

МИНИСТЕРСТВО  
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**«Национальный  
исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)»**

Каширское шоссе, д.31, г. Москва, 115409  
Тел. (499) 324-87-66, факс (499) 324-21-11

<http://www.mephi.ru>

26.03.2024 № 078/029

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор Национального исследовательского  
ядерного университета «МИФИ»  
доктор физ.-мат. наук

Шевченко Владимир Игоревич

26 марта 2024 г.



### Отзыв ведущей организации

на диссертацию Крючкова Дениса Сергеевича  
«Компактные стабилизированные лазерные системы для транспортируемых  
оптических часов и прецизионной интерферометрии»  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.19 - Лазерная физика

#### Актуальность темы диссертационной работы

Лазерные системы, обладающие высокой относительной стабильностью частоты излучения, на данный момент являются основным инструментом многих фундаментальных и прикладных задач прецизионной спектроскопии. Они используются в составе лабораторных и транспортируемых оптических часов на лазерно-охлажденных нейтральных атомах и ионах в ловушках, с их помощью реализуются логические операции в квантовых процессорах. Развитие данных направлений необходимо для ряда фундаментальных исследований, таких как переопределение секунды в СИ, тесты Лоренц-инвариантности, поиск гипотетических расширений Стандартной модели, физической реализации алгоритмов квантовой логики и создания универсальных квантовых вычислителей, метрологического обеспечения наземных и космических экспериментов. Кроме того, лазерные системы часто являются безальтернативным средством измерения в современных задачах передачи ультрастабильных сигналов времени и частоты по оптоволоконным и воздушным каналам, сенсорике, релятивистской геодезии, регистрации гравитационных волн. Многие из данных задач требуют повышения компактности и надежности опорных лазерных систем, позволяющей применять их вне лаборатории.

Диссертационная работа Д.С. Крючкова посвящена созданию компактных высокостабильных лазерных источников на длине волны телекоммуникационного диапазона для применения в задачах прецизионной интерферометрии и разработки транспортируемых оптических часов. Крючковым Д.С. создан и экспериментально исследован компактный 20-мм опорный интерферометр Фабри-Перо для длины волны излучения 1550 нм, обнаружен и исследован эффект термооптической бистабильности в данном интерферометре, методами численного моделирования предсказан эффект смещения температуры, соответствующей точке нулевого коэффициента теплового расширения опорного интерферометра, в зависимости от циркулирующей в нем мощности, с помощью созданного гетеродинного лазерного интерферометра продемонстрировано прецизионное измерение линейных смещений, предложен и реализован вариант построения оптических часов на одиночном ионе иттербия, обеспечивающий большую надежность и компактность. Таким образом, тема диссертации Д.С. Крючкова является актуальной как с научной, так и с прикладной точки зрения.

### **Структура и основное содержание диссертации**

Структурно диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 132 страницы, включая 51 рисунок. Список цитируемой литературы насчитывает 123 наименования.

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель работы, решаемые задачи, научная новизна, практическая значимость, защищаемые положения, апробация работы и личный вклад автора.

В первой главе описывается разработка, экспериментальная реализация и исследование компактного высокодобротного резонатора Фабри-Перо для длины волны излучения 1550 нм. Приводится разработка дизайна высокоотражающих покрытий, расчеты и моделирование формы тела резонатора, обеспечивающей минимальную вибрационную восприимчивость, исследование спектральных характеристик созданного резонатора. Проводится исследование обнаруженного эффекта термооптической бистабильности, приводящего к зависимости формы линии резонансного пропускания от накопленной в резонаторе мощности. Приводится теоретическая модель и экспериментальное исследование формы резонансной линии интерферометра в присутствии термооптической бистабильности, вызванной нагревом зеркал остаточным поглощением циркулирующего излучения. Представлены результаты теоретического



исследования термомеханической деформации зеркал резонатора в присутствии постоянного нагрева со стороны циркулирующего излучения. Предсказывается эффект смещения температуры точки нулевого коэффициента теплового расширения оптических резонаторов из стекла ULE с подложками зеркал из ULE и КУ-1 в зависимости от поглощаемой зеркалами мощности. Описывается создание и исследование метрологических характеристик лазерной системы со стабилизацией по компактному 20-мм резонатору Фабри-Перо.

Вторая глава посвящена разработке и созданию гетеродинного лазерного интерферометра для прецизионного измерения линейных смещений. Описывается созданный гетеродинный лазерный интерферометр, его принцип действия, оптическая и оптоэлектронная схема. Описывается создание и характеристика прецизионного линейного транслятора, с помощью которого осуществляется вариация длины измеряемой трассы. Анализируются и устраняются основные источники погрешностей измерения, приводится разработка и создание вакуумной камеры большого объема, системы внутривакуумной температурной стабилизации. Приводится методика и результаты измерений линейных смещений с помощью созданного интерферометра. Описывается создание и исследование гетеродинного лазерного интерферометра в транспондерной схеме.

Третья глава посвящена разработке и созданию транспортируемых оптических часов на одиночном ионе иттербия-171 в радиочастотной ловушке, в которых независимая компактная опорная ультрастабильная лазерная система на длине волны 1550 нм используется для стабилизации многоканальной фемтосекундной гребенки оптических частот, что обеспечивает высокую кратковременную стабильность радиочастотного выходного сигнала часов и позволяет реализовать локальную стабилизацию используемых лазерных систем. Описывается конструкция и функциональная схема оптических часов, приводится устройство используемой фемтосекундной гребенки частот, методика и результаты измерений собственных шумов гребенки, вносимых при генерации радиочастотного сигнала. Описывается используемая компактная опорная ультрастабильная лазерная система на длине волны 1550 нм, методика и результаты исследования ее метрологических характеристик. Описывается методика и результаты определения относительной нестабильности частоты выходного радиочастотного сигнала оптических часов.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

**Научная новизна и значимость диссертационной работы**

Результаты работы являются новыми и имеют высокую научную значимость. В частности:

1. Разработан и создан компактный 20-мм оптический резонатор Фабри-Перо для длины волны 1550 нм, исследованы его спектральные характеристики. Измеренная резкость составила 82 000 при резонансном пропускании 50%.
2. Обнаружен и исследован эффект термооптической бистабильности в макроскопическом резонаторе Фабри-Перо на длине волны ближнего ИК диапазона, проявляющийся в созданном интерферометре при увеличении заводимой в него мощности лазерного излучения. По измеренным гистерезисным формам линии резонансного пропускания методами численного моделирования определена зависимость сдвига центральной частоты резонансной моды созданного интерферометра от прошедшей мощности, равная  $180 \frac{\text{кГц}}{\text{мВт}}$ , 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. Предсказан эффект смещения точки нулевого коэффициента теплового расширения опорных оптических резонаторов в зависимости от поглощаемой зеркалами доли циркулирующего излучения. С помощью численного моделирования профиля распределения температуры по зеркалу и соответствующего профиля механической деформации рассчитано, что смещение происходит по линейному закону с коэффициентами  $-78 \frac{\text{мК}}{\text{мВт}}$  и  $-65 \frac{\text{мК}}{\text{мВт}}$  для высокоотражающих зеркал интерферометра на подложках из стекла ULE и КУ-1 соответственно.
4. Создана и охарактеризована компактная лазерная система с активной частотной стабилизацией по 20-мм опорному резонатору, измеренная относительная нестабильность частоты ее излучения составила  $5 \cdot 10^{-14}$  на времени усреднения 1 – 10 с.
5. При помощи созданного гетеродинного лазерного интерферометра продемонстрировано прецизионное измерение линейных смещений в диапазоне до 17 мкм при длине измеряемой трассы 5 см с погрешностью измерения  $40 \frac{\text{фм}}{\sqrt{\text{Гц}}}$  в диапазоне частот 1 – 50 Гц и  $10 \frac{\text{пм}}{\sqrt{\text{Гц}}}$  на частоте 0.1 Гц, что обеспечивает предел чувствительности на уровне 270 пм на времени усреднения 10 с. Показано, что данная



чувствительность достаточна для реализации современных миссий релятивистской геодезии, длина измеряемой трассы может быть увеличена с использованием стабилизированных по частоте лазерных систем.

6. Предложен и реализован вариант построения оптический часов на одиночном ионе иттербия-171 в радиочастотной ловушке Пауля, в котором многоканальный фемтосекундный синтезатор оптических частот стабилизируется с помощью независимой опорной лазерной системы на длине волны 1550 нм с активной частотной стабилизацией по 77 мм высокодобротному интерферометру Фабри-Перо. Данный подход обеспечивает кратковременную относительную нестабильность выходного сигнала часов на частоте 1 ГГц на уровне не более  $9 \times 10^{-15}$  при времени усреднения 1 с и позволяет осуществить локальную стабилизацию частот всех используемых лазерных источников, что упрощает оптическую схему, повышает компактность и надежность оптических часов в целом.
7. Созданы и исследованы транспортируемые оптические часы на одиночном ионе иттербия-171, определена относительная нестабильность их выходного радиочастотного сигнала 1 ГГц, которая составила  $8.9 \times 10^{-15}$  на 1 с;  $9.4 \times 10^{-16}$  на 100 с и  $4.9 \times 10^{-16}$  на 1000 с

### **Практическая значимость диссертационной работы**

Практическая значимость результатов работы выражается в следующем:

1. Компактная лазерная система с активной частотной стабилизацией по 20-мм опорному резонатору может быть использована в широком круге прикладных задач, таких как передача ультрастабильных сигналов времени и частоты на оптической несущей для удаленного сличения оптических реперов частоты, прецизионная дальнометрия, сенсорика.
2. Результаты исследования термооптической бистабильности в компактном резонаторе на длине волны 1550 нм могут представлять интерес для создания оптических логических устройств и должны быть учтены при разработке компактных стабилизированных лазерных систем.
3. Эффект смещения точки нулевого коэффициента теплового расширения в зависимости от накопленной в опорном интерферометре мощности излучения должен быть учтен для последовательной характеристики лазерных систем, обладающих высокой интенсивностью циркулирующего излучения на зеркалах.

4. Результаты исследования созданного лазерного гетеродинного интерферометра доказывают правильность используемых методов и принципиальную достижимость чувствительности, необходимой для реализации современной гравиметрической миссии. Данные результаты могут лечь в основу для подготовки современных отечественных миссий релятивистской геодезии.

5. Предложенный вариант построения транспортируемых оптических часов со стабилизацией фемтосекундного синтезатора оптических частот, реализующего локальную стабилизацию используемых лазерных систем по независимой опорной ультрастабильной лазерной системе, обеспечивает упрощение оптической схемы, повышает компактность и надежность, отказоустойчивость и автономность транспортируемых оптических часов, что необходимо для более эффективного решения задач формирования и поддержания национальной шкалы времени, укрепления наземного и бортового сектора ГЛОНАСС, синхронизации геометрически разнесенных процессов, метрологического обеспечения фундаментальных исследований.

Результаты диссертации имеют высокую научную и техническую значимость и могут быть применены в таких организациях, как НИЯУ МИФИ, ООО МЦКТ, ФГУП ВНИИФТРИ, АО РКС, АО НПК СПП, ИЛФ СО РАН, ИСАН и других.

#### **Обоснованность и достоверность основных результатов и выводов**

Достоверность полученных результатов подтверждается воспроизводимостью экспериментальных данных, их согласием с результатами предложенных теоретических моделей, обоснованностью сделанных в работе допущений и приближений, а также публикацией основных результатов работы в рецензируемых журналах, входящих в базы Web of science и Scopus.

Результаты диссертации прошли апробацию на всероссийских и международных симпозиумах и конференциях. Они также опубликованы в пяти статьях, входящих в международные базы данных Web of science и Scopus.

#### **Замечания по диссертации**

Несмотря на общее положительное впечатление, к работе имеется и ряд замечаний:

1. Введение диссертационной работы содержит достаточно подробное описание истории развития и актуального состояния направления стабилизированных лазерных систем в целом, а также их наиболее значимых современных применений. Однако, оно не содержит предметного обзора подходов к разработке компактных стабилизированных



лазерных систем, и не позволяет сразу определить нишу данной работы и соотнести целевые характеристики, приводящиеся в начале Главы 1, с подобными системами. Такой обзор приведен существенно позже, в конце Раздела 1.6, что некоторым образом усложняет восприятие диссертации читателем.

2. В разделе 1.6 иллюстрации Рис. 22 Характерный вид сигнала ошибки метода ПДХ и Рис. 23 Спектр сигнала с фотодиода ПДХ являются избыточными, так как общий вид данных сигналов является многократно описанным в литературе, конкретных величин данных сигналов в тексте не приводится, и сделать какой-либо количественный вывод о работе обсуждаемой системы стабилизации они не позволяют.

3. В Разделе 2.5 работы описывается созданный лазерный гетеродинный интерферометр в транспондерной схеме, отмечается, что применение данной схемы является необходимым для масштабирования длины измеряемой трассы до ~200 км, необходимой для реализации гравиметрических миссий. Однако, погрешность измерений данного интерферометра оказывается более высокой, чем измерений в конфигурации без транспондерной схемы, приведенных в Разделе 2.4.1. Данный факт в диссертационной работе не обсуждается.

4. В Разделе 3.4 работы для упрощения восприятия работы стоило более подробно описать механизм «медленной» обратной связи (на временах более 50 с), определяющий долговременную стабильность выходного РЧ сигнала созданных транспортируемых оптических часов.

Приведенные замечания не снижают высокой научной ценности представленной работы и значимости ее вклада для развития прецизионной спектроскопии и интерферометрии, квантовой метрологии и сенсорики.

### **Общая оценка диссертации**

Диссертация Крючкова Дениса Сергеевича «Компактные стабилизированные лазерные системы для транспортируемых оптических часов и прецизионной интерферометрии» является законченным научным исследованием. По тематике она соответствует заявленной специальности и удовлетворяет требованиям, изложенным в Положении о присуждении ученых степеней № 842, утвержденным Правительством Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., а ее автор заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 Лазерная физика.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и корректно представляет достигнутые результаты.

Доклад по материалам диссертации был сделан Крючковым Денисом Сергеевичем 20.03.2024г. на семинаре Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ. Отзыв составлен заведующим кафедрой №78 «Физико-технические проблемы метрологии» Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ Борисюком Петром Викторовичем.

Отзыв на диссертацию Д.С.Крючкова обсужден и одобрен на семинаре Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ, протокол №078/027 от 20.03.2024г..

Заведующий кафедрой  
«Физико-технические проблемы метрологии»  
Института лазерных и плазменных  
технологий НИЯУ МИФИ,  
д.ф.-м.н. по специальности 01.04.07 –  
физика конденсированного состояния,  
[PVVborisyuk@mephi.ru](mailto:PVVborisyuk@mephi.ru)



Борисюк  
Петр Викторович

Директор  
Института лазерных и плазменных технологий  
НИЯУ МИФИ,  
д.ф.-м.н. по специальности 01.04.21 –  
Лазерная физика, профессор,  
[ARKuznetsov@mephi.ru](mailto:ARKuznetsov@mephi.ru)



Кузнецов  
Андрей Петрович

Председатель совета по аттестации  
и подготовке научно-педагогических кадров  
НИЯУ МИФИ,  
д.ф.-м.н. по специальности 01.01.03  
– математическая физика, профессор,  
[NAKudryashov@mephi.ru](mailto:NAKudryashov@mephi.ru)



Кудряшов  
Николай Алексеевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ);

115409, Россия, Москва, Каширское шоссе, 31  
+7 (495) 788 56 99, доб. 9388



Список основных работ сотрудников ведущей организации Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) 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. Lebedinskii, Y. Y., Borisyuk, P. V., Chubunova, E. V., Kolachevsky, N. N., Vasiliev, O. S., & Tkalya, E. V. (2020). A Unique System for Registering One-Photon Signals in the Ultraviolet Range from An Isomeric  $^{229m}\text{Th}$  Nucleus Implanted on Thin  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  Films. *physica status solidi (a)*, 217(4), 1900551.
2. Derevyashkin, S. P., Borisyuk, P. V., Khabarova, K. Y., Kolachevsky, N. N., Strelkin, S. A., Tkalya, E. V., Tregubov, D.O., Tronin, I.V., & Yakovlev, V. P. (2020). Cumulative loading of the ion trap by laser ablation of thorium target in buffer gas. *Laser Physics Letters*, 18(1), 015501.
3. Konenkov, A. N., Konenkov, N. V., & Sysoev, A. A. (2022). Modeling dipolar excitation for quadrupole mass filter. *European Journal of Mass Spectrometry*, 14690667221087515.
4. Kurelchuk, U. N., Borisyuk, P. V., Chubunova, E. V., Domashenko, M. S., Karazhanov, S. Z., Kolachevsky, N. N., Lebedinskii, Yu. Yu., Myzin, D.A., Nikolaev A.V., & Tkalya, E. V. (2022). Spectroscopic Studies of Crystalline Neon Film Grown on a Gold Surface. *Physics of Atomic Nuclei*, 85(12), 1988-1991.
5. Telnov, E. Y., Borisyuk, P. V., Kolachevsky, N. N., Provorchenko, D. I., Strelkin, S. A., Tkalya, E. V., Tregubov, D.O., Trichev K.K., & Cherepanov, P. A. (2022). Parameter Optimization of Laser Cooling of Strontium Ions without a Luminescence Signal. *Physics of Atomic Nuclei*, 85(10), 1759-1765.
6. Kurelchuk, U. N., Borisyuk, P. V., Chubunova, E. V., Karazhanov, S. Z., Kolachevsky, N. N., Lebedinskii, Y. Y., Myzin, D.A., Nikolaev A.V., & Tkalya, E. V. (2022). Spectroscopic studies of solid Ar condensed on a gold surface. *Materials Letters*, 306, 130930.
7. Telnov, E. Y., Borisyuk, P. V., Bukharskii, N. D., Korneev, P. A., Trichev, K. K., & Cherepanov, P. A. (2023). Magnetic collimation system for improving ion trap loading efficiency. *Review of Scientific Instruments*, 94(8).