

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.262.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
НАУКИ ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 20 мая 2024 г № 66

О присуждении Крючкову Денису Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Компактные стабилизированные лазерные системы для транспортируемых оптических часов и прецизионной интерферометрии» по специальности 1.3.19 — Лазерная физика принята к защите 18 марта 2024 года, (протокол заседания № 63) диссертационным советом 24.1.262.01, созданным 11 апреля 2012 года приказом № 105/нк на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53.

Соискатель Крючков Денис Сергеевич, 21 октября 1995 года рождения, в 2019 году с отличием окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по направлению 03.04.01 Прикладные математика и физика. С 2019 года обучался в аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) по направлению 03.06.01 Физика и астрономия и закончил её в 2023 году. Справка об обучении и сдаче кандидатских экзаменов выдана ФИАН в 2023 году. С 2016 года является сотрудником ФИАН. В настоящее время работает в должности высококвалифицированного младшего научного сотрудника ФИАН.

Диссертационная работа Д.С. Крючкова выполнена в Отделе спектроскопии Отделения оптики ФИАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук Хабарова Ксения Юрьевна, высококвалифицированный ведущий научный сотрудник Отдела спектроскопии Отделения оптики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Тайченачев Алексей Владимирович, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Отдела лазерной физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН);
2. Афанасьев Антон Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Отдела лазерной спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН)

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация — Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), город Москва, в своем положительном отзыве, подписанном доктором физико-математических наук, доцентом Борисюком Петром Викторовичем, заведующим кафедрой №78 «Физико-технических проблем метрологии» Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ; доктором физико-математических наук, профессором Кузнецовым Андреем Петровичем, директором Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ; доктором физико-математических наук, профессором Кудряшовым Николаем Алексеевичем, председателем совета по аттестации и подготовке научно-педагогических кадров НИЯУ МИФИ; и утвержденном доктором физико-математических наук Шевченко Владимиром Игоревичем, ректором НИЯУ

МИФИ, указала, что диссертация является законченным научным исследованием, по тематике соответствует специальности 1.3.19 – «Лазерная физика» и удовлетворяет требованиям, изложенным в Положении о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а соискатель заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Соискатель имеет 21 опубликованную работу, в том числе по теме диссертации опубликовано 5 работ в научных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus (Q2 и Q3) и Web of Science.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем Д.С. Крючковым работах.

Наиболее значимые результаты по теме диссертации опубликованы в статьях:

1. Khabarova, K., Kryuchkov, D., Borisenko, A., Zalivako, I., Semerikov, I., Aksenov, M., Sherstov, I., Abbasov, T., Tausenev, A., Kolachevsky, N. "Toward a New Generation of Compact Transportable Yb⁺ Optical Clocks" // Symmetry. – 2022. – Т. 14, – № 10. – С. 2213.

2. Крючков Д. С., Кудеяров К. С., Вишнякова Г. А., Жаднов Н. О., Хабарова К. Ю., Колачевский Н. Н. «Миниатюрные высокодобротные резонаторы ULE для стабилизации частоты лазерного излучения» // Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук. – 2021. – №10. – С. 295-300.

3. К. С. Кудеяров, В. К. Милоков, Д. С. Крючков, И. А. Семериков, О. А. Ивлев, К. Ю. Хабарова, Н. Н. Колачевский. «Характеристики лабораторного макета гетеродинного лазерного интерферометра для разработки проекта космической гравиметрии» // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52, № 6. – С. 555–559.

4. Вишнякова Г. А., Крючков Д. С., Воронова Т. А., Кудеяров К. С., Чиглинцев Э. О., Жаднов Н. О., Хабарова К. Ю., Колачевский Н. Н. «Термооптическая бистабильность в компактном высокодобротном резонаторе на длине волны 1550 нм» // Краткие сообщения по физике Физического

института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук. – 2023. – № 9. – С. 385-390.

5. Шакиров, М. И., Жаднов, Н. О., Крючков, Д. С., Кудеяров, К. С., Хабарова, К. Ю., Колачевский, Н.Н. «Деформация зеркал и сдвиг температуры нулевого теплового расширения оптического резонатора из-за нагрева излучением» // Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук. – 2023. – №12. – С. 121-132.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их высокой квалификацией и наличием достижений мирового уровня в области лазерной физики и атомной спектроскопии, а ведущей организации – ее репутацией признанного научного центра, проводящего исследования в области прецизионной спектроскопии, а также физике лазерно-охлажденных ионов в ловушках.

Диссертация Д.С. Крючкова посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию применения компактных оптических высокодобротных резонаторов Фабри-Перо для использования в составе высокостабильных лазерных систем, необходимых в качестве опорных источников в задачах прецизионной интерферометрии и создания более компактных и надежных транспортируемых оптических часов. Исследования являются актуальными, поскольку подобные системы обладают высокой востребованностью в различных задачах, таких как проверка Стандартной модели и поиск ее расширений, детектирование гравитационных волн, метрологическое обеспечение глобальных навигационных систем, наземных и космических экспериментов, создание сети оптических часов, гравиметрия, создание мобильных оптических часов, сенсорика. Полученные в рамках диссертационной работы результаты отражают возможность создания компактных стабилизированных лазерных систем, более компактных и надежных транспортируемых оптических часов и реализации современных миссий релятивистской геодезии.

На основании выполненных соискателем исследований были получены следующие основные результаты:

1. Создан и исследован 20-мм высокодобротный интерферометр Фабри-Перо для центральной длины волны 1550 нм. Измеренная резкость составила 82 000, величина резонансного пропускания составила 50 %.

2. Обнаружен и изучен эффект термооптической бистабильности в созданном резонаторе. Измерены гистерезисные формы линии пропускания, проявляющиеся при увеличении заводимой мощности лазерного излучения и сканировании частоты лазерного излучения вблизи резонансной моды. Сравнением с теоретической моделью определен сдвиг центральной частоты резонансной моды созданного интерферометра в зависимости от прошедшей мощности $180 \frac{\text{кГц}}{\text{МВт}}$, и постоянная времени теплового отклика зеркал интерферометра, равная 16 мс. Рассчитана чувствительность центральной частоты резонансной моды к интенсивности циркулирующего излучения, равная $150 \frac{\text{Гц}}{\text{Вт}/\text{мм}^2}$.

3. По результатам численного моделирования термомеханических процессов предсказан эффект смещения температуры нулевого коэффициента теплового расширения монокристаллических опорных резонаторов с телом из стекла ULE и подложками из стекла ULE и КУ-1, вызванный остаточным поглощением накопленной мощности покрытиями зеркал. Рассчитано, что в стационарном случае смещение происходит по линейному закону с коэффициентами $-78 \frac{\text{мК}}{\text{МВт}}$ и $-65 \frac{\text{мК}}{\text{МВт}}$ для зеркал на подложках из стекла ULE и стекла КУ-1, соответственно.

4. Разработана и исследована лазерная система на длине волны 1550 нм с активной стабилизацией частоты излучения по 20-мм резонатору Фабри-Перо, измерена ее относительная нестабильность, которая составила $5 \cdot 10^{-14}$ на времени усреднения 1 – 10 с.

5. Создан и исследован гетеродинный лазерный интерферометр. С его помощью продемонстрировано измерение линейных смещений на длине измеряемой трассы 50 мм в диапазоне 17 мкм. Продемонстрированная погрешность измерения составила менее $40 \frac{\text{фм}}{\sqrt{\text{Гц}}}$ в диапазоне частот 1 – 50

Гц и $10 \text{ пм}/\sqrt{\text{Гц}}$ на частоте 0.1 Гц, что обеспечивает чувствительность измерения 270 пм на времени усреднения 10 с. Данная чувствительность отвечает требованиям современных миссий релятивистской геодезии, а длина измеряемой трассы может быть масштабирована с помощью компактной лазерной системы с активной стабилизацией частоты излучения по 20-мм компактному резонатору.

6. Предложен и реализован вариант построения оптических часов на одиночном ионе иттербия-171 в радиочастотной ловушке, в котором многоканальный фемтосекундный синтезатор оптических частот стабилизируется с помощью независимой опорной ультрастабильной лазерной системы на длине волны 1550 нм. Данный вариант позволяет осуществить локальную стабилизацию частот всех используемых лазерных источников, что существенным образом упрощает оптическую схему и повышает компактность установки.

7. Созданы и исследованы транспортируемые оптические часы на одиночном ионе иттербия, относительная нестабильность выходного радиочастотного сигнала которых составила 8.9×10^{-15} на 1 с; 9.4×10^{-16} на 100 с и 4.9×10^{-16} на 1000 с.

Все результаты, представленные автором, являются новыми. Новизна обусловлена тем, что:

– Впервые экспериментально исследован эффект термооптической бистабильности на длине волны телекоммуникационного диапазона, проявляющийся в созданном 20-мм высокодобротном резонаторе Фабри-Перо.

– Впервые предсказан эффект смещения температуры нулевого коэффициента теплового расширения опорного монолитного высокодобротного интерферометра в зависимости от мощности, поглощаемой брэгговскими высокоотражающими покрытиями зеркал на подложках из стекла со сверхнизким коэффициентом теплового расширения Corning ULE и подложках из КУ-1.

– Впервые предложен и реализован вариант построения транспортируемых оптических часов на одиночном ионе иттербия-171 в

радиочастотной ловушке с использованием независимой опорной ультрастабильной лазерной системы на длине волны 1550 нм для стабилизации многоканального фемтосекундного синтезатора оптических частот. Это обеспечило низкую кратковременную нестабильность выходного радиочастотного сигнала 1 ГГц и более высокую надежность, автономность и отказоустойчивость системы в целом.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что компактные стабилизированные лазерные системы являются необходимыми для передачи ультрастабильных сигналов времени и частоты на оптической несущей для удаленного сличения оптических реперов частоты, решения задач гравиметрии и сенсорики. Результаты исследования термооптических и термомеханических эффектов представляют интерес для создания оптических логических устройств и должны быть учтены при создании компактных высокостабильных лазерных систем. Результаты исследования созданного гетеродинного лазерного интерферометра доказывают принципиальную достижимость чувствительности, необходимой для реализации современных гравиметрических миссий. Предложенный вариант построения транспортируемых оптических часов может быть использован при разработке и создании современных систем, обладающих более простой оптической схемой, более высокой компактностью и надежностью, отказоустойчивостью и автономностью.

Полученные результаты могут быть применены такими организациями, как Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН), Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»), Акционерное общество "Научно-производственная корпорация "Системы прецизионного приборостроения" (АО «НПК «СПП»), Акционерное общество «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и

информационных систем» (АО «РКС»), Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (МИФИ), Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН), Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН).

Достоверность результатов работы подтверждается использованием в ходе исследований поверенного измерительного оборудования, согласием данных, полученных в ходе различных экспериментов и их воспроизводимостью. Справедливость ряда представленных в диссертации результатов подтверждается их согласием с данными, полученными другими авторами.

Все основные научные результаты, включенные в диссертацию Д.С. Крючковым, получены лично автором, либо при его непосредственном участии. В частности, автором лично выполнены расчеты и моделирование высокоотражающих зеркал для длины волны излучения 1550 нм; статические и динамические механические расчеты формы тела и системы подвеса резонатора методом конечно-элементного анализа; термомеханическое моделирование; разработка и создание компактной высоковакуумной камеры; разработка, создание и настройка оптической схемы для измерения термооптических эффектов; создание и исследование системы стабилизации частоты излучения волоконного лазера по компактному резонатору; проведение соответствующих измерений и анализ данных. Также Д.С. Крючков лично разработал и создал лазерный гетеродинный интерферометр, осуществил разработку и изготовление вакуумной камеры большого объема для размещения его оптической плиты, оптоволоконных и электрических вакуумных вводов; создание и юстировку оптической схемы интерферометра; проведение соответствующих измерений. Помимо этого, автор внес существенный вклад в разработку и создание транспортируемых оптических часов на одиночном ионе иттербия-171 в радиочастотной ловушке Пауля в части характеристики, юстировки и отладки

компактной опорной ультрастабильной лазерной системы на длине волны 1550 нм, стабилизации по ней многоканального фемтосекундного синтезатора оптических частот и исследования кратковременной нестабильности радиочастотного выходного сигнала оптический часов.

В ходе защиты соискатель Д.С. Крючков аргументировано ответил на заданные ему вопросы членов диссертационного совета, а также на замечания ведущей организации и оппонентов.

На заседании 20 мая 2024 года диссертационный совет принял решение присудить Д.С. Крючкову учёную степень кандидата физико-математических наук за решение научной задачи по разработке и исследованию компактных стабилизированных лазерных систем и их применению в задачах прецизионной интерферометрии и создания транспортируемых оптических часов.

При проведении тайного голосования члены диссертационного совета в количестве 21 человек, из них 9 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (1.3.19 Лазерная физика), участвовавшие в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовали:

за присуждение учёной степени - 21,
против присуждения учёной степени - 0,
недействительных бюллетеней - 0.

Заместитель председателя диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор

Ионин Андрей Алексеевич

Учёный секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н.

Золотко Александр Степанович

20 мая 2024 г.