

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.070.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
НАУКИ ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 14.06.2024 г. № 1

О присуждении Ватнику Сергею Марковичу, гражданину России, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация **«Высокоэффективные лазерные излучатели на основе кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных ионами тулия и гольмия»** по специальности «1.3.19 – Лазерная физика» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук принята к защите 01.02.2024 г., протокол № 3, диссертационным советом 24.1.070.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН), 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 15Б, приказ № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Ватник Сергей Маркович, 1960 года рождения, с 1995 по 2022 г. работал старшим научным сотрудником, заведующим сектором Твердотельные лазерные системы с диодной накачкой в ИЛФ СО РАН. С 2022 г. по настоящее время работает в Общество с ограниченной ответственностью Научно-техническое объединение **«ИРЭ — Полюс»** г. Фрязино в должности начальника Лаборатории метрологии оптических материалов. В 1995 г. соискателю была присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук, диплом №009621 от 14 июля 1995 г.

Диссертация выполнена в Отделе лазерной физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный консультант – Багаев Сергей Николаевич, академик РАН, доктор физико-математических наук, научный руководитель ИЛФ СО РАН.

Официальные оппоненты, давшие положительные отзывы на диссертацию:

Кобцев Сергей Михайлович - доктор физико-математических наук, (специальность 01.04.05 – Оптика), руководитель отдела лазерной физики и инновационных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский

национальный исследовательский государственный университет» (НГУ), г. Новосибирск.

Рубцова Наталия Николаевна - доктор физико-математических наук, (специальность 01.04.05 – Оптика), ведущий научный сотрудник лаборатории лазерной спектроскопии и лазерных технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН), г. Новосибирск.

Цветков Владимир Борисович - доктор физико-математических наук (специальность 01.04.21 – Лазерная физика), профессор, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН), г. Москва.

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН), г. Нижний Новгород, дала положительный отзыв на диссертацию. Отзыв подготовлен ведущим научным сотрудником лаборатории твердотельных лазеров ИПФ РАН, д.ф.-м.н. Антиповым Олегом Леонидовичем, подписан руководителем отделения нелинейной динамики и оптики ИПФ РАН, д.ф.-м.н. Стародубцевым Михаилом Викторовичем.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обоснован их компетентностью в области оптики, спектроскопии активных сред, лазерной физики, широкой известностью своими достижениями в этих областях и способностью объективно оценить научную и практическую ценность диссертационной работы.

В своем положительном заключении ведущая организация указала, что диссертация Ватника Сергея Марковича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержатся новые решения актуальных проблем физики твердотельных лазеров с диодной накачкой, а ее результаты представляют значительный интерес в области комплексного исследования спектрально-генерационных характеристик анизотропных активных сред и разработки эффективных лазерных источников двухмикронного диапазона.

В отзывах оппонентов и ведущей организации отмечается актуальность темы диссертационной работы, высокий профессиональный уровень её выполнения, а также новизна, научная и практическая значимость результатов. Отмечается, что автореферат в полной мере соответствует диссертации и отражает её содержание.

В отзыве ведущей организации были сделаны следующие замечания:

1. В диссертации описан метод измерения термооптических коэффициентов кристаллов, предложенный автором. Однако в диссертации не представлен анализ погрешностей измерений при его экспериментальной реализации. Не приводится также сравнение этого метода с другими измерительными методиками и подходами к определению термооптических коэффициентов.
2. В диссертации рассмотрен механизм образования и кинетика фотонной лавины в кристаллах двойных калий-редкоземельных вольфраматов, однако отсутствует сравнение спектроскопических и кинетических параметров этого эффекта с другими кристаллами, активированными ионами Tm^{3+} или No^{3+} .
3. Модель образования фотонной лавины, разработанная автором, относится лишь к ее начальному участку, поскольку не учитывает заселенности других энергетических уровней, лежащих выше 3F_4 , т.е. она дает в основном качественные оценки.
4. Спектры лазерной генерации, представленные в диссертации, измерены, как правило, при максимальной мощности генерации. Вызывает сожаление отсутствие данных по спектрам для другой мощности генерации, например, вблизи порога генерации. Это связано с тем, что для квазитрёхуровневых активных сред спектр генерации существенно зависит от степени инверсии населённости уровней лазерного перехода.
5. При описании термодинамической модели взаимодействия ионов Tm^{3+} и No^{3+} в диссертации не приведены численные оценки границ применимости данной модели, как по концентрациям взаимодействующих ионов, так и по кинетическим параметрам их взаимодействия. Как представляется, при малых концентрациях взаимодействующих ионов доминирующим фактором будет не выход на термодинамическое равновесие, а процессы расселения метастабильных уровней за счет индивидуальных излучательных и безызлучательных переходов.
6. В тексте диссертации встречаются отдельные опечатки, а также отдельные американизмы такие, как “слэбы” (вместо “пластин”) или “допирование” (вместо “легирования”).

В отзыве официального оппонента д.ф.-м.н. С. М. Кобцева были сделаны следующие замечания:

1. В результате испытаний дисковой структуры 3%No:KYW/KYW в режиме пассивной модуляции добротности лазерного резонатора полупроводниковым насыщающимся поглотителем SESAM сделан вывод о том, что оптимизация параметров SESAM даст возможность существенно увеличить энергию импульсов и сократить их длительность. Необходимо привести аргументы в пользу этого вывода.
2. В заключении утверждается о перспективности использования исследованных кристаллов для разработки малогабаритных источников

лазерного излучения, однако, габариты источников могут быть существенно больше при введении в их резонаторы дополнительных элементов, необходимых для реализации пользовательских функций этих источников (перестройка длины волны излучения, сужение линии излучения и т.д.). Необходим комментарий к такому выводу.

3. На рисунке 6.19 неточно указан масштаб времени – миллисекунды вместо наносекунд.

4. На рисунке 7.7(a) неточно указан масштаб мощности генерации – милливатты вместо ватт.

В отзыве официального оппонента д.ф.-м.н. Н. Н. Рубцовой было сделано одно замечание о применении жаргонных выражений, «метастабиль» вместо «метастабильного уровня», стр. 222.

В отзыве официального оппонента д.ф.-м.н., профессора В. Б. Цветкова были сделаны следующие замечания :

1. Отсутствие отдельной главы, посвященной литературному обзору и разбиение обзора по экспериментальным главам приводит к излишней концентрации внимания именно на кристаллах двойных калий-редкоземельных вольфрамов, активированных ионами тулия и гольмия. При этом упускается из виду то, что впервые генерация на переходах $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ иона гольмия и $^3F_4-^3H_6$ иона тулия в кристалле ИАГ была получена в 1965 году, а сенсбилизация лазерного перехода в ионе гольмия ионами тулия и эрбия реализована в 1966 г.

2. В Главе 1 описана интересная авторская методика по измерению термооптических коэффициентов при создании управляемого температурного градиента в исследуемом кристалле. Следовало бы подробнее остановиться на отличии авторской методики от похожего по экспериментальной схеме метода измерения термооптической линзы в активном элементе при работе лазера.

3. В Главе 5, раздел 4 слишком кратко описаны характеристики эпитаксиальных пленок. Было бы очень интересно привести данные по параметрам кристаллической решетки пленки и подложки, поскольку нетривиальным фактором является нанесение легированной «толстой» пленки (до 300 мкм) на нелегированную подложку с усложняющим фактором в виде некубической структуры кристалла.

4. В Главе 5, раздел 5, при описании экспериментов с активными элементами, полученными методом термодиффузионной сварки, следовало бы подчеркнуть, что, хотя эффект уширения спектральных линий примесей в кристаллах был известен ранее, однако проявление его в спектрах генерации наблюдалось впервые.

5. Слишком подробное описание результатов в заключениях к главам работы. Более краткое и более структурированное смотрелось бы лучше.

В отзывах ведущей организации и официальных оппонентов отмечается, что представленные замечания имеют частный характер, не затрагивают основных положений и выводов и не влияют на общую высокую оценку работы в целом. Соискатель заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности «1.3.19 – Лазерная физика».

На диссертацию и автореферат поступило 3 отзыва:

от Каблукова Сергея Ивановича - д.ф.-м.н., профессора, главного научного сотрудника Лаборатории оптических сенсорных систем Института автоматики и электрометрии СО РАН, Буримова Николая Ивановича - д.ф.-м.н., Заведующего кафедрой Электронных приборов Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники и Юдина Николая Александровича – д.т.н., профессора Томского государственного университета. Все отзывы положительные, содержат замечания, которые не влияют на высокий уровень оценки диссертации.

На все вопросы и замечания, содержащиеся в отзывах на автореферат, С.М. Ватником были даны ответы и комментарии.

Соискатель имеет по теме диссертации 30 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, и приравненных к ним. Наиболее значимые работы:

1. Vatnik S.M., Vedin I.A., Pavlyuk A.A. High-efficient diode-pumped thin disk 15%Tm:KYW laser // Proc. SPIE 2007, vol. 6731, pp. 673103 (1-4)
2. Vatnik S.M., Vedin I.A., Pavlyuk A.A. High-efficiency 5%Tm:KLu(WO₄)₂ N_m-cut minislabs laser // Laser Physics Letters, 2012, vol. 9, pp. 765-769
3. Ватник С.М., Ведин И.А., Курбатов П.Ф., Павлюк А.А. Эффективная двухмикронная генерация дисков и композитных структур 5%Tm³⁺:KLu(WO₄)₂/KLu(WO₄)₂ // Квантовая электроника, 2014, т.44, стр. 989-992
4. Vatnik S.M. - On the steady-state population of the Tm³F₄ and Ho⁵I₇ manifolds in a co-doped crystalline host, Journal of Luminescence Vol.149, May, pp.264–266 (2014)
5. 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 N_m-cut 5%Tm:KLu(WO₄)₂ в режиме пассивной модуляции добротности кристаллом Cr²⁺:ZnSe", «Квантовая электроника», Том 47, № 11, стр. 981-985 (2017)

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований показано:

1. Термические коэффициенты оптического пути прозрачных материалов могут быть измерены с помощью определения угла отклонения зондирующего

пучка при поперечном градиенте температур в исследуемом образце, с воспроизводимостью $10^{-7}/\text{К}$ и абсолютной погрешностью до $10^{-6}/\text{К}$.

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 вольфрамов 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 вольфрамов, активированных тулием и гольмием, обладают величиной удельного энергопотребления свыше 1 кВт/см^2 при эффективности генерации 45...65%, что обуславливает перспективность этих лазерных материалов для разработки источников когерентного излучения с выходной мощностью на уровне 50...100 Вт.

6. Внутренние термомеханические напряжения в композитных структурах $\text{Tm:KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ 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 интервале 1.8-2.0 мкм.

7. Использование насыщающихся поглотителей на основе $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 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.

Научная значимость результатов диссертации заключается в том, что:

- Впервые получен и детально проанализирован комплекс данных по спектроскопическим характеристикам кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфрамов, активированных ионами тулия и гольмия, включая численное моделирование основных процессов переноса энергии;
- Впервые проведены подробные исследования эффекта «фотонной лавины» в кристаллах двойных калий-иттриевых и калий-иттербий-иттриевых вольфрамов, активированных тулием. Экспериментально показано, что при

накачке кристаллов импульсным излучением неодимовых лазеров (Nd:YAG в режиме свободной генерации, $\lambda = 1064$ 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, прямо связанных с оптической силой термоиндуцированной (термической) линзы. На основании результатов измерений сделан вывод о наличии в кристаллах двойных калий-редкоземельных вольфраматов «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). ;

- Детально исследован режим пассивной модуляции тулиевых лазеров с помощью насыщающихся поглотителей на основе кристаллов $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, впервые получены рекордно короткие для этого метода длительности импульсов (менее 10 нс);

Впервые проведены комплексные исследования спектрально-генерационных характеристик дисковых активных элементов $\text{Ho}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ 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 обеспечения необходимых температурных режимов активных элементов;

- 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, сформулированы критерии оптимизации состава кристаллов, активированных тулием и гольмием;

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- Создан научно-технический задел для разработки промышленных лазеров двухмикронного диапазона на основе кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, в том числе в режиме импульсно-периодической генерации с высокой пиковой мощностью световых импульсов;

- Разработан ряд лабораторных макетов лазерных излучателей с диодной накачкой с выходной мощностью свыше 15 Вт на длине волны 1.91 мкм,

удельным энергопотреблением более 1 кВт/см² и полной оптической эффективностью свыше 50%, что находится на уровне современных мировых достижений;
- Практическая значимость работы подтверждена двумя актами внедрения.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждена сравнением с результатами других российских и зарубежных исследователей, публикациями в высокорейтинговых рецензируемых научных изданиях, докладами на международных семинарах и конференциях. Ряд методик измерений, разработанных автором прошел успешную апробацию в научных коллективах из Белоруссии и Германии.

Личный вклад соискателя

Авторский вклад С.М. Ватника заключается в выборе объектов исследования, выполнении основного объема теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включая разработку теоретических моделей в гл. 3 и 7, методик экспериментальных исследований, проведение экспериментальных работ, анализ и подготовку результатов к публикациям в рецензируемых научных изданиях. Автором сделаны выводы и научное обобщение полученных результатов.

Из 21 человек, входящих в состав диссертационного совета, на защите присутствовали, очно и в удаленном интерактивном режимах, 18 человек, из них 13 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации. Дополнительно введенных членов на разовую защиту не было.

При проведении тайного голосования с использованием информационных технологий проголосовали: За - 18, против - нет. Диссертационный совет утвердил протокол о результатах голосования.

На заседании 14.06.2024 г. диссертационный совет принял решение присудить Ватнику Сергею Марковичу ученую степень доктора физико-математических наук по специальности «1.3.19 – Лазерная физика».

Зам. председателя диссертационного совета 24.1.070.01,

д.ф.-м.н.



Тайченачев Алексей Владимирович

Ученый секретарь диссертационного совета,

д.ф.-м.н.

Прудников Олег Николаевич

14 июня 2024 г.