

ОТЗЫВ

официального оппонента Афанасьева Антона Евгеньевича на диссертацию
Крючкова Дениса Сергеевича
«Компактные стабилизированные лазерные системы для транспортируемых оптических часов и прецизионной интерферометрии»,
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «Лазерная физика»

Диссертационная работа Д.С. Крючкова посвящена проблеме создания компактных лазерных источников на длине волны телекоммуникационного диапазона с активной стабилизацией частоты излучения по высокочастотным опорным оптическим резонаторам Фабри-Перо. Актуальность данной задачи обусловлена высокой востребованностью лазерных систем, обладающих малой спектральной шириной линии излучения и высокой стабильностью положения ее центра, в различных задачах. Среди актуальных задач фундаментальной физики можно выделить следующие: детектирование гравитационных волн, поиск дрейфа фундаментальных констант, проверка предсказаний общей теории относительности и поиск новой физики. Среди прикладных задач выделяют метрологическое обеспечение глобальных навигационных систем, передача ультрастабильных сигналов по протяжённым оптоволоконным и воздушным линиям, синхронизация геометрически удаленных процессов, релятивистская геодезия, создание мобильных оптических часов и сенсорика.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Объём работы составляет 132 страницы, включая 51 рисунок. Список цитируемой литературы содержит 123 наименования.

Во введении автор приводит историю и актуальное состояние развития высокостабильных лазерных систем. Рассмотрены задачи их фундаментального и прикладного использования. Такой обзор позволяет обосновать актуальность выбранной темы и сформулировать цели и задачи исследования. Приведены защищаемые положения, научная новизна и сведения о практической значимости, личном вкладе, научных публикациях автора по теме диссертации. Приведены сведения по апробации работы.

Первая глава посвящена разработке и исследованию компактного (длиной 20-мм) высокочастотного интерферометра Фабри-Перо для длины волны излучения 1550 нм. Приводятся расчёты формы тела резонатора, необходимой для оптимального закрепления в системе подвеса и подавления собственных низкочастотных механических резонансов. Описывается создание и исследование спектральных характеристик брэгговских высокоотражающих зеркал, приводится создание вакуумной камеры с активной системой температурной стабилизации. Описывается и исследуется обнаруженная зависимость формы линии резонансного пропускания от направления сканирования частоты лазерного источника при увеличении заводимой в резонатор мощности. В качестве основного механизма возникновения эффекта предполагается локальный нагрев отражающих покрытий зеркал поглощённой долей циркулирующего излучения. Описывается экспериментальное исследование обнаруженного эффекта. Сравнение экспериментальных

данных с теоретической моделью формы линии в присутствии термооптической бистабильности позволяет определить чувствительность частоты моды резонатора к интенсивности циркулирующего излучения, составившая $150 \frac{\text{Гц}}{\text{Вт}/\text{мм}^2}$ и постоянную времени теплового отклика зеркал – 16 мс. Помимо этого, приводится теоретический анализ деформации зеркал в «стационарном» случае постоянного нагрева внутррезонаторным излучением. На основе параметров созданного компактного резонатора строится численная модель. Для случая разного положения начальной температуры относительно температуры нулевого коэффициента теплового расширения (КТР) резонатора рассчитываются профили распределения температуры по поверхности зеркал. С их помощью рассчитываются профили механических деформаций, эффективное изменение длины резонатора. Строятся зависимости эффективного смещения поверхности зеркал с различными материалами подложек от различных значений мощности поглощаемого зеркалами излучения. Предсказывается эффект смещения точки нулевого КТР в резонаторе в зависимости от данной мощности, определяется чувствительность $-78 \text{ мК}/\text{мВт}$ и $-65 \text{ мК}/\text{мВт}$ для зеркал с подложками из стекла ULE и КУ-1 соответственно. Отмечается, что для величины данного эффекта определяющей является производная КТР материала подложки по температуре. Описывается создание и характеристика лазерной системы с активной стабилизацией частоты излучения на основе созданного резонатора. Описывается система стабилизации, схема сличения с независимой высокостабильной лазерной системой. Определяется относительная нестабильность созданной лазерной системы, равная 5×10^{-14} на времени усреднения 0,1–10 с, отмечается, что данное значение на порядок превышает предел тепловых шумов. Приводится анализ возможных источников нестабильности. Отмечается, что лазерная система с подобными характеристиками может быть эффективно использована для различных прикладных задач, таких как прецизионная дальнометрия, передача высокостабильных сигналов частоты и времени на дальние расстояния, сенсорика.

Во второй главе рассматривается создание и исследование лазерного гетеродинного интерферометра для прецизионного измерения линейных смещений, в качестве опорного источника для которого может быть использована созданная ранее компактная стабилизированная лазерная система. Приводится общий принцип применения методов лазерной интерферометрии для измерения линейных смещений. Описывается оптоэлектронная схема созданного гетеродинного лазерного интерферометра. Приводятся характеристики созданного линейного транслятора, с помощью которого изменяется длина измеряемой трассы. Описывается создание вакуумной камеры большого объёма для размещения оптической плиты лазерного интерферометра. Описывается методика и результаты измерения линейных смещений в диапазоне до 17 мкм при длине измеряемой трассы 5 см. Приводятся результаты длительного измерения, уровень шумов которого составил $40 \frac{\text{ФМ}}{\sqrt{\text{Гц}}}$ в полосе частот 1 – 50 Гц и $10 \frac{\text{пМ}}{\sqrt{\text{Гц}}}$ на частоте 0,1 Гц, что обеспечивает предел чувствительности 270 пм на времени усреднения 10 с. Описывается реализация транспондерной схемы в созданном гетеродинном интерферометре, приводятся результаты соответствующих измерений. Отмечается, что продемонстрированная точность измерений соответствует требованиям современных гравиметрических миссий, а длина

измеряемой трассы может быть масштабирована без увеличения погрешности с помощью использования высокостабильной лазерной системы.

Основное содержание третьей главы посвящено разработке и созданию транспортируемых оптических часов на одиночном ионе иттербия-171 в радиочастотной ловушке. Приведена актуальность задачи, мотивируется выбор схемы построения оптических часов. Отмечается оригинальность предложенного варианта построения, в котором многоканальная фемтосекундная оптическая гребёнка частот стабилизируется по независимой опоре – ультрастабильной лазерной системе на длине волны 1550 нм. Описывается принципиальная функциональная схема и конструкция созданных часов. Приводится устройство используемой многоканальной волоконной фемтосекундной гребёнки оптических частот. Описывается компактная опорная лазерная система на длине волны 1550 нм со стабилизацией частоты по 77-мм высокочастотному резонатору Фабри-Перо. По сравнению с другой высокостабильной лазерной системой на длине волны 1140 нм определяется её относительная нестабильность, составившая менее 3×10^{-15} при времени усреднения 1–50 с. Приводятся результаты исследования нестабильности выходного сигнала оптических часов на частоте 1 ГГц, которая составила $8,9 \times 10^{-15}$ на времени усреднения 1 с и ограничена собственными шумами фемтосекундной гребёнки частот. На времени усреднения 1–50 с нестабильность ограничена опорной лазерной системой на длине волны 1550 нм. На времени усреднения 100 с нестабильность составила $9,4 \times 10^{-16}$, на времени 1000 с – $4,9 \times 10^{-16}$. Отмечается, что предложенный вариант построения оптических часов обеспечивает более высокую надёжность, компактность и автономность системы в целом.

Диссертация содержит экспериментальные и теоретические результаты, имеющие принципиальное значение для разработки и создания высокостабильных лазерных систем. Такие системы могут быть использованы для решения фундаментальных и прикладных задач. Наиболее интересными являются создание транспортируемых оптических часов, исследование гравитационного потенциала Земли с использованием космических аппаратов. Практическая значимость данной работы состоит в возможности использования компактной лазерной системы со стабилизацией по 20-мм резонатору в широком круге задач, таких как передача ультрастабильных сигналов времени и частоты на оптической несущей для удалённого сличения оптических реперов частоты, гравиметрия, сенсорика. Обнаруженный и исследованный эффект термооптической бистабильности на длине волны телекоммуникационного диапазона представляет интерес для создания оптических логических устройств. Эффект смещения точки нулевого КТР в зависимости от поглощённой зеркалами опорного интерферометра мощности излучения должен быть учтён при создании компактных лазерных систем. Продемонстрированная созданным гетеродинным лазерным интерферометром погрешность измерения доказывает принципиальную достижимость чувствительности, необходимой для реализации современной гравиметрической миссии. Предложенный вариант построения транспортируемых оптических часов обеспечивает упрощение оптической схемы, повышает их компактность и надёжность, отказоустойчивость и автономность.

Результаты работы опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных изданиях, индексируемых международными базами данных Scopus и Web of Science, а также прошли апробацию на всероссийских и международных научных конференциях и симпозиумах.

Диссертационная работа не лишена следующих недостатков:

1) Работа посвящена активной стабилизации частоты лазерного излучения. Во введении работы не достаёт описания процессов, которые приводят к нестабильности частоты лазеров и их классификации.

2) Первая глава посвящена созданию опорного резонатора для лазерной системы. Для полного понимания описания не хватает поясняющего рисунка с указанием основных элементов рассматриваемой системы. Аналог такого рисунка появляется в тексте диссертационной работы позже. Вначале приходится додумывать, о чём идёт речь.

3) При выборе длины резонатора на основе данных рисунка 1, автор делает заключение, что длина резонатора должна составлять величину 10-20 мм, что обеспечит «приемлемый» уровень тепловых шумов на уровне 5×10^{-15} . Не до конца ясно основание почему именно такое значение выбрано в качестве «приемлемого» уровня шумов. Фактически, отталкиваясь от этих значений, происходит создание всей лазерной системы, т.е. оно задаёт весь вектор исследования в диссертационной работе. Необходимо было более чётко сформулировать критерии, которые легли в основу этого выбора.

4) «По результатам серии моделирований, в которой варьировалось положение групп точек подвеса на теле резонатора, было определено оптимальное смещение и заглубление точек, результатом явилась геометрия тела резонатора, на основании которой были изготовлены два тела для оптических резонаторов». Параметры тела резонатора были определены, но не описаны в диссертационной работе.

5) Для создания высокодобротного резонатора были созданы зеркала. Коэффициент отражения зеркал был определён по параметрам самого резонатора. Для полноты картины в диссертационной работе не достаёт исследования пропускания созданного зеркала в широком диапазоне спектра с использованием спектрофотометра.

6) Резкость резонатора определялась по времени жизни фотона. Указано, что время жизни составило величину 1,74 пс. Для полноты описания не хватает графика, на основании которого были проведены данные измерения.

7) Исследование гетеродинного интерферометра проводилось при уровне вакуума 2×10^{-1} мбар. В тексте указано, что на время измерений отключались вакуумные насосы, чтобы избежать дополнительных вибраций. Уровень давления остаточных паров достаточно высок (8×10^{-4} мбар при откачке турбомолекулярным насосом со скоростью откачки 70 л/с). Такой высокий уровень остаточных газов может говорить о течи в вакуумной камере. Учитывая, что для измерения девиации Аллана (рис. 34) требуется несколько десятков секунд, возникает вопрос об уровне натекания созданной камеры. Изменение давления внутри будет влиять на долговременную стабильность. В диссертационной работе рассмотрено только изменение температуры, но никак не проанализирован дрейф давления, который может быть существенным в данном случае.

8) Сравнение созданной лазерной системы для транспортируемых оптических часов с независимой ультрастабильной системой на длине волны 1140 нм (рис. 49)

демонстрирует рост относительной нестабильности на больших временах. В диссертационной работе не описаны причины данного поведения.

9) Результаты работы представлены в достаточном количестве статей, опубликованных в журналах из списка ВАК. Однако, полученные результаты, на мой взгляд, можно было представить и в гораздо большем количестве журналов с высоким квартилем.

Указанные замечания никак не уменьшают ценности результатов, полученных в диссертации.

Заключение по диссертационной работе

Тема диссертации является актуальной. Научные положения и выводы диссертации научно обоснованы. Результаты, диссертации обладают практической значимостью, научной новизной, прошли апробацию, представлены в опубликованных трудах автора. Достоверность результатов подтверждается их воспроизводимостью и согласованностью, в том числе, с результатами других авторов.

Диссертация Д.С. Крючкова является законченной научно-квалификационной работой. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. Диссертация удовлетворяет всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а её автор, Крючков Денис Сергеевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «Лазерная физика».

Официальный оппонент:

к.ф.-м.н Афанасьев Антон Евгеньевич,

старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института спектроскопии Российской академии наук (ИСАН)

Российская Федерация, 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д. 5, Институт спектроскопии РАН

Тел.: +7 (965) 376-99-78

e-mail: afanasiev@isan.troitsk.ru

/А.Е. Афанасьев/

25.04.2024г.

Подпись Афанасьева Антона Евгеньевича заверяю:

Кильдиярова Римма Рифовна

Учёный секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института спектроскопии Российской академии наук (ИСАН), к.ф.-м.н.

Российская Федерация, 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д. 5, Институт спектроскопии РАН

Тел.: +7 (495) 851-02-21



/Р.Р. Кильдиярова/

Список основных работ официального оппонента Афанасьева Антона Евгеньевича по тематике диссертации Д.С. Крючкова "Компактные стабилизированные лазерные системы для транспортируемых оптических часов и прецизионной интерферометрии" в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. А. Е. Афанасьев, А. М. Машко, А. А. Мейстерсон, В. И. Балыкин, «Спектроскопия атомов рубидия в импульсной оптической дипольной ловушке фемтосекундной длительности», Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики, 111(11), 757–762 (2020).
2. А. М. Машко, А. А. Мейстерсон, А. Е. Афанасьев, В. И. Балыкин, «Атомная дипольная импульсная ловушка со спектральной фильтрацией лазерного излучения», Квантовая электроника, 50(6), 530–536 (2020).
3. А. Е. Афанасьев, А. М. Машко, А. А. Мейстерсон, В. И. Балыкин, «Спектроскопия поглощения атомов в оптической дипольной ловушке методом их спектрально-селективного нагрева пробным полем», Квантовая электроника, 50(3), 206-212 (2020).
4. А. Е. Afanasiev, A. A. Meysterson, A. M. Mashko, P. N. Melentiev and V. I. Balykin, "Atom femto trap: experimental realization", Appl. Phys. B, 126, 26 (2020).
5. А. Е. Афанасьев, В. И. Балыкин, «Нулевой оптический сдвиг частоты возбуждения атома, локализованного в импульсном лазерном поле», Квантовая электроника, 51(3), 248–253 (2021).
6. А. Е. Afanasiev, A. S. Kalmykov, R. V. Kirtaev, A. A. Kortel, P. I. Skakunenko, D. V. Negrov, V. I. Balykin, "Single-layer atom chip for continuous operation: Design, fabrication and performance", Optics & Laser Technology, 148, 107698 (2022).
7. Д.В. Быкова, А.Е. Афанасьев, В.И. Балыкин, «Острая фокусировка атомного пучка с использованием доплеровского и суб-доплеровского механизмов лазерного охлаждения в двумерной магнито-оптической ловушке», Письма в ЖЭТФ, 118, 7 (2023)
8. П.И. Скакуненко, Д.В. Быкова, А.Е. Афанасьев, В.И. Балыкин, «Эффективная загрузка атомного чипа из низкоскоростного атомного пучка», Письма в ЖЭТФ, 119, 20 (2024)
9. А.Е. Афанасьев, П.И. Скакуненко, В.И. Балыкин, «Атомный гравиметр на основе атомного фонтана и микроволнового перехода», Письма в ЖЭТФ, 119, 89 (2024).