

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.3.038.825.2

ГУСАКОВА
Наталья Васильевна

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ И ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
КРИСТАЛЛОВ НАТРИЙ-ВИСМУТОВОГО МОЛИБДАТА И КАЛИЕВЫХ
ВОЛЬФРАМАТОВ С ИОНАМИ Tm^{3+} И Ho^{3+}

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.05 – оптика

Минск, 2021

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный руководитель – **Ясюкевич Анатолий Сергеевич**, кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра оптических материалов и технологий филиала Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательский политехнический институт».

Официальные оппоненты: **Гапоненко Николай Васильевич**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий НИЛ «Нанофотоника» научно-исследовательской части УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»;

Коржик Михаил Васильевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией экспериментальной физики высоких энергий НИУ "Институт ядерных проблем" Белорусского государственного университета.

Оппонирующая организация – ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси».

Защита состоится «04» июня 2021 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.17 при Белорусском государственном университете по адресу: г. Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407. Телефон учёного секретаря: 209-57-09.

Почтовый адрес: пр-т Независимости 4, Минск, 220030.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «29» апреля 2021 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
кандидат физико-математических наук
доцент

О.Г. Романов

ВВЕДЕНИЕ

Создание компактных лазерных источников, излучающих в области 1,9–2,1 мкм, вызывает большой интерес благодаря широкому кругу их практических применений в системах оптической связи, дистанционного зондирования атмосферы, экологического мониторинга окружающей среды и медицине. Микрочип лазеры с диодной накачкой являются наиболее простыми и компактными источниками когерентного излучения. К их достоинствам относятся возможность серийного производства в одном технологическом процессе, надежность, хорошая воспроизводимость параметров и относительно низкая стоимость. Кроме того, данные лазеры являются неразъюстируемыми, чаще всего имеют TEM₀₀ моду генерируемого излучения и могут быть легко интегрированы в другие системы. С целью получения генерации в спектральном диапазоне 1,9–2,1 мкм наиболее широко применяются кристаллы и стекла, активированные ионами Tm³⁺ и Ho³⁺. Несмотря на многообразие известных на сегодняшний день тулий- и гольмийсодержащих матриц, поиск новых лазерных материалов, обладающих сочетанием свойств, необходимых для реализации конкретных систем и получения эффективной генерации, остается актуальной задачей.

Нерешенным остается вопрос оптимизации концентраций ионов-активаторов, экспериментальный поиск которых является технически сложной задачей и связан с большими временными и материальными затратами. Математическое моделирование существенно сокращает время на оптимизацию параметров лазера, позволяя проводить анализ выходных характеристик в зависимости от матрицы и концентраций ионов-активаторов, параметров резонатора лазера, системы накачки. При создании корректных математических моделей существенно важным является определение спектроскопических характеристик лазерного материала и параметров переноса энергии между взаимодействующими ионами. В частности, определение параметров переноса необходимо при разработке тулиевых лазеров с диодной накачкой в области 0,8 мкм, поскольку процесс кросс-релаксации (КР) – донор-акцепторный (Д-А) перенос энергии – является основным механизмом заселения верхнего лазерного уровня ³F₄. Для со-активированных ионами тулия и гольмия кристаллов, которые при возбуждении в области 0,8 мкм позволяют получать генерацию в спектральном диапазоне 2,1 мкм, необходимо определить, как параметры КР между ионами тулия, так и параметры переноса энергии между тулием и гольмием. Поскольку на сегодняшний день эти величины найдены только для ограниченного ряда материалов, и, в некоторых случаях, значения для одного и того же материала отличаются на порядок, их определение является важной задачей при разработке эффективных тулиевых и тулий-гольмиевых лазерных систем.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с заданиями, входящими в государственные программы научных исследований «Электроника и фотоника», подпрограмма «Развитие методов и технологий современной оптики и лазерной физики для использования в промышленности, медицине, сельском хозяйстве, охране окружающей среды, обороне» 2011–2015 г., задание 2.2.10 «Исследование новых кристаллических и стеклокристаллических активных сред и создание твердотельных лазеров ИК диапазона на их основе для медицины, дальнометрии и промышленных применений» (№ госрег. 20111035); в рамках проектов Министерства образования Республики Беларусь ГБ №15-04 «Исследование спектроскопических и генерационных характеристик кристаллов двойных молибдатов и ванадатов с разупорядоченной структурой легированных ионами Er^{3+} , Tm^{3+} » (№ госрег. 20150356) и ГБ №16-166 «Микрочип лазеры на основе кристаллов $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$, $\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$, активированных ионами Tm^{3+} и Ho^{3+} , излучающие в области 2 мкм» аспирантский грант (№ госрег. 20164043); а также в рамках проектов БРФФИ Ф15СО-014 «Исследование процессов переноса энергии в кристаллах вольфраматов, активированных ионами Tm^{3+} и Ho^{3+} и генерационных характеристик лазеров на их основе в зависимости от концентрации активаторов» (№ госрег. 20151690), Ф19М-075 «Исследование спектроскопических и генерационных характеристик кристалла Ho:KYW при резонансной накачке в области 1,9 мкм» (№ госрег. 20191918).

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы, утвержденным постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19 апреля 2010 г. №585: раздел 6 «Лазерные, оптические, оптико-, опто-, микро- и радиоэлектронные технологии и системы» и на 2016–2020 годы, утвержденным постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 г. №190: раздел 6 «Электроника и фотоника».

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка лазерных сред на основе кристаллов вольфраматов и молибдатов, активированных ионами тулия и со-активированных ионами тулия и гольмия, излучающих в спектральной области 1,9–2,1 мкм.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

– изучить спектроскопические характеристики кристаллов натрий-висмутовых молибдатов, активированных ионами тулия, как лазерных сред, излучающих в области 1,9 мкм, изучить механизмы переноса энергии в данных кристаллах и определить оптимальное значение концентрации ионов-активаторов с

целью достижения максимальной эффективности процесса кросс-релаксации ${}^3\text{H}_6 + {}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_4 + {}^3\text{F}_4$;

- изучить механизмы переноса энергии возбуждения ионов тулия в кристаллах калий-иттриевого и калий-лутециевого вольфраматов, установить влияние концентрации ионов тулия на спектрально-кинетические и генерационные характеристики кристаллов вольфраматов, как активных лазерных сред, излучающих в области 1,9–2,1 мкм;

- установить влияние концентрации ионов гольмия на спектрально-кинетические и генерационные характеристики кристалла калий-иттриевого вольфрамата, со-активированного ионами тулия и гольмия;

- изучить возможность получения непрерывной лазерной генерации в области 1,9–2,1 мкм в микрочип конфигурации резонатора на основе кристаллов вольфраматов, активированных ионами тулия и со-активированными ионами тулия и гольмия, при возбуждении излучением в области 0,8 мкм.

Объектами исследования являлись:

- кристаллы натрий-висмутового молибдата, активированные ионами тулия $\text{Tm}^{3+}:\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$;

- кристаллы калий-иттриевого и калий-лутециевого вольфрамата, активированные ионами тулия $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$, $\text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$;

- кристаллы калий-иттриевого вольфрамата, со-активированные ионами тулия и гольмия Tm^{3+} , $\text{Ho}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$.

Предметом исследования являлись спектроскопические свойства указанных выше материалов, а также мощностные и спектральные характеристики выходного излучения лазеров, излучающих в спектральной области 1,9–2,1 мкм.

Научная новизна

1. Впервые определены спектроскопические характеристики кристалла натрий-висмутового молибдата, активированного ионами тулия. Установлен диполь-дипольный механизм релаксации возбужденного состояния ${}^3\text{H}_4$ в результате донор-акцепторного переноса энергии и найдены его параметры. Определено значение оптимального содержания ионов тулия (~ 7 ат.%) в кристалле $\text{Tm}^{3+}:\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$ для достижения максимальной эффективности процесса кросс-релаксации ${}^3\text{H}_6 + {}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_4 + {}^3\text{F}_4$. Сделана оценка перспективности применения кристаллов натрий-висмутовых молибдатов с ионами тулия в качестве активных сред лазеров, излучающих в области 1,9 мкм.

2. Определены параметры донор-акцепторного переноса энергии между ионами тулия в кристаллах калий-иттриевого и калий-лутециевого вольфраматов, установлен диполь-дипольный механизм безызлучательной релаксации возбужденного состояния ${}^3\text{H}_4$ и изучено влияние концентрации ионов тулия на спектрально-кинетические характеристики данных кристаллов. Показано, что при содержании ионов тулия более 1,4–1,5 ат.% процесс кросс-релаксации является

миграционно-ускоренным. Переход к режиму сверхмиграции в кристалле Tm:KLuW наблюдается при содержании ионов тулия 13 ат.%.
 3. Установлен нерезонансный характер переноса энергии возбуждения между ионами Tm^{3+} (3F_4) и Ho^{3+} (5I_7) в кристалле калий-иттриевого вольфрамата и определены параметры переноса энергии. Установлено влияние концентрации ионов гольмия на спектрально-кинетические характеристики материала.
 4. Впервые реализована лазерная генерация в микрочип конфигурации на кристаллах Tm:KY(WO₄)₂, Tm:KLu(WO₄)₂, Tm,Ho:KY(WO₄)₂ при диодной накачке и установлено влияние концентрации ионов-активаторов на выходные характеристики лазеров. Определено значение оптимального содержания ионов тулия (8 ат.%) в кристаллах вольфраматов для получения максимальной эффективности лазерной генерации.

Положения, выносимые на защиту

1. Кристаллы $Tm^{3+}:NaBi(MoO_4)_2$ характеризуются высокими поперечными сечениями поглощения в спектральной области 0,8 мкм, стимулированного испускания в области 1,9 мкм и, при содержании ионов тулия более 1,3 ат.%, миграционно-ускоренным переносом энергии при нерезонансном характере процесса кросс-релаксации $^3H_6 + ^3H_4 \rightarrow ^3F_4 + ^3F_4$, что в совокупности создает условия для эффективного заселения верхнего лазерного уровня 3F_4 , при возбуждении в области 0,8 мкм и получении генерации в области 1,9 мкм.

2. В кристаллах двойных калиевых вольфраматов, активированных ионами Tm^{3+} , нерезонансный процесс кросс-релаксации $^3H_6 + ^3H_4 \rightarrow ^3F_4 + ^3F_4$ происходит в результате диполь-дипольного взаимодействия и является миграционно-ускоренным при содержании ионов тулия более 1,4–1,5 ат.%, и при содержании ионов тулия 13 ат.% в кристалле Tm:KLu(WO₄)₂ скорость миграции энергии по системе доноров в результате резонансных взаимодействий превосходит скорость донор-акцепторной передачи энергии, что обуславливает переход к режиму сверхмиграции.

3. Увеличение содержания ионов тулия до 8 ат.% в кристаллах Tm:KYW и Tm:KLuW обеспечивает высокую эффективность процесса кросс-релаксации $^3H_6 + ^3H_4 \rightarrow ^3F_4 + ^3F_4$, что при слабом концентрационном тушении люминесценции с уровня 3F_4 , приводит к росту его населенности, и в сочетании с высокими поперечными сечениями поглощения на переходе $^3H_6 \rightarrow ^3H_4$ и стимулированного испускания на переходе $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$ обуславливает получение лазерной генерации в непрерывном режиме в спектральном диапазоне 1,85–2,1 мкм.

4. Уменьшение содержания ионов гольмия в кристалле Tm,Ho:KYW от 1 ат.% до 0,5 ат.% приводит к существенному снижению потерь на перепоглощение на длине волны генерации и ап-конверсии с верхнего лазерного уровня 5I_7 , что позволяет получить непрерывную генерацию на переходе $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ иона гольмия в микрочип конфигурации лазера при комнатной

температуре вследствие эффективного переноса энергии от ионов тулия к ионам гольмия, происходящих при участии фононов решетки.

Личный вклад соискателя ученой степени

Лично соискателем были зарегистрированы спектры люминесценции и поглощения кристаллов с ионами РЗЭ, было изучено затухание люминесценции редкоземельных ионов-активаторов. На основе экспериментальных данных были рассчитаны поперечные сечения поглощения и стимулированного испускания, определены параметры, определяющие интенсивности линий в спектрах поглощения и люминесценции, определены параметры переноса энергии между ионами РЗЭ. Выполнены эксперименты по получению лазерной генерации в непрерывном режиме, проведено математическое моделирование лазеров, дана интерпретация полученных результатов, сформулированы основные выводы и положения, выносимые на защиту. Научному руководителю – ведущему научному сотруднику НИЦ ОМТ Ясюкевичу А.С., заведующему кафедрой «Лазерная техника и технология» Кулешову Н.В. принадлежит общее руководство работой, участие в постановке задач, обсуждение полученных результатов исследования. Соавтор Мудрый А.В. оказал помощь при проведении низкотемпературных исследований. Соавторы совместных публикаций Кисель В.Э., Курильчик С.В. и Гапоненко М.С. оказали содействие в организации и постановке лазерных экспериментов и обсуждении результатов. Соавтор Корниенко А.А. оказывал консультации при расчете интенсивностей $f-f$ переходов. Соавтор Павлюк А.А. выращивал исследуемые в диссертации образцы кристаллов. Остальные соавторы занимались изучением вопросов, не вошедших в диссертацию.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Семинар по новым направлениям непрерывных и импульсных лазеров (г. Бад Хоннеф, Германия, 2013), Международная научно-техническая конференция «Приборостроение» (г. Минск, 2014, 2016, 2019); Международная школа и конференция по оптоэлектронике, фотонике, инженерии и наноструктурам (г. Санкт-Петербург, РФ, 2015), XVI международный Феофиловский симпозиум (г. Санкт-Петербург, РФ, 2015); Международная конференция «Физика конденсированного состояния» (г. Гродно, 2015); Международная конференция «Перспективные твердотельные лазеры» (г. Берлин, Германия, 2015; г. Вена, Австрия, 2019); Международная конференция «Оптика лазеров» (г. Санкт-Петербург, РФ, 2016, 2020); Европейская конференция по лазерам и электрооптике CLEO/Europe (г. Мюнхен, Германия, 2017).

Результаты диссертации нашли применение при разработке технологии выращивания кристаллов вольфрамов на ОАО «Завод «Оптик» (г. Лида);

внедрены в учебный процесс на приборостроительном факультете БНТУ и на факультете информационных технологий и робототехники ВГТУ (имеется 3 акта о внедрении).

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 19 научных работах, из которых: 7 статей в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 5,8 авторского листа), 6 статей в сборниках материалов научных конференций, 6 тезисов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, шести глав, заключения, библиографического списка и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 143 страницы, в том числе 61 рисунок занимает 26 страниц, 33 таблицы – 14 страниц, приложение – 5 страниц. Библиографический список содержит 239 наименований, включая собственные публикации соискателя ученой степени.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Глава 1 посвящена обзору спектроскопических и генерационных характеристик ионов Tm^{3+} и Ho^{3+} . В разделах 1.1 и 1.2 проанализированы особенности получения генерации на ионах тулия в оксидных и фторидных матрицах в различных диапазонах, а в разделе 1.3 – в области спектра 2–2,1 мкм на кристаллах, со-активированных ионами Tm^{3+} и Ho^{3+} . Проведенный обзор показывает, что кристаллы вольфраматов и молибдатов, характеризующиеся высокими значениями поперечных сечений, допускающие высокие уровни легирования ионами РЗЭ и обладающие сравнительно простой технологией роста, являются привлекательными средами для создания эффективных и компактных лазеров. На сегодняшний день остается нерешенным ряд вопросов, относящихся к процессам переноса энергии возбуждения между ионами тулия и гольмия в данных кристаллах и влиянию концентрации ионов-активаторов на их спектрально-кинетические и генерационные характеристики.

В **главе 2** описаны объекты исследования: кристаллы калиевых вольфраматов $Tm^{3+}:KY(WO_4)_2$, $Tm^{3+}:KLu(WO_4)_2$ и $Tm^{3+},Ho^{3+}:KY(WO_4)_2$, а также кристалл натрий-висмутевого молибдата $Tm^{3+}:NaBi(MoO_4)_2$. Описаны установки, аппаратура и методики измерения оптического поглощения, люминесценции, времени релаксации возбужденных состояний и генерационных характеристик лазеров.

Глава 3 диссертационной работы посвящена исследованию спектрально-люминесцентных свойств кристалла $Tm^{3+}:NaBi(MoO_4)_2$ ($Tm:NBM$). Раздел 3.1

включает изучение абсорбционных свойств данного материала при температурах 294 К и 78 К (рисунок 1). Спектры поперечных сечений поглощения, измеренные при комнатной температуре, характеризуются широкими и слабоструктурированными полосами с выраженной анизотропией и доминирующим состоянием σ -поляризации. Интенсивный переход ${}^3H_6 \rightarrow {}^3H_4$, используемый при накачке тулиевых сред лазерными диодами, обладает значениями сечений поглощения в пике линии на длине волны 796 нм равными $2,7 \times 10^{-20} \text{ см}^2$ и $1,6 \times 10^{-20} \text{ см}^2$ для σ - и π -поляризации, соответственно. При этом ширина полосы на полувысоте составляет 7 нм и 24 нм для σ - и π -поляризации, соответственно.

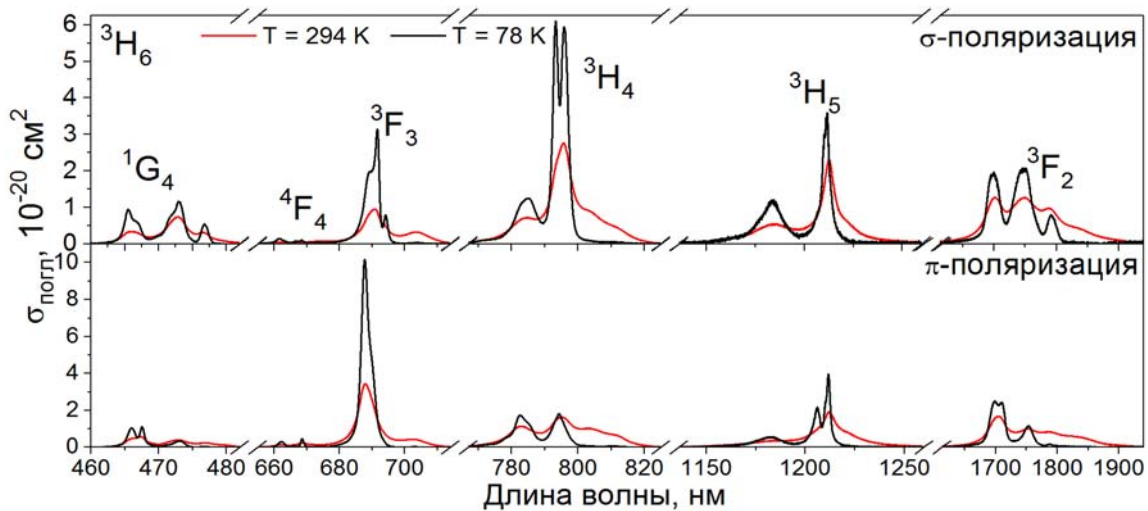


Рисунок 1. – Спектры поперечных сечений поглощения кристалла Tm:NBM при температурах 78 К и 294 К

Раздел 3.2 посвящен исследованию излучательных свойств кристалла Tm:NBM в рамках теории Джадда-Офельта. В результате расчетов были определены излучательные времена жизни $\tau_{изл}$ некоторых метастабильных состояний иона Tm^{3+} (таблица 1), а также коэффициенты ветвления люминесценции $\beta_{люм}$ при переходах с данных уровней.

Таблица 1. – Излучательные свойства кристалла Tm:NaBi(MoO₄)₂

Состояние	1G_4	3F_2	2F_3	3H_4	3H_5	3F_4
$\tau_{изл}$, мкс	223	222	194	212	1430	1209
$\tau_{люм}$, мкс	–	–	–	170 (0,7 ат.%) 25 (3 ат.%)	–	1030 (0,7 ат.%) 930 (3 ат.%)
$\eta_{люм}$, %	–	–	–	80 (0,7 ат.%) 12 (3 ат.%)	–	85 (0,7 ат.%) 77 (3 ат.%)

В разделе 3.3 исследовались люминесцентные свойства кристалла Tm:NBM. На основе полученных при температурах 294 К и 78 К спектров поглощения и люминесценции (рисунок 1 и 2), определялась штарковская структура уровней иона Tm^{3+} в кристалле Tm:NBM. Из спектров люминесценции, поглощения и

данных по структуре уровней установлено, что процесс КР ${}^3\text{H}_6 + {}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_4 + {}^3\text{F}_4$ в кристаллах Tm:NBM является нерезонансным и происходит с участием фононов решетки.

Спектры люминесценции (рисунок 2) и поглощения в области 0,8 и 1,9 мкм, зарегистрированные при комнатной температуре, применялись для расчета спектров сечений стимулированного испускания (СИ) (рисунок 3) по модифицированному методу соответствия и формуле Фюхтбауэра-Ладенбурга. Полученные спектры сечений использовались при определении параметров миграции энергии между ионами Tm^{3+} в состояниях ${}^3\text{H}_4$ и ${}^3\text{F}_4$. Переход ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$ характеризуется максимальным значением сечения СИ $1,8 \times 10^{-20} \text{ см}^2$ на длине волны 1842 нм и шириной полосы 158 нм для π -поляризации. При этом для σ -поляризации сечение СИ составляет $1,5 \times 10^{-20} \text{ см}^2$ на длине волны 1793 нм, при ширине полосы – 169 нм.

Разделы 3.4–3.5 посвящены исследованию механизмов переноса энергии между ионами тулия в кристаллах Tm:NBM. Параметры миграции энергии $C_{\text{ДД}}$ по уровням ${}^3\text{H}_4$ и ${}^3\text{F}_4$ при диполь-дипольном взаимодействии были рассчитаны на основании теории Ферстера-Декстера (Ф-Д). Полученные значения $C_{\text{ДД}}$, а также величины критических расстояний взаимодействия $R_{\text{ДД}}$ сведены в таблицу 2. Быстрая миграция энергии по уровням ${}^3\text{F}_4$ делает кристаллы натрий-висмутового молибдата привлекательными средами для со-активации их ионами Ho^{3+} с целью получения генерации в области 2,1 мкм.

Таблица 2. – Параметры миграции энергии между ионами тулия в кристаллах молибдатов и вольфраматов

Кристалл	$R_{\text{ДД}}({}^3\text{H}_4)$, нм	$C_{\text{ДД}}({}^3\text{H}_4)$, $\times 10^{-38} \text{ см}^6/\text{с}$	$R_{\text{ДД}}({}^3\text{F}_4)$, нм	$C_{\text{ДД}}({}^3\text{F}_4)$, $\times 10^{-38} \text{ см}^6/\text{с}$
$\text{Tm}^{3+}:\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$	1,45	5,3	2,01	5,4
$\text{Tm}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$	1,32	2,6	1,92	4,3
$\text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$	1,36	3,4	2,10	6,3

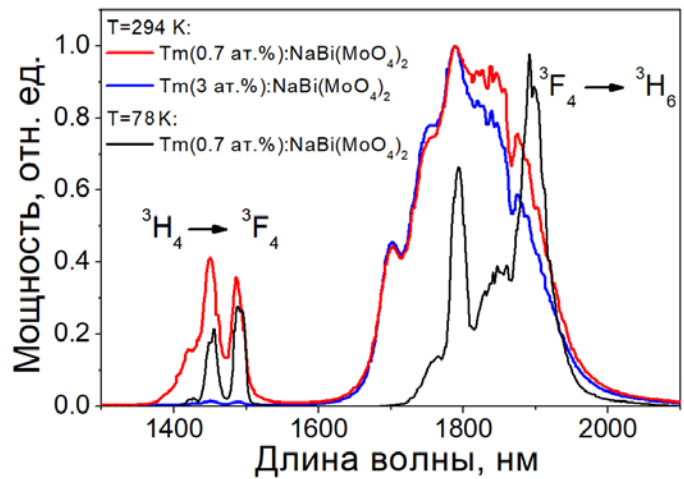


Рисунок 2. – Спектры люминесценции Tm:NBM при температурах 78 К и 294 К

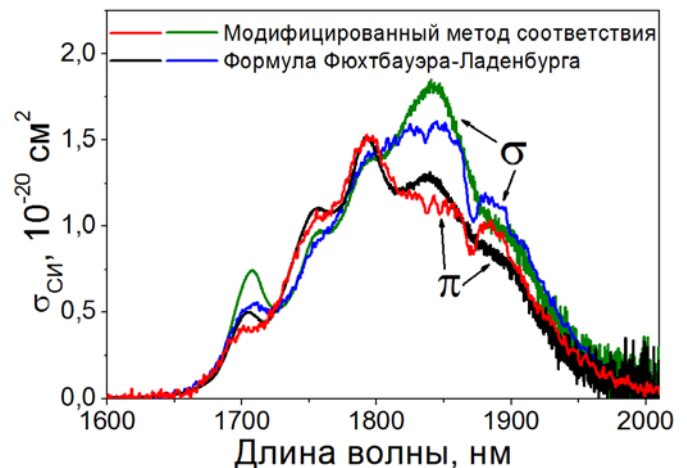


Рисунок 3. – Спектры поперечных сечений стимулированного испускания кристалла Tm:NBM

Затухание люминесценции кристаллов Tm:NBM с содержанием ионов тулия 0,7 ат.% и 3 ат.% на переходе ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ носило экспоненциальный характер. Постоянные времена затухания $\tau_{\text{люм}}$ и значения квантового выхода люминесценции $\eta_{\text{люм}}$ приведены в таблице 1. Сокращение времени жизни уровня 3F_4 с ростом концентрации ионов тулия обусловлено миграцией энергии с последующей передачей возбуждения дефектам кристалла.

Кинетика затухания люминесценции на переходе ${}^3H_4 \rightarrow {}^3F_6$ для кристалла Tm(0,7 ат.%):NBM аппроксимировалась экспоненциальной функцией. Для кристалла с содержанием ионов тулия 3 ат.% затухание люминесценции носило неэкспоненциальный характер (рисунок 4) и в этом случае время жизни уровня определялось по формуле $\tau_{\text{люм}} = \int tI(t)dt / \int I(t)dt$. Соответствующие времена жизни уровня 3H_4 и квантовые выходы люминесценции представлены в таблице 1.

Неэкспоненциальное затухание с уровня 3H_4 обусловлено процессом КР ${}^3H_6 + {}^3H_4 \rightarrow {}^3F_4 + {}^3F_4$, характеризующимся микропараметром Д-А взаимодействия $C_{\text{ДА}}$, который определялся из аппроксимации кинетики затухания люминесценции ${}^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$ моделями: Инокути-Хираяма (И-Х), Йокота-Танимото (Й-Т)

(диффузионная модель) и Бурштейна (Б) (прыжковая модель) (рисунок 4). Наилучшее описание экспериментальных данных было получено для моделей Й-Т и Б, которые учитывают миграцию энергии между ионами тулия по уровням 3H_4 . Полученное соотношение $C_{\text{ДД}} > C_{\text{ДА}}$ предполагает описание переноса энергии в Tm:NBM в рамках прыжковой модели. В

таблице 3 приведены значения критического расстояния Д-А взаимодействия $R_{\text{ДА}}$, критической концентрации C_0 и микропараметра $C_{\text{ДА}}$.

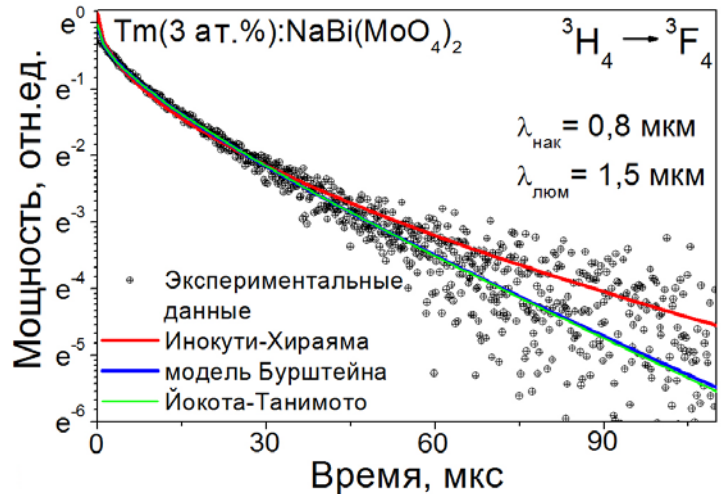


Рисунок 4. – Кинетика затухания люминесценции с уровня 3H_4 в кристалле Tm:NBM

Таблица 3. – Параметры кросс-релаксации кристалла Tm:NBM

Модель	$R_{\text{ДА}}$, нм	$C_0, \times 10^{26} \text{ м}^{-3}$	$C_{\text{ДА}}, \times 10^{-38} \text{ см}^6/\text{с}$
Инокути-Хираяма	1,47	0,74	6,1
Йокота-Танимото	1,26	1,27	2,4
Бурштейна	1,30	1,18	2,9

Показано, что кристалл Tm:NBM характеризуется большей эффективностью КР по сравнению с тулийсодержащими кристаллами вольфраматов, а также кристаллами фторидов, гранатов и силикатов. Данный

механизм носит диполь-дипольный характер и является миграционно-ускоренным. Установлено, что вероятность дезактивации возбужденного уровня ${}^3\text{H}_4$ в результате КР в кристалле Tm:NBM становится больше вероятности его внутрицентральной релаксации при содержании ионов тулия $> 1,7\text{--}1,8$ ат.%, а насыщение эффективности КР наблюдается при содержании тулия около 7 ат.%.

Глава 4 диссертационной работы посвящена исследованию спектроскопических свойств тулийсодержащих кристаллов вольфраматов, анализу процессов переноса энергии и определению оптимальной концентрации ионов Tm^{3+} , обеспечивающей максимальную эффективность процесса КР. В разделе 4.1 рассматриваются абсорбционно-люминесцентные свойства кристаллов $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ ($\text{Tm}:\text{KYW}$) и $\text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ ($\text{Tm}:\text{KLuW}$) и определенные на их основе параметры миграции энергии по системе ионов Tm^{3+} (таблица 2).

Относительное изменение интенсивностей полос в спектре люминесценции в области 1300–2200 нм (рисунок 5) с ростом концентрации ионов Tm^{3+} указывает на наличие эффективного процесса КР, который в исследуемых материалах является нерезонансным и происходит с участием фононов кристаллической решетки.

В разделе 4.2 были исследованы времена жизни возбужденных состояний ${}^3\text{F}_4$ и ${}^3\text{H}_4$ ионов тулия в кристаллах $\text{Tm}:\text{KYW}$ и $\text{Tm}:\text{KLuW}$. С ростом концентрации ионов тулия наблюдалось сокращение времени жизни состояния ${}^3\text{F}_4$, обусловленное тушением люминесценции на дефектах структуры кристалла, при этом

сохранялся экспоненциальный характер затухания. Для кристалла $\text{Tm}:\text{KLuW}$ время жизни изменялось от 1,29 мс до 0,81 мс при увеличении содержания Tm^{3+} от 3 ат.% до 13 ат.%. Для кристалла $\text{Tm}:\text{KYW}$ такое изменение составило от 1,52 мс до 1,29 мс при увеличении содержания Tm^{3+} от 0,2 ат.% до 5,8 ат.%. На основании анализа кинетик затухания люминесценции ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_4$ в рамках моделей И-Х, Й-Т, Б определены параметры КР $S_{\text{да}}$ и миграции энергии $S_{\text{дд}}$ для кристаллов с различным содержанием ионов-активаторов. Установлено, что процесс КР в кристаллах вольфраматов протекает в результате диполь-дипольного взаимодействия и является миграционно-ускоренным при содержании ионов тулия более 1,4–1,5 ат.%. Вероятность КР становится больше

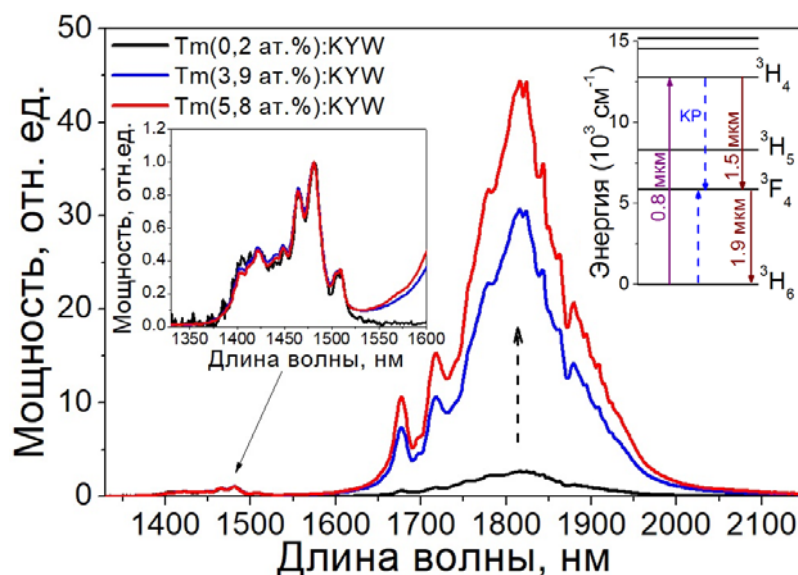


Рисунок 5. – Спектры люминесценции кристалла $\text{Tm}:\text{KYW}$, зарегистрированные в неполяризованном свете

вероятности внутрицентральной релаксации при содержании ионов тулия ~ 3 ат%. Насыщение эффективности процесса КР наблюдается при содержании ионов тулия ~ 8 ат. %.

Кинетика затухания люминесценции для кристалла Tm(13 ат.):KLuW (рисунок 6) имеет близкий к экспоненциальному характер затухания, что свидетельствует о достижении режима сверхмиграции возбуждения между ионами Tm^{3+} , находящимися в возбужденном состоянии 3H_4 и затухание люминесценции с уровня 3H_4 может быть описано в рамках прыжковой модели. Анализ полученных кинетик затухания люминесценции показывает, что миграция и Д-А перенос энергии для кристаллов Tm:KLuW более эффективен, чем для кристаллов Tm:KYW ввиду того, что расстояния в парах Lu-Lu и Y-Y, которые влияют на эффективность данных процессов, меньше для кристалла Tm:KLuW.

В Главе 5 исследованы генерационные характеристики кристаллов Tm:KYW и Tm:KLuW с различным содержанием ионов тулия. Активные элементы (АЭ), вырезанные вдоль оптической индикатрисы N_g , были закреплены на медном теплоотводе, поддерживаемом при температуре $15^\circ C$. Накачка на длине волны 801 нм осуществлялась лазерным диодом с волоконным выводом излучения. Фокусирующая система обеспечивала диаметр перетяжки в АЭ 100 мкм.

В разделе 5.1 представлены генерационные характеристики Tm:KYW и Tm:KLuW лазеров (таблица 4). Впервые была продемонстрирована генерация в микрочип конфигурации на основе данных кристаллов. Излучение генерации было линейно поляризовано вдоль оси оптической индикатрисы N_m кристалла. Микрочип-лазеры генерировали TEM_{00} моду. При одинаковом пропускании выходного зеркала для образцов с большим содержанием ионов тулия наблюдалось смещение длины волны генерации в длинноволновую область. Максимальная выходная мощность и дифференциальная эффективность генерации были получены с кристаллом Tm(13 ат.):KLuW.

На основе кристаллов Tm:KYW и Tm:KLuW реализована генерация в микрочип конфигурации в области 2,1 мкм (${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$) (таблица 4), соответствующей вибронным переходам. Из анализа структуры уровней показано, что данные переходы происходят при участии фононов кристалла с энергией менее 460 см^{-1} , связанных с верхними подуровнями мультиплета 3H_6 .

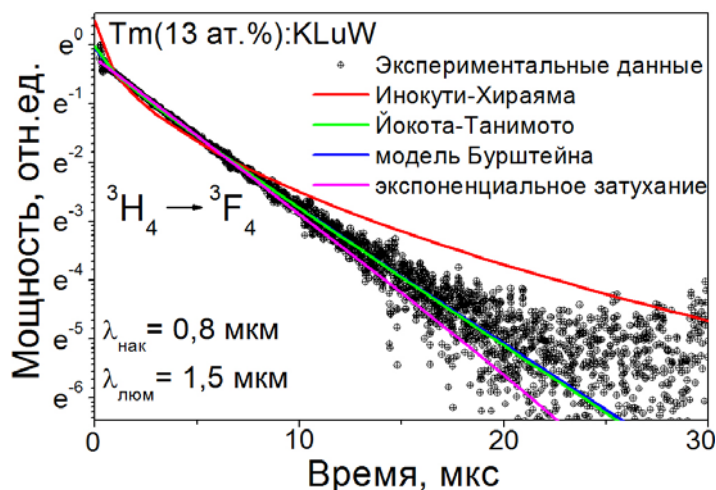


Рисунок 6. – Кинетика затухания люминесценции с уровня 3H_4 кристалла Tm(13 ат.):KLuW

Таблица 4. – Генерационные характеристики лазеров Tm:KYW и Tm:KLuW

Кристалл	T_{OC} , %	$P_{пор}$, мВт	$P_{макс}$, мВт	$\eta_{полз}$, %	$\eta_{полз}$, %	$\lambda_{ген}$, нм
Tm(3,9 ат.%):KYW	1,1	276	528	55	47	1958
	1,8	336	498	54	45	1948
	0,5	390	160	19	16	2042–2091
Tm(5,8 ат.%):KYW	1,1	378	610	58	53	1960
	1,8	393	526	56	50	1951
	0,5	333	120	12	10	2050–2100
Tm(6,2 ат.%):KLuW	1,1	430	532	51	46	1972
	1,8	440	530	50	45	1958, 1967
	2,5	539	492	50	45	1972–1996
	11,5	760	402	51	46	1941–1956
	15,7	826	363	50	45	1942
	0,5	270	182	20	18	2060–2100
Tm(13 ат.%):KLuW	1,1	232	790	61	60	1968
	1,8	290	780	62	61	1965
	2,5	318	769	58	59	1975–2015
	11,0	462	657	61	60	1944–1959
	14,5	535	605	13	13	1938–1954
	0,5	60	211	13	13	2080–2100

Используя трехзеркальную схему резонатора с интерференционно-поляризационным фильтром было показано, что увеличение содержания ионов Tm^{3+} в кристаллах вольфраматов приводит к увеличению диапазона непрерывной перестройки длины волны генерации (таблица 5) и росту ее эффективности (рисунок 7 (а)).

Таблица 5. – Диапазон перестройки длины волны генерации Tm:KYW и Tm:KLuW лазеров

Кристалл	Tm(3,9 ат.%):KYW	Tm(5,8 ат.%):KYW	Tm(6,2 ат.%):KLuW	Tm(13 ат.%):KLuW
$\lambda_{мин} - \lambda_{макс}$, нм	1862 – 1990	1862 – 2026	1886 – 2006	1884 – 2028

Для апробации полученных для кристаллов Tm:KYW и Tm:KLuW параметров переноса энергии проводилось математическое моделирование лазера с трехзеркальной конфигурацией резонатора. При моделировании, основанном на системе балансных уравнений, учитывались потери на репоглощение, процессы миграции энергии по уровням 3F_4 (Tm^{3+}) и КР. Для обоих кристаллов Tm:KLuW (рисунок 7 (а)) и Tm:KYW было получено хорошее согласие результатов моделирования и экспериментальных данных.

С целью оптимизации концентрации ионов-активаторов в кристаллах Tm:KLuW и Tm:KYW были проведены расчеты для активных сред с

содержанием иона тулия до 30%. Показано, что увеличение концентрации ионов Tm^{3+} приводит к росту эффективности генерации (рисунок 7 (б)), зависимость которой носит нелинейный характер. Рассчитанное значение оптимального содержания ионов Tm^{3+} в кристаллах вольфраматов, при котором достигаются максимальные эффективность и мощность генерации лазера составляет $\sim 8-9$ ат.%, что близко к условиям, при которых наблюдается насыщение эффективности кросс-релаксации.

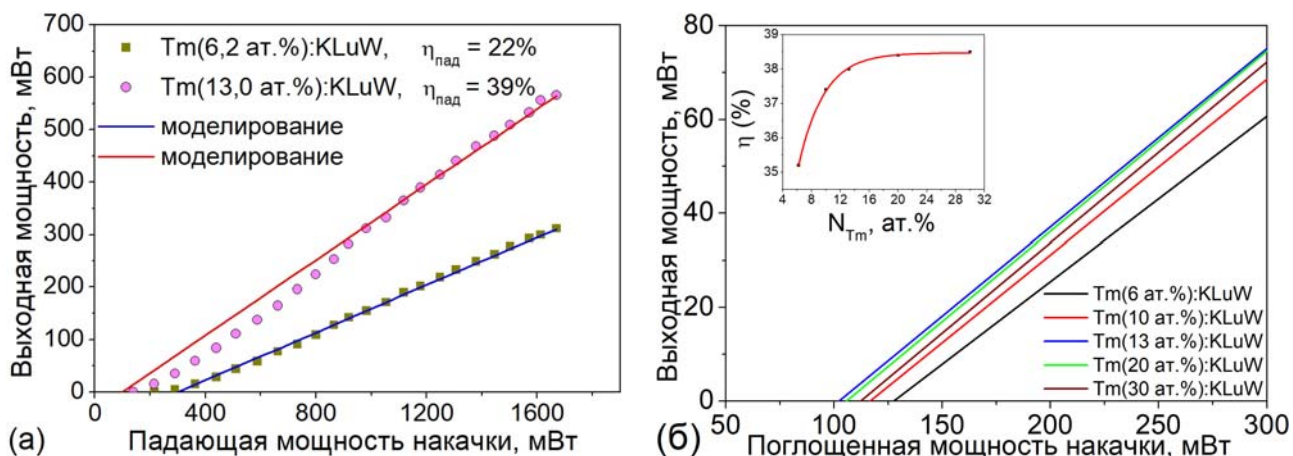


Рисунок 7. – Экспериментальные выходные характеристики Tm:KLuW лазеров и результаты математического моделирования (а), математическое моделирование лазеров Tm:KLuW с различным содержанием Tm^{3+} (б)

В Главе 6 исследованы спектроскопические и генерационные характеристики кристаллов $Tm^{3+}, Ho^{3+}:KY(WO_4)_2$ ($Tm, Ho:KYW$) с различным содержанием ионов гольмия. В частности, в разделе 6.1 определены абсорбционно-люминесцентные свойства и параметры переноса энергии между ионами тулия и гольмия, находящимися в возбужденных состояниях 3F_4 и 5I_7 , соответственно. Для оценки эффективности переноса энергии в кристалле $Tm, Ho:KYW$ определялась константа равновесного взаимодействия θ . Значение θ , учитывающее только резонансные взаимодействия, рассчитанное на основе данных по структуре уровней, составило 0,024 и близко к значению, определенному по теории Ф-Д $\theta_{Ф-Д} = 0,026$. В то же время, $\theta_{люм}$, учитывающее нерезонансный перенос энергии, определенное на основании спектров люминесценции $Tm, Ho:KYW$ составило 0,054. Такое отличие в величинах θ свидетельствует о существенном вкладе нерезонансных процессов переноса энергии в кристалле $Tm, Ho:KYW$, которые влияют на заселенность уровня 5I_7 . На основании данных по спектрам люминесценции и кинетикам затухания люминесценции установлено, что рост содержания ионов Ho^{3+} в кристалле $Tm, Ho:KYW$ от 0,5 ат.% до 1 ат.% при одинаковом содержании ионов Tm^{3+} 5 ат.% приводит к увеличению относительной населенности верхнего лазерного уровня 5I_7 от 63% до 79% и времени его жизни от 2,2 мс до 2,4 мс.

В разделе 6.2 приводятся результаты экспериментов по получению лазерной генерации в микрочип-конфигурации лазера на со-активированных кристаллах Tm,Ho:KYW в квазинепрерывном и непрерывном режимах (таблица 8.) При фиксированном содержании ионов тулия (5 ат.%) содержание ионов гольмия составляло 0,5 и 1 ат.%. Показано, что рост концентрации ионов гольмия в кристалле Tm,Ho:KYW приводит к снижению эффективности генерации и увеличению ее порога при одинаковых значениях пропускания выходного зеркала 0,5% и 1%. Это обусловлено ростом потерь на перепоглощение на длине волны генерации. Кроме того, рост населенности на верхнем лазерном уровне 5I_7 иона гольмия приводит к увеличению скорости ап-конверсионного процесса $^5I_7 \rightarrow ^5I_5$, что обуславливает большее тепловыделение в АЭ. Таким образом, при переходе к непрерывному режиму генерации бóльшие ап-конверсионные потери и потери на перепоглощение ограничивали возможность ее получения в микрочип конфигурации при комнатной температуре с кристаллом Tm(5 ат.%),Ho(1 ат.):KYW.

С кристаллом Tm(5 ат.%),Ho(0,5 ат.):KYW впервые получена генерация в микрочип конфигурации резонатора в непрерывном режиме. Максимальная мощность составила 480 мВт при дифференциальной эффективности 31% по поглощенной мощности накачки и ограничивалась возникающими в АЭ термооптическими искажениями.

Таблица 8. – Генерационные характеристики микрочип-лазеров Tm,Ho:KYW

Кристалл	T_{OC} , %	P_{max} , мВт	λ , нм	$\eta_{полз}$, %
Квазинепрерывный режим				
Tm(5 ат.%),Ho(0,5 ат.):KYW	0,5	182	2070	22
	1	381	2073	39
	2	348	2056	38
	2,3	281	2056	34
Tm(5 ат.%),Ho(1 ат.):KYW	0,5	154	2073	18
	1	185	2073	26
	2,6	90	2073	21
	3,7	69	2071	20
Непрерывный режим				
Tm(5 ат.%),Ho(0,5 ат.):KYW	0,5	217	2078	18
	1	310	2073	26
	2	205	2056	19
	2,3	178	2056	16

Показано, что небольшое значение константы равновесного взаимодействия обуславливает сравнительно высокие эффективности генерации Tm,Ho:KYW лазеров в области 2,1 мкм при комнатной температуре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Впервые определены спектроскопические характеристики кристаллов двойных натрий-висмутовых молибдатов, легированных трехвалентными ионами тулия: $\text{Tm}^{3+}:\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$. На основе низкотемпературных спектров определена структура уровней иона Tm^{3+} в данном кристалле. Определены спектры поперечных сечений поглощения и стимулированного испускания. Установлено, что кристаллы характеризуются высокими значениями сечений и разупорядоченная структура обуславливает широкие полосы в спектрах поглощения и люминесценции. В рамках теории Джадда-Офельта рассчитаны силы линий переходов с поглощением и излучением и определены значения излучательных времен жизни возбужденных состояний иона тулия [6, 8, 9, 15].

2. На основании спектров поглощения и люминесценции с уровней $^3\text{H}_4$ и $^3\text{F}_4$ и кинетик затухания люминесценции с уровня $^3\text{H}_4$ определены параметры кросс-релаксации и миграции энергии между ионами тулия в кристалле $\text{Tm}^{3+}:\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$. Показано, что процесс кросс-релаксации начинает играть существенную роль при содержании ионов тулия более 1,7–1,8 ат.%, а насыщение эффективности кросс-релаксации наблюдается при содержании ионов Tm^{3+} ~ 7 ат.%. Установлено, что механизм переноса энергии $^3\text{H}_4 + ^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_4 + ^3\text{F}_4$ носит диполь-дипольный характер и является миграционно-ускоренным. Показано, что кристалл $\text{Tm}^{3+}:\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$ характеризуется слабым концентрационным тушением люминесценции уровня с $^3\text{F}_4$ [7, 12].

3. Установлено влияние концентрации ионов тулия на спектральные характеристики кристаллов $\text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ и $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$. На основании анализа кинетик затухания люминесценции показано, что процесс кросс-релаксации в данных кристаллах является миграционно-ускоренным при содержании ионов тулия 1,4–1,5 ат.%. Насыщение эффективности процесса кросс-релаксации в кристаллах наблюдается при содержании ионов тулия ~ 8 ат.%. В кристаллах реализуется прыжковый механизм миграционно-ускоренного переноса энергии. При содержании ионов тулия 13 ат.% в кристалле $\text{Tm}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ наблюдается переход к режиму сверхмиграции [7, 8, 12, 13].

4. Исследованы генерационные характеристики $\text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ и $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ лазеров с различными концентрациями ионов тулия. Впервые получена генерация в микрочип конфигурации лазера на основе данных кристаллов в спектральной области 1,9–2,1 мкм. Максимальная выходная мощность на длине волны 1968 нм микрочип-лазера $\text{Tm}(13 \text{ ат. \%}):\text{KLuW}$, работающего в непрерывном режиме составила 790 мВт при дифференциальной эффективности 61% по отношению к поглощенной мощности накачки. Определено, что оптимальное значение содержания ионов-активаторов составляет ~8 ат.%, при котором обеспечиваются максимальные мощность и эффективность

генерации лазеров. Показано, что увеличение концентрации ионов тулия в кристаллах Tm:KYW и Tm:KLuW приводит к увеличению диапазона непрерывной перестройки и росту эффективности генерации [1, 2, 4, 11, 14, 16, 18].

5. Установлено влияние содержания ионов гольмия на спектральные характеристики кристаллов $Tm^{3+}, Ho^{3+}:KY(WO_4)_2$. Показано, что увеличение содержания ионов гольмия от 0,5 ат.% до 1 ат.% приводит к росту относительной населенности уровня 5I_7 и росту ап-конверсионной люминесценции. На основании данных о структуре уровней, спектров люминесценции и кинетик затухания люминесценции определены параметры переноса энергии между возбужденными состояниями 3F_4 (Tm^{3+}) и 5I_7 (Ho^{3+}) и установлен существенный вклад в перенос энергии переходов с участием фононов кристаллической матрицы [3, 5, 8, 10].

6. Впервые получена генерация в микрочип конфигурации резонатора на основе кристаллов $Tm^{3+}, Ho^{3+}:KY(WO_4)_2$ и установлено влияние концентрации ионов гольмия на генерационные характеристики лазеров. Максимальная выходная мощность микрочип-лазера Tm(5 ат.%),Ho(0,5 ат.%):KYW, работающего в непрерывном режиме составила 480 мВт при дифференциальной эффективности 31% по отношению к поглощенной мощности накачки. Показано, что увеличение содержания ионов гольмия от 0,5 ат.% до 1 ат.% ограничивает возможность получения генерации в микрочип конфигурации при комнатной температуре, что обусловлено влиянием ап-конверсионных процессов и потерями на репоглощение [3, 5, 10, 17, 19].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Практическое значение полученных результатов заключается в том, что кристалл натрий-висмутового молибдата предложен в качестве новой среды для лазеров, излучающих в области 1,9 мкм, которые могут представлять интерес для разработки перестраиваемых источников и создании систем генерации импульсов ультракороткой длительности. Установлены оптимальные концентрации ионов тулия и гольмия в кристаллах вольфраматов и молибдатов, с целью достижения максимальных эффективности и мощности генерации лазера в области 1,9–2,1 мкм. Показана возможность использования кристаллов вольфраматов с высокими значениями концентраций ионов активаторов для микрочип-лазеров, которые являются компактными неразъюстируемыми источниками и могут быть интегрированы в системы дистанционного зондирования атмосферы и экологического мониторинга окружающей среды.

Результаты диссертационной работы использованы при разработке технологии выращивания кристаллов на ОАО «Завод «Оптик» (г. Лида), а также внедрены в учебный процесс на приборостроительном факультете БНТУ и на факультете информационных технологий и робототехники ВГТУ (имеется три акта о внедрении).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь

1. Thermal lensing and microchip laser performance of N_g -cut $Tm^{3+}:KY(WO_4)_2$ crystal / M.S. Gaponenko, P.A. Loiko, N.V. Gusakova, K.V. Yumashev, N.V. Kuleshov, A.A. Pavlyuk // Appl. Phys. B. – 2012. – Vol. 108. – P. 603–607.
2. Лазеры на кристаллах $Tm:KLu(WO_4)_2$ и $Tm:KY(WO_4)_2$ в микрочип-конфигурации для дистанционного зондирования атмосферы / О.П. Дернович, С.В. Курильчик, Н.В. Гусакова, Н.В. Кулешов // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 122–128
3. Energy transfer in $Tm, Ho:KYW$ crystal and diode-pumped microchip laser operation / S. Kurilchik, N. Gusakova, M. Demesh, A. Yasukevich, V. Kisel, A. Pavlyuk, N. Kuleshov // Opt. Exp. – 2016. – Vol. 24, № 6. – P. 6451–6458.
4. Modelling of graphene Q-switched Tm lasers / A.S. Yasukevich, P.A. Loiko, N.V. Gusakova, J.M. Serres, X. Mateos, K.V. Yumashev, N.V. Kuleshov, V. Petrov, U. Griebner, M. Aguiló, F. Díaz // Opt. Commun. – 2017. – Vol. 389. – P. 15–22.
5. Spectroscopy and microchip laser operation of $Tm, Ho:KYW$ crystals with different Ho concentrations / N.V. Gusakova, S.V. Kurilchik, A.S. Yasukevich, V.E. Kisel, V.I. Dashkevich, V.A. Orlovich, A.A. Pavlyuk, S.M. Vatnik, S.N. Bagaev, N.V. Kuleshov // Laser Phys. Lett. – 2018. – Vol. 15, № 2. – P. 025001 (6 pp).
6. Growth and spectroscopic properties of $Tm^{3+}:NaBi(MoO_4)_2$ single crystal / N.V. Gusakova, A.V. Mudryi, M.P. Demesh, A.S. Yasukevich, A.A. Pavlyuk, A.A. Kornienko, E.B. Dunina, I.A. Khodasevich, V.A. Orlovich, N.V. Kuleshov // Opt. Mat. – 2018. – Vol. 80. – P. 169–176.
7. Механизмы переноса энергии между ионами тулия в кристаллах вольфраматов и молибдатов / Н.В. Гусакова, М.П. Демеш, А.С. Ясюкевич, А.А. Павлюк, Н.В. Кулешов // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2021. – №. 1. – С 33–40.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

8. Калибровка функции коэффициента пропускания люминесцентной установки / М.П. Демеш, Н.В. Гусакова, А.С. Ясюкевич, В.Э. Кисель, Н.В. Кулешов, С.В. Курильчик, А.С. Руденков, А.М. Ивашко // Приборостроение 2014 : материалы 7-ой Междунар. научн.-технич. конф., Минск, 19–21 ноября 2014 / БНТУ, БелГИМ, ИПФ НАН Беларуси; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2014. – С. 284–285.
9. Исследование спектроскопических характеристик кристалла $NaBi(MoO_4)_2$, активированного ионами Tm^{3+} / Н.В. Гусакова, А.С. Ясюкевич, А.А. Павлюк, Н.В. Кулешов // Физика конденсированного состояния :

материалы XXIII междунар. научн.-практич. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 16 апреля 2015 / ГрГУ им. Я. Купалы; редкол.: В.Г. Барсуков [и др.]. – Гродно, 2015. – С. 21–23.

10. Energy transfer parameters and microchip diode-pumped CW laser performance of Tm,Ho:KYW crystal / N.V. Gusakova, S.V. Kurilchik, A.S. Yasukevich, V.E. Kisel, A.A. Pavlyuk, N.V. Kuleshov // Advanced solid state lasers conference and exhibition (ASSL), Berlin, 4–9 October 2015/ Optical Society of America; ed.: P. Moulton [et al.]. – Washington, DC, USA, 2015. – AM5A.15 (3p).

11. Непрерывный тулиевый микрочип лазер с диодной накачкой, излучающий в области 1,95 мкм / Н.В. Гусакова, М.П. Демеш, А.С. Ясюкевич, В.Э. Кисель, Н.В. Кулешов, С.В. Курильчик, А.М. Ивашко // Приборостроение 2016 : материалы 9-ой Междунар. научн.-технич. конф., Минск, 23–25 ноября 2016 / БНТУ, БелГИМ, ИПФ НАН Беларуси; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2016. – С. 302–303.

12. Параметры переноса энергии между ионами тулия в кристаллах вольфраматов и молибдатов / Н.В. Гусакова, А.С. Ясюкевич, А.А. Павлюк, Н.В. Кулешов // Приборостроение 2019 : материалы 12-ой Междунар. научн.-технич. конф., Минск, 13–15 ноября 2019 / БНТУ, БелГИМ, ИПФ НАН Беларуси; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 455–457.

13. Energy transfer parameters of Tm ions in KY(WO₄)₂ and KLu(WO₄)₂ / N. Gusakova, A. Yasukevich, A. Pavlyuk, N. Kuleshov // OSA laser congress and exhibition, Vienna, 29 September–3 October 2019/ Optical Society of America; ed.: G. Goodno [et al.]. – Washington, DC, USA, 2019. – JM5A.23 (2p).

Тезисы

14. Gusakova, N.V. Tm:KLu(WO₄)₂ microchip laser / N.V. Gusakova, A.S. Yasukevich and A.A. Pavlyuk // Modern Concepts of Continuous Wave and Pulsed High Power Lasers : 540. WE-Heraeus-Seminar, Bad Honnef, Germany, 14–17 July 2013 // ed.: C. Krankel [et al.]. – Bad Honnef, 2013. – P. 47.

15. Spectroscopic properties of Tm:NaBi(MoO₄)₂ laser crystal / N.V. Gusakova, M.P. Demesh, A.S. Yasukevich, N.V. Kuleshov, S.V. Grigoriev, I.A. Khodasevich, A.A. Pavlyuk // XVI International Feofilov Symposium : book of abstracts, St. Petersburg, Russia, 9–13 November 2015 / ed.: V.N. Vasiliev [et al.]. – St. Petersburg, 2015. – P. 191–193.

16. Tunable LD pumped Tm:KLuW laser / O.P. Dernovich, N.V. Gusakova, S.V. Kurilchik, M.P. Demesh, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich and N.V. Kuleshov // 2nd International school and conference on optoelectronics, photonics, engineering and nanostructures : book of abstracts, St. Petersburg, Russia, 6–8 April 2015 / ed.: Zh.I. Alferov [et al.]. – St. Petersburg, 2015. – P. 118–119.

17. Diode pumped continuous-wave Tm,Ho:KYW microchip laser / N.V. Gusakova, O.P. Dernovich, S.V. Kurilchik, M.P. Demesh, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich and N.V. Kuleshov // 2nd International school and conference on optoelectronics, photonics, engineering and nanostructures : book of abstracts, St. Petersburg, Russia, 6–8 April 2015 / ed.: Zh.I. Alferov [et al.]. – St. Petersburg, 2015. – P. 132–133.

18. Diode-pumped Continuous Wave Tm:KLu(WO₄)₂ and Tm:KY(WO₄)₂ Microchip Lasers / O.P. Dernovich, S.V. Kurilchik, N.V. Gusakova, A.S. Yasukevich, V.E. Kisel, A.A. Pavlyuk, N.V. Kuleshov // 17th International Conference Laser Optics : technical program, St. Petersburg, Russia, June 27 – July 01, 2016 / Fund for Laser Physics; ed.: V.N. Vasiliev [et al.]. – St. Petersburg, 2016. – TuR1-p16.

19. Microchip laser operation of Tm,Ho:KYW crystals with different Ho concentrations / N. Gusakova, S. Kurilchik, A. Yasukevich, V. Kisel, V. Dashkevich, V. Orlovich, A. Pavlyuk, S. Vatnik, S. Bagaev, and N. Kuleshov // CLEO/Europe-EQEC : advance program, Munich, Germany, June 25–29, 2017 / European Physical Society; ed.:G. Cerullo, V. Pruneri. – Munich, 2017. – CA-P.15.

РЕЗЮМЕ

Гусакова Наталья Васильевна

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ И ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
КРИСТАЛЛОВ НАТРИЙ-ВИСМУТОВОГО МОЛИБДАТА И КАЛИЕВЫХ
ВОЛЬФРАМАТОВ С ИОНАМИ Tm^{3+} И Ho^{3+}

Ключевые слова: тулий, гольмий, вольфраматы, молибдаты, спектрально-люминесцентные свойства, лазерная генерация.

Цель работы: разработка лазерных сред на основе кристаллов вольфраматов и молибдатов, активированных ионами тулия и со-активированных ионами тулия и гольмия, излучающих в спектральной области 1,9–2,1 мкм.

Методы исследования: стационарной и нестационарной оптической спектроскопии.

Использованная аппаратура: стандартное спектрометрическое и фотоприемное оборудование; лабораторные установки для макетирования твердотельных лазеров.

Полученные результаты и их новизна: определены спектрально-люминесцентные свойства кристаллов молибдатов и вольфраматов активированных ионами Tm^{3+} и Ho^{3+} : спектры сечений поглощения, стимулированного испускания, исследовано влияние концентрации ионов на кинетики затухания люминесценции возбужденных состояний, установлены механизмы переноса энергии электронного возбуждения между ионами. Впервые получена генерация в микрочип конфигурации резонатора на основе кристаллов $Tm:KY(WO_4)_2$, $Tm:KLu(WO_4)_2$ и $Tm, Ho:KY(WO_4)_2$. Установлено влияние концентрации ионов тулия и гольмия на эффективность генерации. Получена генерация тулиевых микрочип-лазеров в области 2,1 мкм, соответствующей вибронным переходам. Проведена оптимизация концентрации ионов тулия в кристаллах вольфраматов и молибдатов.

Рекомендации по использованию и область применения: Полученные результаты используются в научных и производственных организациях Республики Беларусь и внедрены в учебный процесс. По результатам исследования предложены эффективные лазерные материалы на основе кристаллов $Tm:KY(WO_4)_2$, $Tm:KLu(WO_4)_2$, $Tm:NaBi(MoO_4)_2$, $Tm, Ho:KY(WO_4)_2$ для создания на их основе компактных лазеров для применений в дальнометрии, экологическом мониторинге, медицине и научных исследованиях.

РЭЗІЮМЭ

Гусакова Наталля Васільеўна

СПЕКТРАЛЬНЫЯ І ГЕНЕРАЦЫЙНЫЯ ХАРАКТАРЫСТЫКІ КРЫШТАЛЯЎ
НАТРЫЙ-ВІСМУТАВЫХ МАЛІБДАТАЎ І КАЛІЯВЫХ ВАЛЬФРАМАТАЎ І З
ІЁНАМІ Tm^{3+} І Ho^{3+}

Ключавыя словы: тулій, гольмій, вальфрамат, малібдат, спектральна-люмінесцэнтныя ўласцівасці, лазерная генерацыя.

Мэта работы: распрацоўка лазерных асяроддзяў на аснове крышталяў вальфраматаў і малібдатаў, актываваных іёнамі тулія і гольмія, якія выпраменьваюць у спектральнай вобласці 1,9–2,1 мкм.

Метады даследавання: стацыянарная і нестацыянарная аптычная спектраскапія.

Выкарыстаная апаратура: стандартнае спектраметрычнае і фотапрыёмнае абсталяванне; лабараторныя ўстаноўкі для макетавання цвёрдацельных лазераў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: устаноўлены спектральна-люмінесцэнтныя ўласцівасці крышталяў вальфраматаў і малібдатаў, актываваных іёнамі Tm^{3+} і Ho^{3+} : знойдзены спектры сячэнняў паглынання і стымуляванага выпраменьвання, даследаваны ўплыў канцэнтрацыі іёнаў на кінетыкі люмінесцэнцыі ўзбуджаных станаў, устаноўлены механізмы пераносу энергіі электроннага ўзбуджэння паміж іёнамі. Упершыню рэалізавана генерацыя ў мікрачып канфігурацыі рэзанатара на крышталях $Tm:KY(WO_4)_2$, $Tm:KLu(WO_4)_2$ і $Tm,Ho:KY(WO_4)_2$. Устаноўлены ўплыў канцэнтрацыі іёнаў тулія і гольмія на эфектыўнасць генерацыі. Атрымана генерацыя туліевых мікрачып лазераў у вобласці 2,1 мкм, якая адпавядае вібронным пераходам. Праведзена аптымізацыя канцэнтрацыі іёнаў тулія ў крышталлях вальфраматаў і малібдатаў.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць прымянення: Атрыманыя вынікі выкарыстоўваюцца ў навуковых і вытворчых арганізацыях Рэспублікі Беларусь і ўкаранены ў навучальны працэс. Па выніках даследаванняў прапанаваны эфектыўныя лазерныя матэрыялы на аснове крышталляў $Tm:KY(WO_4)_2$, $Tm:KLu(WO_4)_2$, $Tm:NaBi(MoO_4)_2$, $Tm,Ho:KY(WO_4)_2$ для стварэння на іх аснове кампактных лазераў для патрэбаў дальнаметрыі, экалагічнага маніторынгу, медыцыны і навуковых даследаванняў.

SUMMARY

Gusakova Natali Vasilievna

SPECTRAL AND LASER PROPERTIES OF SODIUM-BISMUTH
MOLYBDATE AND POTASSIUM TUNGSTATE CRYSTALS WITH Tm^{3+} AND
 Ho^{3+} IONS

Keywords: thulium, holmium, molybdate, tungstate, spectral-luminescent properties, laser generation.

The purpose of the research: development of laser media based on the tungstate and molybdate crystals, activated with thulium and co-activated with thulium and holmium ions emitting at 1.9–2.1 μm spectral range.

Methods of investigation: stationary and time-resolved spectroscopy.

Used equipment: commonly used spectrometric and photodetector equipment; lab setups for the prototyping of solid-state lasers.

Obtained results and their novelty: The spectral and luminescent properties of the tungstate and molybdate crystals activated with Tm^{3+} and Ho^{3+} ions, in particular, absorption and stimulated emission cross sections spectra were determined. The influence of ions concentration on luminescence decay was investigated. The mechanisms of interionic energy transfer were determined. For the first time, lasing in a microchip cavity configuration of $\text{Tm:KY(WO}_4)_2$, $\text{Tm:KLu(WO}_4)_2$ and $\text{Tm,Ho:KY(WO}_4)_2$ crystals was obtained. The effect of thulium and holmium ions concentration on the generation efficiency was established. Laser action of thulium microchip lasers was obtained at 2.1 μm region corresponding to vibronic transitions. The optimal concentration of thulium ions in tungstate and molybdate crystals was determined.

Recommendations for usage and field of applications: The results of this research are used in the scientific and industrial organizations of the Republic of Belarus and have been implemented in the university studying courses. On the results of this study efficient laser materials based on $\text{Tm:KY(WO}_4)_2$, $\text{Tm:KLu(WO}_4)_2$, $\text{Tm:NaBi(MoO}_4)_2$, $\text{Tm,Ho:KY(WO}_4)_2$ crystals have been proposed for the development of compact laser sources for applications in range-finding, environmental monitoring, medicine, and scientific research.