МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Ватник Сергей Маркович

Высокоэффективные лазерные излучатели на основе кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных ионами тулия и гольмия

Специальность 1.3.19 - Лазерная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Новосибирск 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук» (ИЛФ СО РАН)

Научный консультант: академик С.Н. Багаев

Официальные оппоненты :

1. Кобцев Сергей Михайлович, доктор физико-математических наук, руководитель отдела лазерной физики и инновационных технологий НГУ.

2. Цветков Владимир Борисович, доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора ИОФ РАН по научно-организационной работе.

3. Рубцова Наталия Николаевна, доктор физико-математических наук, заведующая лабораторией лазерной спектроскопии и лазерных технологий ИФП СО РАН.

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

Защита диссертации состоится 14 июня 2024 г. в 10-00 на заседании диссертационного совета 24.1.070.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт лазерной физики СО РАН по адресу 630090 г.Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева 15Б, Зал заседаний Ученого Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале библиотеки ИЛФ СО РАН или на сайте https://laser.nsc.ru/disovet/ .

Автореферат разослан «_____» апреля 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук _____ О.Н.Прудников

Выходные данные издательства

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Со времени первой экспериментальной демонстрации оптического квантового генератора прошло более полувека. За этот период в области лазерной физики и оптических технологий были достигнуты впечатляющие результаты, во многом повлиявшие на облик современного мира. К настоящему времени источники когерентного излучения, а также оптические приборы и системы на их основе используются практически во всех областях человеческой деятельности, включая научные исследования, промышленное производство, телекоммуникацию и связь, метрологию, навигацию, медицину, военное дело и многое другое.

Значительный прогресс в области создания эффективных твердотельных лазерных источников во многом обусловлен современными достижениями в области исследований лазерных кристаллов, важнейшей задачей которых является поиск генерирующих соединений с заранее заданными свойствами. Таким образом, комплексные исследования новых активных сред и создание на их основе экспериментальных образцов высокоэффективных излучателей являются актуальными научно-техническими задачами, особенно важными при разработке специализированных и технологических лазеров.

Поскольку лазерная генерация практически во всех твердотельных средах осуществляется по принципу «свет в свет», т.е. световая энергия накачки преобразуется активной средой и резонатором в когерентное лазерное излучение, то для оптимального режима работы лазерных излучателей необходимо обеспечить максимально полную передачу энергии от источника накачки в активную среду. В этой связи особый интерес представляют твердотельные кристаллические матрицы, в которых ионы-активаторы имеют большие сечения переходов в области длин волн генерации и накачки, что позволяет сравнительно легко реализовать как специальные конфигурации активных элементов (дисковые модули, мини-слэбы и т.п.), так и различные режимы генерации, включая быструю перестройку по спектру, модуляцию

добротности и т.п. К числу таких матриц относится группа моноклинных кристаллов двойных вольфраматов калия со структурной формулой $KRe(WO_4)_2$, где Re = Gd, Y, Lu (в сокращенном варианте KReW). Поскольку при легировании трехвалентные ионы-активаторы (Nd^{3+}, Yb^{3+}, Tm^{3+}, Ho^{3+} и др.) замещают ионы гадолиния, иттрия и лютеция, у которых нет полос поглощения в ИК- и видимой области спектра, то степень легирования может быть достаточно большой, вплоть до полной самоактивации, т.е. 100% замещения.

В диссертационной работе представлены результаты комплексных исследований оптических, термомеханических, спектроскопических и генерационных характеристик лазерных кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных трехвалентными ионами тулия и гольмия. Лазерная генерация в двухмикронном диапазоне осуществляется при переходе этих ионов из метастабильного в один или несколько штарковских подуровней основного состояния, которые в области комнатных температур имеют конечную заселенность, такая схема генерации называется квази-трехуровневой. В этом случае величина пороговой мощности примерно пропорциональна как объему активной зоны (области накачки), так и концентрации «лазерных» ионов. С точки зрения уменьшения порогов генерации, оба этих параметра (объем и концентрацию) целесообразно делать минимально возможными, однако при их неоптимальном уменьшении полная эффективность генерации может быть значительно снижена. Так, уменьшение объема активной зоны приводит к соответствующему увеличению термооптических искажений и термомеханических нагрузок, что является одной из причин ухудшения энергетических характеристик генерации и модового состава лазерного пучка, особенно при интенсивной накачке активного элемента. Кроме этого, при малой концентрации ионов-активаторов и/или малой толщине активного элемента необходимо применять сложные многопроходные схемы накачки, поскольку поглощение накачки при использовании типовых одно-, двух-, или четырехпроходных схем будет

недостаточно велико, что также приводит к уменьшению фактической эффективности излучателя. С другой стороны, для получения максимальной выходной мощности генерации при заданных параметрах профиля лазерного пучка необходимо рассчитать правильную компоновку элементов резонатора, а также обеспечить необходимый уровень теплосъема с активного элемента для его стабильной долговременной работы. Таким образом, проблема сквозной оптимизации параметров активной среды является актуальной научно-технической задачей, тесно связанной с созданием высокоэффективных излучателей двухмикронного диапазона со средней мощностью 10…100 Вт.

Необходимо отметить, что потребность в излучателях такого класса, имеющих сравнительно малый вес и габариты, в последнее время значительно возросла. В первую очередь это связано с расширением числа возможных приложений таких лазерных систем, в том числе медицинских – хирургии, косметологии, офтальмологии и т.д. Важнейшей областью применений импульсных и импульсно-периодических гольмиевых лазеров ($\lambda \approx 2.1$ мкм) является эффективная накачка параметрических генераторов света, обеспечивающих преобразование световой мощности в средний ИК-диапазон (3-5мкм) с полным КПД до 50%. Кроме того, излучение двухмикронного диапазона относится к спектральной области, сравнительно безопасной для зрения, но примыкающей к одному из окон прозрачности атмосферы, что открывает широкие перспективы для создания новых поколений лидаров, дальномеров, дальнейшему развитию дистанционного газоанализа.

В связи с этим, актуальность темы диссертационной работы обусловлена не только комплексным подходом к исследованию фундаментальных аспектов взаимодействия ионов тулия и гольмия в анизотропных кристаллических матрицах, но и рядом практических результатов, представляющих значительный интерес для разработки эффективных лазерных источников с высокой средней мощностью генерации в спектральном диапазоне 1.8 – 2.1 мкм.

Степень разработанности тематики исследований. Систематическое исследование кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных трехвалентными ионами редких земель, активно проводится с начала 70-х годов прошлого века. В течение последующего десятилетия были подробно исследованы спектрально-генерационные характеристики этих лазерных материалов с ионами неодима, эрбия, гольмия, тулия, диспрозия Наиболее перспективными были признаны кристаллы калий-гадолиниевого вольфрамата, активированного неодимом, Nd:$KGd(WO_4)_2$, т.к. при ламповой накачке их эффективность генерации была в 2...3 раза выше, чем для типовых кристаллов иттрий-алюминиевого граната Nd:YAG, в силу более интенсивных и широких полос поглощения, хорошо соответствующих спектру излучения криптоновых газоразрядных ламп. В то же время, когерентное излучение в двухмикронной области спектра на ионах гольмия было реализовано с ламповой накачкой только при криогенном охлаждении. Большой вклад в эти исследования внес чл.-корр. РАН А.А.Каминский, который, помимо многочисленных генерационных экспериментов, выполнил значительный объем спектроскопических работ, в том числе по определению штарковских уровней основных и метастабильных состояний многих редкоземельных ионов в матрицах двойных калий-редкоземельных вольфраматов.

Ситуация кардинально изменилась с появлением мощных полупроводниковых лазерных излучателей, позволяющих производить накачку кристаллов в узкие полосы поглощения. Так, в рамках совместных работ ИЛФ СО РАН и ИНХ СО РАН в 2000 г. впервые была реализована генерация в двухмикронной области спектра на кристалле Tm: $KY(WO_4)_2$ в области комнатных температур с рекордной на тот момент дифференциальной эффективностью 45% и выходной мощностью сотни милливатт. Эти результаты вызвали большой интерес и получили дальнейшее развитие в работах наших белорусских, немецких и испанских коллег. В частности, исследователями из университета Таррагоны (Испания) под руководством профессора Ф. Диаса

были синтезированы все основные кристаллические матрицы семейства двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных тулием. В 2006 г. в Институте Макса Борна (Германия) группой исследователей под руководством В.Петрова была получена выходная мощность непрерывной генерации на уровне 4 Вт с рекордной на тот момент эффективностью генерации, ~ 60%.

Наши усилия были сконцентрированы на реализации максимально возможной выходной мощности, что потребовало изготовления активных элементов специальной формы, значительно улучшающей теплообмен. Так, в 2007 г. в ИЛФ СО РАН был разработан первый дисковый лазер на кристалле Tm: $KY(WO_4)_2$ с выходной мощностью до 5 Вт, в 2012 реализован первый мини-слэб лазер на кристалле Tm: $KLu(WO_4)_2$ с выходной мощностью свыше 10 Вт, в 2014 г. была продемонстрирована высокоэффективная генерация на композитных структурах Tm:$KLu(WO_4)_2$/$KLu(WO_4)_2$ с рекордной шириной спектральной полосы генерации без селектирующих элементов, 1780...1990 нм, что представляет особый интерес для создания фемтосекундных лазерных источников двухмикронного диапазона, в 2018…2019 гг. была проведена сквозная оптимизация активных элементов на основе слэбов Tm: $KLu(WO_4)_2$ и выходная мощность генерации слэб-лазеров была увеличена до 17 Вт. Все вышеперечисленные результаты являются приоритетными, ИЛФ СО РАН совместно с ИНХ СО РАН продолжают сохранять лидирующие позиции в этой области исследований. Здесь также уместно отметить большой цикл совместных российско-белорусских работ по исследованию новых линий генерации европия, удостоенных в 2017 г. премии СО РАН им. академика В.А.Коптюга. Руководство этими работами с российской стороны осуществлял академик РАН С.Н.Багаев, с белорусской - академик БАН В.А.Орлович.

Вместе с тем, кристаллы двойных калий-редкоземельных вольфраматов обладают другими функциональными возможностями, представляющими значительный интерес для фотоники и фотонных технологий. К их числу

следует отнести высокую эффективность вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР-преобразования) в стоксовы и антистоксовы компоненты, что позволило реализовать многоспектральные источники лазерного излучения, в том числе в непрерывном режиме генерации. Большая работа в этом направлении ведется нашими белорусскими коллегами из Института физики и Белорусского национального технического университета, В.А. Орловичем, В.И. Дашкевичем, Н.В. Кулешовым.

Необходимо также отметить значительный потенциал кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов как материалов для изготовления акусто-оптических устройств. Проведенные совместно с ФГУП ВНИИФТРИ исследования фотоупругих характеристик кристаллов KGW и KLuW показали, что величина акустооптического качества $M2$ для этих кристаллов уступает лишь в 3 раза максимальной величине $M2$ для дифракции на продольной звуковой волне в парателлурите, являющемся наиболее эффективным из основных кристаллов, используемых в акустооптике. Вместе с тем, лучевая прочность двойных вольфраматов примерно на порядок выше парателлурита, что позволяет использовать эти кристаллы для эффективной модуляции добротности лазерных резонаторов и получения световых пучков высокой мощности и интенсивности. Легирование кристаллов двойных вольфраматов ионами редких земель позволяет выйти на новый класс акустооптических устройств, объединяющих активный элемент лазерного резонатора и модулятор добротности. Более подробно характерные особенности ВКР-генерации и акустооптические параметры кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов будут представлены в следующей главе.

В целом, полученные к настоящему моменту результаты в области исследований спектрально-генерационных (включая генерацию стоксовых и антистоксовых компонент), термомеханических, теплофизических и акусто-оптических характеристик кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов свидетельствуют о глубокой всесторонней проработке темы

диссертационной работы, при этом совокупность результатов, представленных в диссертации, вносит существенный вклад в развитие одного из приоритетных направлений лазерной физики - физики мощных твердотельных лазеров с диодной накачкой.

Цели и задачи работы. Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной проблемы комплексного исследования термооптических, спектроскопических и генерационных характеристик семейства кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных трехвалентными ионами тулия и гольмия. Взаимодополняющее сочетание экспериментальных и теоретических методов полностью соответствует сложившейся тенденции развития работ в этом направлении, которая остается неизменной на протяжении длительного времени и заключается в последовательном сквозном изучении основных особенностей, параметров и характеристик кристаллов с целью детального выявления всех потенциальных перспектив для создания новых приборов, элементов и устройств фотоники. В этой связи, одной из важнейших целей исследований является определение всех фундаментальных аспектов взаимодействия высокоинтенсивных световых полей в оптических резонаторах с ионами редкоземельных и переходных металлов в анизотропных кристаллических матрицах при «квази-трехуровневой» схеме генерации. Другая, не менее значимая, цель работы заключается в формировании опережающего научно-технического задела и реализации всех преимуществ кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов для решения прикладных задач по разработке и оптимизации высокоэффективных лазерных излучателей двухмикронного диапазона с высокой средней и пиковой мощностью.

В соответствии со сформулированными целями, было определено несколько ключевых направлений исследований, тесно связанных между собой. Во-первых, значительный научный и практический интерес представляет изучение основных каналов переноса энергии в системе взаимодействующих

ионов тулия и гольмия, что в конечном итоге позволяет оптимизировать концентрации ионов-активаторов в лазерных кристаллах. Во-вторых, особое внимание было уделено комплексным исследованиям спектрально-генерационных характеристик, в том числе эффекту «фотонной лавины», спектральным зависимостям сечений переходов и коэффициентов ненасыщенного усиления, порогам и эффективности лазерной генерации в различных режимах, включая пассивную модуляцию добротности с помощью насыщающихся поглотителей на основе кристаллов Cr^{2+}:ZnSe. В-третьих, достаточно подробно были исследованы спектральные зависимости термооптических коэффициентов кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, что позволило, в частности, определить группу так называемых «атермальных» направлений, т.е. такие кристаллические срезы, в которых термооптические искажения минимальны. Последнее имеет особое значение для разработки сверхстабильных лазерных систем, где параметры пучка (пространственная структура, расходимость и т.п.) практически не зависят от величины выходной мощности генерации.

Помимо фундаментальных аспектов исследований, значительное внимание было уделено изучению и оптимизации спектрально-генерационных характеристик активных элементов различных конфигураций, включая пластины, диски, слэбы и стержни, а также разработке на их основе ряда лабораторных макетов высокоэффективных излучателей двухмикронного диапазона. Необходимо отметить, высокая оптическая плотность кристаллов в области 800...810 нм позволяет избежать использования сложных многопроходных схем для накачки активного элемента полупроводниковыми гетероструктурами, что, в свою очередь, существенно снижает массо-габаритные параметры излучателей и повышает их надежность.

В целом, основные результаты диссертационной работы и сформированный на их основе опережающий научно-технический задел позволили выйти на лидирующие позиции по ряду ключевых направлений, в

том числе по реализованной мощности генерации (свыше 15 Вт, слэбы) и спектральному диапазону перестройки (более 200 нм, композитные структуры).

Научная новизна. В ходе выполнения диссертационной работы были задействованы разноплановые взаимодополняющие методы исследования всех основных характеристик кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, что в конечном итоге позволило получить ряд принципиально новых результатов, представляющих значительный научный и практический интерес. Применительно к научной составляющей, новизна результатов заключается в следующем :

- Впервые получен и детально проанализирован полный комплекс данных по спектроскопическим характеристикам кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных ионами тулия и гольмия, который включает моделирование основных процессов переноса энергии в системе взаимодействующих ионов, расчет сечений переходов и оценку коэффициента ненасыщенного усиления кристаллов в зависимости от величины инверсии заселенностей;
- Комплексные исследования эффекта «фотонной лавины» в кристаллах двойных калий-иттриевых и калий-иттербий-иттриевых вольфраматов, активированных тулием, проведены впервые. Предложена оригинальная аналитическая модель, описывающая основные особенности развития «фотонной лавины», на основании которой были определены кинетические и спектроскопические параметры этого эффекта. Экспериментально показано, что при накачке кристаллов импульсным излучением неодимовых лазеров (Nd:YAG в режиме свободной генерации, λ = 1064 нм) величина инверсии заселенностей тулия может достигать 70…80% при коэффициенте ненасыщенного усиления до 100 Дб/см в диапазоне 1.8-1.94 мкм.
- Предложен и реализован новый метод измерения термических коэффициентов оптического пути (ТКОП), прямо связанных с оптической силой термоиндуцированной (термической) линзы. Для кристаллов двойных калий-

редкоземельных вольфраматов с различными концентрациями ионов-активаторов впервые определены спектральные зависимости ТКОП в интервале 400…2100 нм На основании результатов измерений и их последующего анализа сделан вывод о наличии в кристаллах «атермальных» направлений с нулевым ТКОП, которые зависят от длины световой волны и ее поляризации;

- Для кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов с тулием впервые проведен сравнительный анализ генерационных характеристик различных форм активных элементов (пластины, диски, слэбы, стержни). В результате комплексной оптимизации параметров резонаторов, включая компенсацию термооптических линз, разработан ряд лабораторных макетов лазерных излучателей с диодной накачкой с выходной мощностью свыше 15 Вт на длине волны 1.91 мкм, удельным энергосъемом более 1 кВт/см^2 и полной оптической эффективностью свыше 50%, что находится на уровне современных мировых достижений;

- Детально исследован режим пассивной модуляции тулиевых лазеров с помощью насыщающихся поглотителей на основе кристаллов Cr^{2+}:ZnSe, впервые получены рекордно короткие для этого метода длительности импульсов (менее 10 нс), а также достигнута средняя выходная мощность лазерного излучения на уровне 3 Вт при частоте повторения импульсов до 10 кГц. На основе этих результатов сделан вывод о том, что средняя мощность генерации в режиме пассивной модуляции добротности может превышать 10 Вт при частоте повторения импульсов 20…50 кГц и спектральном диапазоне перестройки 1.85…1.95 мкм;

- В приближении локального термодинамического равновесия впервые проведен полный расчет заселенности метастабильных уровней тулия и гольмия в со-допированных кристаллах при произвольных уровнях возбуждения. Получены новые экспериментальные результаты, уточняющие характеристики энергообмена. По данным спектроскопических измерений определены относительные заселенности ионов тулия и гольмия на метастабильных

уровнях, подтвердившие концепцию локального термодинамического равновесия На этой основе были сформулированы критерии оптимизации состава кристаллов для непрерывных и импульсных лазерных излучателей двухмикронного диапазона на переходе $^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$ ионов гольмия;

- В результате оптимизации состава соактивированных тулий-гольмиевых кристаллов для микрочип-конфигурации резонатора реализована дифференциальная эффективность генерации до 36%, при этом выходная мощность на длине волны 2056 нм составила 480 мВт - оба этих параметра находятся на уровне лучших мировых достижений;

- 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 рекордной дифференциальной эффективностью 66% и выходной мощностью 1.6 Вт. Показана принципиальная возможность дальнейшего увеличения выходной мощности до 10…100 Вт, в зависимости от условий накачки и обеспечения необходимых температурных режимов активных элементов;

- На основании всей совокупности полученных результатов сделан вывод о перспективности использования кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных тулием и гольмием, для разработки специализированных источников лазерного излучения с выходной мощностью 50…100 Вт, обеспечивающих непрерывный и импульсно-периодический режим генерации с высокой пиковой интенсивностью световых импульсов.

<u>Теоретическая и практическая значимость работы.</u> Двухмикронный спектральный диапазон представляет значительный интерес для технологических, биомедицинских и информационных приложений. Его уникальность обусловлена тем, что, с одной стороны, в диапазоне 1.8-2.0 мкм поглощение воды увеличивается десятикратно, достигая пика в 100 см$^{-1}$ для 1.95 мкм, поэтому двухмикронные перестраиваемые лазеры имеют широкий

прикладной потенциал в биомедицине, офтальмологии и малоинвазивной медицине, включая лазерную липотрипсию. С другой стороны, спектральный диапазон ~ 2.1 мкм примыкает к краю прозрачности атмосферы, поэтому двухмикронные излучатели могут быть использованы для эффективной реализации многоканальной оптической связи, передачи информации, квантовой сенсорики. Отдельный прикладной интерес представляет использование импульсных двухмикронных лазеров для накачки параметрических преобразователей, а также для технологических применений по обработке пластмасс, включая высокопроизводительные 3D принтеры.

Опережающий научно-технический задел, сформированный в ходе выполнения работы, является ключевым компонентом для разработки высокоэффективных лазерных излучателей и оптических усилителей двухмикронного диапазона, обладающих уникальными параметрами мирового уровня по всей совокупности спектрально-генерационных характеристик.

В основе предлагаемых решений лежат :

- Разработанный метод измерения термических коэффициентов оптического пути (ТКОП), который может быть адаптирован для определения тепловых линз в любых прозрачных твердых телах, включая лазерное стекло и оптическую керамику. Полученные результаты будут использованы при оптимизации геометрических размеров активных элементов и проектировании резонаторов твердотельных лазеров;
- Оригинальный метод расчета заселенности метастабильных уровней тулия и гольмия в со-допированных кристаллах при произвольных уровнях возбуждения позволяет сформулировать критерии оптимизации состава активных элементов для лазерных излучателей и оптических усилителей двухмикронного диапазона на переходе $^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$ ионов гольмия с целью максимальной эффективности использования энергии накачки, что имеет большое значение для разработки лазерных систем с повышенной мощностью излучения;

- Результаты комплексных исследований эффекта "фотонной лавины" в кристаллах двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных тулием, могут быть использованы для создания непрерывных и импульсных оптических усилителей в диапазоне 1.8-1.9 мкм с коэффициентом ненасыщенного усиления до 100 Дб/см;
- Результаты сравнительного анализа спектральных зависимостей коэффициентов усиления и генерационных характеристик кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов с тулием и гольмием будут применены для разработки специализированных лазерных источников с заданными массогабаритными параметрами при средней выходной мощности излучения до 100 вт и удельном энергосъеме более 1 кВт/см^2 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 для обработки пластмасс и полимерных материалов, а также найдут применение в лазерных приборах различного назначения, в том числе эффективных источниках накачки параметрических преобразователей, системах оптической связи и передачи информации, экологического мониторинга, медицинского лазерного оборудования, приборов и устройств квантовой сенсорики.

Методология и методы исследований. В рамках реализации целей и задач диссертационной работы были разработаны и успешно апробированы новые методы и подходы. В частности, в ходе исследований был предложен оригинальный способ измерения термооптических параметров, а также задействован комплексный подход в определении параметров лазерных кристаллов с помощью взаимодополняющих методик, что, например, позволило получить взаимосогласованные значения сечения переходов из коэффициентов

ненасыщенного усиления и, независимым образом, из спектроскопических измерений. При теоретическом моделировании были максимально учтены основные особенности процессов энергообмена в лазерных кристаллах, что позволило добиться хорошей точности описания экспериментальных результатов и получить достоверные значения физических параметров.

Все исследования были выполнены на современном лабораторном оборудовании, включающем универсальный спектроскопический стенд на базе монохроматора МДР-204, импульсный Nd:YAG лазер, диодные источники накачки с полной оптической мощностью до 60 Вт на длине волны 0.81мкм, набор ФЭУ и ИК-фотоприемников, а также высококачественные оптические и механические компоненты и комплектующие, что позволило проводить измерения спектров пропускания и люминесценции лазерных кристаллов в диапазоне длин волн 0.3-4 мкм с метрологической точностью.

Для улучшения эксплуатационных параметров активных элементов, прежде всего для улучшения коэффициентов теплосъема с боковых поверхностей лазерных кристаллов, были задействованы собственные технологические возможности напыления высокопрочных металлических покрытий методом анодной вакуумной дуги. Данное техническое решение было защищено патентом Российской Федерации № 2530073 от 12 августа 2014 года [П9]. Разработанная технология металлизации была успешно применена для изготовления активных элементов дисковых лазеров и улучшения отражательных характеристик диэлектрических зеркал.

<u>Положения, выносимые на защиту.</u>

1. Термические коэффициенты оптического пути (ТКОП) прозрачных материалов могут быть измерены с помощью определения угла отклонения зондирующего пучка при поперечном градиенте температур в исследуемом образце, с воспроизводимостью 10^{-7}/K и абсолютной погрешностью до 10^{-6}/K.

2. Использование концепции локального термодинамического равновесия позволяет провести полный расчет заселенностей метастабильных уровней

тулия и гольмия в со-допированных кристаллах при произвольных уровнях возбуждения и на этой основе обосновать критерии оптимизации состава активных элементов для лазерных излучателей и оптических усилителей двухмикронного диапазона.

3. Эффект "фотонной лавины" в кристаллах двойных калий-редкоземельных вольфраматов с тулием при их накачке излучением импульсных неодимовых лазеров обеспечивает достижение инверсии заселенностей на уровне 75%...80% при полном оптическом КПД около 10%.

4. Слэб-конфигурация активных элементов, активированных тулием, позволяет реализовать эффективность генерации лазеров двухмикронного диапазона свыше 40% при выходной мощности более 15 Вт, обеспечивая ширину спектрального диапазона перестройки более 100 нм.

5. Дисковые активные элементы на основе эпитаксиальных и композитных структур двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных тулием и гольмием, обладают величиной удельного энергосъема свыше 1 кВт/см^2 при эффективности генерации 45…65%, что обуславливает перспективность этих лазерных материалов для разработки специализированных источников когерентного излучения с выходной мощностью на уровне 50…100 Вт.

6. Внутренние термомеханические напряжения в композитных структурах $Tm:KLu(WO_4)_2/KLu(WO_4)_2$ оказывают значительное влияние на форму и ширину спектров генерации. В частности, подбор оптимальной геометрии активных элементов и технологических условий синтеза композитов позволил экспериментально реализовать сверхширокополосную генерацию в спектральном интевале 1.8-2.0 мкм.

7. Использование насыщающихся поглотителей на основе Cr^{2+}:ZnSe обеспечивает режим пассивной модуляции добротности тулиевых лазеров с рекордно короткими длительностями световых импульсов, до 7 нс, и эффективностью свыше 80% по отношению к непрерывной генерации.

Опубликование результатов. Основные результаты работы изложены в 29 статьях [П1-П8, П10-П30], опубликованных в периодических рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК либо приравненных к ним (базы данных РИНЦ, Scopus, Web of Science), и одном патенте РФ № 2530073 [П9].

Апробация работы. Результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались на 16 международных конференциях [П31-П46], в том числе Int. Conf. on Lasers, Applications, and Technologies (LAT 2007, Minsk, Belarus); V Int. Symposium on Modern Problems of Laser Physics (MPLP 2008, Novosibirsk, Russia); Solid State Lasers XIX: Technology and Devices, San Francisco, California, USA (2010); VI Int. Symposium on Modern Problems of Laser Physics (MPLP 2013, Novosibirsk, Russia); Int. Conf. «Laser Optics 2016» (LO-2016, St. Peterburg, Russia); Optics InfoBase Conference Papers Part F75-ASSL (Nagoya, Japan, 2017); Int. Conf. «Laser Optics 2018» (ICLO-2018, St. Peterburg, Russia); 8th Pacific-Rim Laser Damage (PLD-2018, Yokohama, Japan). Общее число опубликованных автором работ - 65, по теме диссертации - 46.

Личный вклад автора заключается в выполнении основного объема теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включая разработку теоретических моделей в гл. 3 и 7, методик экспериментальных исследований, проведение исследований, анализ и подготовку результатов к публикациям в рецензируемых научных изданиях.

Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения и двух приложений. Общий объем диссертации составляет 260 страниц, включая 112 рисунков, 11 таблиц по тексту, список литературы из 279 наименований, а также список работ, опубликованных по теме диссертации.

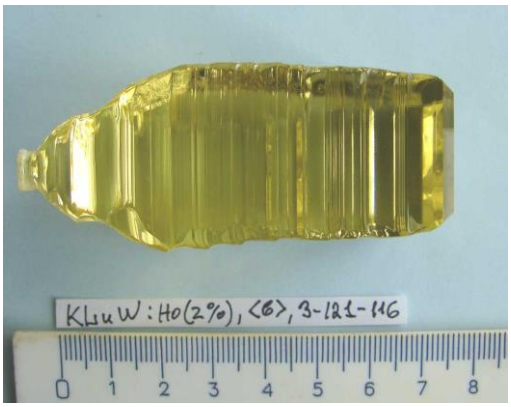
Основное содержание работы.

<u>В первой главе</u> подробно изложены технологии синтеза, представлены структурные, физические и оптические характеристики кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов $KRe(WO_4)_2$, где Re = Gd, Y, Lu (KReW), а также подробно изложен новый способ измерения температурных коэффициентов оптического пути (ТКОП), являющийся базовым параметром для расчета величины термической линзы.

Монокристаллы двойных калий-редкоземельных вольфраматов были выращены в Институте неорганической химии СО РАН на лабораторной кристаллизационной установке НХ620Н. Рост кристаллов проводился из платиновых тиглей диаметром 70 и высотой 120 мм с толщиной стенки до 2 мм в атмосфере воздуха.

В результате оптимизации условий синтеза и технологии выращивания были получены высококачественные крупногабаритные структурно-совершенные кристаллы двойных калий-редкоземельных вольфраматов, образцы которых представлены на рисунке 1. Типовой объем кристаллической були составляет около 20…30 см^3.

(а)



(б)

Рисунок 1 – Выращенные на ростовой установке НХ620Н монокристаллы 4%Tm:KLuW (а) и 2%Ho:KLuW (б).

Все кристаллы семейства $KRe(WO_4)_2$ (Re = Gd, Y, Lu) являются изоструктурными и относятся к центросимметричному классу 2/m моноклинной сингонии с пространственной группой C^6_{2h}, Z=4. Параметры элементарной

ячейки a ~ 8.05Å, b ~ 10.35Å, c ~ 7.54Å незначительно зависят от величины ионного радиуса редкоземельных ионов, входящих в состав кристаллической матрицы KReW, при этом угол β между a и c (~ 94º) также изменяется несущественно, менее половины градуса. Нелегированные, без редкоземельных допантов, кристаллы двойных калий-редкоземельных вольфраматов представляют собой бесцветные, прозрачные, твердые кристаллы, которые не растворимы в воде, в органических растворителях и практически не растворимы в слабо концентрированных неорганических кислотах (HCl, H_2SO_4 и др.).

В силу низкой симметрии (пространственная группа 2/m) кристаллы KReW являются двулучепреломляющими, при этом одна из осей (N_p) оптической индикатрисы совпадает с кристаллографической осью симметрии 2-го порядка b. Две другие оси, N_m и N_g, лежат в плоскости a – c, угол β ~ 94^0 между a и c близок к прямому. Основные параметры кристаллов представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Базовые физические характеристики кристаллов KReW.

Параметр	Величина
Температура полиморф. перехода / плавления	~ 1030 ºC / 1060 ºC
Структура – моноклинная центросимметричная	Группа C^6_{2h} – 2/m
Параметры элементарной ячейки KGW (KYW)	a = 8.09(5) Å, b = 10.37(5) Å, c = 7.58(4) Å, β = 94º (94.43º)
Область прозрачности (1 $см^{-1}$ на 1 мм толщины)	365-5110 нм
Ориентировка осей оптической индикатрисы	$N_p \parallel b \perp N_m \perp N_g$, $\angle(c,N_g) \sim 18^o$
Показатели преломления	$n_p \approx n_m \approx n_g \approx 2$
Удельная теплоемкость KLuW (KYW) при 25 ºC	324(500) Дж/кг·гр
Теплопроводность вдоль направлений $a \mid b \mid c$	3.1|2.4|3.9 Вт/м·гр
Коэффициенты линейного расширения по $a\|b\|c$	$\approx 11\|2.8\|19 \cdot 10^{-6}$ ºC
Класс твердости по Моосу	4.5-5
Микротвердость по Кнупу $a \mid b \mid c$, кг/$мм^2$	≈ 370 | 390 | 460
Коэффициент непрерывного ВКР-усиления	≈ 3…4 см/ГВт

При нагреве активных элементов твердотельных лазеров вследствие неполного преобразования энергии накачки в энергию лазерного излучения в объеме активного элемента возникает неоднородное распределение температур,

приводящее к фазовым искажениям светового пучка. Дополнительный набег фаз обусловлен двумя взаимосвязанными факторами, а именно (1) неоднородным расширением кристаллического материала по направлению луча, $\Delta\varphi \sim \alpha n L \Delta T/\lambda$ (α, n и L – коэффициент линейного расширения, показатель преломления и длина кристалла вдоль луча, ΔT – изменение температуры при включении накачки, λ – длина волны) и (2) зависимостью показателя преломления от температуры, $\Delta\varphi \sim (dn/dT)L\Delta T/\lambda$, где величина dn/dT вдоль луча определяется матрицей термооптических коэффициентов $\partial n/\partial T$.

Измерение температурных коэффициентов оптического пути $\partial n/\partial T + (n - 1)\alpha$ кристалла KLuW было проведено по предложенной автором методике «отклонения зондирующего луча», probe-beam deflection technique [П10], схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2(а).

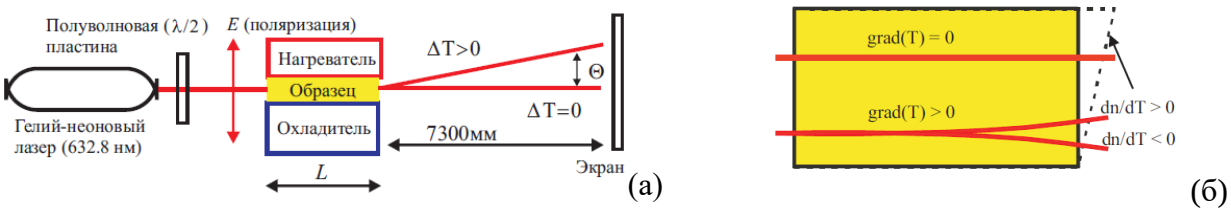


Рисунок 2 (а) – Схема экспериментальной установки по измерению термооптических коэффициентов, (б) – Эквивалентная оптическая схема распространения зондирующего луча в образце.

«Зондирующий» лазерный луч проходит через образец кристалла в форме параллелепипеда, установленный между нагревателем и охладителем таким образом, чтобы поток тепла и, соответственно, градиент температуры, был перпендикулярен направлению распространения луча. Так как в кристалле нет внутренних источников тепла, то градиент температур будет одинаков по всему объему образца, $\mathrm{grad}(T) = (T_h - T_c)/H$, здесь T_h, T_c – температура поверхностей кристалла, прилегающих к нагревателю и охладителю, H – высота образца. Линейное изменение температуры и показатель преломления внутри образца (вдоль высоты «H») оптически эквивалентно некоторому клину, отклоняющему зондирующий луч от первоначальной траектории $\mathrm{grad}(T) = 0$, как показано на

рисунке 2(б). На основании общих соотношений распространения лучей в неоднородных средах легко получить зависимость для угла отклонения θ [П10],

$$\theta = \left(\frac{\partial n}{\partial T} + (n-1)\alpha \right) \frac{(T_h - T_c)L}{H}. \quad (1)$$

Таким образом, из измерений угла отклонения θ можно определить так называемый температурный коэффициент оптического пути (Thermal Coefficient of Optical Path, или TCOP), TCOP = $\partial n/\partial T + (n - 1)\alpha$. Из измерений углов отклонения θ для всех возможных комбинаций поляризации и ориентации образцов кристалла KLuW, вырезанных по осям индикатрисы N_p, N_m и N_g, была определена матрица TCOP в спектральном интерале 0.4-2 мкм, [П10, П11].

<u>Во второй главе</u> рассмотрены спектроскопические характеристики кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных ионами тулия и гольмия. Штарковская структура энергетических уровней ионов Tm^{3+} и Ho^{3+} в KReW была определена в работах немецких и испанских коллег, в частности, V. Petrov (MBI) и F. Dias (FiCMA). Энергетическая структура первых двух уровней (основного и метастабильного) представлена в Таблице 2.

Таблица 2 – Штарковские компоненты Tm^{3+} и Ho^{3+} в матрице KLuW.

Tm:KLuW	
$^{2S+1}L_J$	Энергия штарковских компонент, см$^{-1}$
$^3H_6$	0, 135, 155, 224, 247, 256, 279, 329, 346, 359, 513, 522, 530
$^3F_4$	5663, 5711, 5724, 5768, 5876, 5963, 5976, 5981, 6002
Ho:KLuW	
$^{2S+1}L_J$	Энергия штарковских компонент, см$^{-1}$
$^5I_8$	0, 4, 6, 11, 21, 32, 43, 62, 106, 118, 144, 183, 209, 250, 292
$^5I_7$	5100, 5101, 5107, 5109, 5147, 5184, 5199, 5208, 5211, 5214, 5219, 5230, 5233, 5253, 5288

Для оценки параметров лазерной генерации по «квази-трехуровневой» схеме и оптимизации состава активных элементов большое значение имеют сечения поглощения σ_a и излучения σ_e на лазерном переходе в основное состояние, комбинация которых позволяет определить сечение ненасыщенного усиления σ_g

в зависимости от относительной заселенности верхнего лазерного уровня. Величину сечения поглощения σ_a легко определить по спектрам пропускания плоскопараллельного образца с толщиной L и концентрацией активных ионов N,

$$\sigma_a(\lambda) = -\ln(A(\lambda))/(NL), \qquad (2)$$

где $A(\lambda) < 1$ – относительная доля прошедшего через образец излучения с длиной волны λ, откорректированная на величину френелевских потерь. Сечение излучательных переходов σ_e можно рассчитать по спектральной интенсивности люминесценции $P(\lambda)$ и времени жизни τ метастабильного уровня согласно формуле Фёхтбауэра-Ладенбурга

$$\sigma_e = \frac{\lambda^3 P(\lambda)}{8\pi n^2 C\tau \int P(\lambda) d\left(\ln(\lambda)\right)} \qquad (3)$$

здесь n – показатель преломления кристалла, C – скорость света в вакууме.

Систематическое изучение спектрально – генерационных характеристик кристаллов Tm:KYW в области комнатных температур было впервые проведено в [П1]. Основные результаты этой работы, в том числе спектральные зависимости сечений переходов σ_a и σ_e, были неоднократно подтверждены исследованиями испанских, немецких и белорусских коллег.

Для лазерных переходов из метастабильного в основное состояние легко определить сечение усиления σ_g в зависимости от относительной величины инверсии заселенностей $\beta = N_2/N$,

$$\sigma_g = \beta\sigma_e - (1-\beta)\sigma_a, \qquad (4)$$

где N_2 – заселенность метастабильного состояния, N – концентрация лазерных ионов. Величина σ_g имеет особую важность, т.к. она определяет спектральную зависимость логарифмического коэффициента усиления кристалла G,

$$G = \ln(I/I_0) = \sigma_g NL, \qquad (5)$$

где I_0 и I – интенсивности светового потока на входе и выходе из активного элемента длиной L и концентрацией активных центров N. В случае неоднородного распределения инверсии заселенностей G определяется интегрированием $\sigma_g N$ по длине кристалла в направлении распространения луча.

На рисунке 3 представлены сечения усиления σ_g для кристаллов Tm:KLuW и Ho:KYW при поляризации света вдоль оси оптической индикатрисы N_m. Необходимо отметить, что σ_g для двойных вольфраматов существенно (в несколько раз) превышают аналогичные величины для кристаллов YAG и YLF.

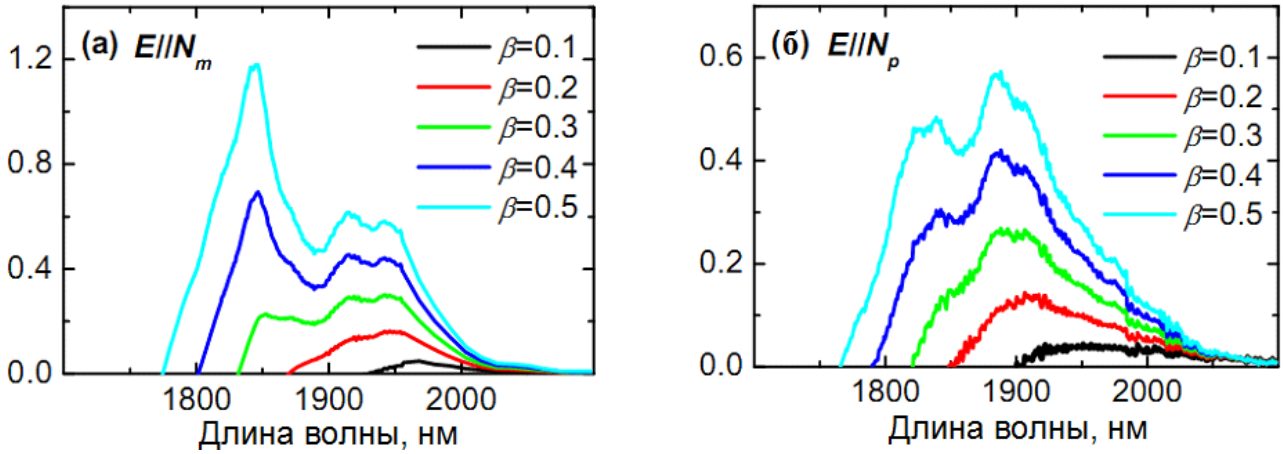


Рисунок 3 – Сечения (в единицах 10^{-20} см^2) усиления σ_g на переходах $^3F_4 \leftrightarrow {}^3H_6$ для кристалла Tm:KLuW (а) и $^5I_7 \leftrightarrow {}^5I_8$ для кристалла Ho:KYW (б).

Взаимодействию ионов тулия и гольмия в лазерных кристаллах посвящено большое число экспериментальных и теоретических работ, в которых подробно рассмотрены механизмы безызлучательной (ап-конверсионной) разгрузки метастабильных состояний $^3F_4$ и $^5I_7$. В целом, был сделан вывод о том, что скорость ап-конверсионных процессов быстро возрастает с увеличением как концентрации ионов, так и инверсии заселенностей. В частности, в [П1] был определен ряд кинетических констант кристалла 15%Tm:KYW, что позволило в дальнейшем оптимизировать величину допирования кристаллов KReW с целью достижения максимальной эффективности и мощности генерации.

<u>В третьей главе</u> детально изучен эффект фотонной лавины в кристаллах калий-иттриевых и калий-иттербий-иттриевых вольфраматов, активированных тулием. Этот эффект обусловлен наличием эффективной кросс-релаксации, которая заключается в том, что ион тулия в возбужденном состоянии $^3H_4$ передает примерно половину энергии близлежащему иону в основном состоянии $^3H_6$, в результате чего оба иона переходят в метастабильное состояние $^3F_4$. Кросс-релаксация становится достаточно заметной при

концентрациях тулия свыше 1 ат. %, и становится доминирующим механизмом разгрузки уровня $^3H_4$ при концентрации тулия свыше 3…5%. Формирование фотонной лавины при наличии эффективной кросс-релаксации происходит следующим образом. Ион тулия в состоянии $^3F_4$ поглощает квант накачки и переходит на уровень $^3H_4$, с которого он и другой ион в основном состоянии переходят на метастабиль $^3F_4$. В результате этого процесса поглощение каждого кванта накачки с уровня $^3F_4$ увеличивает заселенность этого уровня на единицу, и в условиях интенсивной накачки заселенность $^3F_4$ будет расти экспоненциально быстро. В приближении кинетических уравнений начальный участок развития фотонной лавины при импульсной описывается соотношением [П12]

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\sigma_{\mathrm{AB}} N_{\mathrm{A}} L}{\eta}\left(exp\left(\eta \sigma_{25} \int_0^t I dt \right) + \eta - 1 \right) , \qquad (6)$$

а после окончания импульса накачки заселенность $^3F_4$ изменяется как

$$\frac{N_2(t)}{N_2(0)} = \frac{\exp(-t/\tau_2)}{1 + k_{\Sigma\mathrm{Tm}} N_2(0) \tau_2 (1 - \exp(-t/\tau_2))} . \qquad (7)$$

Здесь I – мощность накачки, ΔI – поглощаемая кристаллом мощность, $\Delta I << I$, $\sigma_{\mathrm{AB}} N_{\mathrm{A}} L$ – начальное поглощение образца толщины L, η – эффективность кросс-релаксации, σ_{25} – сечение перехода из метастабильного состояния $^3F_4$ на группу уровней $^3F_3$+$^3F_2$, которые сразу релаксируют на уровень $^3H_4$ [П12], N_2 и τ_2 – заселенность и время жизни метастабиля $^3F_4$, $k_{\Sigma\mathrm{Tm}}$ – коэффициент ап-конверсии [П1, П12]. В случае содопирования кристалла тулием и иттербием (с концентрацией N_{A}) параметр σ_{AB} является сечением поглощения накачки ионами иттербия, который обеспечивает небольшую начальную заселенность уровня $^3F_4$. Если допирование иттербием отсутствует, то тогда $\sigma_{\mathrm{AB}} = \sigma_{25}$, а N_{A} соответствует термической заселенности уровня $^3F_4$, которая в области комнатных температур составляет около 10^{-11} от общего числа ионов тулия в кристалле, в соответствии с данными табл. 2. Необходимо отметить, что (6)

справедливо при относительно небольших заселенностях уровня 2, когда $N_2 << N_1$, поскольку при N_2, сравнимом с N_1, эффективность кросс-релаксации η уменьшается в результате истощения основного состояния, при этом дальнейшее увеличение поглощения кристалла относительно невелико. Эффект фотонной лавины имеет пороговый характер, т.е. начинается с определенной интенсивности оптической накачки, поскольку для формирования лавины скорость увеличения числа ионов в состоянии $^3F_4$ за счет кросс-релаксации должна превышать скорость люминесцентных переходов $^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$. Далее, при высоких плотностях мощности накачки фотонная лавина будет выходить на насыщение, так как эффективность кросс-релаксации при уменьшении заселенности основного состояния $^3H_6$ быстро падает, и кроме того, возрастает удельная доля различных ап-конверсионных процессов, приводящих к ускоренному расселению метастабильного уровня $^3F_4$.

Экспериментальные исследования кинетики фотонной лавины первоначально были выполнены на образцах кристалла 7%Tm:50%Yb:KYW, где поглощение излучения накачки с длиной волны 1064 нм ионами иттербия обеспечивало небольшую начальную заселенность метастабильного уровня $^3F_4$.

Схема экспериментов изображена рисунке 4 : линейно-поляризованное (по N_m) излучение импульсного Nd:YAG лазера с длиной волны 1064 нм фокусировалось на поверхность кристалла К в пятно диаметром 230±30мкм.

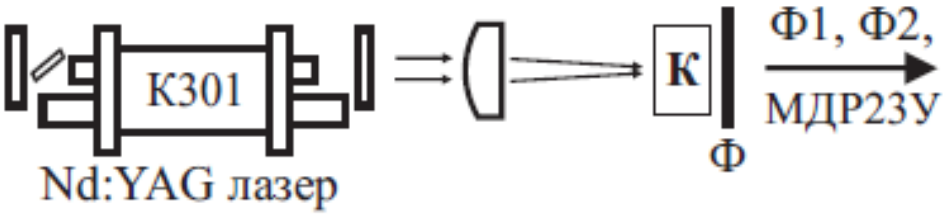


Рисунок 4 – Схема эксперимента по исследованию кинетики фотонной лавины, К – кристалл 7%Tm:50%Yb:KYW, Ф - фильтр, Ф1, Ф2 – фотоприемники.

Кинетика пропускания накачки регистрировалась фотодиодом ФД256 (Ф1), спектр и кинетика люминесценции в интервале 1600-2000нм были измерены с помощью монохроматора МДР-23У и фотосопротивления ФР-185 (Ф2). Более подробное описание стенда и методик измерений приведено в [П12].

На рис. 5 изображены кинетика пропускания исследуемого кристалла К состава 7%Tm:50%Yb:KYW и интенсивность его люминесценции по окончании импульса, аппроксимированные зависимостями (6) и (7), соответственно.

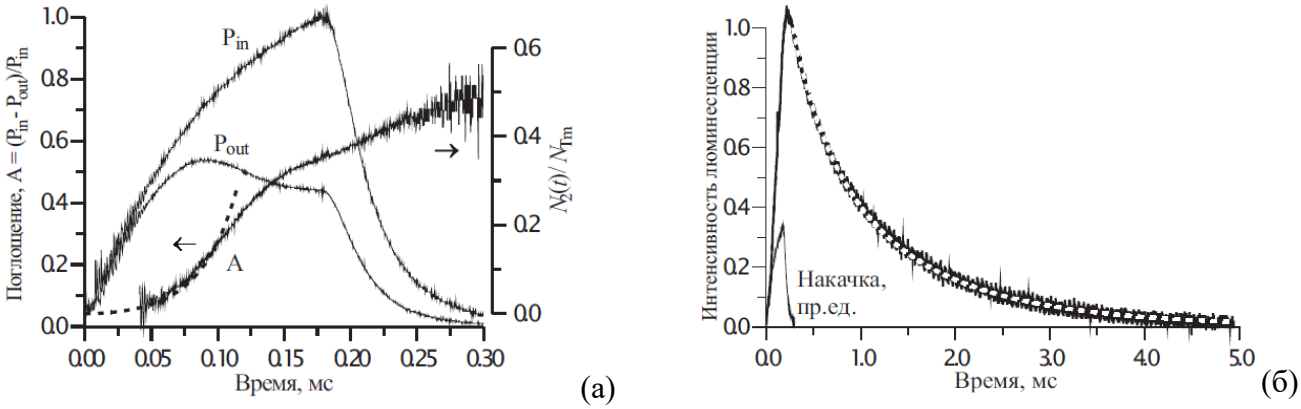


Рисунок 5 – Кинетика поглощения импульсного излучения Nd:YAG лазера кристаллом 7%Tm:50%Yb:KYW (а), и кинетика его люминнсценции (б).

Из аппроксимации (6) оказалось возможным получить только оценку сечения σ_{25}, $\sigma_{25}=1\div3\cdot10^{-20}$см^2 [П12], при этом на момент окончания импульса инверсия заселенности, согласно обоим аппроксимациям, превышает 50%. Этот вывод был подтвержден прямыми измерениями коэффициента ненасыщенного усиления на переходе $^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ для кристалла 10%Tm:KYW [П13], где также была определена эффективность образования фотонной лавины, см. рис. 6.

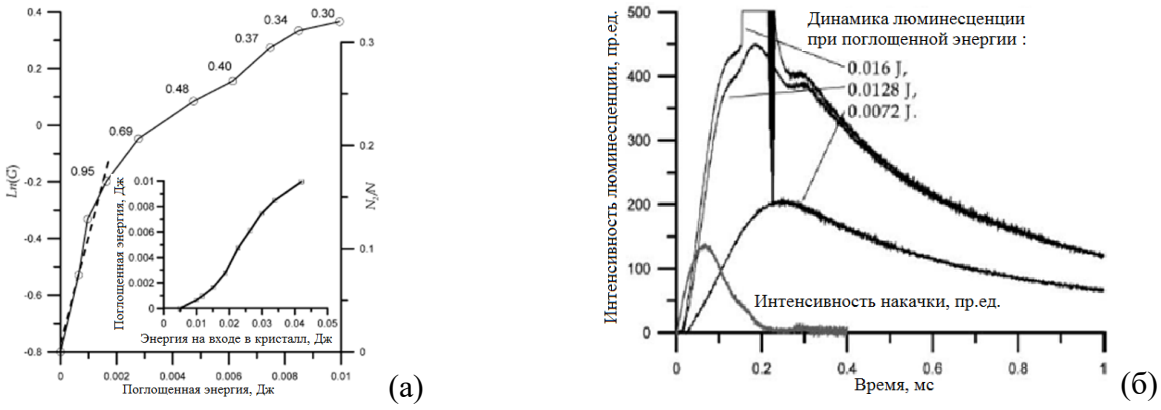


Рисунок 6 – Эффективность образования фотонной лавины (а) и кинетика люминесценции кристалла 10%Tm:KYW в зависимости от энергии накачки.

Согласно данным рис. 6(б) [П13], инверсия заселенностей метастабиля $^3F_4$ может достигать 70% при эффективности лавины около 15%. Последнее может представлять значительный интерес для создания новых типов оптических усилителей, в том числе каскадных усилителей мощности на диапазон ~1.9 мкм.

<u>В четвертой главе</u> представлены результаты исследований спектрально-генерационных характеристик миниатюрных слэб-лазеров на основе кристаллов калий-лютециевых вольфраматов, активированных тулием, как в непрерывном режиме генерации, так и в режиме пассивной модуляции добротности с помощью поликристаллического насыщающегося поглотителя Cr^{2+}:ZnSe.

Тепловыделение в активном элементе является одним из наиболее значимых факторов, ограничивающих предельную мощность генерации из-за формирования короткофокусных термических линз, влияющих на устойчивость резонатора, а также возникновения больших термомеханических напряжений, доходящих в предельных случаях до порога разрушения кристалла. Использование активных элементов специальных конфигураций с большой площадью теплоотвода – слэбов и дисков (см. след. Раздел) – позволяет уменьшить величину перепада температур в области накачки и дает возможность в десятки и сотни раз увеличить выходную мощность генерации.

Необходимо отметить, что оптимизация концентрации тулия и формы активного элемента является достаточно сложной задачей, учитывающей несколько взаимопротивоположных тенденций. В частности, порог генерации по квази-трехуровневой схеме пропорционален полному числу ионов тулия в области накачки, т.е. его целесообразно максимально уменьшить. Если объем активного элемента будет слишком мал, то удельная площадь поверхности тоже будет сравнительно невелика, что ограничит предельную мощность генерации, поэтому концентрация тулия должна быть минимально возможной. С другой стороны, при малых концентрациях тулия эффект кросс-релаксаци не даст заметного вклада в увеличение заселенности метастабильного уровня $^3F_4$, т.е. эффективность генерации значительно уменьшится. С учетом заданной плотности мощности накачки наиболее оптимальным вариантом оказалась слэб-конфигурация активного элемента с геометрическими размерами ~ 6 мм вдоль направления N_m, ~ 0.9 мм вдоль N_p, и ~ 0.25 мм вдоль N_g, изготовленного из кристалла 5%Tm:KLuW, как показано на рис. 7, см. также [П3].

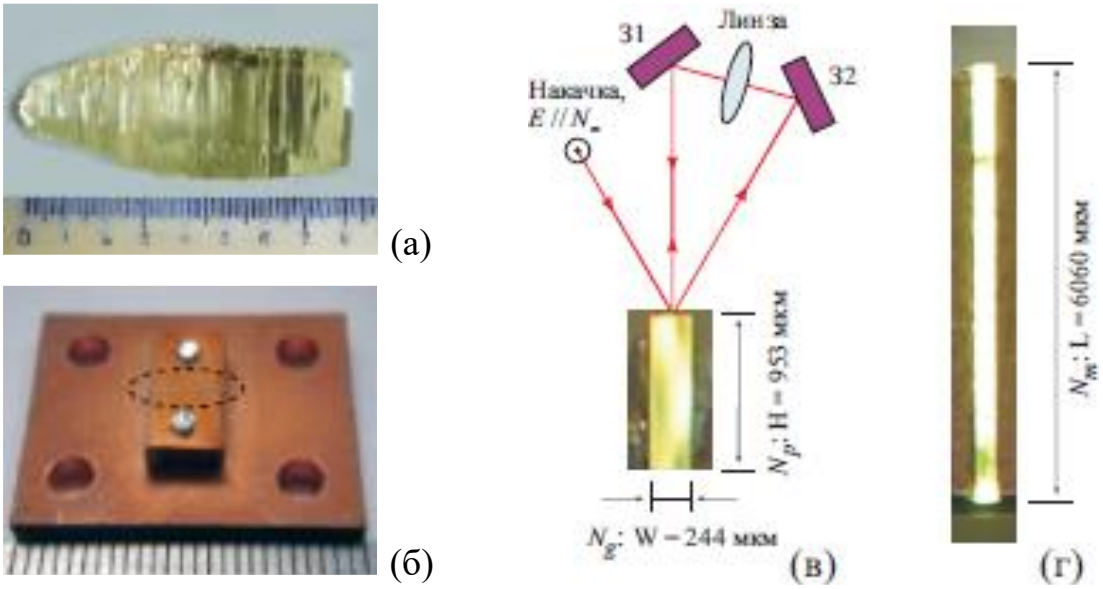


Рисунок 7 – Фотографии були 5%Tm:KLuW (а), слэба на медном теплоотводе (б), схема накачки и вид элемента с торца (в), вид элемента сверху (г).

Спектрально-генерационые характеристики мини-слэба 5%Tm:KLuW с объемом активной среды менее 2 мм^3 представлены на рис. 8, накачка слэба осуществлялась непрерывным излучением диодной линейки с λ=806 нм [П3].

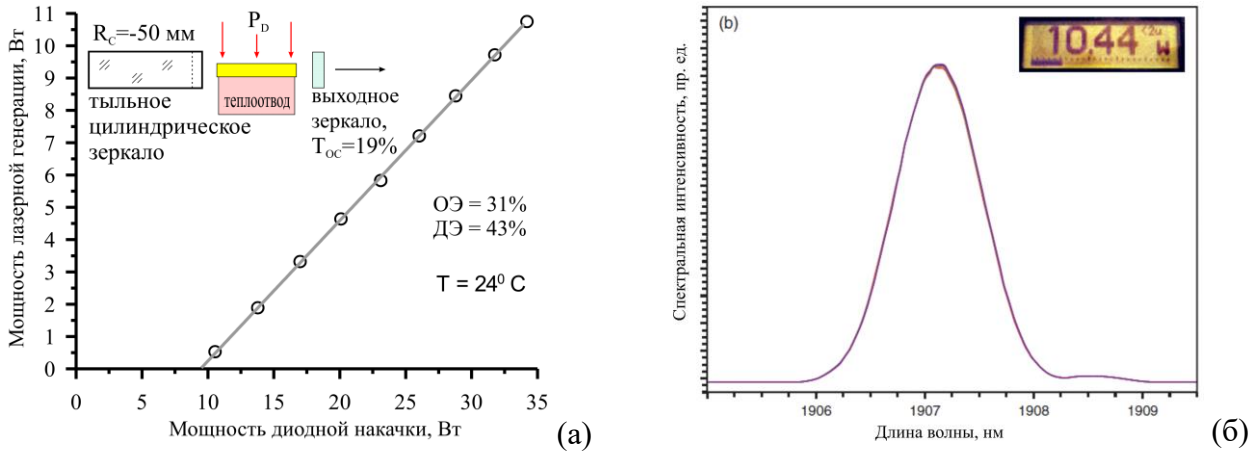


Рисунок 8 – Генерационные (а) и спектральные (б) характеристики одного из первых слэб-элементов 5% Tm:KLuW в режиме непрерывной накачки. На вставке (а) показана конфигурация резонатора.

Величина термической линзы, определенная в [П3] по изменению профиля зондирующего луча в дальней зоне, полностью соотвествует параметрам ТКОП, измеренным методом отклонения луча в условиях поперечного температурного градиента. Хорошая взаимосогласованность этих результатов подтверждает достоверность методики измерений ТКОП [П10].

В работе [П5] были подробно исследованы характеристики слэб-лазеров с активными элементами из кристалла 5%Tm:KLuW, ориентированными по оси N_m (N_m - срез) и по атермальному направлению AT, для которого температурный коэффициент оптического пути не превышал $0.5 \cdot 10^{-6}$/°K в области длин волн ~ 1900 нм, т.е. термическая линза практически равна нулю. Накачка активных элементов осуществлялась двумя линейками лазерных диодов с совокупной оптической мощностью до 60 Вт, основные результаты представлены на рис.9.

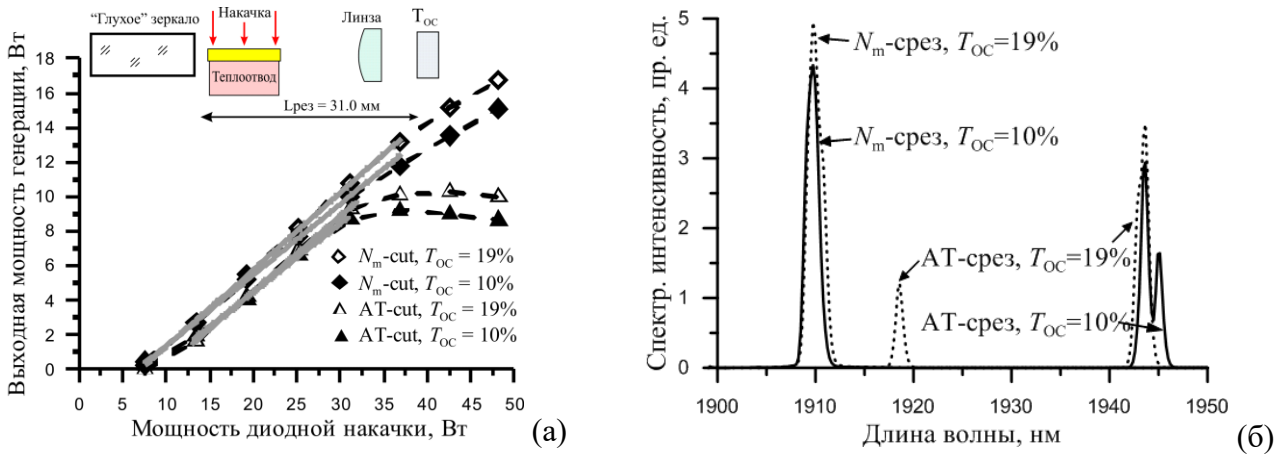


Рисунок 9 – Генерационные характеристики N_m- и AT-слэбов при накачке в непрерывном режиме для пропускания выходного зеркала 10% и 19% (а), и их спектры генерации (б). На вставке показана геометрия лазерного резонатора.

Согласно представленным данным, для слэб-геометрии активных элементов мощность генерации составила 17 Вт при дифференциальной эффективности 40%, что вплоть до настоящего времени является приоритетным результатом для двойных калий-редкоземельных вольфраматов с тулием [П5]. Для сравнения, мощность генерации элементов стандартных конфигураций Tm:KReW ограничена единицами Ватт (Mateos X., IEEE QE, V.42, 1008 (2006)).

В работе [П17] были подробно изучены особенности генерации мини-слэба N_m-cut 5%Tm:KLuW в режиме пассивной модуляции добротности кристаллом Cr^{2+}:ZnSe, а также представлен расчет лазерных импульсов (их энергии, длительности, частоты повторений) на основе скоростных уравнений с учетом спектроскопических характеристик, длин активной среды и насыщающегося поглотителя, плотности мощности накачки и геометрии резонатора. Основные

результаты этого исследования изображены на рис. 10, в табл. 3 проведено сравнение экспериментальных и расчетных параметров генерации.

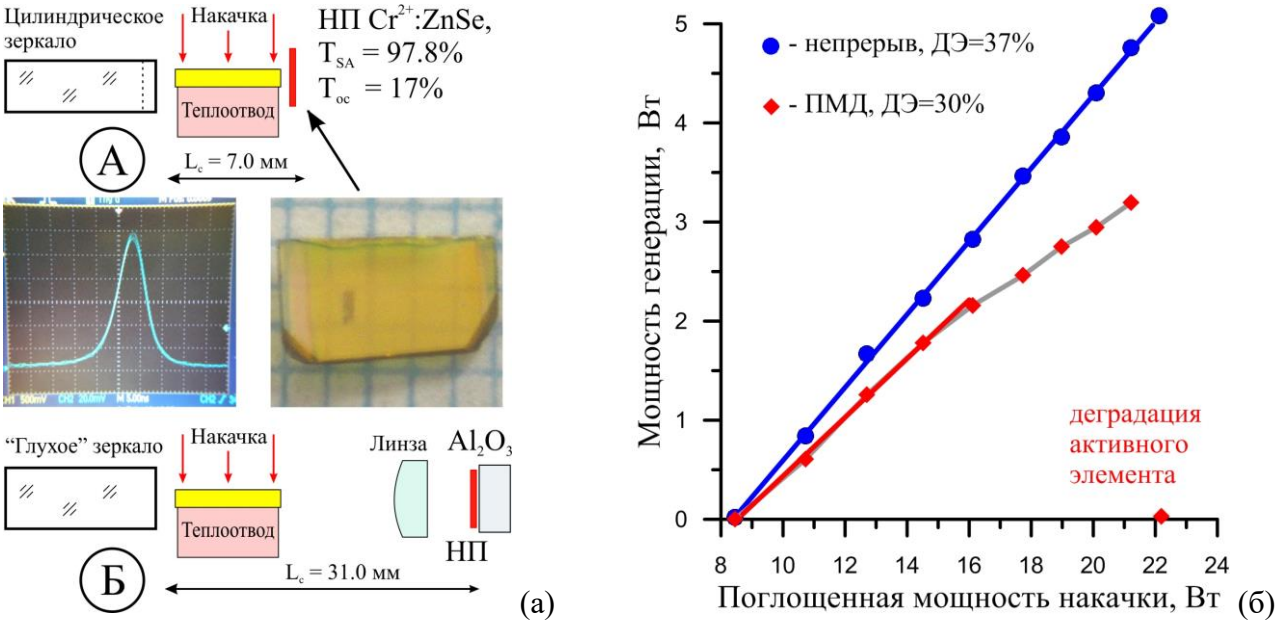


Рисунок 10 – (а) Схематическое изображение исследованных резонаторов А, Б. На фото слева изображена форма лазерного импульса для резонатора А при средней мощности накачки 2.1 Вт (пиковая 15 Вт), длительность по полувысоте составляет 7 нс. На фото справа представлен насыщающийся поглотитель после оптического пробоя. (б) – Генерационные характеристики слэба в резонаторе Б с "глухим" плоским зеркалом при непрерывной накачке.

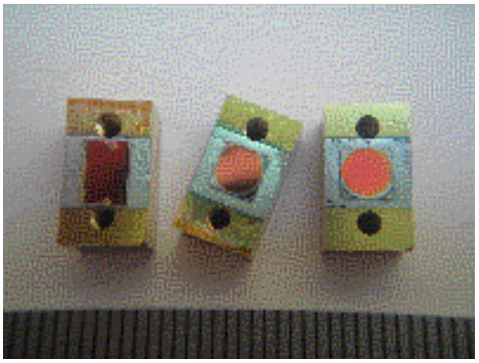
Таблица 3 – Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов для обоих типов исследованных резонаторов А, Б в квази-непрерывном режиме накачки (средняя мощность 2.1 Вт, пиковая 15 Вт), $\sigma_{sa} n L_{sa}$ = 1.35%.

Тип резонатора	L, мм	Энергия импульса, мДж эксп. / расчет	Длительность импульса, нс эксп. / расчет	Частота повторения, кГц эксп. / расчет
А, T_{oc}=17%	7,0	0.30 / 0.30	7.0 / 8.3	7.0 / 6.9
Б, T_{oc}=19%	31,0	0.30 / 0.30	35 / 42	6.3 / 6.25

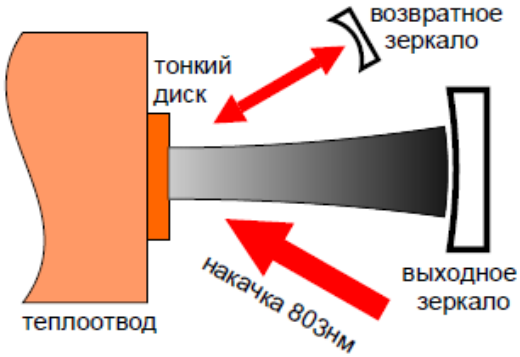
В целом, несмотря на сравнительно небольшие значения теплопроводности кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, оптимизированные по геометрии и концентрации активные элементы Tm:KLuW позволяют получить эффективную генерацию с выходной мощностью ~ 20 Вт с ближней перспективой увеличения мощности до 100 Вт, в том числе в импульсно-периодическом режиме с наносекундными длительностями импульсов.

<u>В пятой главе</u> подробно рассмотены спектрально-генерационные характеристики тулиевых дисковых лазеров на основе кристаллов двойных калий-лютециевых вольфраматов. Отличительной особенностью дискового лазера является сравнительно небольшая толщина активной среды (типично 100…300 мкм), которая во много раз меньше поперечного размера области накачки. Так как толщина активной среды достаточно мала, все температурные градиенты направлены в основном перпендикулярно поверхности, что уменьшает фазовый набег и позволяет эффективно компенсировать термооптические искажения. В силу этого, при обеспечении надлежащего теплоотвода, лазеры на тонких дисках способны генерировать излучение чрезвычайно высокой мощности, вплоть до единиц и десятков киловатт.

Высокоэффективная генерация дисковых элементов из кристаллов *b*-cut 15%Tm:KYW была впервые продемонстрирована в [П2]. На рис. 11 изображен внешний вид дисков на теплоотводах и оптическая схема резонатора, основные характеристики генерации представлены в табл. 4.



(а)



(б)

Рисунок 11 – Фотография дисковых активных элементов (слева направо 300, 250 и 200 мкм) из кристалла *b*-cut 15%Tm:KYW (а), общая схема эксперимента для исследования генерационных характеристик тонких дисков (б).

Таблица 4 – Характеристики генерации тонких дисков 15%Tm:KYW [П2]

Толщина диска, мкм	Дифференциальная эффективность, %	Порог генерации, Вт	Длина волны, нм	Ширина спектра, нм
200	31	4.0	1947	12
250	32	3.8	1950	12
300	32	3.9	1949	10

Параметры генерации, в том числе выходная мощность и эффективность, были значительно улучшены при использовании эпитаксиальных структур с тонким активным слоем [П14, П20, П21, П22]. Такие структуры представляют собой пластины из чистых кристаллов KReW, на которые эпитаксиально наращивается кристаллическая пленка, допированная тулием с концентрацией 5%…15%. В качестве примера, на рис. 12 изображены спектр и генерационная характеристика эпитаксии 5%Tm:KLuW (250 мкм) на подложке KLuW (2.5 мм).

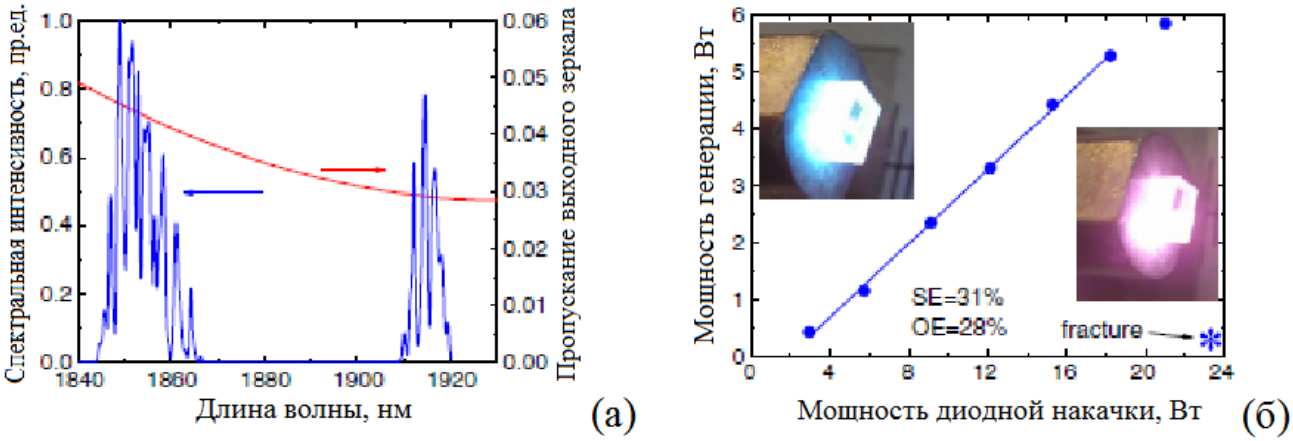


Рисунок 12 – Спектр генерации в квази-непрерывном режиме (а) и генерационная характеристика для непрерывной накачки (б) эпитаксиальной структуры 5%Tm:KLuW/KLuW [П14]. На вставках изображен активный элемент на теплоотводе до (вверху) и после (внизу) разрушения кристалла под накачкой.

Согласно [П14, П22], удельная мощность энергосъема с эпитаксиальных структур превышает 1 кВт/см^2, что находится на уровне лучших мировых достижений. Параметры генерации всех эпитаксий представлены в табл. 5.

Таблица 5 – Основные параметры генерации эпитаксиальных структур 5%...15%Tm:KLuW/KLuW в квази-непрерывном режиме, скважность 18%.

Уровень допирования	Толщина эпитаксии	Дифференц. эффективность	Порог генерации	Длина волны	Ширина спектра
5%	250 мкм	47%	0.08 Вт	~ 1855 нм	~ 12 нм
10%	160 мкм	38%	0.31 Вт	~ 1850 нм	~ 15 нм
10%	220 мкм	42%	0.27 Вт	1917 нм	10 нм
15%	160 мкм	46%	0.29 Вт	1920 нм	10 нм
15%	250 мкм	43%	0.36 Вт	1930 нм	25 нм
15%	450 мкм	40%	0.50 Вт	1945 нм	10 нм

В целом, эффективность генерации всех исследованных структур (за одним исключением), превышает 40%, что соответствует среднемировому уровню.

Помимо эпитаксиальных структур, предоставленных испанскими коллегами из университета Таррагоны (FiCMA), были подробно исследованы композитные активные элементы, полученные методом диффузионной сварки «чистых» и допированных кристаллов KReW. Технология этого метода применительно к анизотропным кристаллам двойных вольфраматов была разработана в Институте лазерной физики СО РАН [П4]. Так, результате диффузионного сращивания было получено механически неразъемное соединение двух кристаллов, 5%Tm:KLuW и KLuW, по своей прочности не уступающее самому кристаллическому материалу. Дисковые элементы из композитных кристаллов, изготовленные по стандартным методикам [П4, П14, П22] с применением оригинальной технологии металлизации [П9, патент РФ], показали навысшую эффективность генерации (56%), основные результаты представлены в табл. 6.

Таблица 6 – Параметры генерации композитных структур 5%Tm:KLuW/KLuW.

Уровень допирования	Толщина активного слоя, мкм	Дифференц. эффективность	Порог генерации	Длина волны	Ширина спектра
5%	250 (композит)	51.4%	0.30 Вт	~ 1900 нм	200 нм
5%	450 (композит)	55.8%	0.41 Вт	~ 1850 нм	12 нм

На рис. 13 изображены генерационные характеристики и спектры композита и тонкого диска с одинаковой толщиной активного слоя, 250 мкм.

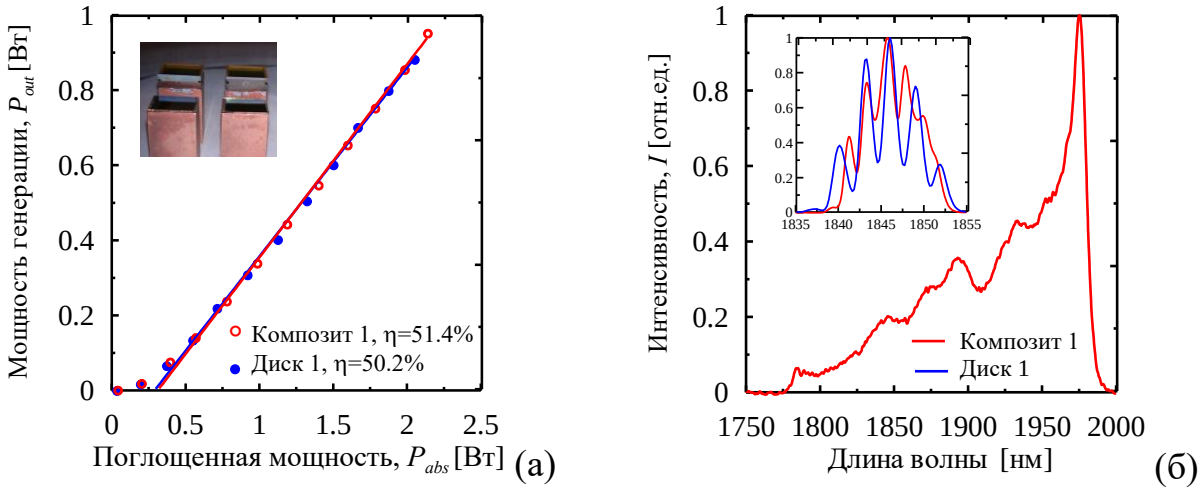


Рисунок 13 – Генерационные характеристики композита 1 и диска 1, на вставке – общий вид активных элементов (а), спектр генерации композита 1, на вставке – спектры диска 1 и композита 1 после распиловки, см. далее по тексту.

Интересно отметить, что спектр генерации композита с толщиной активного слоя 250 мкм был фактически сплошным с шириной полосы более 200 нм, см. рисунок 13(б). С целью изучения особенностей этого эффекта, композит был снят с теплоотвода (распаян) и распилен на примерно равные фрагменты, которые были снова установлены (напаяны) на теплоотводы. После этой процедуры параметры генерации практически не изменились, порог остался прежним, дифференциальная эффективность превышала 50%, однако спектральный состав генерации стал идентичен спектру диска с шириной полосы около 15 нм, см. вставку на рис. 13(б). В [П4] было показано, что изменение спектров генерации композита после его распиловки обусловлено снятием внутренних напряжений, возникающих в процессе сращивания кристаллических слоев. В целом, для композитных структур обоснован и экспериментально подтвержден новый эффект уширения спектральной полосы генерации, обусловленный наличием внутренних напряжений, что представляет значительный интерес для разработки сверхширокополосных лазерных систем, в том числе для фемтосекундных излучателей двухмикронного диапазона.

В шестой главе приведены результаты исследования генерационных характеристик эпитаксиальных структур Ho:KYW/KYW, особенностей формирования термических линз и параметров световых импульсов в режиме модуляции добротности с помощью насыщающегося поглотителя SESAM.

Исследование генерационных характеристик эпитаксиальной структур Ho:KYW/KYW с содержанием гольмия от 3% до 10% было проведено в геометрии квази-продольной накачки [П23], в качестве источника накачки был использован волоконный лазер с длиной волны 1960 нм, соответствующей максимуму поглощения ионов гольмия на «резонансном» переходе $^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$. На рис. 14 изображены оптическая схема лазерного излучателя, аналогичная рис. 11 (б), и генерационные характеристики эпитаксии 3%Ho:KYW/KYW. Согласно представленным данным, дифференциальная эффективность генерации достигает 66%, что в целом находится на уровне лучших мировых результатов.

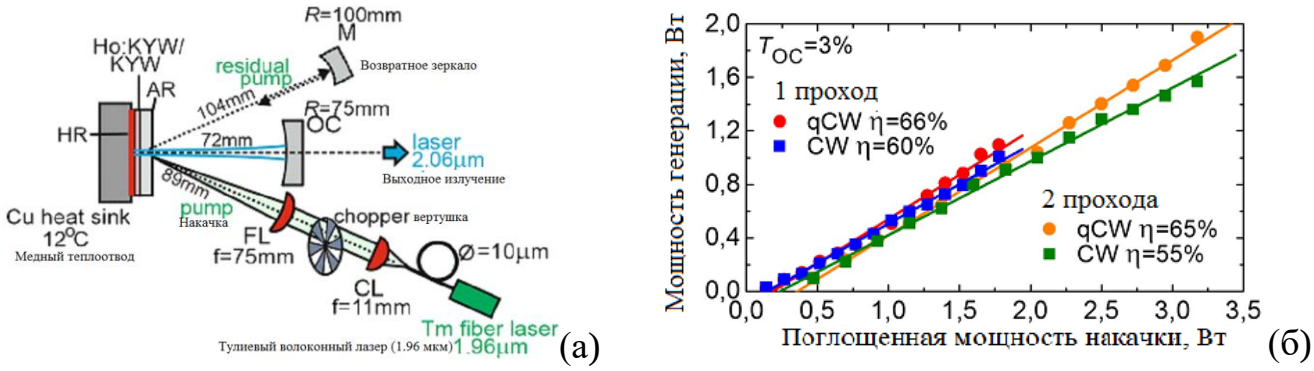


Рисунок 14 – Оптическая схема лазерного резонатора (а), генерационные характеристики эпитаксиальной структуры 3%Ho:KYW/KYW в режиме непрерывной и квази-непрерывной накачки (б).

Можно также отметить, что величина максимального энергосъема для эпитаксии 3%Ho:KYW составила 2 кВт/см^2, что примерно вдвое превышает аналогичную величину для дисковых активных элементов Tm:KLuW.

Дифференциальная эффективность структуры 5%Ho:KYW/KYW в той же геометрии резонатора, рис. 14(а), оказалась вдвое ниже, она не превышала 34% для всех исследованных коэффициентов выходных зеркал 1.5%, 3%, и 5%. Аналогично, на эпитаксиях с содержанием гольмия 7% и 10% порого лазерной генерации превышал максимальную мощность накачки. В [П24] было высказано предположение, что наблюдаемое ухудшение генерационных параметров при увеличении концентрации ионов гольмия связано с более сильными термо-оптическими аберрациями и повышенной скоростью ап-конверсионных процессов, приводящих как к дополнительному нагреву области накачки, так и более быстрому «расселению» верхнего лазерного уровня $^5I_7$. Действительно, при непрерывной накачке различие генерационных характеристик становится еще более заметным : выходная мощность дискового 3% Ho:KYW лазера достигает 1.0 Вт при дифференциальной эффективности 60%, в то время как выходная мощность диска 5% Ho:KYW и его дифференциальная эффективность падают до 0.24 Вт и 15% соответственно [П23, П24]. Спектры генерации исследованных структур и типичная деформация пространственного профиля луча вследствие термооптических искажений приведены на рис. 15. Длины волн

центрированы либо на 2058 нм, либо на 2074 нм, в полном соответствии со спектральными зависимостями усиления для кристалла Ho:KYW, см. рис. 3(б).

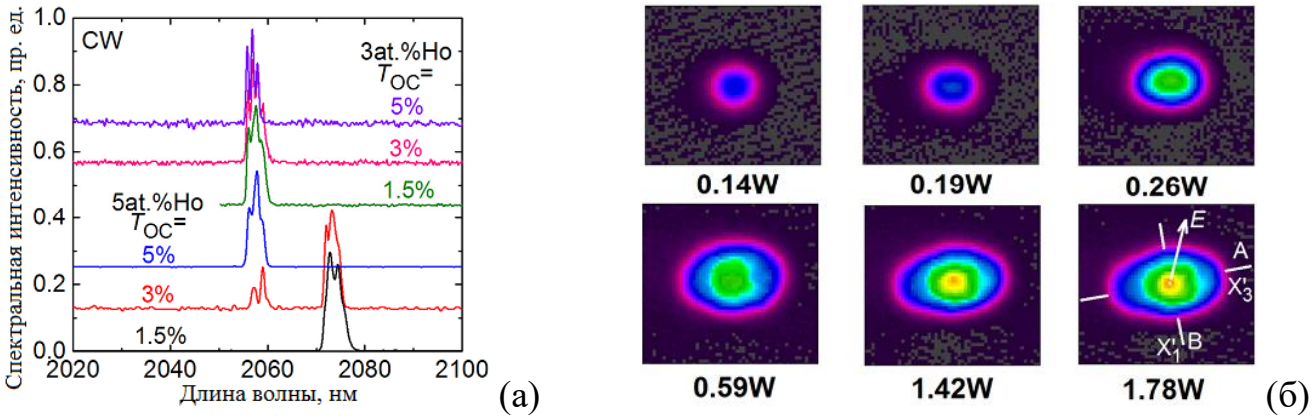


Рисунок 15 – Спектры генерации для эпитаксий 3%Ho:KYW и 5%Ho:KYW (а), пространственный профиль излучения дискового 3%Ho:KYW/KYW лазера в зависимости от поглощенной мощности непрерывной накачки (б).

Термооптические эффекты в эпитаксиальных структурах 3%- и 5%Ho:KYW/KYW были подробно изучены в [П24], где на основе данных по деформации пространственного профиля излучения была рассчитана зависимость оптической силы линзы (1/f) от поглощенной мощности накачки по направлениям большой и малой полуосей эллипса A и B, которые определены анизотропией коэффициентов термического расширения кристаллов KYW. В целом, в [П24] сделан вывод о том, что коэффициент астигматизма термической линзы обратно пропорционален площади пятна накачки, поэтому следует ожидать, что соответствующее увеличение размеров области накачки приведет к значительному уменьшению термооптических искажений.

В работе [П25] была исследована генерация эпитаксиальной структуры 3%Ho:KYW/KYW (λ = 2054 нм) в режиме пассивной модуляции добротности полупроводниковым насыщающимся поглотителем SESAM. В этом режиме получена чрезвычайно стабильная последовательность световых импульсов с максимальной средней мощностью 551 мВт при дифференциальной эффективности 44%, которая составляет 93% от аналогичной величины (47%) для режима непрерывной накачки. Энергия импульсов увеличивается с ростом

поглощенной мощности накачки от 1.2 до 4.1 мкДж, при этом длительность импульса уменьшается от 342 до 201 нс, а частота повторения возрастает от 52 до 135 кГц. В [П25, П26] сделан вывод о том, что оптимизация параметров SESAM позволит существенно увеличить энергию импульсов и уменьшить их длительность. Большие пиковые мощности востребованы в целом ряде приложений, включая накачку параметрических генераторов ИК-диапазона.

Заключительная, седьмая глава посвящена детальному анализу особенностей энергообмена в соактивированных тулием и гольмием кристаллах в приближении локального термодинамического равновесия, а также вопросам оптимизации состава кристаллов для получения максимальной эффективности генерации. Согласно [П19], модель локального термодинамического равновесия не учитывает ап-конверсионные процессы и не устанавливает взаимосвязь между интенсивностью накачки и заселенностями метастабильных уровней. Вместе с тем, на ее основе можно получить точную оценку заселенностей метастабильных состояний каждой группы ионов, если известны энергии штарковских подуровней и общее число ионов в возбужденном состоянии. Для этого методом неопределенных множителей Лагранжа определяется минимум свободной энергии системы взаимодействующих ионов F, который имеет вид

$$F/k_BT = - N_{2*}ln(\Sigma exp(-E_{2i}/k_BT) - N_{6*}ln(\Sigma exp(-E_{6j}/k_BT) + \ln(C^{N2}_{NTm}) + \ln(C^{N6}_{NHo}) \quad (8)$$

при дополнительном условии $N_1 + N_2 = N_{Tm}$ и $N_5 + N_6 = N_{Ho}$, (9)

где k_B – постоянная Больцмана, T – температура, N_2 (N_6) – число ионов тулия (гольмия) на метастабильных уровнях $^3F_4$ и $^5I_7$, суммирование ведется по всем штарковским подуровням с энергиями E_{2i} и E_{6j}, включая вырожденные, см. табл.2., N_{Tm} и N_{Ho} – полное число ионов тулия и гольмия в области накачки. Два последних слагаемых в (8) определяют энтропию системы при условии, что заселенностью всех уровней, кроме основного и метастабильного, можно пренебречь вследствие малых времен жизни, откуда следует соотношение (9). Совместное решение (8) и (9) приводит к результату [П19]

$$N_2 = \gamma Z_{Tm}N_{Tm}/(1 + \gamma Z_{Tm}), \qquad N_6 = \gamma Z_{Ho}N_{Ho}/(1 + \gamma Z_{Ho}). \quad (10)$$

Здесь Z_{Tm} и Z_{Ho} обозначают соответствующие статистические суммы

$$Z_{Tm} = \sum_j \exp(-E_{2j}/k_B T), \quad Z_{Ho} = \sum_j \exp(-E_{6j}/k_B T), \tag{11}$$

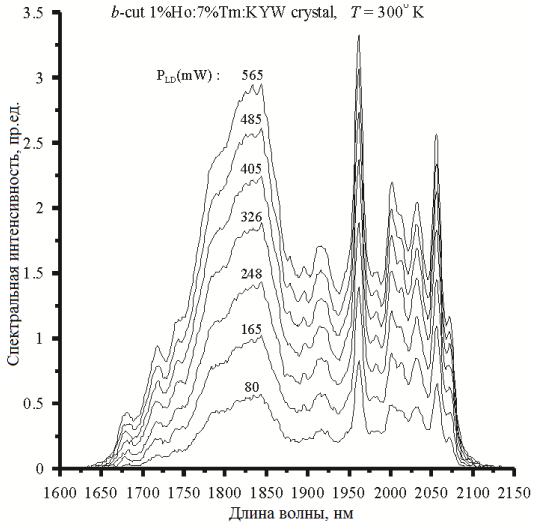
в то время как параметр γ определяется из условия $N_2 + N_6 = N_\Sigma \le N_{Tm} + N_{Ho}$, где N_Σ - общее число ионов в метастабильных состояниях $^3F_4$ и $^5I_7$. Если ввести нормированные заселенности $\beta_{Tm} = N_2/N_{Tm}$ и $\beta_{Ho} = N_6/N_{Ho}$, то (10) перейдет в

$$\beta_{Ho} = Z\beta_{Tm}/(1 + (Z - 1)\beta_{Tm}), \tag{12}$$

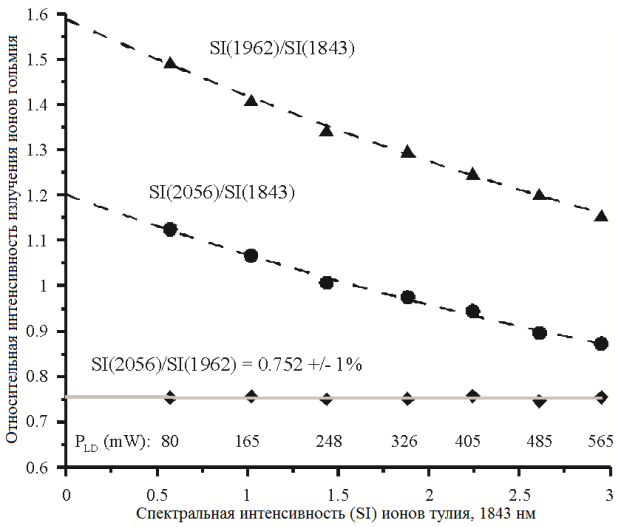
здесь $Z = Z_{Ho}/Z_{Tm}$. В соответствии с вышеизложенным, $\beta_{Ho} = Z\beta_{Tm}$ при $\beta_{Tm} \to 0$ [260] и $\beta_{Ho} \approx \beta_{Tm}$ при $\beta_{Tm} \to 1$ [П19]. Вследствие того, что интенсивность люминесценции ионов гольмия и тулия пропорциональна заселенности метастабилей β_{Ho} и β_{Tm}, их спектральные интенсивности в соотносятся как

$$\frac{\text{Spectral intensity of Ho-band}}{\text{Spectral intensity of Tm-band}} = \frac{const}{1 + (Z - 1)\beta_{Tm}} \ . \tag{13}$$

Расчетные зависимости (12) и (13) были подтверждены измерением спектральной интенсивности люминесценции кристалла 1%Ho:7%Tm:KYW при различных мощностях накачки, подробности эксперимента приведены в [П19].



(а)



(б)

Рисунок 16 – Спектры люминесценции кристалла 1%Ho:7%Tm:KYW при изменении средней мощности диодной накачки от 80 до 565 мВт (а) и относительные спектральные интенсивности люминесценции кристалла 1%Ho:7%Tm:KYW на длине волны 1962 и 2056 нм (б). Нижняя кривая (ромбы) показывает отношение этих интенсивностей, которая в пределах экспериментальной погрешности (~ 1%) не зависит от мощности накачки.

На рис. 16 представлены спектры люминесценции и относительные спектральные интенсивности ионов гольмия (нормированные на спектральную интенсивность ионов тулия) на длинах волн 1962 нм и 2056 нм вместе с их аппроксимациями в соответствии с уравнением (13). Как и следовало ожидать, обе аппроксимации дают один и тот же коэффициент, $\beta_{Tm} = 3.73 \cdot 10^{-3}$ SI(1843 нм). Таким образом, при максимальной мощности накачки (565 мВт в среднем) $\beta_{Tm} = 1.1\%$ и поэтому $\beta_{Ho} = 28\%$, как это следует из уравнения (12) при Z(300°K) = 35, см. табл.2. Такая оценка β_{Ho} представляется вполне правдоподобной [П19].

Значительный интерес к со-активированным лазерным средам обусловлен существенным упрощением схемы накачки ионов гольмия за счет прямой передачи энергии от ионов тулия, поскольку эффективность оптической накачки гольмиевых кристаллов в ближнем ИК-диапазоне сравнительно мала. В частности, использование со-активированных материалов позволяет отказаться от вспомогательных тулиевых лазеров, обеспечивающих инверсию заселенности и генерацию ионов гольмия на переходе $^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$, λ ~2.1 мкм.

Эффективная генерация в со-активированных тулием и гольмием кристаллах KLuW была получена в [П30] для микрочип-конфигурации лазерного резонатора. Вместе с тем, подробный анализ особенностей энергообмена и параметров лазерной генерации в соактивированных кристаллах приводит к выводу, что максимальная мощность генерации при комнатной температуре ограничена величиной ~ 1 Вт. Это ограничение обусловлено значительным повышением температуры в активной зоне, приводящим к уменьшению эффективности переноса энергии от тулия к гольмию, увеличением скорости ап-конверсионных процессов (дополнительное тепловыделение!) и порогов генерации для квази-трехуровневой схемы генерации на переходе $^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$. Таким образом, со-активированные активные среды с тулием и гольмием наиболее целесообразно использовать в компактных маломощных излучателях, предназначенных, например, для систем оптической связи, ИК-спектрометрии, лидаров, экологического мониторинга.

З А К Л Ю Ч Е Н И Е

В настоящей диссертационной работе представлены результаты комплексного исследования новых лазерных материалов для эффективных излучателей двухмикронного диапазона – моноклинных кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных трехвалентными ионами тулия и гольмия. Рассмотрены фундаментальные аспекты взаимодействия ионов с высокоинтенсивными световыми полями в лазерных резонаторах при квази-трехуровневой схеме генерации, систематизирован большой объем данных по спектроскопии и кинетическим параметрам энергообмена, определены оптимальный состав и геометрия активных элементов, обеспечивающие максимальную эффективность и выходную мощность генерации при заданных параметрах накачки. Научные результаты исследований, имеющие в основном приоритетный характер, являются базовым заделом и тесно взаимосвязаны с прикладными задачами по улучшению параметров генерации и расширению функциональных возможностей излучателей двухмикронного диапазона.

В ходе выполнения диссертационной работы были задействованы различные взаимодополняющие методы и методики исследования всех основных характеристик кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, что в конечном итоге позволило получить ряд принципиально новых результатов, представляющих значительный научный и практический интерес. Применительно к научной составляющей, новизна результатов заключается в следующем :

- Проведена самосогласованная систематизация данных по спектроскопическим характеристикам и кинетическим параметрам энергообмена в кристаллах двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных ионами тулия и гольмия. Комплексное описание основных процессов переноса энергии в системе взаимодействующих ионов, экспериментальное определение сечений переходов и расчет коэффициентов ненасыщенного усиления позволило оптимизировать состав и геометрию активных элементов для достижения

максимальной эффективности и мощности лазерной генерации. В частности, одним из преимуществ кристаллов Tm,Ho:KReW являются более высокие сечения переходов по сравнению, например, с распространенными кристаллами Tm,Ho:YAG или Tm,Ho:YLF, что позволяет уменьшить порог генерации и существенно сократить длительность световых импульсов в режиме модуляции добротности, вплоть до единиц наносекунд;

- Впервые проведены комплексные исследования эффекта «фотонной лавины» в кристаллах двойных калий-иттриевых и калий-иттербий-иттриевых вольфраматов, активированных тулием. Данный эффект основан на поглощении накачки из метастабильного состояния $^3F_4$ и переходом иона на уровень $^3H_4$. Если концентрация ионов тулия достаточно велика, уровень $^3H_4$ расселяется за счет энергообмена с другим ионом, находящимся в основном состоянии $^3H_6$, при этом на метастабиль $^3F_4$ переходят оба этих иона (кросс-релаксация). Таким образом, поглощение каждого кванта накачки увеличивает заселенность метастабильного уровня $^3F_4$ и при достаточно интенсивной накачке основная часть ионов перейдет на этот метастабиль. Измерения коэффициентов ненасыщенного усиления кристаллов в режиме «фотонной лавины» были проведены по оригинальной методике. Предложена аналитическая модель, описывающая основные особенности развития «фотонной лавины», на ее базе определены кинетические и спектроскопические параметры этого эффекта;

- Экспериментально показано, что в результате образования «фотонной лавины» при накачке кристаллов импульсным излучением неодимовых лазеров (Nd:YAG в режиме свободной генерации, λ = 1064 нм) величина инверсии заселенностей тулия может достигать 70…80% при коэффициенте ненасыщенного усиления до 100 Дб/см в диапазоне 1.8-1.94 мкм. Последнее представляет значительный интерес для разработки оптических усилителей двухмикронного диапазона;

- Предложен и реализован новый метод измерения термических коэффициентов оптического пути (ТКОП), прямо связанных с оптической силой термоиндуцированной (термической) линзы. Метод основан на создании

поперечного температурного градиента в прямоугольном образце. Наличие градиента изменяет оптический путь луча внутри образца вследствие его расширения и изменения показателя преломления, что фактически эквивалентно появлению дополнительного клина, пропорционального величине температурного градиента. Таким образом, измерение отклонения луча при прохождении через неоднородно нагретый образец позволяет определить так называемый термический коэффициент оптического пути (ТКОП), по которому рассчитывается величина тепловой линзы при известном тепловыделении;

- Впервые определены спектральные зависимости ТКОП в интервале 400…2100 нм для кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов с различными концентрациями ионов-активаторов. На основании результатов измерений получено экспериментальное подтверждение о наличии в кристаллах «атермальных» направлений с нулевым ТКОП, которые зависят от длины световой волны и ее поляризации. Так, для кристаллов 5%Tm:KLuW AT-срез находится в плоскости N_m-N_g и его нормаль составляет угол 68.5° с осью N_g;

- Проведен сравнительный анализ генерационных характеристик кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов с тулием для различных форм активных элементов - дисков, мини-слэбов и стержней. В зависимости от конфигурации, выходная мощность генерации в области комнатных температур составила от 5 до 17 Вт в спектральной области ~1.9 мкм, что вплоть до настоящего времени является мировым приоритетом для этого класса кристаллов. Также на уровне современных мировых достижений находятся полная оптическая эффективность генерации, вплоть до 56%, и величина удельного энергосъема для тулиевых дисковых лазеров, более 1 кВт/см^2;

- Для дисковых элементов на основе композитных структур Tm:KLuW/KLuW обоснован и экспериментально подтвержден новый эффект уширения спектральной полосы генерации, обусловленный наличием внутренних напряжений в тонком активном слое, а также продемонстрирован лабораторный прототип излучателя с шириной спектра более 200 нм, от 1780 до 1990 нм.

- Детально исследован режим пассивной модуляции тулиевых слэб-лазеров с помощью насыщающихся поглотителей на основе кристаллов Cr^{2+}:ZnSe, получены рекордно короткие для этого метода длительности импульсов (менее 10 нс), а также достигнута средняя выходная мощность лазерного излучения на уровне 3 Вт при частоте повторения импульсов до 10 кГц;
- Предложена и экспериментально подтверждена система кинетических уравнений, описывающая процесс формирования световых импульсов в режиме пассивной модуляции добротности, параметры которой содержат только спектроскопические характеристики активного элемента и насыщающегося поглотителя, плотность мощности накачки, длину резонатора и коэффициент пропускания выходного зеркала. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что средняя мощность генерации кристаллов Tm:KLuW в режиме модуляции добротности может превышать 10 Вт при частоте повторения импульсов 20…50 кГц и спектральном диапазоне перестройки 1.85…1.95 мкм;
- В приближении локального термодинамического равновесия проведен расчет заселенности метастабильных уровней тулия и гольмия в со-допированных кристаллах при произвольных уровнях возбуждения. Получены новые экспериментальные результаты, уточняющие характеристики энергообмена, по данным спектроскопических измерений определены относительные заселенности ионов тулия и гольмия на метастабильных уровнях $^3F_4$, $^5I_7$. На этой основе были сформулированы критерии оптимизации состава кристаллов для непрерывных и импульсных лазерных излучателей двухмикронного диапазона на переходе $^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$ ионов гольмия;
- Для тулий-гольмиевых кристаллов оптимального состава 0.5%Ho:5%Tm:KYW при микрочип-конфигурации резонатора реализована дифференциальная эффективность генерации до 31%, при этом выходная мощность на длине волны 2056 нм составила 480 мВт - оба этих параметра находятся на уровне лучших мировых достижений;

- Впервые проведены комплексные исследования спектрально-генерационных и термооптических 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 рекордной дифференциальной эффективностью 66% и выходной мощностью 1.6 Вт;
- На дисковой эпитаксиальной структуре 3%Ho:KYW/KYW, в режиме пассивной модуляции добротности лазерного резонатора полупроводниковым насыщающимся поглотителем SESAM, был получен стабильный режим импульсно-периодической генерации на длине волны 2056 нм с частотой 135 кГц, длительностью и энергией импульса 200 нс и 4 мкДж, соответственно. Сделан вывод о том, что оптимизация параметров SESAM даст возможность существенно увеличить энергию импульсов и сократить их длительность;
- Показана принципиальная возможность дальнейшего увеличения выходной мощности как дисковых, так и слэб-лазеров на кристаллах и композитах Ho,Tm:KReWдо 10…100 Вт, в зависимости от условий накачки и обеспечения необходимых температурных режимов активных элементов.

Все экспериментальные исследования выполнены на современной приборной базе, достоверность полученных данных основана на использовании научно обоснованных методик измерений и подтверждена полной взаимосогласованностью спектральных, кинетических и генерационных параметров лазерных кристаллов. Результаты исследований опубликованы в 30 статьях высокорейтинговых рецензируемых журналах и представлены на 16 международных конференциях в формате устных и стендовых докладов.

В ходе выполнения диссертационной работы был реализован ряд технических и технологических решений, представляющих несомненный научно-практический интерес, к числу которых относятся:
- Технология изготовления и оригинальная схема накачки миниатюрных слэб-элементов с объемом активной среды не более 1.5 мм^3;

- Технология синтеза композитных структур Ho,Tm:KRew/KReW с поперечным размером до 10×10 мм^2 и эффективностью генерации 50%…55%;
- Оригинальный метод металлизации диэлектрических материалов с улучшенной адгезией для пайки активных элементов на теплоотвод, защищенный патентом Российской Федерации № 2530073 от 12 августа 2014 г.

В целом, на основании всей совокупности полученных в диссертационной работе результатов, сделан вывод о перспективности использования кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных тулием и гольмием, для разработки малогабаритных специализированных источников лазерного излучения с выходной мощностью до 100 Вт, обеспечивающих непрерывный и импульсно-периодический режим генерации с высокой пиковой интенсивностью световых импульсов в спектральном диапазоне 1.8-2.1 мкм.

Благодарности :

Автор выражает свою глубокую признательность научному руководителю ИЛФ СО РАН академику Багаеву Сергею Николаевичу за неустанное внимание ко всем работам по тематике диссертации и их поддержку в научном, техническом и организационном плане. Искренне благодарен своим коллегам и соавторам – к.ф.-м.н. Ведину Ивану Александровичу и к.ф.-м.н. Курбатову Петру Федоровичу за неоценимую помощь в проведении экспериментальных исследований, обсуждении результатов и постановке новых задач. Особую признательность выражаю к.т.н. Павлюку Анатолию Алексеевичу за синтез крупногабаритных структурно-совершенных кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, на которых были получены все экспериментальные результаты диссертации. Отдельно хочу отметить работу технических специалистов ИЛФ СО РАН Андросова Геннадия Николаевича, к.ф.-м.н. Бельтюгова Владимира Николаевича, Эрга Геннадия Владимировича, Ковалева Сергея Ивановича, обеспечивших оптическую обработку кристаллов и напыление диэлектрических покрытий, а также помощь и поддержку ООО «Кристаллы Сибири» в лице к.т.н. Юркина Александра Михайловича.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

П1. Багаев С.Н., Ватник С.М., Майоров А.П., Павлюк А.А., Плакущев Д.В. Спектроскопия и лазерная генерация моноклинных кристаллов $KY(WO_4)_2:Tm^{3+}$ // Квантовая электроника, 2000, т.30, стр. 310-315

П2. Vatnik S.M., Vedin I.A., Pavljuk A.A. High-efficient diode-pumped thin disk 15%Tm:KYW laser // Proc. SPIE 2007, vol. 6731, pp. 673103 (1-4)

П3. Vatnik S.M., Vedin I.A., Pavlyuk A.A. High-efficiency 5%Tm:$KLu(WO_4)_2$ N_m-cut minislab laser // Laser Physics Letters, 2012, vol. 9, 765-769

П4. Ватник С.М., Ведин И.А., Курбатов П.Ф., Павлюк А.А. Эффективная двухмикронная генерация дисков и композитных структур 5%Tm^{3+}:$KLu(WO_4)_2$/$KLu(WO_4)_2$ // Квантовая электроника, 2014, т.44, стр. 989-992

П5. Bagayev S. N., Vatnik S. M., Vedin I. A., Orlovich V. A., Kuleshov N. V., Pavlyuk A. A., Gusakova N. V., Kurilchik S. V., Yasukevich A. S., Kisel V. E., Yumashev K. V., Loiko P. A., and Dashkevich V. I. Efficient Tm-laser operation based on 5at.%Tm:KLu(WO4)2 with Nm and AT orientations // AIP Conference Proceedings 2098, 020003 (2019); https://doi.org/10.1063/1.5098147

П9. Курбатов П.Ф., Бельтюгов В.Н., Ватник С.М., Ведин И.А., Андросов Г.Н. Вакуумный дуговой испаритель металлов / Патент РФ № 2530073, зарегистрирован 12 августа 2014 г.

П10. Vatnik S.M., Pujol M.-C., · Carvajal J.J., · Mateos X.,·Aguiló M., · Díaz F., · Petrov V., Thermo-optic coefficients of monoclinic KLu(WO4)2 // Appl. Phys. B vol.95, pp. 653–656 (2009)

П11. Loiko P.A., Vatnik S.M., Vedin I.A., Pavlyuk A.A., Yumashev K.V. and Kuleshov N.V., Thermal lensing in Nm-cut monoclinic Tm:KLu(WO4)2 laser crystal // Laser Phys. Lett. vol.10, pp. 125005-6 (2013)

П12. Ватник С.М., Майоров А.П., Павлюк А.А., Плакущев Д.В., Спектроскопия и кинетика заселенностей моноклинных кристаллов $KYb_{0.5}Y_{0.43}Tm_{0.07}(WO_4)_2$ при импульсной накачке Nd:YAG лазером // Квантовая электроника, т.31 №1, 19-22 (2001)

П13. Vatnik S., Balashov E., Pavljuk A., Golikova E., Lyutetskiy A. - Measurement of gain and evaluation of photon avalanche efficiency in 10% Tm:$KY(WO_4)_2$ crystal pumped by free-running Nd:YAG laser // Optics Communications, v. 220, 397-400 (2003)

П14. Vatnik S.M., Vedin I.A., Segura M., Mateos X. - Efficient thin-disk Tm-laser operation based on Tm:KLu(WO4)2/KLu(WO4)2 epitaxies // Optics Letters, Vol. 37, No. 3, 356-358 (2012)

П17. Ватник С.М., Ведин И.А., Курбатов П.Ф., Смолина Е.А., Павлюк А.А., Коростелин Ю.В., Скасырский Я.К. "Спектрально-генерационные характеристики мини-слэба Nm-cut 5%Tm:$KLu(WO_4)_2$ в режиме пассивной модуляции добротности кристаллом Cr^{2+} :ZnSe", «Квантовая электроника», Том 47, № 11, стр. 981-985 (2017)

П18. Багаев С. Н. , Осипов В. В. , Ватник С. М. , Шитов В. А. , Ведин И. А. , Курбатов П. Ф. , Максимов Р. Н. , Лукьяшин К. Е. , Павлюк А. А. «Спектрально-генерационные характеристики керамики 1% Ho : YAG при внутрирезонаторной накачке», Квантовая Электроника, Том 45, №1, стр. 23-25 (2015)

П19. Vatnik S.M. - On the steady-state population of the Tm ^{3}F4 and Ho ^{5}I7 manifolds in a co-doped crystalline host, Journal of Luminescence Vol.149, May, pp.264–266 (2014)

П20. Vatnik S., Vedin I., Pujol M. C., Mateos X., Carvajal J. J., Aguilo M., Diaz F., Griebner U., and Petrov V.,"Thin disk Tm-laser based on highly doped Tm:KLu(WO4)2/KLu(WO4)2 epitaxy," Laser Phys. Lett.Vol.7, Iss.6, pp. 435–439 (2010)

П21. Vatnik S., Vedin I., Pujol M. C., Mateos X., Carvajal J. J., Aguilo M., Diaz F., Griebner U., and Petrov V., CW laser operation of a highly-doped Tm:KLu$(WO_4)_2$/ KLu$(WO_4)_2$ thin disk epitaxial laser // Proc. of SPIE Vol. 7578 75780E-1(8) (2010)

П22. Segura M., Solé R. M., Mateos X., Carvajal J. J., Pujol M. C., Massons J., Aguiló M., Vatnik S., Vedin I., Petrov V., Griebner U., Díaz F. - Crystal growth, characterization and thin disk laser operation of $KLu_{1-x}Tm_x(WO_4)_2$/ KLu$(WO_4)_2$ epitaxial layers // CrysEngComm. Vol.14, No. 1, pp. 223-229 (2012)

П23. Mateos X., Lamrini S., Scholle K., Fuhrberg P., Vatnik S., Loiko P., Vedin I., Aguiló M., Díaz F., Griebner U., and Petrov V., "Holmium thin-disk laser based on Ho:KY$(WO_4)_2$/KY$(WO_4)_2$ epitaxy with 60% slope efficiency and simplified pump geometry," Opt. Lett. Vol.42, Iss. 17, pp. 3490-3493 (2017)

П24. Mateos X., Loiko P., Lamrini S., Scholle K., Fuhrberg P., Vatnik S., Vedin I., Aguiló M., Díaz F., Griebner U., and Petrov V., "Thermo-optic effects in Ho:KY$(WO_4)_2$ thin-disk lasers," Opt. Mater. Express Vol.8, Iss. 3, pp. 684-690 (2018)

П25. Mateos X., Loiko P., Lamrini S., Scholle K., Fuhrberg P., Suomalainen S., Härkönen A., Guina M., Vatnik S., Vedin I., Aguiló M., Díaz F., Wang Y., Griebner U., and Petrov V., "Ho:KY$(WO_4)_2$ thin-disk laser passively Q-switched by a GaSb-based SESAM," Opt. Express Vol.26, No.7, pp. 9011-9016 (2018)

П26. Mateos X., Loiko P., Lamrini S., Scholle K., Fuhrberg P., Suomalainen S., Härkönen A., Guina M., Vatnik S., Vedin I., Aguiló M., Díaz F., Wang Y., Griebner U., and Petrov V., Highly-efficient Ho:KY$(WO_4)_2$ thin-disk lasers at 2.06 μm, Proc. of SPIE Vol. 10713, pp. 107130J1-J8 (2018)

П30. Gusakova N.V., Kurilchik S.V., Yasukevich A.S., Kisel V.E., Dashkevich V.I., Orlovich V.A., Pavlyuk A.A., Vatnik S.M., Bagaev S.N. and Kuleshov N.V., Spectroscopy and microchip laser operation of Tm, Ho:KYW crystals with different Ho concentrations, Laser Physics Letters, Vol. 15, No. 2, pp. 025001-05 (2018)