

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.063.02,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ФЕДЕРАЛЬНОГО  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ  
ИМ. А.М. ПРОХОРОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 6 июня 2022 г. № 166.

О присуждении Сафроновой Елене Сергеевне, гражданке Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Твердотельные квантроны с диодной накачкой ближнего ИК-диапазона, работающие в широком температурном диапазоне без активной системы термостабилизации» по специальности 01.04.21 – Лазерная физика по физико-математическим наукам принята к защите 4 апреля 2022 года (протокол заседания № 164) диссертационным советом Д 002.063.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (119991 Москва, ул. Вавилова, 38, совет создан приказом Рособрнадзора № 2048-1308 от 19 октября 2007 г.).

Соискатель Сафронова Елена Сергеевна 1989 года рождения. В 2013 году соискатель окончила Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова» по специальности «Физика».

В 2017 году соискатель окончила аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального

исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН» по специальности 01.04.21 - Лазерная физика.

Удостоверения о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2021 году. По философии в ФГБУН Институте Философии РАН, по английскому языку в ФГБУН Институте языкознания РАН, по специальности в ИОФ РАН.

В настоящее время работает в отделе разработки лазеров, лазерно-оптических систем и изделий микроэлектроники Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» в должности научного сотрудника.

Диссертация выполнена в отделе разработки лазеров, лазерно-оптических систем и изделий микроэлектроники ФГУП «ВНИИА» и в отделе колебаний ИОФ РАН.

Научный руководитель – Дормидонов Александр Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, начальник отдела разработки лазеров, лазерно-оптических систем и изделий микроэлектроники ФГУП «Всероссийского научно-исследовательского института автоматики им. Н.Л. Духова».

Официальные оппоненты:

Ребров Сергей Григорьевич, доктор технических наук, начальник отдела Акционерного общества Государственного научного центра Российской Федерации «Исследовательского центра имени М.В. Келдыша»,

Коняшкин Алексей Викторович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Фрязинского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской Академии Наук дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-

исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» в своем положительном заключении, подписанном Антиповым Александром Анатольевичем, кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником лаборатории нанофотоники и наноплазмоники, и утвержденном заместителем директора Федерального государственного учреждения «Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук», кандидатом физико-математических наук Соколовым Виктором Ивановичем, указала, что диссертация Сафроновой Е.С. «Твердотельные квантроны с диодной накачкой ближнего ИК-диапазона, работающие в широком температурном диапазоне без активной системы термостабилизации», являясь законченным научным исследованием, полностью удовлетворяет требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Сафронова Елена Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21-Лазерная физика.

В отзыве указаны следующие замечания:

1. Название диссертационной работы выбрано не совсем удачно. Можно было бы более четко отразить содержание диссертационной работы, например: «Разработка и оптимизация квантронов для твердотельных лазеров с поперечной диодной накачкой ближнего ИК-диапазона, работающих в широком температурном диапазоне без активной системы термостабилизации». Это же касается и формулировки «... без активной системы термостабилизации» хотя в конструкции квантрона ЛДР охлаждаются элементами Пельтье и имеется контур охлаждения с водой.
2. В диссертации приводится описание численной реализации математической модели активной среды твердотельного лазера с пассивной модуляцией добротности на основе системы скоростных

уравнений, которая позволяет рассчитывать динамику формирования лазерных наносекундных импульсов. Но в работе не отражены результаты, полученные в результате именно численного исследования динамики формирования наносекундных импульсов согласно этой модели.

3. Представлены спектры и  $\wedge$  мощность излучения лазерных диодов накачки при разных температурах, но не показано как меняется распределение интенсивности излучения и диаграмма направленности. Данные параметры могут оказывать влияние на генерационные характеристики активной среды.
4. В работе предложено увеличение ширины спектра излучения ЛДР с 2 нм до 10 нм с целью сгладить зависимость эффективности узкополосной накачки от температуры. При этом вводится длина поглощения излучения в среде для спектрального интервала заданной ширины, т.е. делается предположение, что для суммарного излучения в данном спектральном интервале выполняется закон Бугера-Ламберта-Бера с некоторой "общей" длиной поглощения излучения. Но чем сильнее разброс длин поглощения для отдельных длин волн, входящих в спектральный интервал, тем менее будет применим данный закон для описания поглощения излучения в заданном спектральном интервале.
5. В тексте диссертационной работы имеются несоответствия в рисунках и подписях под ними.

Соискатель имеет 10 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 10 работ, из них в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК опубликовано 3 работы.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. **Травина Е.С.**, Дормидонов А.Е., *Лазерные диодные решетки высокой плотности мощности для накачки твердотельных лазеров в широком температурном диапазоне* // Краткие сообщения по физике ФИАН, **48**, - 2021. С.36-41.

2. Lednev V.N., Dormidonov A.E., Sdvizhenskii P.A., Grishin M.Ya, Fedorov A.N., Savvin A.D., **Safronova E.S.**, and Pershin S.M. *Compact diode-pumped Nd<sup>3+</sup>:YAG laser for remote analysis of low-alloy steels by laser-induced breakdown spectroscopy* // J. Anal. At. Spectrom., **33**, - 2018 – p.294–303.
3. Dormidonov A.E., Savvin A.D., **Safronova E.S.**, Shaulskii D.V. *Wide temperature range diode pumped Nd<sup>3+</sup>:YAG laser without active thermal stabilization* // Журнал прикладной спектроскопии, **83(6-16)**, - 2016 с.481 - 482.
4. Mitrokhin V.P., Dormidonov A.E., Savvin A.D., **Safronova E.S.**, Sirotkin A.A., Firsov K.N., Compact diode-pumped NIR and MIR lasers for nonlaboratory applications// IEEE 2018 International Conference Laser Optics (ICLO) – 2018. – p.68

На автореферат диссертации поступило пять отзывов:

1. Из Института лазерно–физических исследований ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», подписал отзыв начальник научно – теоретического отдела, заведующий кафедрой квантовой электроники СарФТИ НИЯУ МИФИ, доктор физико-математических наук Стариков Федор Алексеевич. Отзыв положительный, содержит два замечания: 1) в теме диссертации заявлен температурный диапазон от – 50 до +50°C, а результаты проведенных измерений выходных характеристик лазерной генерации, представленные на графиках в диапазоне от – 55 до + 55 °С. 2) было бы уместно в литературном обзоре указать эффективность существующих квантронов с диодной накачкой для удобства сравнения созданным в рамках диссертационной работы.
2. Из «Специального конструкторского бюро по лазерным системам и комплексам» ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина», подписала отзыв начальник отдела лазерных систем Отделения 500, кандидат технических наук Березин Андрей Владимирович. Отзыв

положительный, содержит пять замечаний: 1) не до конца раскрыто понятие «активной системы термостабилизации»; 2) из текста не понятно, что такое длина поглощения «labs»; 3) не приведена информация о марке и физических характеристик клея, которым производилась фиксация активного элемента в лейкосапфировой трубке; 4) недостаточно раскрыты вопросы согласования коэффициентов теплового расширения алюмоиттриевого граната и сапфировой трубки; 5) полученная нестабильность выходной энергии лазера во всем температурном диапазоне работы, характеризующаяся значением 30 % ограничивает область применения устройства.

3. Из Института лазерно–физических исследований ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», подписал отзыв начальник научно – исследовательского отдела, кандидат физико-математических наук Захаров Никита Геннадьевич. Отзыв положительный, содержит три замечания: 1) не обоснован выбор температурного диапазона от – 50 до + 50°C; 2) не обоснован выбор спектральных характеристик излучения накачки; 3) не приведены данные о коэффициенте распространения лазерного пучка  $M^2$ .

4. Из Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер Российской академии наук, подписал отзыв заведующий лаборатории Атмосферной адаптивной оптики, доктор физико-математических наук Кудряшов Алексей Валерьевич. Отзыв положительный, содержит одно замечание: 1) в автореферате остается не понятным почему рассматриваются разные длины волн лазерных диодных решеток для накачки выбранного типа твердотельных лазеров.

5. Из Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования науки «Национальный исследовательский Нижегородский государственный

университет им. Н.И. Лобачевского», подписал отзыв доцент кафедры квантовой радиофизики и электроники, кандидат физико-математических наук Маругин Алексей Валентинович. Отзыв положительный, содержит четыре замечания: 1) в работе рассматривается конструкция конкретного  $\text{Nd}^{+3}$ : VAG –лазера с диодной накачкой, в то время как в названии работы обозначена более широкая область исследований («твердотельные квантроны ближнего ИК-диапазона»). В тексте автореферата отсутствуют указания на степень универсальности полученных результатов по отношению к другим вариантам твердотельных лазерных излучателей; 2) в тексте автореферата отсутствуют пояснения к использованной методике численного анализа системы, хотя данная позиция присутствует в обозначенных целях работы и положениях, выносимых на защиту; 3) пункты 3 и 6 заключения практически дублируют друг друга; 4) можно считать оставляющим вопросы пояснение к приведенной в автореферате на рис. 2 температурной зависимости длины поглощения. Для объяснения влияния ширины спектра диодной линейки на эффективность накачки логичнее было бы привести спектральную зависимость коэффициента поглощения неодима, позволяющую непосредственно определить требования к условиям накачки активного элемента.

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

реализован метод математического моделирования твердотельных лазеров с диодной накачкой, отличающийся использованием множителей Лагранжа для нахождения условного экстремума решений трансцендентных уравнений, описывающих процессы генерации, и позволяющий оптимизировать параметры резонаторов с пассивной модуляцией добротности;

установлено, что измеренное смещение длины волны излучения лазерных диодов в температурном диапазоне от  $-50$  до  $+50$  °C составляет  $0,28$  нм/°C, при этом ширина и форма спектра излучения остаются неизменными, а эффективность лазерных диодных решеток падает с ростом температуры;

выявлено, что кондуктивное охлаждение активного элемента при помощи лейкосапфировой линзы без жидкого хладагента внутри корпуса обеспечивает стабильную работу квантрона с пиковой мощностью лазерной диодной накачки до  $20$  кВт при частоте повторения  $50$  Гц;

получена генерация наносекундных импульсов  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  лазера с диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности со стабильностью выходной энергии не менее  $70\%$  в температурном диапазоне от  $-50$  до  $+50$  °C без активной системы термостабилизации;

реализована схема поперечной накачки цилиндрического  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  кристалла диаметром  $5$  мм решетками лазерных диодов, сфокусированных одной цилиндрической лейкосапфировой линзой диаметром  $20$  мм, которая формирует параболический профиль инверсной населенности, практически инвариантный к изменению температуры в диапазоне от  $-50$  до  $+50$  °C;

обнаружено, что схема поперечной накачки решетками лазерных диодов, расположенных с пяти сторон вокруг кристалла  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  диаметром  $5$  мм и сфокусированных одной цилиндрической лейкосапфировой линзой диаметром  $50$  мм, обеспечивает однородность пространственного распределения инверсной населенности более  $90\%$  в поперечном сечении лазерного кристалла, что позволяет усиливать лазерные импульсы без искажения профиля пучка.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что** предложенная комплексная математическая модель твердотельных лазеров с поперечной диодной накачкой позволяет выбрать оптимальную геометрию накачки активного элемента, осуществить термодинамический расчет и подобрать оптимальные параметры лазерного резонатора, что значительно

сокращает время и повышает качество разработки лазеров и усилителей с заданными параметрами выходного излучения;

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

схема поперечной диодной накачки  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  кристалла квантрона с применением одной фокусирующей цилиндрической линзы позволяет получать в поперечном сечении кристалла устойчивое пространственное распределение инверсной населенности заданного профиля. Это может быть использовано для компактных твердотельных лазеров и усилителей различного назначения, работающих в температурном диапазоне от  $-50$  до  $+50$  °C без активной системы термостабилизации в режиме мгновенной готовности;

предложенный способ кондуктивного охлаждения активного элемента квантрона при помощи цилиндрической лейкосапфировой линзы, в качестве теплоотвода, позволяет отказаться от жидкого хладагента внутри корпуса, что в свою очередь повышает надежность и упрощает конструкцию устройства;

$\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  лазер с диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности генерирует наносекундные лазерные импульсы со стабильностью выходной энергии не менее 70 % в температурном диапазоне от  $-50$  до  $+50$  °C без активной системы термостабилизации.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:**

исследования проводились на современном научном оборудовании с использованием современных вычислительных систем и математических методов обработки данных. Достоверность результатов основана на анализе выполненных ранее работ и подтверждается сравнением полученных численных результатов с экспериментальными данными. Положения и выводы, сформулированные в диссертационной работе, получили апробацию на всероссийских и международных конференциях.

**Личный вклад соискателя состоит в:**

планировании и проведении математического моделирования и экспериментов, обработке, анализе и интерпретации полученных данных, написании и обсуждении текстов статей, в представлении результатов исследований на конференциях и семинарах.

На заседании 6 июня 2022 г. диссертационный совет принял решение присудить Сафроновой Е.С. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за «19», против «0», недействительных бюллетеней «1».

Председатель диссертационного совета  
член-корреспондент РАН



С.В. Гарнов

Ученый секретарь диссертационного совета  
канд. физ.-мат. наук

А.А. Ушаков

7 июня 2022