

ОТЗЫВ

официального оппонента Пальчикова Виталия Геннадьевича на диссертацию Жаднова Никиты Олеговича «Флуктуации частоты высокостабильных лазерных систем с опорным монолитным оптическим резонатором», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика

Диссертация Жаднова Н. О. посвящена решению важной научной проблемы – созданию и исследованию характеристик лазерных систем с опорными монолитными резонаторами Фабри-Перо для современных оптических стандартов времени и частоты. Актуальность темы диссертационного исследования не вызывает сомнений и предопределяется следующими обстоятельствами:

-необходимостью создания ультрастабильных «часовых» лазеров с относительной нестабильностью частоты излучения порядка 10^{-15} и ниже и с шириной спектральной линии порядка нескольких герц для современных оптических стандартов времени и частоты, основанных на применении методов лазерного охлаждения;

- возможностью использования пространственно- разнесенных высокостабильных источников временной синхронизации для навигационных систем, альтернативных спутниковым;

-возможностями современных высокоточных оптических стандартов частоты, созданных на основе применения опорных монолитных резонаторов Фабри-Перо, в областях прикладной метрологии и глобальной спутниковой навигации, а также для тестирования фундаментальных теорий и экспериментов на их основе (общей и специальной теории относительности, проверке Лоренц-инвариантности, поиске вариаций во времени фундаментальных физических констант, поиске темной материи в различных энергетических диапазонах, детектировании гравитационных волн и т.д.).

В Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) на протяжении последних лет активно ведутся работы по созданию ультрастабильных оптических резонаторов с метрологическими характеристиками, соответствующими лучшим образцам мирового уровня. Часть этих достижений принадлежит лично Жаднову Никите Олеговичу и составляет предмет его диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Полный объём диссертации составляет 148 страниц. Список литературы содержит 144 наименований.

Во введении обсуждается актуальность темы диссертации, формулируется цель и задачи работы, научная новизна, ее научная и практическая значимость. Там же приведен список публикаций автора, защищаемые положения, а также обоснование преимуществ используемых автором диссертации подходов применительно к кругу проблем, рассматриваемых в диссертации.

Первая глава содержит детальное описание особенностей методов стабилизации частоты лазеров как по спектральной линии излучения атома, так и на основе опорного резонатора (Раздел 1.1 и 1.2). Там же приводятся типичные спектральные ширины линий для коммерчески доступных нестабилизированных одночастотных лазеров с оценками фундаментального предела ширины спектральной линии лазера, предсказанного в работах А. Шавлова и Ч. Таунса. Раздел 1.3 посвящен изложению метода Паунда-Драйвера-Холла для стабилизации частоты лазера по опорному оптическому резонатору. Последующие разделы данной главы содержат анализ шумовых процессов, характерных для опорных оптических резонаторов с перечислением основных известных способов подавления и компенсации различных видов шумов.

Во второй главе детально описаны тепловые шумы опорных резонаторов и методы их эффективного подавления. Основное внимание автор уделяет физическим свойствам броуновских флуктуаций как наиболее важному типу тепловых шумов для опорных резонаторов. Автором предложен оригинальный подход для достаточно точных оценок предельной нестабильности длины ULE-резонатора, связанной с тепловыми колебательными процессами (для зеркал и их подложек, а также тела резонатора). Проведенные оценки положены в основу созданных автором лазерных систем, основанных на применении опорных резонаторов двух типов: длинных (48 см) из стекла ULE и криогенных кремниевых. Центральным результатом второй главы, на мой взгляд, являются численное моделирование, формулировка и реализация оригинального метода автора, посвященного частичной компенсации тепловых шумов в основной моде резонатора Фабри-Перо.

Третья глава диссертации посвящена описанию конструкций двух ультрастабильных лазерных систем на основе ULE-резонаторов длиной 48 см в горизонтальной и вертикальной конфигурациях, а также исследованию их свойств. Рассмотрены, в частности, вопросы, связанные с разработкой систем подвеса резонаторов в вакуумных камерах с низкой чувствительностью к вибрациям, оптоэлектронных систем привязки частоты, систем стабилизации температуры в нулевой точке коэффициента теплового расширения резонаторов и т.д. Значительный интерес представляют результаты экспериментальные измерения и оценок различных возможных источников нестабильности

частоты: шумов петли обратной связи, остаточной амплитудной модуляции, интенсивности излучения и вибраций. В третьей главе получены также экспериментальные значения для временного дрейфа частоты сигнала биений лазерных систем после стабилизации температуры в точках нулевого теплового расширения, а также спектральная плотность мощности сигнала биений между лазерными системами со стабилизацией по вертикальному и горизонтальному резонаторам.

Четвертая глава диссертации посвящена решению задачи компенсации флуктуаций остаточной амплитудной модуляции в петле стабилизации частоты лазера по криогенному резонатору из монокристаллического кремния, при использовании высокой механической добротности кремния в качестве отправного пункта исследования. В разделе 4.1 приведено описание экспериментальной установки, проанализированы оптические, механические и тепловые свойства кремниевых монокристаллических резонаторов. В следующем разделе данной главы исследовались шумы частоты, связанных с остаточной амплитудной модуляцией излучения лазера. Предложенный автором метод подавления флуктуаций остаточной амплитудной модуляции позволил уменьшить вклад флуктуаций в девиацию Аллана более чем в 100 раз.

Наконец, в главе 5 теоретически смоделирован принципиально новый способ создания опорных резонаторов с нулевым тепловым расширением; при этом не предполагается использование конструкционных материалов, имеющих нулевую точку, как было описано в предыдущих главах. Основная идея стабилизации длины резонатора заключается в использовании обжатия тела в радиальном направлении кольцом из металла или другого материала с коэффициентом теплового расширения, значительно большим, чем у материала тела. Методом математического моделирования подобраны размеры элементов, обеспечивающие температурную стабилизацию; при этом резонатор предложенной конструкции имеет нулевую точку, а температурная зависимость его коэффициента теплового расширения вблизи нулевой точки описывается линейной функцией.

В заключении суммируются основные выводы и итоги работы, а также приведён перечень основных результатов.

Замечания по содержанию диссертационной работы:

1. В обзоре литературы, посвященном использованию оптических часов для вторичного переопределения единицы времени - секунды в системе СИ, следовало бы привести ссылку на «Дорожную карту», разработанную Консультативным Комитетом по

времени и частоте МБМВ (2016 год.) поскольку именно этот основной документ содержит требования к характеристикам оптических стандартов, методам их сличений, срокам утверждения Генеральной конференцией МБМВ

2. В разделе «Актуальность работы» требует пояснений следующее утверждение автора: «...стабилизированный по частоте лазер играет роль хранителя частоты на временах, меньших чем характерное время опроса атомного репера частоты, составляющее порядка 100 мс...»

3. Во второй и третьей Главах диссертации обосновывались и подчеркивались преимущества конструкций ультрастабильных лазерных систем на основе ULE-резонаторов с длиной 48 см в горизонтальной и вертикальной конфигурациях. Хотелось бы также знать ограничения и недостатки, присущие данным конструкциям (высокая чувствительность к вибрациям, качеству подвеса и температурным изменениям и т.д.).

Перечисленные замечания носят, скорее, рекомендательный характер и не затрагивают основные положения диссертационной работы, а также общую положительную оценку диссертации.

Достоверность результатов диссертационной работы Жаднова Н. О. подкреплена согласованностью с данными других авторов, полученных в рамках независимых альтернативных подходов, а также с результатами теоретических расчетов. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертационной работы.

К достоинствам диссертации следует отнести четкость и ясность изложения представленных в ней результатов, а также наличие значительного числа ссылок на работы других авторов. Основные результаты автора докладывались на представительных конференциях и семинарах, своевременно опубликованы в отечественной и зарубежной печати.

Результаты диссертационной работы внедрены в ФГУП «ВНИИФТРИ», в частности, в разработках оптических стандартов частоты на холодных атомах стронция, которые введены в состав Государственного первичного эталона времени и частоты Российской Федерации.

Заключение

Оценивая диссертационную работу Жаднова Никиты Олеговича в целом, можно сделать следующее заключение:

- тема диссертации актуальна, научные выводы, заключения и рекомендации диссертации научно обоснованы;

- результаты диссертации обладают научной новизной, практической значимостью, прошли апробацию, в достаточной степени представлены в научных трудах автора;

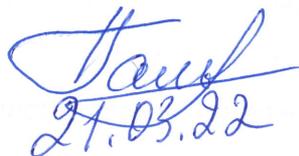
- диссертация Жаднова Никиты Олеговича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Жаднов Никита Олегович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Официальный оппонент:

д.ф.-м.н. Пальчиков Виталий Геннадьевич,
главный научный сотрудник Главного метрологического центра Государственной службы времени и частоты (ГМЦ ГСВЧ (НИО-7)) Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»),
Российская Федерация, 141570, Московская область, город Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево, промзона ФГУП «ВНИИФТРИ», корпус 28.

тел.: 8-495-660-57-24

e-mail: vitpal@mail.ru



/Пальчиков Виталий Геннадьевич/

Подпись Пальчикова Виталия Геннадьевича удостоверяю:

Лобова Оксана Алексеевна,
Начальник отдела кадров Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»),
Российская Федерация, 141570, Московская область, город Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево, промзона ФГУП «ВНИИФТРИ», корпус 45.

тел.: 8-495-660-57-24



/Лобова Оксана Алексеевна /

Список основных публикаций оппонента доктора физико-математических наук В. Г. Пальчикова по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Baryshev V.N, Kupalov D.S, Novoselov A.V, Aleinikov M. S, Boiko A.I, Pal'chikov V. G, Blinov I. Y., Compact Quantum Frequency Standard Using A Rubidium Vapor Cell With Pulsed Optical Pumping and Microwave Excitation Using the Ramsey Scheme. *Measurement Techniques*. 59(12):1286-90 (2017)
2. В. Д. Овсянников, С. И. Мармо, С. Н. Мохненко, В. Г. Пальчиков, Операционная компенсация неопределенностей высших порядков в стандартах частоты на атомах магния и кальция в оптических решетках, *Квантовая электроника*, 48(5), 419-424 (2018)
3. М. Н. Скворцов, С. М. Игнатович, В. И. Вишняков, Н. Л. Квашнин, И. С. Месензова, Д. В. Бражников, В. А. Васильев, А. В. Тайченачев, В. И. Юдин, С. Н. Багаев, И. Ю. Блинов, В. Г. Пальчиков, Ю. С. Самохвалов, Д. А. Парёхин, Миниатюрный квантовый стандарт частоты на основе явления когерентного пленения населённости в парах атомов Rb-87, *Квантовая электроника*, 50(6), 576-580 (2020)
4. А. В. Семенко, Г. С. Белотелов, Д. В. Сутырин, С. Н. Слюсарев, В. И. Юдин, А. В. Тайченачев, В. Д. Овсянников, В. Г. Пальчиков, Анализ неопределенностей стандарта частоты на холодных атомах иттербия с использованием операционных параметров оптической решетки, *Квантовая электроника*, 51 (6), 484--489 (2021)
5. A. I. Magunov and V. G. Palchikov, On the efficiency of laser pumping of hyperfine structure sublevels of Rubidium-87 and Cesium-133 atoms, *J. Phys.: Conf. Ser.* v. 2036, art. no. 012003, (2021).