

О Т З Ы В

официального оппонента Тайченачева Алексея Владимировича на диссертацию Крючкова Дениса Сергеевича "Компактные стабилизированные лазерные системы для транспортируемых оптических часов и прецизионной интерферометрии", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 "Лазерная физика"

Диссертационная работа Д.С. Крючкова посвящена исследованиям и разработкам, направленным на создание компактных высокостабильных лазерных источников на длине волны телекоммуникационного диапазона для применения в задачах прецизионной интерферометрии и создания транспортируемых оптических часов.

Актуальность выбранной темы не вызывает сомнений и связана, в основном, с широким использованием ультрастабильных лазерных систем в фундаментальных и прикладных исследованиях, в числе которых проверки фундаментальных физических теорий (включая тесты Лоренц-инвариантности, вариации фундаментальных постоянных, поиск темной материи и др.), регистрация гравитационных волн, метрологическое обеспечения наземных и космических экспериментов, передача высокостабильных сигналов оптической частоты и времени по волоконным линиям или воздушным линиям, релятивистская геодезия, квантовая сенсорика, создание транспортируемых оптических часов на нейтральных атомах и ионах.

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

Первая глава посвящена разработке, созданию и экспериментальному исследованию относительно короткого 20-мм высокочастотного оптического резонатора Фабри-Перо для длины волны излучения 1550 нм. Приведены расчеты геометрии тела резонатора, обеспечивающей наименьшую восприимчивость частоты его моды к внешним вибрационным возмущениям, описывается разработка, создание и исследование многослойных диэлектрических высокоотражающих зеркал, приведена разработка и изготовление высоковакуумной камеры для созданного резонатора. Обнаружено и исследовано бистабильное поведение резонатора, проявляющегося в виде зависимости формы линии резонансного пропускания от направления сканирования частоты лазерного источника при увеличении заводимой в резонатор мощности. Приведена теоретическая модель формы линии в присутствии оптической бистабильности, вызванной нагревом отражающих покрытий зеркал. Проведено экспериментальное исследование обнаруженного эффекта, сравнением экспериментальных данных с теоретической моделью определена чувствительность частоты моды резонатора к интенсивности циркулирующего излучения, составившая $150 \frac{\text{Гц}}{\text{Вт}/\text{мм}^2}$, постоянная времени теплового отклика зеркал, составившая 16 мс. Описано теоретическое исследование деформации

зеркал в случае присутствия постоянного нагрева со стороны циркулирующего в резонаторе излучения. Построена численная модель, за основу которой взяты параметры созданного компактного резонатора. Рассчитаны профили механических деформаций зеркал для случая разного положения начальной температуры относительно температуры нулевого коэффициента теплового расширения (КТР) резонатора, рассчитано эффективное изменение длины резонатора, построены зависимости эффективного смещения поверхности зеркала с различными материалами подложек от температуры резонатора для различных значений мощности излучения, поглощаемой зеркалом. Предсказан эффект смещения точки нулевого КТР в резонаторе в зависимости от мощности, поглощаемой его зеркалами, с чувствительностью -78 мК/мВт и -65 мК/мВт для зеркал с подложками из стекла ULE и КУ-1 соответственно. Отмечено, для что данного эффекта определяющей является величина производной КТР по температуре. Описано создание и характеристика лазерной системы с активной стабилизацией частоты излучения по 20-мм резонатору. Приведено описание оптоэлектронной схемы, схемы сличения с независимой ультрастабильной лазерной системой на длине волны 1140 нм. Относительная нестабильность созданной лазерной системы составила 5×10^{-14} , что на порядок превышает предел тепловых шумов для данного резонатора. Приведен анализ наиболее вероятных источников, отмечено, что недостаточный контроль стабильности заводимой в резонатор мощности и недостаточная точность определения точки нулевого КТР могут являться лидирующими источниками нестабильности. Отмечено, что подобная лазерная система может быть использована для некоторых важных прикладных задач, таких как прецизионная дальнометрия, передача ультрастабильных сигналов частоты на дальние расстояния, сенсорики.

Во второй главе рассматривается возможное применение такой стабилизированной лазерной системы в качестве опорного источника в интерферометрической схеме для прецизионного измерения линейных смещений. Приведен обзор существующих применений методов лазерной интерферометрии. Приведен общий принцип измерения линейных смещений при помощи лазерных интерферометрических систем, описана транспондерная схема лазерного интерферометра. Описана оптоэлектронная схема созданного гетеродинного лазерного интерферометра. Описан созданный прецизионный линейный транслятор, имитирующий вариацию длины измеряемой трассы. Рассмотрена разработка и создание вакуумной камеры большого объема для размещения в ней лазерного интерферометра. Приведена методика и результаты измерения линейных смещений в диапазоне до 17 мкм при длине измеряемой трассы 5 см. Проанализированы и устранены основные источники погрешностей. Проведено длительное измерение, 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 чувствительность 270 пм на времени усреднения 10 с. Описана созданная лазерная интерферометрическая система в транспондерной схеме,

приведены результаты измерений с ее помощью. Отмечено, что достигнутая точность измерений соответствует требованиям современных миссий релятивистской геодезии, а длина измеряемой трассы может быть увеличена без потери точности с помощью использования высокостабильной лазерной системы.

Третья глава посвящена разработке и созданию транспортируемых оптических часов на одиночном ионе иттербия-171 в радиочастотной ловушке. Обсуждается актуальность и важность создания транспортируемых оптических часов. Мотивирован выбор схемы построения оптических часов, в которой многоканальная фемтосекундная оптическая гребенка частот стабилизируется по независимой высокостабильной лазерной системе. Описана конструкция и принципиальная функциональная схема созданных оптических часов. Приведено устройство используемой многоканальной волоконной фемтосекундной гребенки оптических частот. Описана созданная опорная лазерная система на длине волны 1550 нм с активной стабилизацией по 77-мм высокодобротному резонатору Фабри-Перо в компактной вакуумной камере. Относительная нестабильность, определенная по сравнению с другой высокостабильной лазерной системой на длине волны 1140 нм, составила менее 3×10^{-15} при времени усреднения 1 – 50 с. Описана методика и результаты исследования кратковременной стабильности выходного радиочастотного сигнала оптических часов, показано что она составила $8,9 \times 10^{-15}$ на времени усреднения 1 с и ограничена собственными шумами фемтосекундной гребенки частот, на временах 1 – 50 с ограничена стабильностью опорной лазерной системы на длине волны 1550 нм. Отмечено, что предложенная схема построения оптических часов является оригинальной и обеспечивает более высокую надежность и компактность системы в целом.

Диссертация содержит важные экспериментальные и теоретические результаты, имеющие принципиальное значение для разработки и создания высокостабильных лазерных систем, подготовки гравиметрических миссий, создания транспортируемых оптических часов. Результаты работы опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных изданиях, индексируемых международными базами данных Scopus и Web of Science, а также прошли апробацию на научных конференциях и симпозиумах.

В то же время, по тексту диссертационной работы имеются следующие замечания критического характера:

- 1) Введение, стр. 7, второй абзац снизу: утверждается, что оптические часы участвуют «в формировании национальных шкал времени (UTC, TAI)...». Наверное правильнее было бы говорить о национальных и международных шкалах времени.
- 2) Введение, стр. 8, второй абзац сверху: утверждается, что построение оптических реперов частоты с неточностью на уровне единиц шестнадцатого знака уже имеет технический, а не научный характер и существуют коммерчески доступные наборы компонентов для создания таких реперов. С этим утверждением

сложно согласиться по многим причинам. В частности, условно коммерчески доступной (ссылка [33] в списке литературы) является только лазерная составляющая оптического стандарта частоты на нейтральных атомах стронция. Все остальное (высоковакуумная система для лазерного охлаждения и захвата атомов), а также оптические стандарты частоты на других платформах исследователям до сих пор приходится разрабатывать и создавать самостоятельно даже для достижения относительно скромного по современным меркам уровня точности 10^{-16} .

3) Введение, стр. 8, последний абзац: не достает ссылки или ссылок на работы по водородным мазерам, которые составляют существенную конкуренцию транспортируемым оптическим часам, особенно в сегменте квантовых стандартов частоты бортового базирования.

4) Введение, стр. 10 пункт 4: здесь и далее по тексту диссертации утверждается, что одной из научных задач диссертации было «создать и исследовать оптический генератор частоты на одиночном ионе иттербия-171». Непонятно почему именно генератор, а не стандарт частоты?

5) Введение, стр. 11 пункт 3: здесь утверждается, что «впервые предложена и реализована схема построения оптических часов на одиночном ионе иттербия-171 в радиочастотной ловушке и т.д.». При этом в диссертации не обсуждается хорошо известный европейский подобный проект [S. Ritter et al., Opticlock: Transportable and Easy-to-Operate Optical Single-Ion Clock, Quantum 2.0 Conference 2020]. Мне кажется, что сравнение было бы уместно.

6) Глава 3, стр. 114, рис. 51 и последний абзац: информация, представленная в тексте, не вполне соответствует данным представленным на рисунке. Так относительно нестабильность на 100 секундах в тексте $9.4 \cdot 10^{-16}$, а на рисунке заметно больше 10^{-15} ?

Указанные замечания 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 ученых степеней, утвержденным постановлением

Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Крючков Денис Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 - «Лазерная физика».

Официальный оппонент:

д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, Тайченачев Алексей Владимирович,
главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН)

Российская федерация, 630090, Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 15Б,
ИЛФ СО РАН

тел.: +7 (913)719-42-84

e-mail: taichenachev@laser.nsc.ru

/Тайченачев Алексей Владимирович/

04.04.2024г.

Подпись Тайченачева Алексея Владимировича заверяю:

Покасов Павел Викторович

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН), к.ф.-м.н.,

Российская федерация, 630090, Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 15Б,
ИЛФ СО РАН

тел.: +7(383)330-89-21

e-mail: pokasov@laser.nsc.ru



/Покасов Павел Викторович /

Список основных работ официального оппонента Тайченачева Алексея Владимировича 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. M. Abdel Hafiz, R. Vicarini, N. Passilly, C.E. Calosso, V. Maurice, J.W. Pollock, A.V. Taichenachev, V.I. Yudin, J. Kitching, and R. Boudot, "Protocol for Light-Shift Compensation in a Continuous-Wave Microcell Atomic Clock", *Phys. Rev. Applied*, 14, 034015 (2020).
2. Чепуров С.В., Павлов Н.А., Луговой А.А., Багаев С.Н., Тайченачев А.В., «Оптический стандарт частоты на одиночном ионе иттербия-171», *Квантовая электроника*, 51(6), 473–478 (2021)
3. V. I. Yudin, A. V. Taichenachev, M. Yu. Basalaev, O. N. Prudnikov, H. A. Furst, T. E. Mehlstäubler and S. N. Bagayev, "Combined atomic clock with blackbody-radiation-shift-induced instability below 10^{-19} under natural environment conditions", *New J. Phys.*, 23, 023032 (2021).
4. T. Zanon-Willette, D. Wilkowski, R. Lefevre, A. V. Taichenachev, and V. I. Yudin, "SU(2) hyper-clocks: Quantum engineering of spinor interferences for time and frequency metrology", *Phys. Rev. Research*, 4, 023117 (2022).
5. V.I. Yudin, A.V. Taichenachev, O.N. Prudnikov, M.Yu. Basalaev, V.G. Pal'chikov, M. von Boehn, T.E. Mehlstäubler, and S.N. Bagayev, "Probe-Field-Ellipticity-Induced Shift in an Atomic Clock", *Phys. Rev. Applied*, 19, 014022 (2023).
6. Zanon-Willette, T., Impens, F., Arimondo, E., Wilkowski, D., Taichenachev, A. V., & Yudin, V. I. (2023). Engineering quantum control with optical transitions induced by twisted light fields. *Physical Review A*, 108(4), 043513.
7. Krysenko, D. S., Prudnikov, O. N., Taichenachev, A. V., Yudin, V. I., Chepurov, S. V., & Bagaev, S. N. (2023). Ground-state electromagnetically-induced-transparency cooling of Yb⁺ 171 ions in a polychromatic field. *Physical Review A*, 108(4), 043114.