

*На правах рукописи*

ВЕДИН Иван Александрович

**ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСКОВЫХ ЛАЗЕРОВ  
НА ОСНОВЕ ДВОЙНЫХ КАЛИЙ-РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ  
ВОЛЬФРАМАТОВ  $Tm^{3+}:KRE(WO_4)_2$ , RE = Y, Lu**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск, 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук», г. Новосибирск

Научный руководитель:

кандидата физико-математических наук

**Ватник Сергей Маркович**, руководитель сектора «Твердотельные лазерные системы с диодной накачкой», Институт лазерной физики СО РАН.

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита состоится «\_\_\_\_\_» 2019 г. в \_\_\_ часов \_\_\_ минут на заседании диссертационного совета Д003.024.01 в Институте лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева 15Б, к. 201

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидата физико-математических наук

П.В. Покасов

### Актуальность темы исследования

Создание компактных перестраиваемых высокоэффективных источников когерентного излучения, работающих при комнатной температуре в ближнем и среднем ИК диапазоне длин волн, представляет значительный интерес для решения многочисленных как прикладных, так и научных задач. Лазерная генерация в этом спектральном диапазоне длин волн может быть реализована с помощью различных твердотельных матриц (например, с помощью кристаллов YAG, YAP, YLF), в том числе анизотропных кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, легированных ионами тулия. Возрастающий интерес к этим кристаллам обусловлен уникальным сочетанием их оптико-физических и спектроскопических параметров, в совокупности обеспечивающих высокую эффективность генерации и широкую область спектральной перестройки в области от ~1.8 до 2.0 мкм. Так, сравнительно большие сечения излучательных переходов с лазерного метастабильного уровня  $^3F_4$  в основное состояние  $^3H_6$  обеспечивают низкие пороги генерации и дают возможность получения коротких лазерных импульсов в режиме модуляции добротности, вплоть до длительностей порядка единиц наносекунд. Высокая оптическая плотность кристаллов на длинах волн диодной накачки (~0.8 мкм) позволяет производить эффективную накачку мощными AlGaAs – лазерными диодами и линейками в любой геометрии (продольной, поперечной), что является важным фактором для оптимизации излучателей на их основе. В силу больших скоростей кросс-релаксационных процессов (переходы  $^3H_4 \rightarrow ^3F_4$ ,  $^3H_6 \rightarrow ^3F_4$ ), в исследуемых кристаллах величина квантового выхода на верхний лазерный уровень  $^3F_4$  близка к 2 при концентрациях ионов тулия выше 3...5 ат. %, что также приводит к соответствующему увеличению эффективности генерации (до уровня 50% и выше). Кроме того, длина волны излучения тулиевых лазеров на основе исследуемых сред (~1.9 мкм) достаточно хорошо согласуется с полосой поглощения кристаллов  $Cr^{2+}:ZnSe$  и  $Cr^{2+}:ZnS$ , что позволяет использовать комбинированные лазерные системы, такие как  $Tm^{3+}:KLu(WO_4)_2 \rightarrow Cr^{2+}:ZnSe$  и др., для преобразования излучения диодов и линеек в средний ИК диапазон, ~ 2.1 - 3.0 мкм.

Первые результаты спектроскопических и генерационных исследований ионов тулия в матрице двойных калий-редкоземельных вольфраматов с диодной накачкой были представлены в совместной работе Института лазерной физики и Института неорганической химии СО РАН еще в 2000 г. В частности, на образце монокристалла  $15\text{at.}\% \text{Tm}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$  была получена генерация в двухмикронном диапазоне длин волн с дифференциальной эффективностью на уровне 45%, при этом была показана возможность перестройки по спектру от  $\sim 1850$  нм до  $\sim 1950$  нм, что уже тогда находилось на уровне лучших мировых достижений. Эти перспективные результаты стимулировали дальнейшие полномасштабные исследования, которые проводились научными коллективами разных стран, в частности, из России, Белоруссии, Германии и Испании. В ходе этих исследований были получены значительные объемы данных по спектроскопическим и генерационным характеристикам, подтверждены благоприятные перспективы использования исследуемых кристаллов в качестве активных элементов компактных высокоэффективных лазерных излучателей с диодной накачкой, перестраиваемых в широком спектральном диапазоне. Необходимо отметить, что сравнительно невысокая теплопроводность кристаллов (около 3 Вт/м·К) и твердость ( $\sim 5$ ), в значительной степени ограничивают их использование в лазерных системах с высокой выходной средней мощностью. Это, в первую очередь, связано с тем, что предельный уровень тепловыделения, приводящий к разрушению кристаллов вследствие термомеханических напряжений, примерно, на порядок меньше, чем в кристаллах YAG и YAP. Однако, начиная с 2007 года, в наших работах была показана реальная возможность существенного увеличения выходной мощности лазерных излучателей за счет использования активных элементов специальной формы - тонких дисков, композитных кристаллов и слэбов. Так, в Институте лазерной физики СО РАН на дисковом активном элементе  $15\text{at.}\% \text{Tm}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$  толщиной 300 мкм впервые была достигнута выходная мощность генерации около 5 Вт в непрерывном режиме накачки, а уже в 2012 была продемонстрирована реальная возможность создания высокоэффективных тулиевых лазеров (в мини-слэб конфигурации) с выходной средней мощностью свыше 10Вт. Таким образом, как в России, так и за рубежом, активно ведутся

работы по оптимизации и совершенствованию твердотельных лазерных систем на основе кристаллов  $Tm^{3+}:KRE(WO_4)_2$  с целью увеличения эффективности и выходной мощности излучателей до уровня 50...100 Вт, поскольку высокие сечения переходов, как в области накачки, так и в области генерации, позволяют сделать эти системы чрезвычайно компактными по сравнению, например, с аналогичными волоконными лазерами. Следует отметить, что за последнее время появилось значительное количество публикаций, посвященных как спектроскопическим параметрам исследуемых кристаллов, так и различным типам лазерных излучателей на их основе. Однако, оптимизация параметров генерации  $Tm^{3+}:KRE(WO_4)_2$ ,  $RE=Y, Lu$ , лазеров может быть проведена только на основе глубокого понимания физических процессов, происходящих в анизотропных лазерных кристаллах. Изучение оптических характеристик активных сред и схем оптической накачки, в свою очередь, требует проведения комплексных физических исследований. Вместе с тем, систематическое исследование спектроскопических и генерационных характеристик трехвалентного тулия представляет значительный интерес как для фундаментальных аспектов взаимодействия редкоземельных ионов в кристаллических матрицах, так и для многочисленных приложений, в которых используются лазерные источники, генерирующие в двухмикронном диапазоне длин волн. В силу того, что все результаты по исследованию оптических и генерационных характеристик кристаллов, активированных тулием, являются новыми и имеют приоритетный характер, научная значимость и научный уровень результатов, полученных в ходе выполнения диссертационной работы, сопоставимы с мировыми по актуальности и новизне.

### **Цель диссертационной работы**

Комплексное экспериментальное исследование спектрально-генерационных свойств и характерных особенностей взаимодействия ионов трехвалентного тулия в анизотропных кристаллах двойных калий-редкоземельных вольфраматов  $KRE(WO_4)_2$  ( где  $RE=Y, Lu$ ), с целью создания на их основе лабораторных образцов и макетов высокоэффективных компактных лазерных систем с диодной накачкой, работающих в двухмикронной области спектра.

Решаемые, при разработке твердотельных дисковых лазеров с диодной накачкой, задачи носили комплексный характер и основывались на результатах фундаментальных исследований особенностей структуры твердотельных матриц, их спектрально-люминесцентных характеристик, процессов безызлучательного переноса энергии между примесными оптическими центрами. Таким образом, для достижения намеченной цели были **поставлены следующие задачи:**

1. Изучение данных, опубликованных в научных источниках, по спектрально-люминесцентным и генерационным свойствам кристаллических матриц, активированных ионами  $Tm^{3+}$ ;
2. Комплексное экспериментальное исследование спектроскопических характеристик лазерных кристаллов  $Tm^{3+}:KY(WO_4)_2$  и  $Tm^{3+}:KLu(WO_4)_2$ , легированных различными концентрациями ионов тулия, уточнение реальных схем взаимодействия ионов;
3. Исследование методов фокусировки излучения накачки в активные элементы, а также проведение расчётов параметров резонаторов (с учётом наводимых накачкой термооптических искажений), позволяющих согласовать основную моду резонатора с областью усиления в кристаллах;
4. Определение основных особенностей и параметров лазерной генерации (пороги, эффективность, спектральный диапазон генерации) при накачке кристаллов  $Tm^{3+}:KY(WO_4)_2$  и  $Tm^{3+}:KLu(WO_4)_2$  непрерывным и импульсным излучением на длине волны  $\sim 0.8$  мкм;
5. Разработка и оптимизация технологии производства монокристаллов и композитных структур на их основе. Проведение сравнительного анализа выходных генерационных характеристик для  $Tm^{3+}:KY(WO_4)_2$  и  $Tm^{3+}:KLu(WO_4)_2$  лазеров в зависимости от конфигурации активного элемента (монокристаллы, эпитаксиальные пленки, композитные структуры);
6. Оптимизация составов кристаллов  $Tm^{3+}:KY(WO_4)_2$  и  $Tm^{3+}:KLu(WO_4)_2$  и проведение генерационных экспериментов с целью получения максимальной эффективности генерации;

## Научная новизна

1. Продемонстрирована работа дисковых лазеров на основе кристалла  $15\text{ат.}\% \text{Tm}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ . Впервые достигнута выходная мощность генерации свыше 4.9 Вт, что соответствует полной оптической  $\sim 25\%$  и дифференциальной  $\sim 32\%$  эффективности.
2. Впервые разработан дисковый лазер на основе эпитаксиальной структуры  $15\text{ат.}\% \text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  с толщиной активного слоя 80 мкм;
3. Представлены результаты сравнительных исследований спектрально-генерационных характеристик дисковых лазеров на основе эпитаксиальных структур  $\text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  в зависимости от концентрации туля, толщины активного слоя и параметров резонатора;
4. Впервые предложена и реализована технология изготовления дисковых композитных активных  $\text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  элементов (аналог эпитаксиальных структур) методом высокотемпературного диффузионного сращивания в вакууме;
5. Представлены результаты сравнительного анализа спектрально-генерационных характеристик  $\text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  лазеров в зависимости от конфигурации активного элемента (монокристаллы, эпитаксиальные пленки, композитные структуры);

## Практическая значимость работы

Высокоэффективные и компактные лазеры двухмикронного диапазона ( $\sim 1.9\text{-}2.0$  мкм) с диодной накачкой находят широкое практическое применение в медицине: хирургии, офтальмологии, ангиопластике, артроскопии и т.д. Важным применением двухмикронных лазеров является их использование в лидарных установках (для определения скорости ветра, состояния облаков, картины загрязнения и т.д.). Практическое применение этих лазеров обусловлено тем, что в двухмикронном диапазоне длин волн находятся линии поглощения колебательных переходов не только молекул  $\text{H}_2\text{O}$ , но и некоторых других молекул (таких как  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$  и других). Дифференциальные лидары, использующие два лазерных пучка с различными длинами волн, одна из которых близка к частоте

молекулярного перехода исследуемого газа, а вторая находится вне полосы поглощения, характеризуются высокой чувствительностью при измерении концентрации газов в атмосфере. Кроме того, комбинированные лазерные системы на основе тулиевых лазеров ( $\lambda > 2$  мкм) могут использоваться в качестве накачки параметрических генераторов света, например, кристаллов  $\text{ZnGeP}_2$ , для преобразования излучения в средний ИК диапазон ( $\sim 3$ -6 мкм), которые также актуальны для практических применений, в частности, для решения военно-технических задач.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается высоким уровнем экспериментальной техники, сопоставлением данных, полученных различными методами, применением современных теоретических представлений и методов обработки при анализе данных, сравнением с имеющимися литературными данными.

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

1. Реализован непрерывный режим работы набора дисковых  $15\text{at.}\% \text{Tm}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$  лазеров излучающих в двухмикронном диапазоне длин волн с толщиной активного слоя от 200 до 300 мкм. Максимальная выходная мощность генерации составила свыше 4.9 Вт, что соответствует полной оптической  $\sim 25\%$  и дифференциальной  $\sim 32\%$  эффективностям.
2. Продемонстрирована работа дисковых лазеров на основе эпитаксиальных структур  $\text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ . В результате оптимизации параметров активного элемента и схемы диодной накачки реализован компактный дисковый тулиевый лазер на основе эпитаксиальной структуры  $15\text{at.}\% \text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  (толщина активного слоя 450 мкм) с дифференциальной эффективностью генерации более 46%.
3. Продемонстрирована работа дисковых лазеров на основе изготовленных композитных структур с толщиной активного слоя 250 и 450 мкм. Использование в качестве активных элементов лазеров композитных и эпитаксиальных структур  $5\% \text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  позволяет увеличить предельную плотность энергопотребления более чем в два раза в сравнении с дисками  $5\text{at.}\% \text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  при одинаковой толщине активного слоя;



4. Внутренние напряжения в композитных структурах  $\text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ , возникающие в процессе диффузионной сварки, влияют на формирование спектра генерации лазеров на их основе.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах Института лазерной физики СО РАН, а также на международных конференциях: 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 (2010), San Francisco, USA; Intl. Conf. on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2010) collocated with Intl. Conf. on Lasers, Applications, and Technologies (LAT 2010), Kazan, Russia; Intl. Conf. on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2013) collocated with Intl. Conf. on Lasers, Applications, and Technologies (LAT 2013), Moscow, Russia; VI Int. Symposium on Modern Problems of Laser Physics (MPLP 2013), Novosibirsk, Russia; Intl. Conf. «Laser Optics 2014» (LO-14) 2014, St. Petersburg, Russia; V Russian-Chinese Workshop and School for Young Scientists on Laser Physics and Photonics (RCWLP&P 2015), Novosibirsk, Russia; II молодежная научно-практическая конференция «Региональные программы и проекты в области интеллектуальной собственности», Москва, Россия (2015), VII Int. Symposium on Modern Problems of Laser Physics (MPLP 2016), Novosibirsk, Russia; Intl. Conf. «Laser Optics 2016» (LO-14), St. Petersburg, Russia; Intl. Conf. on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2016) collocated with Intl. Conf. on Lasers, Applications, and Technologies (LAT 2016), Minsk, Belarus; Advanced Solid State Lasers (ASSL 2017), Nagoya, Japan; VIII Int. Symposium on Modern Problems of Laser Physics (MPLP 2018), Novosibirsk, Russia; Intl. Conf. «Laser Optics 2018» (ICLO-18), St. Petersburg, Russia; 8th Pacific-Rim Laser Damage (PLD 2018), Yokohama, Japan.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 29 работ, список которых приведен в конце автореферата: 12 работ опубликовано в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных ВАК [П1-П12], 16 работ опубликовано в материалах

всероссийских и международных конференций [П13–П28], получен 1 патент [П29].

**Личный вклад автора.** Все результаты, представленные в работе, получены соискателем лично, либо в соавторстве при его непосредственном участии. Автор принимал участие в проведении экспериментов, обработке и обсуждении полученных результатов, подготовке публикаций по теме диссертационной работы. Основные работы выполнены в Институте лазерной физики СО РАН совместно в соавторстве с сотрудниками Института неорганической химии СО РАН, а также при сотрудничестве с группами исследователей из Института физики и кристаллографии материалов и наноматериалов (FiCMA-FiCNA, Испания), Института Макса Планка (Германия) и Института физики им. Б.И.Степанова (Беларусь). Во всех случаях использования результатов других исследований в диссертации приведены ссылки на источники информации.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 96 страниц, включая 29 рисунков, 7 таблиц и списка цитируемой литературы из 66 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, определяются цель и задачи исследований, перечисляются основные положения диссертации, выносимые на защиту, приводятся научная новизна и практическая значимость полученных результатов, излагается краткое содержание глав с указанием основных полученных результатов.

**Первая глава** является обзорной. В ней дана краткая историческая справка о развитии новых перспективных кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, которые являются ключевым объектом исследования. В рамках диссертационной работы были апробированы технологии синтеза монокристаллов  $Tm^{3+}:KRE(WO_4)_2$ , эпитаксиальных структур, а так же предложена и реализована технология изготовления дисковых композитных структур.

Так, в п.1.1 описывается технология синтеза исследуемых высококачественных однородных монокристаллов  $KY(WO_4)_2$  и  $KLu(WO_4)_2$  с концентрацией тулия от 5 до 15 ат.% модифицированным низко градиентным методом Чохральского. В результате оптимизации условий синтеза в Институте неорганической химии СО РАН были получены высококачественные крупногабаритные структурно-совершенные кристаллы, которые были использованы для проведения спектроскопических и генерационных экспериментов в рамках задач, решаемых в диссертационной работе, см. рис.1а.

В п.1.2 рассмотрена технология синтеза образцов эпитаксиальных структур методом жидкофазной эпитаксии. В рамках совместных работ с зарубежными партнерами, в Институте физики и кристаллографии материалов и наноматериалов (FiCMA-FiCNA, Испания), совместно с Институтом Макса Планка (Германия), были синтезированы образцы эпитаксиальных структур  $Tm^{3+}:KLu(WO_4)_2/KLu(WO_4)_2$  с концентрацией тулия от 5 до 15 ат.%, при этом толщина активного кристаллического слоя выращенного на нелегированной подложке структур варьировалась от 80 до 450 мкм, см. рис.1б.

В п.1.3 приведено описание методики изготовления многослойных активных элементов на основе анизотропных кристаллов. В частности, разработаны композитные структуры 5...10ат.% $Tm^{+3}:KLu(WO_4)_2/KLu(WO_4)_2$  с толщиной активного слоя 250

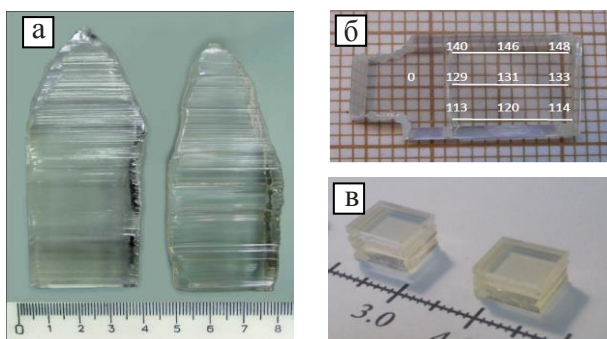


Рис. 1. Фотографии образцов синтезированных монокристаллов  $Tm:KLu(WO_4)_2$  (а), эпитаксиальных (б) и композитных (в) структур  $Tm:KLu(WO_4)_2/KLu(WO_4)_2$ .

и 450 мкм, которые, так же как и эпитаксиальные структуры, представляют собой жесткое неразъемное соединение двух однотипных кристаллов различных по составу. Как правило, такое соединение осуществляется при оптическом контакте за счет взаимной диффузии (срачивания) приповерхностных слоев контактируемых материалов в условиях повышенных температур и давления, см. рис. 1в.

Кроме того, в **п.1.4** представлены структурные и физические характеристики нелегированных кристаллов двойных вольфраматов  $KRE(WO_4)_2$ . В **п.1.5** описаны спектрально-люминесцентные свойства кристаллов  $KRE(WO_4)_2$ , легированных ионами  $Tm^{3+}$ . Приводится сравнение основных спектроскопических характеристик ионов  $Tm^{3+}$  в исследуемых монокристаллах  $KRE(WO_4)_2$ , а также в других кристаллических матрицах  $Y_3Al_5O_{12}$ ,  $YLiF_4$  и  $YAlO_3$ . Приведены спектры поглощения и люминесценции исследуемых кристаллов. Описывается структурная схема энергетических уровней трехвалентного тулия  $Tm^{3+}$  в кристаллах  $Tm^{3+}:KRE(WO_4)_2$ . В разделе отмечены недостатки и достоинства исследуемых лазерных сред, в частности, высокие значения сечений люминесценции, широкие полосы поглощения, хорошие теплофизические свойства.

Также в **п.1.6** демонстрируются результаты предварительных экспериментов по получению генерации на монокристалле  $15at.\%Tm^{3+}:KY(WO_4)_2$ . В разделе обосновывается основная цель настоящей работы, а именно возможность создания на их основе новых высокоэффективных компактных лазерных систем с диодной накачкой, работающих в двухмикронной области спектра.

В заключительном **п.1.7** приводятся основные выводы к первой главе.

**Вторая глава** посвящена комплексному экспериментальному исследованию спектрально-генерационных характеристик дисковых лазеров на основе монокристаллов  $15at.\%Tm^{3+}:KY(WO_4)_2$ .

Параграф **2.1** посвящен принципу работы твердотельных дисковых лазеров с диодной накачкой, в нем описаны основные элементы конструкции резонатора, приведены примеры реализации многопроходных схем накачки дисковых активных элементов.

В **п.2.2** описывается процесс разработки дисковых активных элементов на основе монокристаллов  $15at.\%Tm^{3+}:KY(WO_4)_2$  и способ

установки их на теплоотводы. Приводятся результаты исследования параметров излучения диодной линейки, используемой для накачки активных элементов. Изучен вопрос формирования излучения диодной линейки с помощью различных зеркальных и линзовых систем с целью оптимизации накачки, в частности, описывается четырехзеркальная система коллимации. Исследуется температурная зависимость длины волны излучения лазера накачки, а также обсуждается вопрос о согласовании спектров источника накачки и поглощения образцов с целью обеспечения максимальной эффективности поглощения лазерного излучения.

В **п.2.3** представлены спектрально - генерационные характеристики дисковых лазеров на основе  $15\text{ат.}\%Tm^{+3}:KY(WO_4)_2$ . Приводятся основные результаты экспериментальных исследований набора дисковых лазеров с толщиной активного элемента от 200 до 300 мкм, генерирующих излучение в диапазоне длин волны от 1840 до 1950 нм. Показано, что оптимизация таких параметров как толщина активного элемента, длина резонатора, коэффициент пропускания и радиус кривизны выходного зеркала, а также метод фокусировки излучения накачки в активный элемент, позволяет достигнуть мощности генерации более 4.9 Вт, соответствующей полной оптической - 25% и дифференциальной - 32% эффективностям, см. табл.1.

Табл. 1. Параметры излучения  $15\text{ат.}\%Tm^{+3}:KY(WO_4)_2$  дискового лазера для пропускания выходного зеркала  $T = 0.5\%$ .

Толщина, мкм	ДЭ, %	Порог, Вт	Мощность, Вт	Длина волны, нм	Ширина спектра, нм
200	31	4.0	3.5	1947	12
250	32	3.8	4.5	1950	12
300	32	3.9	4.9	1949	10

В заключительном **п.2.4** приводятся основные выводы ко второй главе.

**Третья глава** посвящена комплексному экспериментальному исследованию генерационных характеристик набора дисковых лазеров с диодной накачкой на основе эпитаксиальных структур  $KLu(WO_4)_2$  с концентрацией ионов тулия от 5 до 15 ат.%.

**В п.3.1** впервые продемонстрированы результаты работ по исследованию дискового лазера на основе эпитаксиальной структуры  $15\text{ат.}\%Tm^{3+}:KLu(WO_4)_2/KLu(WO_4)_2$ . Описан процесс разработки дискового активного элемента с толщиной активного слоя 80 мкм. Обсуждается альтернативная схема формирования излучения диодной линейки, основанная на двухзеркальном коллиматоре. Исследуются генерационные характеристики лазера в зависимости от параметров резонатора. В частности, представлены зависимости выходных параметров излучателя от величины пропускания выходного зеркала для квазинепрерывного и непрерывного режимов, см. табл. 2. Также изучена зависимость средней выходной мощности в квазинепрерывном режиме от физической длины резонатора лазера.

Табл. 2. Дифференциальная эффективность дисковых лазеров для коэффициентов пропускания выходного зеркала  $T = 2.8\%$ ,  $1.6\%$ , и  $0.4\%$ .

$T_{ос}, \%$	ДЭ (QCW режим)	ДЭ (CW режим)
0.4	12.0%	11.2%
1.6	12.2%	9.8%
2.8	10.6%	6.7%

Обнаружена и впоследствии многократно подтверждена «структурированная» форма спектров выходного излучения дисковых  $Tm^{3+}:KLu(WO_4)_2/KLu(WO_4)_2$  лазеров, которая представляет собой совокупность (5-10) отдельных неэквидистантных пиков со спектральной шириной менее 1 нм, соответствующих переходам между отдельными штарковскими уровнями. Изучено влияние окружающей среды, в которую помещен резонатор (генерации в обычных условиях, резонатор помещен в аргон) на форму и спектральный состав генерации.

**В п.3.2** проведен сравнительный анализ выходных генерационных характеристик для лазеров в зависимости от конфигурации активного элемента, а также параметров резонатора. Исследуются экспериментальные зависимости доли поглощенной в кристалле мощности накачки от мощности излучения диодных линеек в схемах с настроенным и разъюстированным резонатором. В силу того, что форма и однородность пятна накачки оказывает существенное влияние на генерационные характеристики лазера, то для накачки

эпитаксиальных структур  $\text{Tm}^{+3}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  был разработан модернизированный компактный модуль, обеспечивающий среднюю мощность до 60Вт в непрерывном режиме работы, и при этом обеспечивающий круглую форму пятна в фокусе. Результаты исследования спектрально-генерационных характеристик дисковых лазеров с оптимизированной диодной накачкой, ключевыми компонентами которых являются эпитаксиальные структуры  $5\dots 15\text{ат.}\%\text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  с толщиной активного слоя от 160 до 450 мкм, систематизированы в таблице 3.

На завершающем этапе работы были проведены исследования генерационных характеристик лучшего образца эпитаксиальной структуры  $5\text{ат.}\%\text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  в непрерывном режиме работы дискового лазера с целью определения максимальной мощности генерации, а также порога разрушения структуры. Согласно измерениям, рассчитанная дифференциальная эффективность, отнесенная к поглощенной мощности накачки, составила около 47%, т.е. одинакова как для непрерывного, так и для квазинепрерывного режимов генерации. Оптическая эффективность при этом равнялась 42 %. При этом интенсивность излучения накачки в момент разрушения структуры составляла  $\sim 4,8 \text{ кВт/см}^2$ , см. рисунок 2.

Табл. 3. Основные параметры генерации различных образцов эпитаксиальных структур  $\text{Tm}^{+3}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  в квазинепрерывном режиме работы лазера ( $T = 2.8\%$ ).

Концентрация $\text{Tm}$ , %	Толщина слоя, мкм	ДЭ, %	Порог генерации, Вт	Длина волны, нм	Диапазон генерации, нм
5	250	47	0.08	1855	12
10	160	38	0.31	1850	15
10	220	42	0.27	1917	10
15	160	46	0.29	1920	10
15	250	43	0.36	1930	25
15	450	40	0.50	1945	10

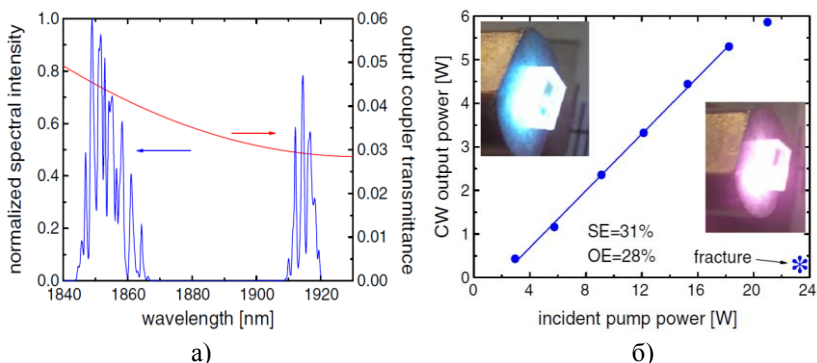


Рис. 2. Типичный спектр генерации (а) и генерационные характеристики, полученные для образца эпитаксиальной структуры  $5\text{at.}\% \text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ , в непрерывном режиме накачки (б).

В заключительном п.3.3 приводятся основные выводы к третьей главе.

В четвертой главе представлены результаты сравнительных исследований спектрально-генерационных характеристик набора дисковых лазеров на основе монокристаллов  $5\text{at.}\% \text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  и композитных структур  $5\text{at.}\% \text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ .

В п.4.1 описывается процесс разработки дисковых активных элементов на основе монокристаллов  $5\text{at.}\% \text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  и композитных структур  $5\text{at.}\% \text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  с толщиной активного слоя 250 и 450 мкм, см. вставку к рисунку 3б.

В п.4.2 представлены результаты исследования генерационных характеристик дисков  $5\text{at.}\% \text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  и композитов  $5\text{at.}\% \text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  для квазинепрерывного режима накачки (скважность 14%), см. табл. 4. Согласно результатам измерений, композиты показали несколько лучшую дифференциальную эффективность генерации по сравнению с аналогичными дисковыми элементами, что, по всей видимости, связано с уменьшением перегрева структуры в области накачки за счет дополнительного теплоотвода через подложку. Вместе с тем, дифференциальная эффективность генерации всех исследованных образцов превышает 50%, что находится в хорошем соответствии с аналогичной величиной для монокристаллов и эпитаксиальных структур.



Табл. 4. Параметры генерации для дисковых и композитных элементов с активным слоем  $5\text{ат.}\% \text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  (QCW режим накачки).

Образец	Толщина, мкм	ДЭ, %	ОЭ, %	Пороговая мощность, Вт
Композит 1	250	51.4	44.6	0.31
Диск 1	250	50.2	43.1	0.29
Композит 2	450	55.8	49.1	0.39
Диск 2	450	50.9	44.9	0.41

Спектры генерации дисков и композитных структур в условиях квазинепрерывной накачки при максимальной выходной мощности представлены на рисунке 3а. Экспериментально показано, что внутренние напряжения в композитных структурах значительно влияют на спектральные характеристики генерации лазера. Показано, что использование в качестве активных элементов лазеров композитных и эпитаксиальных структур позволяет увеличить предельную плотность энергосъема более чем в два раза в сравнении с дисками  $5\text{ат.}\% \text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  при одинаковой толщине активного слоя, см. рисунок 3б.

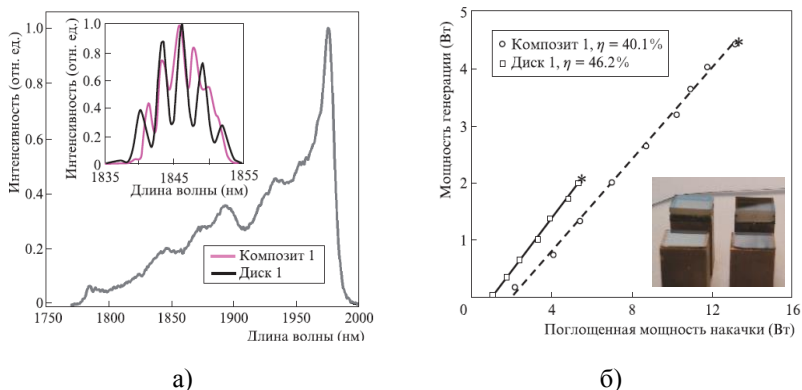


Рис. 3. Спектры генерации (а) и зависимости мощности генерации от поглощенной мощности накачки (б) в непрерывном режиме для дисков  $5\text{ат.}\% \text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  и композитов  $5\% \text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  с толщиной активного слоя 250 мкм.

В заключительном п.4.3 приводятся выводы к четвертой главе.

**В заключении** представлены основные результаты, полученные в работе, приведен список основных публикаций по теме диссертации и список цитируемой литературы.

### **Основные результаты диссертации**

В настоящей работе решена задача комплексного исследования генерационных характеристик твердотельных дисковых лазеров с диодной накачкой на основе новых активных сред – монокристаллов  $\text{Tm}^{3+}:\text{KRE}(\text{WO}_4)_2$ , эпитаксиальных и композитных структур  $\text{Tm}^{3+}:\text{KRE}(\text{WO}_4)_2/\text{KRE}(\text{WO}_4)_2$ , с целью создания высокоэффективных компактных излучателей на их основе, работающих в двухмикронном диапазоне длин волн. В работе получены следующие основные результаты и выводы:

1. Реализован непрерывный режим работы дискового лазера на основе монокристалла  $15\text{ат.}\%\text{Tm}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ . На разработанных активных элементах с толщиной диска 200, 250 и 300 мкм при накачке излучением диодной линейки на длине волны 802 нм получена генерация в двухмикронном диапазоне длин волн. Впервые достигнута максимальная мощность генерации более 4.9 Вт на длине волны 1880 нм, соответствующая полной оптической эффективности - 25% и дифференциальной эффективности - 32%;
2. Впервые была продемонстрирована работа дисковых лазеров на основе эпитаксиальных структур  $5...15\text{ат.}\%\text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  с толщиной активного слоя от 80 до 450 мкм, как в квазинепрерывном, так и в непрерывном режимах. Дифференциальная эффективность на всех образцах эпитаксиальных структур превышала 40%, при этом максимальная эффективность генерации наблюдалась на дисковом активном элементе  $5\text{ат.}\%\text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  с толщиной активного слоя 250 мкм и равнялась 47%. Изучение спектрально-оптических свойств эпитаксиальных структур показало, что использование исследованных сред позволяет создавать высокоэффективные лазерные системы с возможностью перестройки более 100 нм в двухмикронном диапазоне длин волн. Кроме того, была также впервые обнаружена (и впоследствии многократно подтверждена) «структурированная» форма спектров выходного излучения дисковых  $\text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  лазеров, которые

представляют собой совокупность (5-10) отдельных неэквидистантных пиков со спектральной шириной менее 1 нм, соответствующих переходам между отдельными штарковскими уровнями.

3. Предложена и реализована технология изготовления дисковых композитных активных  $\text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  элементов (аналог эпитаксиальных структур) методом высокотемпературного диффузионного сращивания в вакууме. Впервые проведен ряд сравнительных исследований спектрально-генерационных характеристик двухмикронных тулиевых лазеров с диодной накачкой на основе композитных структур и тонких дисков. На образце композита (аналог эпитаксиальных структур  $\text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ ), с толщиной активного слоя 250 мкм, получена мощность генерации около 5 Вт в непрерывном режиме на длине волны 1.85 мкм. В условиях квазинепрерывной накачки дифференциальная эффективность превысила 50% для всех исследованных образцов. Кроме того, было экспериментально установлено, что внутренние напряжения в композитных структурах значительно влияют на спектральные характеристики генерации, в частности изменяют форму и ширину спектра генерации;
4. Продемонстрирована возможность увеличения выходной мощности генерации на образце монокристалла  $5\text{at.}\% \text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ . Разработан действующий макет высокоэффективного малогабаритного тулиевого лазера с активным элементом в мини-слэб конфигурации. Выходная мощность лазера составила свыше 10 Вт в спектральной области 1.91 мкм, что является рекордной величиной для активных сред на основе кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных тулием.

В целом, за период 2007-2019 гг. было проведено полномасштабное исследование генерационных характеристик лазерных сред нового поколения  $\text{Tm}:\text{KRE}(\text{WO}_4)_2$ ,  $\text{RE}=\text{Y}, \text{Lu}$ , а также экспериментально подтверждена возможность увеличения выходной мощности до уровня 50...100 Вт в двухмикронном диапазоне длин волн, 1.8-2.0 мкм.

## Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю и наставнику – с.н.с. ФГБУН ИЛФ СОРАН к.ф.-м.н. Ватнику С. М. за помощь в выборе темы диссертации, руководство работой, помощь при проведении экспериментальных работ, обсуждении результатов, а также при подготовке публикаций. Автор также выражает благодарность руководителю группы ФГБУН ИНХ СОРАН к.т.н. Павлюку А. А., за предоставленные для исследований образцы высококачественных монокристаллов. Автор благодарит группу зарубежных ученых в составе авторского коллектива: Martha Segura, Rosa Maria Solé, Xavier Mateos, Joan J. Carvajal, Maria Cinta Pujol, Jaume Massons, Magdalena Aguiló, Valentin Petrov, Uwe Griebner, Francesc Díaz, за предоставленные для исследований образцы эпитаксиальных структур, а также за помощь в обсуждении результатов научных исследований и подготовке совместных публикаций. Автор выражает свою искреннюю благодарность с.н.с. ФГБУН ИЛФ СОРАН к.ф.-м.н. Курбатову П. Ф. за поддержку и оказанную помощь в подготовке экспериментов по отработке технологии изготовления композитных структур, а также помощь в проведении экспериментов по отработке технологии нанесения металлизированных покрытий на образцы монокристаллов и структур. Также автор благодарит сотрудников ФГБУН ИЛФ СОРАН в лице руководителя группы Андросова Г.Н., ведущего инженера Эрга Г. В., н.с. Ковалева С. И., оператора Кукарина Л. Ф. за помощь и содействие при изготовлении активных элементов излучателей, оптических деталей и вспомогательной оптики.

## СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. S. M. Vatnik, I. A. Vedin, A. A. Pavljuk - High-efficient diode-pumped thin disk 15%Tm:KYW laser // Proc. of SPIE, 6731, 673110 (1-3) (2007);
2. Sergei Vatnik, Ivan Vedin, Maria Cinta Pujol, Xavier Mateos, Joan J. Carvajal, Magdalena Aguiló, Francesc Diaz, Uwe Griebner, Valentin Petrov – CW laser operation of a highly-doped Tm:KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>/KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> thin disk epitaxial laser // Proc. of SPIE, Vol. 7578 75780E-1 (2010);

3. S. M. Vatinik, I. A. Vedin, M.C. Pujol, X. Mateos, J.J. Carvajal, M. Aguilo, F. Diaz, U. Griebner, V. Petrov – Thin disk Tm-laser based on highly doped Tm:KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>/KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> epitaxy // Laser Physics Letters, v. 7, No. 6, pages 435–439 (2010);
4. S. M. Vatinik, I. A. Vedin, Martha Segura, Xavier Mateos - Efficient thin-disk Tm-laser operation based on Tm:KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>/KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> epitaxies // Optics Letters, V. 37, No. 3, 356-358 (2012);
5. Martha Segura, Rosa Maria Solé, Xavier Mateos, Joan J. Carvajal, Maria Cinta Pujol, Jaume Massons, Magdalena Aguiló, Sergei Vatinik, Ivan Vedin, Valentin Petrov, Uwe Griebner, Francesc Díaz - Crystal growth, characterization and thin disk laser operation of KLu<sub>1-x</sub>Tm<sub>x</sub>(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>/ KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> epitaxial layers // CrysEngComm., 14, No. 1, 223-229 (2012);
6. S.M. Vatinik, I.A. Vedin, A.A. Pavlyuk – High-efficiency 5%Tm:KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> N<sub>m</sub>-cut minislabs laser // Laser Phys. Lett., V. 9, No. 11, 765–769 (2012);
7. P.A. Loiko, S.M. Vatinik, I.A. Vedin, A.A. Pavlyuk, K.V. Yumashev and N.V. Kuleshov - Thermal lensing in Nm-cut monoclinic Tm:KLu.WO<sub>4</sub>/2 laser crystal // Laser Phys. Lett., 10, 125005 (2013);
8. S.M. Vatinik, I.A. Vedin, P.F. Kurbatov, A.A. Pavlyuk - Efficient 2-mm laser oscillation of 5 %Tm<sup>3+</sup>:KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> disks and 5%Tm<sup>3+</sup>:KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>/KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> composite structures // Quantum Electronics, 44 (11) 989 – 992 (2014);
9. S.M. Vatinik, I. A. Vedin, P.F. Kurbatov, E. A. Smolina, A. A. Pavlyuk, Yu. V. Korostelin, Ya. K. Skasyrsky – «Spectral and power characteristics of a 5%Tm:KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> N-m-cut minislabs laser passively Q-switched by a Cr<sup>2+</sup>:ZnSe crystal» // Quantum Electronics 47 (11), 981-985 (2017);
10. X. Mateos, S. Lamrini, K. Scholle, P. Fuhrberg, S. Vatinik, P. Loiko, I. Vedin, M. Aguilo, F. Diaz, U. Griebner, and V. Petrov – «Holmium thin-disk laser based on Ho:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>/KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> epitaxy with 60% slope efficiency and simplified pump geometry» // Optics Letters, 42, 3490 (2017);
11. X. Mateos, P. Loiko, S. Lamrini, K. Scholle, P. Fuhrberg, S. Vatinik, I. Vedin, M. Aguiló, F. Díaz, U. Griebner, and V. Petrov – «Thermo-optic effects in Ho:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> thindisk lasers» // Optical Materials Express, 8, 684 (2018);

12. X. Mateos, P. Loiko, S. Lamrini, K. Scholle, P. Fuhrberg, S. Suomalainen, A. Härkönen, M. Guina, S. Vatik, I. Vedin, M. Aguiló, F. Díaz, Y. Wang, U. Griebner, and V. Petrov – «Ho:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> thin-disk laser passively Qswitched by a GaSb-based SESAM» // Optics Express, 26, 9011 (2018);
13. S. M. Vatik, I. A. Vedin, A. A. Pavljuk - High-efficient diode-pumped thin disk 15%Tm:KYW laser // Int. Conf. on Lasers, Applications, and Technologies (LAT 2007), Minsk, Belarus;
14. S. M. Vatik, I. A. Vedin, A. A. Pavljuk - High-efficient diode-pumped thin disk 15%Tm:KYW laser // V Int. Symposium on Modern Problems of Laser Physics (MPLP 2008), Novosibirsk, Russia;
15. S. M. Vatik, I. A. Vedin, A. A. Pavljuk - High-Efficiency Transversely Pumped 5%Tm:KLuW Mini-Slab Laser // Solid State Lasers XIX: Technology and Devices, San Francisco, California, USA, January 23, 2010;
16. S. M. Vatik, I. A. Vedin, A. A. Pavljuk - High-efficiency operation of diode pumped 4.5%Tm:KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser // Intl. Conf. on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2010) collocated with Intl. Conf. on Lasers, Applications, and Technologies (LAT 2010), Kazan, Russia;
17. S. N. Bagaev, S. M. Vatik, I. A. Vedin, P. F. Kurbatov, A. A. Pavlyuk, X. Mateos, M. C. Pujol, F. Díaz, V. Petrov, U. Griebner, Yu. V. Korostelin and Ya. K. Skasyrsky - "Novel high-efficiency thulium lasers based on monoclinic KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystalline host" // Intl. Conf. on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2013) collocated with Intl. Conf. on Lasers, Applications, and Technologies (LAT 2013), Moscow, Russia;
18. S. M. Vatik, I. A. Vedin, A. A. Pavlyuk, X. Mateos, M. C. Pujol, F. Díaz, V. Petrov, U. Griebner - "Novel high-efficiency thin-disk lasers based on Tm:KLuW/KLuW epitaxy" // VI Int. Symposium on Modern Problems of Laser Physics (MPLP 2013), Novosibirsk, Russia;
19. S. Vatik, I. Vedin, P. Kurbatov, A. Pavlyuk - "High-Efficiency Thin-Disk Laser Based on Tm-doped KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>/KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> Composite Crystal" // Intl. Conf. «Laser Optics 2014» (LO-14) 2014, St. Peterburg, Russia;
20. S. Vatik, I. Vedin, P. Kurbatov, A. Pavlyuk - High-efficiency thin-disk laser based on Tm-doped KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>/KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> composite

- crystal // V Russian-Chinese Workshop and School for Young Scientists on Laser Physics and Photonics (RCWLP&P 2015), Novosibirsk, Russia;
21. И.А. Ведин, П. Ф. Курбатов, С. М. Ватник, Г. Н. Андросов, В. Н. Бельтюгов - «Технология нанесения однородных металлизированных покрытий с использованием вакуумного дугового анодного испарителя» // II молодежная научно-практическая конференция «Региональные программы и проекты в области интеллектуальной собственности», Москва, Россия (2015);
  22. S.M. Vatik, I.A. Vedin, P.F. Kurbatov, A.A. Pavlyuk - CW Laser Performance of Diode Pumped 5%Tm:KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> Crystals // VII Int. Symposium on Modern Problems of Laser Physics (MPLP 2016);
  23. S. Vatik, I. Vedin, P. Kurbatov, A. Pavlyuk - High-efficiency thin-disk laser based on Tm-doped KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>/KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> composite crystal // Intl. Conf. «Laser Optics 2016» (LO-16) 2016;
  24. S.M. Vatik, I.A. Vedin, P.F. Kurbatov, A.A. Pavlyuk - High-Efficiency Laser Based on 4.5%Tm:KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> Octagon Rod, Intl. Conf. on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2016) collocated with Intl. Conf. on Lasers, Applications, and Technologies (LAT 2016) 2016;
  25. X. Mateos, S. Lamrini, K. Scholle, P. Fuhrberg, S. Vatik, P. Loiko, I. Vedin, M. Aguilo, F. Diaz, U. Griebner, and V. Petrov - «Power scaling and thermo-optics of Ho: KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> thin-disk lasers: Effect of Ho<sup>3+</sup> concentration» // Optics InfoBase Conference Papers Part F75-ASSL 2017;
  26. I.A. Vedin, S.N. Bagayev, V.A. Orlovich, S.M. Vatik, N.V. Kuleshov, E.V. Smolina, A.A. Pavlyuk, N.V. Guskova, S.V. Kurilchik, A.S. Yasukevich, V.E. Kisel, K.V. Yumashev, P.A. Loiko, V.I. Dashkevich - «Efficient Tm-laser operation based on 5%Tm:KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> with N<sub>m</sub> and AT orientation» // VIII Int. Symposium on Modern Problems of Laser Physics (MPLP 2018);
  27. S.N. Bagayev, V.A. Orlovich, S.M. Vatik, N.V. Kuleshov, I.A. Vedin, E.V. Smolina, A.A. Pavlyuk, N.V. Guskova, S.V. Kurilchik, A.S. Yasukevich, V.E. Kisel, K.V. Yumashev, P.A. Loiko, V.I. Dashkevich - «Highly-Efficient Multi-Watt Lasing in

5at.%Tm:KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> Mini-Slabs» // Intl. Conf. «Laser Optics 2018» (ICLO-18) 2018;

28. X. Mateos, P. Loiko, S. Lamrini, K. Scholle, P. Fuhrberg, S. Suomalainen, A. Härkönen, M. Guina, S. Vatnik, I. Vedin, M. Aguiló, F. Díaz, Y. Wang, U. Griebner, and V. Petrov - «Highly-efficient Ho:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> thin-disk lasers at 2.06» // 8th Pacific-Rim Laser Damage (PLD 2018) 2018;
29. И.А. Ведин, П. Ф. Курбатов, С. М. Ватник, Г. Н. Андросов, В. Н. Бельтюгов – Вакуумный дуговой испаритель металлов // патент RU 2530073 C1 от 10.10.201



Ведин И.А.

ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСКОВЫХ ЛАЗЕРОВ НА  
ОСНОВЕ ДВОЙНЫХ КАЛИЙ-РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ  
ВОЛЬФРАМАТОВ  $Tm^{3+}:KRE(WO_4)_2$ , RE = Y, Lu

Автореферат

Подписано в печать **00.00.2019**  
Формат бумаги 60×84/16, Усл. печ. л. 1.05,  
Уч.-изд. л. 1.0, Тираж 100 экз., Заказ № **00**

Отпечатано в типографии ООО «Параллель»  
630090, Новосибирск, Институтская, 4/1