

У Т В Е Р Ж А Ю

Директор федерального
государственного бюджетного
научного учреждения «Федеральный
исследовательский центр Институт
прикладной физики им. А.В.
Гапонова-Грехова Российской
академии наук»,
д.ф.-м.н. Денисов Григорий
Геннадьевич



« 10 » мая 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» на диссертацию Ватника Сергея Марковича «Высокоэффективные лазерные излучатели на основе кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных ионами тулия и гольмия», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика

Актуальность темы выполненной работы

Диссертационная работа С.М. Ватника посвящена исследованиям активных сред на основе кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов с ионами тулия (Tm^{3+}) и гольмия (Ho^{3+}), которые предназначены для генерации когерентного излучения в двухмикронной области спектра. Лазерные источники данного спектрального диапазона представляют существенный интерес для ряда технологических, биомедицинских и информационных приложений, а также для накачки параметрических генераторов и усилителей среднего и дальнего инфракрасного (ИК) диапазонов. Представленный в диссертации комплекс данных по спектроскопическим характеристикам и кинетическим параметрам энергообмена имеет большое значение для изучения фундаментальных аспектов взаимодействия ионов Tm^{3+} и Ho^{3+} с интенсивным лазерным излучением при квазитрехуровневой схеме генерации. На этой основе был оптимизирован состав кристаллов и выполнены сравнительные исследования параметров генерации активных элементов различной геометрии (стержней, пластин, дисков и др.), что позволило выйти на предельные характеристики по выходной мощности и диапазону спектральной перестройки. В связи с этим, актуальность темы диссертационной работы обусловлена не только результатами фундаментальных исследований

взаимодействия ионов тулия и гольмия в анизотропных кристаллических матрицах, но и формированием научно-технического задела, представляющего значительный интерес для разработки эффективных лазерных источников с высокой средней и пиковой мощностью для спектрального диапазона 1.8 – 2.1 мкм.

Новизна исследований и полученных результатов

Практически все результаты, представленные в работе, являются новыми и имеют научный приоритет на момент их опубликования. К числу наиболее важных и принципиальных результатов, определяющих научную новизну, относятся следующие:

- предложен и реализован новый метод измерения термических коэффициентов оптического пути (ТКОП). Для кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов с различными концентрациями ионов-активаторов впервые определены спектральные зависимости ТКОП в интервале 400...2100 нм, сделан вывод о наличии в кристаллах «атермальных» направлений с нулевым ТКОП;
- получен и проанализирован полный набор данных по спектроскопическим и кинетическим характеристикам кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных ионами Tm^{3+} и Ho^{3+} , на его основе сформулированы критерии оптимизации состава активных элементов;
- проведены комплексные исследования эффекта «фотонной лавины» в кристаллах двойных калий-иттриевых и калий-иттербий-иттриевых вольфраматов, активированных тулием. Экспериментально показано, что в режиме «фотонной лавины» величина инверсии заселенностей тулия может достигать 70...80%;
- для кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, легированных Tm^{3+} , впервые проведен сравнительный анализ генерационных характеристик активных элементов различной формы (пластин, дисков, стержней), получены рекордные для данного класса кристаллов выходная мощность, величина энергосъема и диапазон спектральной перестройки;
- детально исследован режим пассивной модуляции тулиевых лазеров с помощью насыщающихся поглотителей на основе кристаллов $Cr^{2+}:ZnSe$, получены световые импульсы с длительностью 7 нс и пиковой мощностью 40 кВт;
- в приближении локального термодинамического равновесия впервые проведен полный расчет заселенности метастабильных уровней Tm^{3+} и Ho^{3+} в солегированных кристаллах при произвольном уровне возбуждения. На основе этого были сформулированы критерии оптимизации состава кристаллов для непрерывных и импульсных лазерных излучателей двухмикронного диапазона на переходе $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ ионов Ho^{3+} ;
- впервые проведены комплексные исследования спектрально-генерационных характеристик дисковых активных элементов $Ho:KY(WO_4)_2$ с накачкой волоконным тулиевым лазером, получена генерация на длинах волн 2073 нм и 2060 нм с дифференциальной эффективностью до 66%;

- на основании совокупности полученных результатов сделан вывод о перспективности использования кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных Tm^{3+} и Ho^{3+} , для разработки компактных источников лазерного излучения с высокой выходной мощностью.

Значимость полученных результатов для науки и практики

Научно-технический задел, сформированный в ходе выполнения работы, является одним из ключевых компонентов для разработки высокоэффективных лазерных излучателей и оптических усилителей двухмикронного диапазона. Результаты сравнительного анализа спектральных зависимостей коэффициентов усиления и генерационных характеристик кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов с Tm^{3+} и Ho^{3+} говорят о том, что они могут быть востребованы для разработок специализированных лазерных источников с заданными массогабаритными параметрами при средней выходной мощности излучения до 100 Вт и удельном энергопотреблении более 1 кВт/см² в спектральном диапазоне 1.8-2.1 мкм. Экспериментальные макеты высокоэффективных непрерывных и импульсно-периодических лазерных излучателей с выходной мощностью свыше 15 Вт могут быть использованы в качестве прототипов для создания промышленных и технологических лазеров, в том числе эффективных источниках накачки параметрических преобразователей, системах оптической связи и передачи информации, экологического мониторинга, медицинского лазерного оборудования, приборов и устройств квантовой сенсорики.

Практическое значение работы подтверждено двумя актами внедрения от ООО «НТО ИРЭ-Полус», г. Фрязино и ООО «Лаборатория оптических кристаллов», г. Томск. Результаты работы могут быть востребованы для оптимизации параметров лазерных излучателей с диодной накачкой в ИОФ РАН, ФИАН, ИПФ РАН, ИАиЭ СО РАН, ИЛФ СО РАН, ООО НТО ИРЭ-Полус. Их также можно использовать в качестве материала для специальных курсов по термооптике и лазерной физике в высших учебных заведениях, в том числе МФТИ, МГТУ им. Баумана, НГУ, ТГУ и др.

Достоверность научных положений, выводов и заключений

В ходе выполнения диссертационной работы автором был получен ряд оригинальных научных результатов. Их обоснованность и достоверность подтверждается не только воспроизводимостью экспериментальных данных на различных образцах, но и совпадением в пределах экспериментальной точности с результатами других исследовательских групп. При теоретическом моделировании были учтены основные особенности процессов энергообмена в лазерных кристаллах, что позволило добиться хорошей точности описания экспериментальных результатов и получить достоверные значения физических параметров. Отметим также, что ряд параметров, полученных из независимых измерений, хорошо коррелируют между собой. В частности, максимальное значение сечения перехода ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ ($\sim 4 \cdot 10^{-20}$ см²), определенное по спектроскопическим данным, достаточно точно совпало с аналогичной

величиной $4.5 \cdot 10^{-20}$ см², полученной из измерений коэффициентов ненасыщенного усиления.

Все экспериментальные работы были выполнены на современном лабораторном оборудовании. Для улучшения эксплуатационных параметров активных элементов, в том числе для улучшения коэффициентов теплосъема с боковых поверхностей лазерных кристаллов, автором были задействованы новые технологические возможности напыления высокопрочных металлических покрытий методом анодной вакуумной дуги.

Основные научные результаты широко апробированы на международных научных семинарах и конференциях. Все опубликованные статьи по теме диссертации в научных рецензируемых изданиях прошли необходимую экспертизу, что также является подтверждением достоверности результатов и положений диссертационного исследования.

Оценка содержания диссертации, ее завершенность в целом

Диссертация представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, имеющую большой прикладной потенциал, в которой исследование актуальных проблем физики твердотельных лазеров доведено до получения новых и важных результатов.

Содержание диссертации, научные положения и выводы соответствуют паспорту специальности, по которой она представляется, 1.3.19 – лазерная физика. Личный вклад автора заключается в выполнении основного объема теоретических и экспериментальных исследований, разработку методик экспериментальных исследований и их реализацию, а также подготовку результатов к публикациям в рецензируемых научных изданиях.

Замечания по диссертации

1. В диссертации описан метод измерения термооптических коэффициентов кристаллов, предложенный автором. Однако в диссертации не представлен анализ погрешностей измерений при его экспериментальной реализации. Не приводится также сравнение этого метода с другими измерительными методиками и подходами к определению термооптических коэффициентов.

2. В диссертации рассмотрен механизм образования и кинетика фотонной лавины в кристаллах двойных калий-редкоземельных вольфраматов, однако отсутствует сравнение спектроскопических и кинетических параметров этого эффекта с другими кристаллами, активированными ионами Tm³⁺ или Ho³⁺.

3. Модель образования фотонной лавины, разработанная автором, относится лишь к ее начальному участку, поскольку не учитывает заселенности других энергетических уровней, лежащих выше ³F₄, т.е. она дает в основном качественные оценки.

4. Спектры лазерной генерации, представленные в диссертации, измерены, как правило, при максимальной мощности генерации. Вызывает сожаление отсутствие данных по спектрам для другой мощности генерации, например, вблизи порога генерации. Это связано с тем, что для

квазитрёхуровневых активных сред спектр генерации существенно зависит от степени инверсии населённости уровней лазерного перехода.

5. При описании термодинамической модели взаимодействия ионов Tm^{3+} и Ho^{3+} в диссертации не приведены численные оценки границ применимости данной модели, как по концентрациям взаимодействующих ионов, так и по кинетическим параметрам их взаимодействия. Как представляется, при малых концентрациях взаимодействующих ионов доминирующим фактором будет не выход на термодинамическое равновесие, а процессы расселения метастабильных уровней за счет индивидуальных излучательных и безызлучательных переходов.

6. В тексте диссертации встречаются отдельные опечатки, а также отдельные американизмы такие, как “слэбы” (вместо “пластин”) или “допирование” (вместо “легирования”).

Представленные замечания имеют частный характер и не затрагивают основных положений и выводов. Опечатки не носят системного характера. Замечания не умаляют достоинств диссертации и не влияют на общую высокую оценку работы в целом.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации

В автореферате кратко представлены основные экспериментальные данные и теоретические модели, обосновывающие научную новизну и достоверность результатов диссертационной работы. Структура автореферата соответствует структуре диссертации и дает ясное понимание о ее ключевых особенностях. В целом, содержание автореферата полностью соответствует основным положениям, представленным в диссертационной работе.

Подтверждения опубликованных основных результатов диссертации в научной печати

Основные результаты работы изложены в 30 статьях, опубликованных в рецензируемых высокорейтинговых научных журналах и сборниках, а также были представлены на 16 международных конференциях. Общее число опубликованных автором работ теме диссертации – 46, включая материалы конференций.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.

Диссертационное исследование Ватника Сергея Марковича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержатся решения актуальных проблем физики твердотельных лазеров, а ее результаты представляют значительный интерес в области комплексного исследования спектрально-генерационных характеристик анизотропных активных сред и разработки эффективных лазерных источников двухмикронного диапазона длин волн.

Работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 (в редакции постановления Правительства Российской Федерации от 21.04.2016 г. №335; от 02.08. 2016 г. №748; от 01.10.2018 г. №1168), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор, Ватник Сергей Маркович, заслуживает присуждение ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 «Лазерная физика».

Отзыв подготовлен ведущим научным сотрудником лаборатории твердотельных лазеров федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», д.ф.-м.н. Антиповым Олегом Леонидовичем.

Доклад Ватника Сергея Марковича по диссертации, а также предварительный отзыв на диссертацию были заслушаны и обсуждены на семинаре отделения нелинейной динамики и оптики (НДиО) ИПФ РАН 16 февраля 2024 г.

Руководитель отделения НДиО ИПФ РАН,
доктор физико-математических наук  /Стародубцев М.В./

Ведущий научный сотрудник ИПФ РАН,
доктор физико-математических наук  /Антипов О.Л./

Личные подписи Стародубцева М.В. и
Антипова О.Л. заверяю  / Корюкин И.В. /
Учёный секретарь ИПФ РАН



Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Адрес: Ульянова ул., 46, Бокс 120, Нижний Новгород, 603950.

Тел.: (831)436-62-02, E-mail: dir@ipfran.ru, <http://www.ipfran.ru>