессы ап-конверсии ионов  $\text{Tm}^{3+}$  ( ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$ ,  ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_4$ ), которые могут играть значительную роль при высоких плотностях накачки, реализуемых в генерационном эксперименте;

3) в ходе моделирования не учитывались процессы поглощения с возбужденного состояния  $^3F_4$  на вышележащие уровни, которые также могут иметь место при высоких плотностях накачки [14].

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что выходные характеристики лазера на основе кристаллов  $\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=4,8$  ат. %) несколько выше аналогичных характеристик для кристаллов  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %). По-видимому, это обусловлено тем, что значения сечения поглощения для перехода  $^3H_6 \rightarrow ^3H_4$ , а также сечения люминесценции вынужденного перехода  $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$  для кристаллов двойных молибдатов выше, по сравнению с аналогичными значениями для кристаллов двойных вольфраматов.

В генерационном эксперименте, реализованном в настоящей работе, следует, что выходные характеристики лазера на основе кристаллов  $\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=4,8$  ат. %) ниже аналогичных характеристик для кристаллов  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %). На наш взгляд этот факт обусловлен худшим оптическим качеством кристалла  $\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=4,8$  ат. %) по сравнению с кристаллом  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %).

На основании выполненных в настоящей работе оценок спектроскопических характеристик кристаллов шеелитов с вариацией состава La-Gd, а также результатов генерационного эксперимента и реализованных кинетических моделей лазеров на кристаллах  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %) и  $\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=4,8$  ат. %), можно сделать заключение о том, что при использовании активных элементов с лучшим оптическим качеством, а также при оптимизации коэффициентов пропускания зеркал и схемы резонатора, возможно получение более высоких выходных характеристик лазерной генерации на переходе  $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$  в кристаллах шеелитоподобных натрий-лантан (гадолиний) молибдатах и вольфраматах, активированных ионами Tm.

**В заключении** сформулированы основные выводы по результатам проведенных исследований.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1) определены спектроскопические характеристики (силы осцилляторов, параметры интенсивности, вероятности ряда излучательных переходов ионов  $Tm^{3+}$  для кристаллов  $NaLa_xGd_{1-x}(WO_4)_2:Tm$  ( $x=0-1$ ) и  $NaLa_xGd_{1-x}(MoO_4)_2:Tm$  ( $x=0-1$ ). Из сравнительного анализа спектроскопических характеристик ионов  $Tm^{3+}$  в кристаллах  $NaLa_xGd_{1-x}(WO_4)_2:Tm$  ( $x=0-1$ ) и  $NaLa_xGd_{1-x}(MoO_4)_2:Tm$  ( $x=0-1$ ) следует, что в кристаллах соответствующего концентрационного ряда не происходит значительного изменения локального окружения оптических центров ионов  $Tm^{3+}$ ;

2) в результате сравнительного анализа спектроскопических характеристик кристаллов смешанных шеелитоподобных натрий-лантан (гадолиний) вольфраматов (NLGW:Tm) и молибдатов (NLGM:Tm) с аналогичными характеристиками кристаллов иттрий-алюминиевого граната (YAG:Tm) и кальций-ниобий-галлиевого граната (CNGG:Tm) показано: а) кристаллы NLGW:Tm и NLGM:Tm по сравнению с YAG:Tm и CNGG:Tm характеризуются высокими значениями сечений поглощения и люминесценции, а также значением параметра интенсивности  $\Omega_2$ , что обусловлено более низкой симметрией кристаллического окружения ионов  $Tm^{3+}$  в кристаллах шеелитоподобных натрий-лантан (гадолиний) вольфраматов и молибдатов, по сравнению с кристаллами YAG:Tm и CNGG:Tm; б) квантовый выход люминесценции с уровня  $^3H_4$  в кристаллах NLGW:Tm и NLGM:Tm более чем в 1,5 раза выше соответствующего значения в кристаллах ИАГ:Tm и КНГГ:Tm, что связано с малой величиной многофононной релаксации с уровня  $^3H_4$  в кристаллах NLGW:Tm и NLGM:Tm;

3) получены спектральные зависимости сечения поглощения и люминесценции переходов  ${}^3\text{H}_6 \leftrightarrow {}^3\text{F}_4$  для кристаллов  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  и  $\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$ . С использованием этих зависимостей получены спектральные зависимости сечения усиления лазерного перехода  ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$ , из которых следует, что область положительного усиления при значении параметра относительной инверсной населенности  $P=0,3$  для кристаллов  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  и  $\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  соответствует диапазонам длин волн 1830–2000 нм и 1800–2000 нм;

4) в рамках приближения пространственно-независимых скоростных уравнений реализованы кинетические модели квазитрехуровневых лазеров на основе кристаллов  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %) и  $\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=4,8$  ат. %). В результате численного решения системы балансных уравнений для соответствующих кристаллов получены временные зависимости плотности населенностей энергетических уровней ионов  $\text{Tm}^{3+}$ , участвующих в получении лазерной генерации на переходе  ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$  и плотности потока фотонов в резонаторе. Получены зависимости времени начала генерации и выходной мощности лазерного излучения от мощности излучения лазерного диода накачки;

5) реализована лазерная генерация на переходе  ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$  в кристаллах  $\text{NaLa}_{0,46}\text{Gd}_{0,46}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=2,6$  ат. %) в условиях лазерной диодной накачки. Получено лазерное излучение  $\pi$ - и  $\sigma$ -поляризаций на длинах волн 1908 нм и 1918 нм при дифференциальной эффективности 34 % и 30 % соответственно. Для данных кристаллов реализована перестраиваемая лазерная генерация в спектральном диапазоне 1860–1940 нм;

6) реализована лазерная генерация на переходе  ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$  в кристаллах  $\text{NaLa}_{0,31}\text{Gd}_{0,62}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=4,8$  ат. %) в условиях лазерной диодной накачки. Получено лазерное излучение  $\pi$ - и  $\sigma$ -поляризаций на длинах волн 1910 нм и 1918 нм при дифференциальной эффективности 27 % и 23 % соответственно.

7) получены дисперсионные зависимости и температурный коэффициент показателей преломления для кристаллов  $\text{NaLa}_{0,465}\text{Gd}_{0,465}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=3,5$  ат. %) и  $\text{NaLa}_{0,495}\text{Gd}_{0,495}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}}=0,5$  ат. %). Установлено, что зависимость  $n(T)$  носит линейный характер, а с ростом температуры значения показателей преломления  $n_o$  и  $n_e$  уменьшаются, что приведет к образованию отрицательной термической линзы в активных элементах из исследуемых кристаллов.

### **Список цитируемой литературы**

- 1) Б.М. Антипенко, В.А. Бученков, Т.И. Киселева, Л.И. Крутова, А.А. Никитичев, В.А. Письменный. Туллиевый лазер. // Письма в ЖТФ. Т. 15. В. 16. С. 80-83. (1989).
- 2) Ю.К. Воронько, К.А. Субботин, Д.А. Лис, А.В. Попов, А.А. Соболев, С.Н. Ушаков, Е.В. Жариков. Синтез и спектроскопия кристаллов натрий-гадолиниевого вольфрамата  $\text{NaGd}(\text{WO}_4)_2$ , активированного ионами  $\text{Tm}^{3+}$ . // Оптика и спектроскопия. Т. 100. № 4. С. 656-663. (2006).
- 3) Е.В. Жариков, Д.А. Лис, А.В. Попов, К.А. Субботин, С.Н. Ушаков, А.В. Шестаков, И. Раздобрев. Генерационные свойства кристаллов натрий-гадолиниевого вольфрамата  $\text{NaGd}(\text{WO}_4)_2$ , активированного ионами  $\text{Tm}^{3+}$ . // Квантовая электроника. Т. 36. № 6. С. 515-516. (2006).
- 4) J.M. Cano-Torres, M.D. Serrano, C. Zaldo, M. Rico, X. Mateos, J. Liu, U. Griebner, V. Petrov, F.J. Valle, M. Galan, G. Viera. Broadly tunable laser operation near 2  $\mu\text{m}$  in locally disordered crystal of  $\text{Tm}^{3+}$ -doped  $\text{NaGd}(\text{WO}_4)_2$ . // J. Opt. Soc. Am. B. V. 23. № 12. P. 2494-2502. (2006).
- 5) H. Wang, G. Jia, F. Yang, Y. Wei, Z. You, Y. Wang, J. Li, Z. Zhu, X. Lu, C. Tu. Growth and spectral properties of  $\text{Tm}^{3+}$ -doped  $\text{NaGd}(\text{WO}_4)_2$  crystal. // Appl. Phys. B. V. 83. P. 579-585. (2006).
- 6) J.M. Cano-Torres, X. Han, A. Garcia-Cortes, M.D. Serrano, C. Zaldo, F.J. Valle, X. Mateos, S. Rivier, M. Rico, U. Griebner, V. Petrov. Infrared

spectroscopic and laser characterization of Tm in disordered double tungstates. // Materials Science and Engineering B. V. 146. P. 22-28. (2008).

7) Y. Wei, C. Tu, H. Wang, F. Yang, G. Jia, Z. You, J. Li, Z. Zhu, Y. Wang. Thermal and optical properties of  $\text{Tm}^{3+}:\text{NaLa}(\text{WO}_4)_2$  crystal. // Appl. Phys. B. (2007).

8) L.D. Merkle, J.B. Gruber, M.D. Seltzer, S.B. Stevens, T.H. Allik. Spectroscopic analysis of  $\text{Tm}^{3+}:\text{NaLa}(\text{MoO}_4)_2$ . // J. Appl. Phys. V. 72. № 9. P. 4269-4274. (1992).

9) Ю.К. Воронько, Е.В. Жариков, Д.А. Лис, А.В. Попов, В.А. Смирнов, К.А. Субботин. Спектроскопия кристаллов  $\text{NaLa}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}^{3+}$  и  $\text{NaGd}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}^{3+}$  – перспективных лазерных материалов. // Физика твердого тела. Т. 50. № 9. С. 1547-1551. (2008).

10) W. Guo, Y. Chen, Y. Lin, X. Gong, Z. Luo, Y. Huang. Spectroscopic analysis and laser performance of  $\text{Tm}^{3+}:\text{NaGd}(\text{MoO}_4)_2$  crystal. // J. Phys. D: Appl. Phys. V. 41. (2008).

11) W.J. Guo, Y.J. Chen, Y.F. Lin, X.H. Gong, Z.D. Luo, Y.D. Huang. Spectroscopic properties and laser performance of  $\text{Tm}^{3+}$ -doped  $\text{NaLa}(\text{MoO}_4)_2$  crystal. // J. Appl. Phys. V. 103. P. 093106. (2008).

12) B.R. Judd. // Phys. Rev. V. 127. № 3. P. 750-760. (1962).

13) G.S. Ofelt. // J. Chem. Phys. V. 37. № 3. P. 511-520. (1962).

14) Razdobreev, A. Shestakov. Self-pulsing of a monolithic Tm-doped  $\text{YAlO}_3$  microlaser. // Physical Review A. V. 73. P. 053815. (2006).

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1) Ф.А. Большиков, Ю.К. Воронько, А.В. Попов, П.А. Рябочкина, А.А. Соболев, С.Н. Ушаков, М.Н. Хромов. Спектроскопические свойства кристаллов кальций-ниобий-галлиевого граната, активированного ионами Tm. // Вестник Нижегородского университета. №3. С. 49-55. (2007).



2) Ф.А. Большиков, А.В. Малов, К.Н. Нищев, С.Н. Ушаков. Модернизация установки для регистрации спектров поглощения и люминесценции в области 0,2–2 мкм. // Приборы и техника эксперимента. №5. С. 160-162. (2007).

3) F.A. Bolschikov, M.N. Hromov, A.V. Popov, P.A. Ryabochkina, A.A. Sobol, S.N. Uscakov, Yu. K. Voronko. Spectral and laser properties of Tm-doped calcium-niobium-gallium garnet. // Proceeding of SPIE. V. 6731. (2007).

4) Ф.А. Большиков. Автоматизация установки и спектроскопические исследования на ее основе кристаллов  $\text{NaGd}(\text{WO}_4)_2\text{-Tm}^{3+}$  // Сборник трудов Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2007».

5) И.А. Белова, Ф.А. Большиков, Ю.К. Воронько, А.В. Малов, А.В. Попов, П.А. Рябочкина, А.А. Соболев, С.Н. Ушаков. Интенсивность f-f переходов редкоземельных ионов  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$  в кристаллах кальций-ниобий-галлиевого граната. // Физика твердого тела. Т. 50. № 9. С. 1552-1558. (2008).

6) Ф.А. Большиков, Ю.К. Воронько, Е.В. Жариков, Д.А. Лис, А.В. Попов, П.А. Рябочкина, К.А. Субботин. Кристаллы двойных молибдатов, активированных ионами Tm, как активные среды для лазеров двухмикронной области спектра. // Сборник трудов 6-ой Всероссийской научной школы для студентов и аспирантов «Материалы нано-, микро- и оптоэлектроники: физические свойства применение». С. 119-120. (2008).

7) Ф.А. Большиков. Спектрально-люминесцентные свойства разупорядоченных лазерных кристаллов двойных молибдатов, активированных ионами  $\text{Tm}^{3+}$  // Сборник трудов Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2008».

8) Ф.А. Большиков, Ю.К. Воронько, Е.В. Жариков, Д.А. Лис, А.В. Попов, П.А. Рябочкина, К.А. Субботин. Спектрально-люминесцентные свойства кристаллов  $\text{NaLa}_x\text{Gd}_y\text{Tm}_{1-x-y}(\text{MoO}_4)_2$ . // Сборник научных трудов VII

Международной конференции «Лазерная физика оптические технологии». Т. 3. С. 363-367. (2008).

9) Ф.А. Большиков, Ю.К. Воронько, Е.В. Жариков, Д.А. Лис, А.В. Попов, П.А. Рябочкина, К.А. Субботин. Спектроскопия кристаллов Na-содержащих молибдатов и вольфраматов  $\text{La}^{3+}$  и  $\text{Gd}^{3+}$ , активированных ионами  $\text{Tm}^{3+}$ . // Труды XIV Всероссийской конференции «Оптика и спектроскопия конденсированных сред». С. 62-66. (2008).

10) Патент на изобретение № 23736.29. Устройство для управления шаговым двигателем монохроматора / Ф.А. Большиков, А.В. Малов и П.А. Рябочкина. (Россия). Опубликовано 20.11.2009. Бюллетень №32 за 2009 год.

11) F.A. Bolschikov, G.M. Kuz'micheva, D.A. Lis, Yu.M. Papin, A.V. Popov, V.B. Rybakov, P.A. Ryabochkina, V.G. Senin, V.A. Smirnov, K.A. Subbotin, Yu.K. Voronko, V.V. Voronov, E.V. Zharikov. Growth, refined structural and spectroscopic characteristics of  $\text{Tm}^{3+}$ -doped  $\text{NaGd}(\text{WO}_4)_2$  single crystals. // Journal of Crystal Growth. V. 311. P. 4171-4178. (2009).

12) Ф.А. Большиков, Е.В. Жариков, Д.А. Лис, А.В. Попов, П.А. Рябочкина, В.Г. Сенин, К.А. Субботин. Рост, оптические и спектроскопические свойства кристаллов разупорядоченных шеелитоподобных молибдатов  $\text{NaLa}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{MoO}_4)_2$  ( $x=0-1$ ), активированных ионами  $\text{Tm}^{3+}$ . // Оптика и спектроскопия. Т. 108. № 5. (2010).

13) Ф.А. Большиков, Е.В. Жариков, Н.Г. Захаров, Д.А. Лис, П.А. Рябочкина, К.А. Субботин, О.Л. Антипов. Двухмикронная лазерная генерация в кристаллах  $\text{NaLa}_{1/2}\text{Gd}_{1/2}(\text{WO}_4)_2$ , активированных ионами  $\text{Tm}^{3+}$ . // Квантовая электроника. Т. 40. № 2. (2010).