

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи

Жаднов Никита Олегович

Флуктуации частоты высокостабильных лазерных систем  
с опорным монолитным оптическим резонатором

Специальность 1.3.19 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН

**Колачевский Николай Николаевич**

Официальные оппоненты:

**Пальчиков Виталий Геннадьевич**, доктор физико-математических наук, 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»)

**Гончаров Андрей Николаевич**, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией квантовых сенсоров Института лазерной физики Сибирского отделения Российской Академии Наук (ИЛФ СО РАН)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова»

Защита состоится «11» апреля 2022 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.262.01 на базе ФИАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, а также на сайте института [www.lebedev.ru](http://www.lebedev.ru)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.262.01

доктор физико-математических наук

А. С. Золотько

## **I. Общая характеристика работы**

Диссертация посвящена разработке, созданию и исследованию характеристик высокостабильных лазерных источников на основе опорных монолитных оптических резонаторов Фабри-Перо для использования в качестве локальных осцилляторов в оптических часах, задачах дальнометрии, передачи сигналов времени и частоты, а также тестов фундаментальных теорий.

### **Актуальность работы**

Открытие принципов лазерной генерации и разработка концепции лазера, произошедшие в середине прошлого века, показали принципиальную возможность создания стандартов частоты в оптическом диапазоне [1]. Ключевым методом в данной области является стабилизация частоты излучения лазера по вершине спектральной линии внешнего резонансного элемента: атома, молекулы или оптического резонатора. На сегодняшний день наилучшими показателями относительных точности и стабильности среди всех стандартов обладают оптические часы [2] – устройства, в которых частота лазера стабилизируется по моде высокодобротного оптического резонатора Фабри-Перо [3], а затем по частоте электромагнитного перехода в лазерно-охлажденных атомах или ионах. Лазеры со стабилизацией частоты излучения только по опорному резонатору, имеющие относительную нестабильность частоты  $\Delta\nu/\nu$  на уровне  $10^{-14}$  и ниже на временах усреднения 100 мс – 10 с, в литературе принято называть ультрастабильными. Стабилизация по резонатору в оптических часах выполняет две важные функции. Во-первых, она обеспечивает сужение спектральной линии излучения лазера, необходимое для спектроскопии часовых переходов шириной от нескольких герц до малых долей герца. Линия нестабилизированного лазера в реальных условиях оказывается сильно уширена из-за шумов частоты и интенсивности излучения, вызванных практически неустранимым влиянием окружающей среды или спонтанным излучением активной среды. Во-вторых, стабилизированный по частоте лазер играет роль хранителя частоты на временах, меньших чем характерное время

опроса атомного репера частоты, составляющее порядка 100 мс. Часовой переход в атомах, в свою очередь, обеспечивает точность и долговременную стабильность оптических стандартов.

По характеристикам относительной нестабильности и систематической погрешности частоты лучшие на сегодняшний день оптические часы на атомах стронция [4] и ионе алюминия [5] более чем на два порядка превосходят первичные микроволновые стандарты – цезиевые фонтаны. В связи с этим актуальной задачей современной метрологии является формулировка нового определения секунды системы СИ, которое будет иметь более точную экспериментальную реализацию при помощи оптических часов [6].

Ещё на первых этапах развития оптических стандартов частоты было отмечено не только их прикладное значение в области метрологии и глобальной навигации, но и исключительный потенциал для фундаментальных физических экспериментов [1]. К исследованиям такого рода относятся тесты теории относительности и квантовой теории, проверка постоянства законов природы во времени и поиски новой физики [7]. В частности, точность и стабильность современных оптических часов и ультрастабильных лазерных систем уже позволили осуществить ряд экспериментов, направленных на проверку Лоренц-инвариантности [8] и общей теории относительности [9], поиски возможного дрейфа постоянной тонкой структуры [10] и решение загадки радиуса протона [11].

Новым применением оптических стандартов частоты в фундаментальных исследованиях в настоящее время является поиск темной материи. Одним из возможных кандидатов на её роль являются скалярные поля, образованные сверхлегкими частицами ( $mc^2 \ll 1 \text{ eV}$ ) [12]. Присутствие таких полей должно приводить к гармоническим колебаниям фундаментальных констант, и, следовательно, частот переходов в атомах и частот оптических резонаторов. На сегодняшний день в результате экспериментов с атомными часами [13] и ультрастабильными резонаторами [14,15] удалось установить ограничения на

константу связи между обыкновенной и тёмной материями в различных энергетических диапазонах.

Ультрастабильные лазеры находят применения не только в лабораторных исследованиях: существует ряд проектов, нацеленных на полевые и бортовые задачи. В 2018 году произведен запуск и начата работа пары спутников глобальной системы GRACE-FO [16], предназначенной для построения точной карты геопотенциала и мониторинга климатических изменений. Каждый из спутников оснащён ультрастабильной лазерной системой с опорным резонатором [17].

Лазеры с высокой стабильностью частоты также являются одним из ключевых инструментов для создания детекторов гравитационных волн типа LIGO [18]. Следует отметить, что тепловые шумы длины интерферометра, ограничивающие чувствительность лазерных интерферометрических гравитационно-волновых детекторов, также определяют фундаментальный предел стабильности частоты опорных резонаторов. Диапазон частот гравитационных волн, в котором работают наземные детекторы, из-за сейсмических и ньютоновских шумов ограничен снизу частотой  $\sim 10$  Гц. В низкочастотной области 3 мГц – 10 Гц детектирование гравитационных волн возможно осуществлять при помощи космической сети оптических часов [19].

Квантовый проекционный шум ограничивает относительную нестабильность частоты большинства современных оптических часов величиной  $\approx 10^{-17}/\sqrt{\tau}$ , где  $\tau$  – время измерения. Тем не менее, даже в лучших на сегодняшний день экспериментах, указанная характеристика принимает приблизительно на порядок большее значение. Причиной этого являются шумы частоты стабилизированного по опорному резонатору лазера из-за эффекта Дика [20]. Повышение стабильности часовых лазеров позволит улучшить характеристики оптических часов благодаря подавлению данного эффекта, а также откроет возможность для увеличения времени опроса и улучшения спектрального разрешения.

На стабильность частоты лазерной системы с опорным резонатором оказывает влияние множество технических факторов, связанных с флуктуациями параметров окружающей среды (вибрации, колебания температуры, шумы электроники и др.). Фундаментальный предел нестабильности частоты ультрастабильного лазера связан с так называемыми броуновскими тепловыми шумами резонатора [21]. В последние годы в мире основной прогресс характеристик ультрастабильных лазеров произошёл благодаря применению опорных монокристаллических резонаторов Фабри-Перо нового типа: криогенных кремниевых резонаторов [22,23] и длинных ( $L \approx 0.5$  м) резонаторов из температурно-компенсированного стекла ULE<sup>1</sup> [24]. Значения фундаментального предела тепловых шумов относительной нестабильности частоты таких резонаторов составляют менее  $10^{-15}$ .

В России, в национальном метрологическом институте ВНИИФТРИ, ведутся работы по созданию оптических реперов частоты на холодных атомах стронция для государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ-1. Часовой переход в атомах стронция ( $^{87}\text{Sr}$ ) является одним из наиболее вероятных претендентов на переопределение секунды СИ. В 2016 г. был завершён проект, нацеленный на достижение стронциевым репером величины относительной нестабильности частоты  $10^{-16}$ . Экспериментальная часть настоящей диссертационной работы посвящена проекту по созданию лазерных систем для нового поколения стронциевого репера с относительной нестабильностью частоты  $10^{-17}$ . С этой целью в ФИАН были разработаны ультрастабильные лазеры на длине волны 698 нм (соответствует часовому переходу в атоме стронция) с опорными длинными (48 см) ULE-резонаторами. Указанные резонаторы имеют на порядок меньший предел тепловых шумов, чем предыдущее поколение [25] и способны обеспечить лучшую стабильность. Новым направлением в рамках данного проекта стала разработка лазерных систем с длиной волны 1542 нм со стабилизацией частоты

---

<sup>1</sup> Ultra low expansion glass – стекло со сверхнизким коэффициентом теплового расширения

по криогенным резонаторам из монокристаллического кремния. Эти резонаторы характеризуются чрезвычайно низким уровнем тепловых шумов и малым дрейфом частоты. Созданные на их основе лазеры могут быть использованы для прецизионной спектроскопии в оптических часах путём передачи стабильности в другой спектральный диапазон через фемтосекундную гребёнку оптических частот.

Для достижения предельного уровня стабильности частоты лазерной системы с опорным монокристаллическим резонатором необходимо оптимизировать его форму и подобрать материалы так, чтобы минимизировать тепловые шумы и чувствительность к вибрациям. Не менее важной задачей является разработка и сборка высоковакуумных камер, способных обеспечить стабильную температуру всего резонатора в точке нулевого теплового расширения. Для эффективной передачи стабильности частоты от моды резонатора лазерному излучению необходимо использование оптоэлектронной петли обратной связи также с низким уровнем собственных шумов. Решению задач по разработке и созданию ультрастабильных лазерных систем на основе опорных резонаторов с низким пределом тепловых шумов, а также исследованию влияния разного рода флуктуаций на стабильность частоты посвящена настоящая диссертационная работа.

### **Цель и задачи работы**

Целью данной работы является: создание и исследование характеристик лазерных систем с опорными монокристаллическими резонаторами Фабри-Перо для современных оптических атомных реперов частоты.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

1. Провести анализ основных параметров ультрастабильных лазерных систем, влияющих на предел стабильности частоты лазерного излучения. Проанализировать существующие и перспективные методы минимизации тепловых шумов частоты опорных резонаторов.

2. Разработать и создать опорные резонаторы Фабри-Перо – длинные резонаторы из стекла ULE и криогенные кремниевые резонаторы – с относительной нестабильностью частоты моды ниже  $10^{-15}$ . Разработать и создать вакуумные камеры, системы подвеса и температурной стабилизации резонаторов.

3. Осуществить сличение частот двух полупроводниковых лазеров на длине волны 698 нм, стабилизированных по опорным резонаторам, определить относительную нестабильность частоты сигнала биений оптических частот на временах усреднения 10 мс – 10 с.

4. Разработать и исследовать систему минимизации шумового вклада остаточной амплитудной модуляции в нестабильность частоты лазерной системы, стабилизированной методом Паунда-Драйвера-Холла.

5. Разработать новый метод компенсации изменения длины резонатора Фабри-Перо под действием температуры, альтернативный использованию материалов с нулевым коэффициентом теплового расширения.

### **Научная новизна**

1. Предложен метод частичной компенсации (до 50%) флуктуаций частоты лазерного излучения, вызванных тепловым шумом опорного резонатора Фабри-Перо, при помощи двух «пробных» мод старших порядков.

2. Впервые созданы лазерные системы со стабилизацией частоты по длинным (48 см) резонаторам из стекла ULE с относительной нестабильностью частоты на уровне  $10^{-15}$  на временах усреднения 30 мс – 20 с для использования в оптическом репере частоты на холодных атомах стронция, включенном в государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ-1 Российской Федерации.

3. Разработаны и созданы высокостабильные лазерные системы с опорными монокристаллическими криогенными резонаторами из монокристаллического кремния. В данных системах реализован оригинальный метод стабилизации температуры резонаторов в высоковакуумных камерах и экспериментально показано что

вибрации, вызванные криогенной системой, не сказываются на стабильности длины резонатора на уровне не хуже  $10^{-15}$ .

5. В методе Паунда-Драйвера-Холла экспериментально продемонстрировано более чем 100-кратное уменьшение вклада флуктуаций остаточной амплитудной модуляции в нестабильность частоты лазерной системы. Это удалось сделать за счёт стабилизации температуры кристалла электрооптического модулятора и управления постоянной составляющей напряжения на нём по величине остаточной амплитудной модуляции в цепи обратной связи.

6. Предложен и проверен путём моделирования новый метод компенсации изменения длины резонатора Фабри-Перо под действием температуры, позволяющий создавать оптические опорные резонаторы с нулевым тепловым расширением из материалов, которые таким свойством не обладают.

### **Практическая значимость**

Длинные ULE-резонаторы и криогенные кремниевые резонаторы имеют чрезвычайно низкий фундаментальный предел тепловых шумов и открывают возможность создания ультрастабильных лазеров с относительной нестабильностью частоты излучения ниже  $10^{-15}$ . Использование созданных лазерных систем на длине волны 698 нм с шириной спектральной линии  $<1.5$  Гц для опроса часовых переходов позволило создать оптический репер частоты на холодных атомах стронция ( $^{87}\text{Sr}$ ) в оптической решётке с точностью и относительной нестабильностью ниже  $10^{-17}$  в рамках завершившейся ФЦП "Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012 – 2020 годы", что соответствует современному мировому уровню. Указанный оптический репер является составной частью государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ-1, работающего в национальном метрологическом институте России ФГУП «ВНИИФТРИ». Стронциевый репер частоты участвует в формировании шкалы координированного времени UTC(SU). Проведённые эксперименты по сличению лазеров, стабилизированных по одному и двум разным резонаторам,

позволяют охарактеризовать стабильность частоты лазерных систем и оптоэлектронных петель стабилизации в методе Паунда-Дривера-Холла. Исследование шумов петель стабилизации частоты лазеров открывает возможности для их компенсации и достижения предельного уровня стабильности частоты, связанного с тепловыми шумами резонатора.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Частичная компенсация флуктуаций частоты лазера, обусловленных тепловыми шумами  $LG_{00}$  моды опорного резонатора Фабри-Перо, возможна по сигналу биений оптических полей двух «пробных» мод того же резонатора – лаггерр-гауссовой моды  $LG_{10}$  и лаггерр-гауссовой моды с орбитальным моментом  $LG_{03}$ . Моделирование показало, что этот метод позволяет уменьшить флуктуации частоты лазера на 30 – 50 %.

2. Экспериментально измеренная спектральная ширина сигнала биений частот двух созданных полупроводниковых лазерных систем с длиной волны 698 нм, стабилизированных по ULE-резонаторам длиной 48 см, составляет  $\leq 1.5$  Гц (по уровню половины высоты) и ограничена временем измерения. Это обеспечивает величину девиации Аллана флуктуаций частоты каждой из систем на уровне  $< 2 \cdot 10^{-15}$  на временах усреднения 30 мс – 10 с, что удовлетворяет требованиям для оптического репера частоты нового поколения на атомах стронция.

3. Активная стабилизация температуры кристалла электрооптического модулятора и контроль постоянного напряжения на нём по величине остаточной амплитудной модуляции в методе Паунда-Дривера-Холла позволяют уменьшить в эксперименте вклад её флуктуаций в нестабильность частоты лазерной системы более чем в 100 раз.

4. Напряженное обжатие цилиндрического тела резонатора Фабри-Перо в радиальном направлении при помощи кольца из материала, коэффициент теплового расширения (КТР) которого значительно превосходит КТР тела, позволяет компенсировать тепловое расширение резонатора в аксиальном

направлении. По результатам моделирования температурная зависимость коэффициента теплового расширения резонатора из кварца с алюминиевым обжимающим кольцом вблизи нулевой точки описывается линейной функцией с коэффициентом  $8 \cdot 10^{-10} \text{ 1/K}^2$ , что приблизительно в два раза меньше, чем у резонатора из температурно-компенсированного стекла ULE (Corning 7972).

### **Личный вклад автора**

Все изложенные в работе результаты получены автором, либо при его непосредственном участии. Автор принимал ключевое участие в написании научных статей, которые легли в основу диссертационной работы.

### **Достоверность результатов**

Достоверность результатов экспериментальных исследований подтверждается использованием апробированных и протестированных измерительных приборов и повторяемостью экспериментальных данных. Достоверность теоретических выводов обеспечивается результатами компьютерного моделирования и обоснованностью использованных физических моделей и приближений.

### **Структура и объём работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Объём диссертации – 148 стр.

### **Сведения об апробации результатов работы**

Результаты работы докладывались автором на 5 всероссийских и 5 международных научных конференциях: Физика Ультрахолодных Атомов (ФУХА), 2016 г., Новосибирск, Россия; IV International Conference on Quantum Technologies (ICQT), 2017 г., Москва, Россия; 32nd European Frequency and Time Forum (EFTF 2018), 2018 г., Турин, Италия; 50<sup>th</sup> European Group on Atomic Systems conference (EGAS), 2018 г., Краков, Польша; Физика Ультрахолодных Атомов (ФУХА), 2018 г., Новосибирск, Россия; Фундаментальное и Прикладное

Координатно-Временное и Навигационное Обеспечение (КВНО), 2019 г., Санкт-Петербург, Россия; International Conference on Ultrafast Optical Science (UltrafastLight), 2019 г., Москва, Россия; Физика Ультрахолодных Атомов (ФУХА), 2020 г., онлайн; Joint Conference of the European Frequency & Time Forum & IEEE Intl Frequency Control Symposium (EFTF-IFCS 2021), 2021 г., онлайн; Форум «Микроэлектроника 2021», 2021 г., Алушта, Россия.

Основные результаты работы опубликованы в четырёх статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в базу данных *Web of Science*, а также в трудах конференций, ссылки на которые приведены на стр. 23–24. По материалам диссертации получен патент на полезную модель.

## II. Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность проводимых в рамках диссертационной работы исследований, в том числе приведен краткий обзор использования ультрастабильных лазерных систем в современных фундаментальных и прикладных научных задачах. Сформулированы цели и задачи исследования, защищаемые положения, научная новизна и практическая ценность работы. Далее, в основных главах диссертации, рассмотрены ключевые факторы, приводящие к флуктуациям частоты лазерных систем с опорным монолитным оптическим резонатором, предложены и исследованы (путем эксперимента или моделирования) методы их подавления и компенсации.

**Глава 1** носит обзорный характер. П. 1.1 посвящен методам стабилизации частоты лазеров: по спектральной линии атомов или молекул и при помощи опорного резонатора. В п. 1.2 обсуждаются применения высокостабильных лазерных систем в оптических часах и прецизионных измерениях. Описан эффект Дика, из-за которого стабильность частоты оптических часов ограничивается шумами часового лазера. В п. 1.3 изложен метод Паунда-Дривера-Холла стабилизации частоты лазера по опорному оптическому резонатору. Пункт 1.4 содержит обзор шумовых процессов, характерных для опорных оптических резонаторов и оптоэлектронных петель обратной связи в

методе Паунда-Дривера-Холла. Приведён обзор основных известных способов подавления и компенсации различных шумов.

В **Главе 2** рассмотрены тепловые шумы опорных резонаторов и методы их снижения. Данный вид шума обусловлен случайными тепловыми колебаниями резонатора, носит фундаментальный характер и определяет предел тепловых шумов - минимальное достижимое значение девиации Аллана относительных флуктуаций частоты моды опорного резонатора. В п. 2.1 приведена общая характеристика явления тепловых шумов и их роли в системах стабилизации частоты.

Пункт 2.2 посвящен физическим свойствам броуновских флуктуаций – наиболее важного для опорных резонаторов типа тепловых шумов. Представлен формализм, позволяющий производить расчёты тепловых шумов различных систем – флуктуационно-диссипационная теорема. Для расчёта предела тепловых шумов опорного резонатора введён специальный метод, имеющий название «прямой подход», позволяющий с высокой точностью оценить предельную нестабильность длины резонатора, связанную с тепловыми колебаниями отражающих покрытий, подложек зеркал и тела резонатора. Обсуждается влияние различных параметров оптических резонаторов: геометрических размеров, характеристик излучения, температуры и свойств материалов тела и зеркал, на величину предела тепловых шумов. Приведены основные формулы для расчета тепловых шумов.

В п. 2.3 рассмотрены всевозможные материалы, из которых целесообразно производить опорные резонаторы: кварц, ULE-стекло, сапфир, керамика с малым тепловым расширением, монокристаллический кремний, а также различные виды многослойных отражающих структур. Предложен новый вид материала тела и подложек зеркал опорного резонатора – кристаллический арсенид галлия, использование которого существенно упрощает технологию производства кристаллических суперзеркал.

В п. 2.4 представлены результаты расчётов предела тепловых шумов для резонаторов различных размеров и состава. Проведённые расчёты позволяют

сделать вывод, что для снижения предела Броуновских тепловых шумов опорных резонаторов существует три основных метода:

- Понижение температуры, приводящее к уменьшению тепловой энергии и флуктуаций системы,
- Увеличение расстояния между зеркалами, подавляющее вклад колебаний поверхности зеркал за счет фактора  $1/L$  и позволяющее увеличить размер моды на зеркалах (а значит, и площадь усреднения шумов),
- Использование высокодобротных (например, кристаллических) материалов.

В данной работе созданы и исследованы лазерные системы на основе опорных резонаторов двух типов: длинных (48 см) из стекла ULE и криогенных кремниевых. На сегодняшний день опорные резонаторы схожего состава и конструкции обеспечивают минимальное значение предела тепловых шумов относительной нестабильности частоты в лучших мировых экспериментах [24], [26].

В п. 2.5 обсуждаются прочие виды тепловых шумов: термо-оптический, термоупругий, шумы систем подвеса резонатора и шумы давления остаточного газа. Показано, что их вклад пренебрежимо мал в сравнении с броуновскими тепловыми колебаниями зеркал резонатора.

Пункт 2.6 посвящен методу частичной компенсации тепловых шумов в основной моде  $LG_{00}$  резонатора Фабри-Перо ( $M_1$  на рисунке 1), предложенному в данной работе. Описан принцип метода, базирующийся на использовании пары дополнительных «пробных» мод старшего порядка и том факте, что тепловой шум частоты моды резонатора определяется тепловыми колебаниями поверхности зеркала в той его части, где сосредоточена её интенсивность. Предполагается, что три лазерных пучка, соответствующие выбранным модам, заведены в один и тот же резонатор, и привязаны к нему по частоте. В качестве пробных предложено использовать моды: Лагерр-Гауссову  $LG_{10}$  и Лагерр-Гауссову с орбитальным моментом  $LG_{03*}$  ( $M_3$  и  $M_2$  на рисунке 1 соответственно). Особенностью данных мод является то, что кольцевая часть профиля

интенсивности моды  $M_3$  достаточно хорошо перекрывается с профилем  $M_2$ , а центральная часть – практически не перекрывается. В сигнале биений оптических полей указанных мод (радиочастотный диапазон) флуктуации частоты, связанные с тепловым шумом зеркал резонатора в области кольцевого распределения интенсивности, окажутся скоррелированы для обеих мод и взаимно уничтожатся. В результате, в сигнале биений останутся флуктуации частоты, связанные с тепловыми колебаниями центральной части зеркала (то есть той части, где сосредоточена интенсивность основной моды). Корректировку частоты излучения, соответствующего основной моде опорного резонатора можно произвести по сигналу биений оптических полей двух пробных мод при помощи АОМ<sup>2</sup> (рисунок 1).

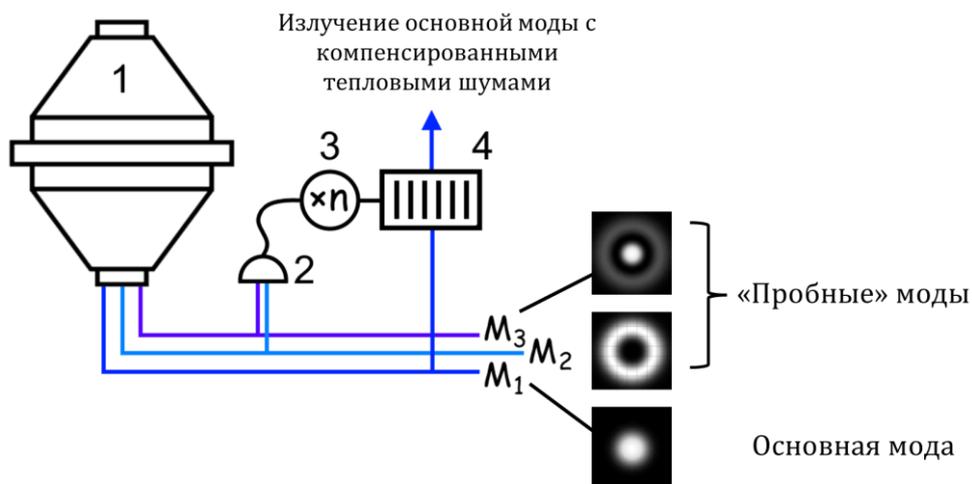


Рисунок 1. Упрощённая схема эксперимента по измерению и частичной компенсации теплового шума основной моды  $M_1$ . 1 – высокостабильный монолитный резонатор Фабри-Перо, 2 – фотодетектор для регистрации биений  $M_2$  и  $M_3$ , 3 – радиочастотный умножитель, 4 – акустооптический модулятор.

Эффективность описанного метода зависит от того, насколько хорошо окажутся согласованы между собой профили интенсивностей используемых мод. Для выявления его эффективности проведено численное моделирование. Поверхность зеркала, искаженная тепловыми шумами, задавалась при помощи случайных броуновских поверхностей. Моделирование показало, что описанный

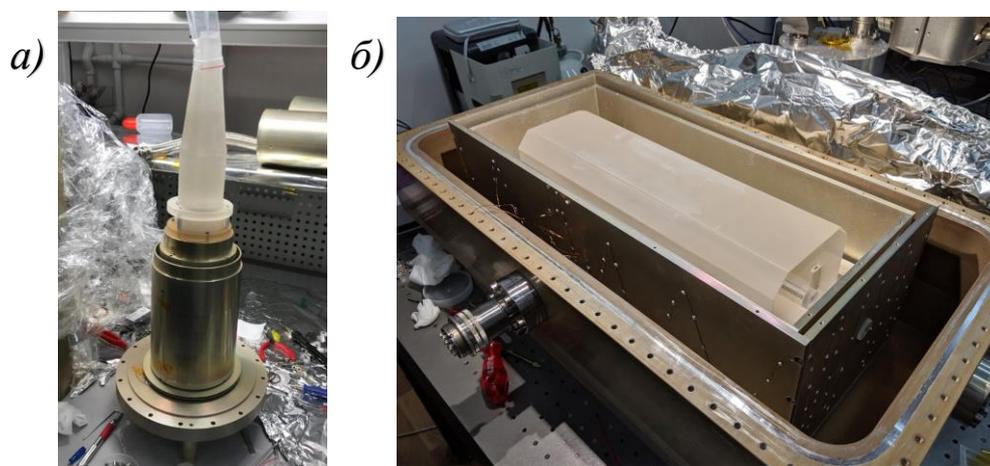
<sup>2</sup> Акустооптический модулятор

метод позволяет компенсировать 30–50% тепловых флуктуаций длины резонатора. Основные представленные в главе 2 результаты опубликованы в работах [27,28].

**Глава 3** посвящена созданию двух ультрастабильных лазерных систем на основе ULE-резонаторов длиной 48 см в горизонтальной и вертикальной конфигурациях, а также исследованию их свойств. Созданные лазерные системы используются в качестве локальных осцилляторов в системе оптических часов на холодных атомах стронция.

Длинные резонаторы имеют малый предел тепловых шумов (на уровне  $10^{-16}$ ), но повышенную чувствительность к механическим возмущениям. Пункт 3.1 этой главы посвящён разработке систем подвеса резонаторов в вакуумных камерах с низкой чувствительностью к вибрациям. Методом конечно-элементного анализа определены оптимальные положения точек подвеса горизонтального резонатора и обоснован выбор биконической формы тела вертикального резонатора.

В п. 3.2 рассмотрены свойства опорных резонаторов, вакуумных камер, оптоэлектронных систем привязки частоты, систем стабилизации температуры в нулевой точке коэффициента теплового расширения резонаторов. Обоснован выбор реализованных технических решений, рассмотрены технические детали и сложности, возникающие на этапе сборки ультрастабильного лазера. Фотографии созданных вертикального и горизонтального длинных ULE-резонаторов и их вакуумных камер показаны на рисунке 2.



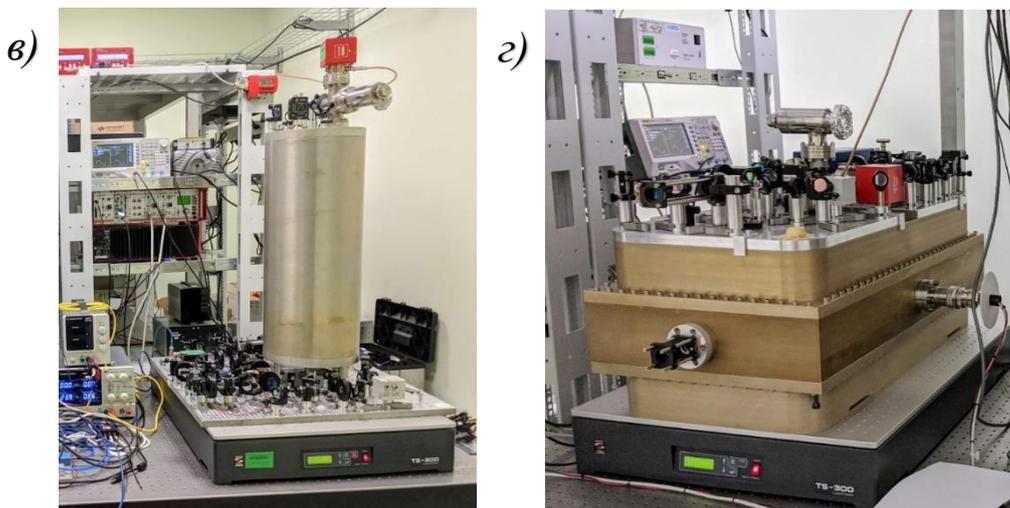


Рисунок 2. (а), (б) – вакуумные камеры с вертикальным и горизонтальным резонаторами на этапе сборки; вертикальная (в) и горизонтальная (г) вакуумные камеры и их оптические системы привязки частот лазеров в лаборатории.

Пункт 3.3 посвящён измерению стабильности и исследованию флуктуаций частоты лазерных систем с длинными ULE-резонаторами. Для этого осуществлено сличение частот лазерных систем. Относительный дрейф частоты двух систем составил около 200 мГц/с. Спектральная ширина на полувысоте сигнала биений указанных лазерных систем оказалась  $\approx 1.5$  Гц и ограничена временем измерения (рисунок 3(а)). Девиация Аллана относительных флуктуаций частоты излучения каждой из лазерных систем составляет менее  $2 \cdot 10^{-15}$  на временах усреднения 30 мс – 10 с, что приблизительно на порядок величины выше предела тепловых шумов (рисунок 3(б)).

В п. 3.3.3–3.3.6 проведено экспериментальное исследование различных возможных источников нестабильности частоты: шумов петли обратной связи, остаточной амплитудной модуляции, интенсивности излучения и вибраций. В результате сличения частот двух лазеров, стабилизированных по двум соседним модам одного и того же резонатора, были измерены шумовые характеристики оптоэлектронных петель привязки частоты. Показано, что на временах усреднения  $\tau > 1$  с вклад шумов оптоэлектронной петли обратной связи в девиацию Аллана флуктуаций частоты сигнала биений является определяющим

и превышает  $10^{-15}$  (рисунок 3(б)). Причиной этого является недостаточно высокая резкость и большой коэффициент поглощения зеркал резонаторов.

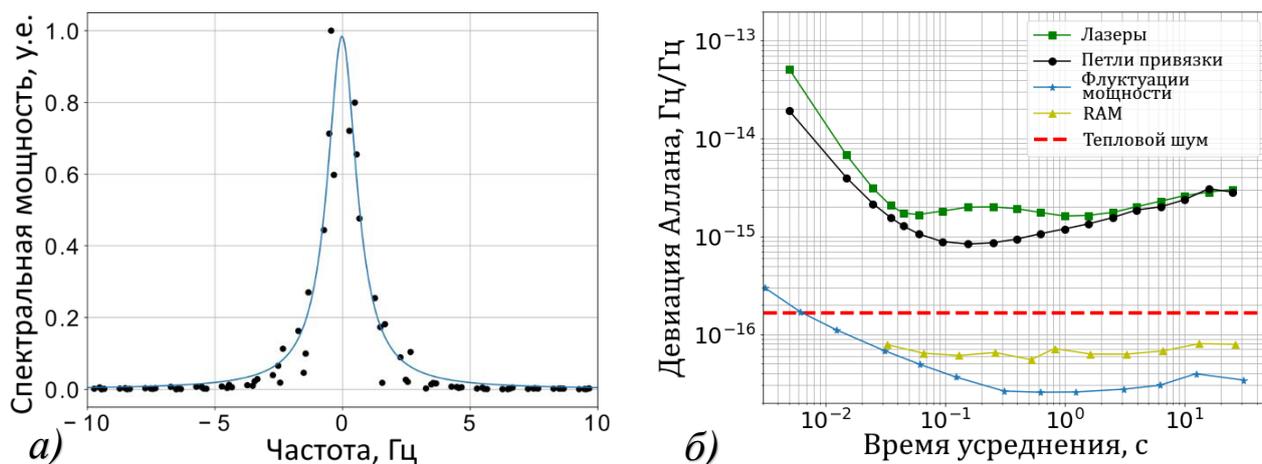


Рисунок 3. (а) Спектральная плотность мощности сигнала биений между лазерными системами со стабилизацией по вертикальному и горизонтальному резонаторам. Время измерения – 1 с. (б) Модифицированная девиация Аллана относительных флуктуаций частоты сигнала биений двух систем. Зеленая кривая - лазеры привязаны к вертикальному и горизонтальному резонаторам. Черная кривая - оба лазера привязаны к соседним  $TEM_{00}$  модам вертикального резонатора для определения нестабильности оптоэлектронной петли обратной связи. Красные пунктирные кривые - ожидаемый уровень теплового шума. Вклад других технических шумов: желтый - остаточная амплитудная модуляция и синий - флуктуации мощности.

Основные представленные в главе 3 результаты опубликованы в работах [27,29].

**Глава 4** посвящена задаче компенсации флуктуаций остаточной амплитудной модуляции в петле стабилизации частоты лазера по криогенному резонатору из монокристаллического кремния. Кремний имеет высокую механическую добротность, позволяя создавать опорные резонаторы с пределом тепловых шумов на уровне  $10^{-16}$ , не прибегая к увеличению длины и, следовательно, вибрационной чувствительности. При работе с этими системами было обнаружено сильное влияние шумов остаточной амплитудной модуляции на стабильность частоты привязанного лазера (рисунок 4, верхняя кривая).

Пункт 4.1 главы посвящён описанию экспериментальной установки. В 4.1.1 рассмотрены оптические, механические и тепловые свойства кремниевых монокристаллических резонаторов. П. 4.1.2 посвящен высоковакуумному криостату, предназначенному для стабилизации температуры резонатора в окрестности 124 К. В 4.1.3 описываются особенности оптоэлектронной петли стабилизации частоты волоконного лазера с длиной волны 1542 нм по криогенному кремниевому резонатору.

Пункт 4.2 посвящен исследованию шумов частоты, связанных с остаточной амплитудной модуляцией излучения лазера – важнейшего источника нестабильности в оптоэлектронных петлях обратной связи. Исследована зависимость глубины амплитудной модуляции от температуры и направления поляризации лазерного излучения. Реализован новый метод подавления флуктуаций остаточной амплитудной модуляции путем активной стабилизации температуры электрооптического модулятора (ЭОМ) и контроля постоянной составляющей напряжения на нём. Данный метод позволил уменьшить вклад флуктуаций остаточной амплитудной модуляции в девиацию Аллана флуктуаций частоты лазерной системы более чем в 100 раз (рисунок 4, нижняя кривая).

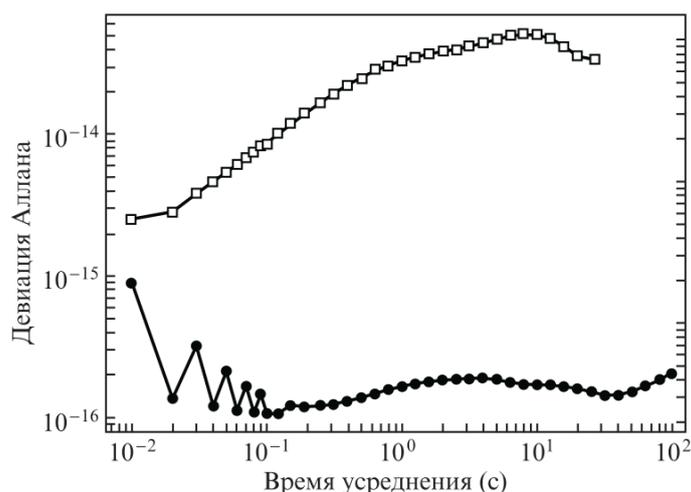
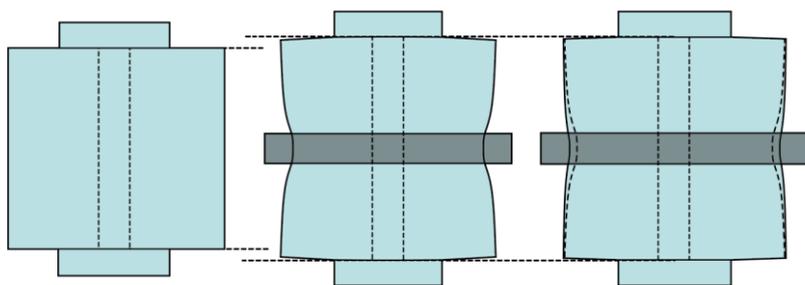


Рисунок 4. Девиация Аллана относительных флуктуаций частоты лазера, стабилизированного по криогенному кремниевому резонатору, обусловленная флуктуациями остаточной амплитудной модуляции: в отсутствие активной стабилизации (□) и при включении петли активной стабилизации (●).

Основные представленные в главе 4 результаты опубликованы в работе [30].

В **Главе 5** предложен и исследован при помощи моделирования новый способ создания опорных резонаторов с нулевым тепловым расширением, альтернативный использованию материалов, имеющих нулевую точку как в главах 3 и 4. Для температурной стабилизации длины резонатора используется обжатие тела в радиальном направлении кольцом из металла или другого материала, у которого коэффициент теплового расширения значительно больше, чем у материала тела. В результате обжатия резонатор удлиняется. Зависимость длины описанного резонатора от температуры определяется двумя эффектами: тепловым расширением тела и изменением давления на него со стороны кольца. Параметры системы можно подобрать таким образом, чтобы оба эффекта компенсировали друг друга (рисунок 5).



*Рисунок 5. Резонатор в недеформированном состоянии (слева), резонатор, обжатый компенсационным кольцом (посередине), резонатор с кольцом при повышении температуры (справа).*

Для исследования характеристик предложенной конструкции резонатора был предпринят расчёт методом конечных элементов. В качестве материала тела и зеркал выбран плавленный кварц, а кольца – алюминий. В расчёте все упругие константы и коэффициенты теплового расширения были учтены вместе с их температурными зависимостями. Подобраны размеры элементов, обеспечивающие температурную стабилизацию. Моделирование показало, что резонатор предложенной конструкции имеет нулевую точку (положение которой зависит от первоначальной силы обжатия), а температурная зависимость его коэффициента теплового расширения вблизи нулевой точки описывается

линейной функцией с коэффициентом  $8 \cdot 10^{-10} \text{ 1/K}^2$ , что приблизительно в два раза меньше, чем у резонатора из стекла Corning ULE 7972 [31] (рисунок 6).

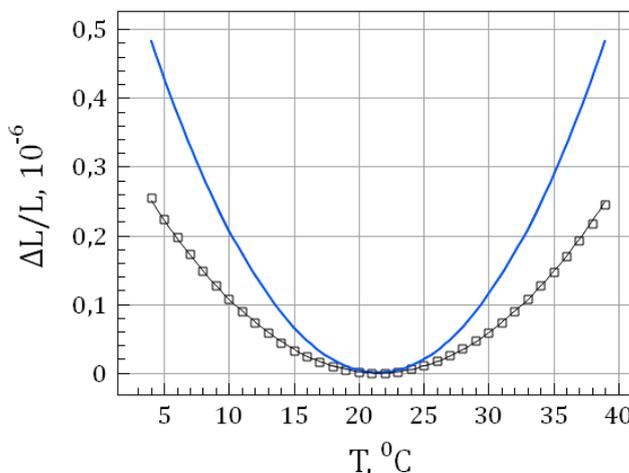


Рисунок 6. Тепловое расширение резонаторов из ULE-стекла (синяя кривая) и кварца с компенсационным кольцом: квадраты — результат расчёта, черная кривая — их аппроксимация параболой.

По результатам этой главы получен патент RU 202420 U1 от 17.02.2021 на полезную модель «Устройство температурной стабилизации оптических резонаторов» ([П1] в списке публикаций автора по теме диссертации).

В приложениях изложена основная информация о характеристиках стабильности и шумов частоты, об оптических свойствах резонаторов Фабри-Перо и приведены практические сведения для реализации привязки частоты методом Паунда-Дривера-Холла.

### Основные результаты работы

1. Предложен метод частичной компенсации тепловых шумов частоты излучения лазера, стабилизированного по основной моде резонатора Фабри-Перо  $LG_{00}$  и проведены соответствующие расчеты. Метод основан на том, что тепловой шум каждой отдельной моды определяется шумами в той области поверхности зеркала, на которой сосредоточена её интенсивность. Для оценки флуктуаций частоты основной моды используется сигнал биений оптических полей лаггер-гауссовой моды  $LG_{10}$  и лаггер-гауссовой моды с орбитальным

моментом  $LG_{03*}$  того же резонатора. Моделирование показало возможность компенсации от 30 до 50 % тепловых шумов.

2. Рассчитаны координаты опор горизонтального резонатора длиной 48 см, обеспечивающие нулевые смещения и наклоны его зеркал под действием вертикальных возмущений. Показано, что вертикальный резонатор биконической формы в два раза менее чувствителен к вибрациям, чем резонатор цилиндрической формы с тем же максимальным диаметром. В соответствии с расчётами изготовлены горизонтальный и вертикальный резонаторы из температурно-компенсированного стекла ULE длиной 48 см и системы их подвеса в вакуумных камерах.

3. Осуществлена стабилизация частоты двух полупроводниковых лазеров с длиной волны излучения 698 нм по модам горизонтального и вертикального ULE-резонаторов длиной 48 см. Измеренная спектральная ширина на полувысоте сигнала биений указанных лазерных систем составляет  $< 1.5$  Гц и ограничена временем измерения. Девиация Аллана относительных флуктуаций частоты излучения каждой из лазерных систем составляет менее  $2 \cdot 10^{-15}$  на временах усреднения 30 мс – 10 с, что на порядок величины выше предела тепловых шумов. Доминирующий вклад в нестабильность частоты вносят шумы оптоэлектронных систем обратной связи. Полученные спектральные характеристики созданных лазеров достаточны для достижения уровня относительной нестабильности частоты  $10^{-17}$  стронциевого оптического репера в составе государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ-1 при усреднении длительностью более 3 часов.

4. Показано что предел тепловых шумов монолитного резонатора уменьшается при использовании кристаллического материала вместо аморфного за счёт увеличения добротности механических резонансов. Основной вклад (более 90 %) дают шумы покрытий и подложек зеркал. Зависимость предела тепловых шумов от длины резонатора  $L$  находится в диапазоне  $L^{-9/8} - L^{-10/8}$ .

5. Предложен ранее не использовавшийся материал для тела и подложек зеркал резонатора – кристаллический арсенид галлия и проведён расчет тепловых шумов частоты такого резонатора. Использование арсенида галлия позволяет существенно упростить технологию создания кристаллических многослойных зеркал за счет использования одного и того же материала подложки и отражающего покрытия. Предел тепловых шумов такого резонатора в 4.5 раза ниже, чем у резонатора из ULE-стекла с кристаллическими зеркалами на кварцевых подложках.

6. Определены характеристики двух опорных резонаторов Фабри-Перо из монокристаллического кремния с диэлектрическими покрытиями зеркал  $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ : резкость и чувствительность к вибрациям. Резкости резонаторов определены методом ring-down и составляют более 580000. Чувствительность частоты моды резонатора к вибрациям в системе подвеса за плоскость центра масс вычислена методом конечно-элементного анализа и составила  $10 \text{ Гц}/(\text{см} \cdot \text{с}^{-2})$ .

7. Спроектированы и созданы два высоковакуумных криостата с остаточным давлением менее  $10^{-8}$  мбар, позволяющие охлаждать опорные резонаторы из монокристаллического кремния до температуры нулевого теплового расширения (124 К). Охлаждение осуществляется радиационным теплообменом с заливным азотным экраном. Полученная величина нестабильности температуры составляет  $< 1 \text{ мК}$  на времени 1 час, что обеспечило дрейф частоты моды кристаллического кремниевого резонатора  $< 3 \text{ Гц}/\text{час}$ .

8. Разработана система подавления шумов остаточной амплитудной модуляции в методе Паунда-Драйвера-Холла с помощью активной стабилизации температуры кристалла ЭОМа и контроля напряжения на нём. Удалось экспериментально уменьшить влияние флуктуаций остаточной амплитудной модуляции на нестабильность частоты лазерной системы до уровня  $< 2 \cdot 10^{-16}$ , соответствующего пределу тепловых шумов криогенных кремниевых монокристаллических резонаторов.

9. Предложен способ компенсации теплового расширения, позволяющий создавать оптические опорные резонаторы с нулевым тепловым изменением длины из материалов, не обладающих таким свойством и проведено моделирование, подтвердившее эффективность подхода. Конструкция резонатора этого типа состоит из цилиндрического тела с осевым отверстием для оптического излучения и пары зеркал. Тело резонатора сжато в радиальном направлении кольцом из материала, КТР (коэффициент теплового расширения) которого превосходит КТР тела. Размеры кольца подобраны так, чтобы при увеличении температуры сборки тенденция к тепловому расширению тела компенсировалась тенденцией к сжатию из-за уменьшения давления на тело резонатора со стороны кольца. Моделирование показало, что резонатор из плавленого кварца, обжатый алюминиевым кольцом, имеет точку нулевого теплового расширения и демонстрирует приблизительно в два раза меньшую чувствительность к изменению температуры в сравнении с резонатором из температурно-компенсированного стекла ULE (Corning 7972).

#### **Публикации автора по теме диссертации**

##### **Научные журналы, входящие в базу данных *Web of Science*:**

1. Н. О. Жаднов, К. С. Кудеяров, Д. С. Крючков, И. А. Семериков, К. Ю. Хабарова, Н. Н. Колачевский, “О пределе теплового шума высокостабильных оптических резонаторов”, *Квантовая электроника*, 2018, т. 48, № 5, стр. 425–430
2. Д. С. Крючков, Н. О. Жаднов, К. С. Кудеяров, Г. А. Вишнякова, К. Ю. Хабарова, Н. Н. Колачевский, “Компенсация флуктуаций остаточной амплитудной модуляции в оптоэлектронной системе стабилизации частоты лазерного излучения”, *Квантовая электроника*, 2020, т. 50, № 6, стр. 590–594
3. N. O. Zhadnov, K. S. Kudeyarov, D. S. Kryuchkov, G. A. Vishnyakova, K. Y. Khabarova, N. N. Kolachevsky “48-cm long room-temperature cavities in vertical and horizontal orientations for Sr optical clock”, *Applied Optics*, 2021, vol. 60, № 29, p. 9151-9159

4. Н. О. Жаднов, Н. Н. Колачевский, “Частичная компенсация тепловых шумов в основной моде оптического резонатора”, Краткие сообщения по физике ФИАН, 2021, т. 8, стр. 27–37.

**Патент на полезную модель:**

П1. Патент RU 202420 U1 от 17.02.2021

Н. О. Жаднов, А. В. Масалов, «Устройство температурной стабилизации оптических резонаторов».

**Тезисы докладов в сборниках трудов конференций:**

1. N. Zhadnov, K. Kudeyarov, I. Semerikov, K. Khabarova, N. Kolachevsky «Low Thermal Noise Fabry-Perot Cavities for Ultrastable Lasers», EFTF-2018, European Frequency and Time Forum, Турин, Италия, 2018 г., С. 60.
2. N. Zhadnov, K. Kudeyarov, D. Kryuchkov, I. Semerikov, K. Khabarova, N. Kolachevsky «Lowering thermal noise of ultrastable cavities to  $1e-17$  level of fractional frequency instability», Book of abstracts of the 50th Anniversary EGAS conference, Краков, Польша, 2018 г., С. 119.
3. Н. Жаднов, К. Кудеяров, Д. Крючков, Г. Вишнякова, К. Хабарова, Н. Колачевский «Ультростабильные лазеры со стабилизацией частоты по криогенным кремниевым резонаторам», Фундаментальное и Прикладное Координатно-Временное и Навигационное Обеспечение (КВНО), Санкт-Петербург, 2019 г., С. 49
4. N. Zhadnov, K. Kudeyarov, D. Kryuchkov, G. Vishnyakova, K. Khabarova, N. Kolachevsky «Ultrastable lasers for optical clocks and fundamental research» International Conference on Ultrafast Optical Science (UltrafastLight), Москва, 2019 г, С. 298.
5. N. Zhadnov, D. Kryuchkov, K. Kudeyarov, G. Vishnyakova, K. Khabarova, N. Kolachevsky «Sr clock laser systems based on long room-temperature cavities», Joint Conference of the European Frequency & Time Forum & IEEE Intl Frequency Control Symposium (EFTF-IFCS), онлайн, 2021 г., С. 73.

6. Н. Жаднов, К. Кудеяров, Д. Крючков, Г. Вишнякова, К. Хабарова, А. Масалов, Н. Колачевский «Компенсация теплового расширения и тепловых шумов опорных оптических резонаторов», Форум «Микроэлектроника 2021», Алушта, 2021 г., С. 737.

#### Список литературы, цитируемой в автореферате

1. *Басов Н.Г., Летохов В.С.* Оптические Стандарты Частоты // *Успехи Физических Наук*, 1968, т. 96, № 4, стр. 585–631.
2. *Ludlow A.D., Boyd M.M., Ye J.* Optical atomic clocks // *Rev. Mod. Phys.*, 2015, vol. 87, June, P. 637–701.
3. *Drever R.W.P. et al.* Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator // *Appl. Phys. B*, 1983, vol. 31, № 2, P. 97–105.
4. *Oelker E. et al.* Demonstration of  $4.8e-17$  stability at 1 s for two independent optical clocks // *Nat. Photonics*, 2019, vol. 13, № 10, P. 714–719.
5. *Brewer S.M. et al.*  $27Al+$  Quantum-Logic Clock with a Systematic Uncertainty below  $1e-18$  // *Phys. Rev. Lett.*, 2019, vol. 123, № 3, P. 33201.
6. *Gill P.* When should we change the definition of the second // *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, 2011, vol. 369, № 1953, P. 4109–4130.
7. *Safronova M.S. et al.* Search for new physics with atoms and molecules // *Rev. Mod. Phys.*, 2018, vol. 90, № 2, P. 025008.
8. *Sanner C. et al.* Optical clock comparison for Lorentz symmetry testing // *Nature*, 2019, vol. 567, № 7747, P. 204–208.
9. *Takamoto M. et al.* Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks // *Nat. Photonics*, 2020, vol. 14, № 7, P. 411–415.
10. *Godun R.M. et al.* Frequency ratio of two optical clock transitions in  $171Yb+$  and constraints on the time variation of fundamental constants // *Phys. Rev. Lett.*, 2014, vol. 113, № 21, P. 210801.
11. *Beyer A. et al.* The Rydberg Constant and Proton Size From Atomic Hydrogen // *Science*, 2017, vol. 358, № 6359, P. 79–85.
12. *Derevianko A.* Atomic clocks and dark-matter signatures // *J. Phys. Conf. Ser.*,

- 2016, vol. 723, P. 1–6.
13. *Wcislo P. et al.* New bounds on dark matter coupling from a global network of optical atomic clocks // *Sci. Adv.*, 2018, vol. 4, № 12, P. 1–8.
  14. *Kennedy C.J. et al.* Precision Metrology Meets Cosmology: Improved Constraints on Ultralight Dark Matter from Atom-Cavity Frequency Comparisons // *Phys. Rev. Lett.*, 2020, vol. 125, № 20, P. 201302 .
  15. *Savalle E. et al.* Searching for Dark Matter with an Optical Cavity and an Unequal-Delay Interferometer // *Phys. Rev. Lett.*, 2021, vol. 126, № 5, P. 051301.
  16. *Abich K. et al.* In-Orbit Performance of the GRACE Follow-on Laser Ranging Interferometer // *Phys. Rev. Lett.*, 2019, vol. 123, № 3, P. 031101.
  17. *Thompson R. et al.* A flight-like optical reference cavity for GRACE follow-on laser frequency stabilization // *Proc. IEEE Int. Freq. Control Symp. Expo.*, 2011.
  18. *Kwee P. et al.* Stabilized high-power laser system for LIGO // *Opt. Express*, 2012, vol. 20, № 10, P. 459–465.
  19. *Kolkowitz S. et al.* Gravitational wave detection with optical lattice atomic clocks // *Phys. Rev. D*, 2016, vol. 94, № 12, P. 124043.
  20. *Dick G. et al.* Local oscillator induced degradation of medium-term stability in passive atomic frequency standards // *Proc. 22nd Precise Time Time Interval Meet.*, 1990, P. 487–508.
  21. *Numata K., Kemery A., Camp J.* Thermal-noise limit in the frequency stabilization of lasers with rigid cavities // *Phys. Rev. Lett.*, 2004, vol. 93, № 25, P. 250602 .
  22. *Zhang W. et al.* Ultrastable Silicon Cavity in a Continuously Operating Closed-Cycle Cryostat at 4 K // *Phys. Rev. Lett.*, 2017, vol. 119, № 24, P. 243601.
  23. *Robinson J.M. et al.* Crystalline optical cavity at 4 K with thermal noise limited instability and ultralow drift // *Optica*, 2019, vol. 6, № 2, P. 240–243.
  24. *Häfner S. et al.*  $8e-17$  Fractional Laser Frequency Instability With a Long Room-Temperature Cavity // *Opt. Lett.*, 2015, vol. 40, № 9, P. 2112.
  25. *Бердасов О.И. и др.* Ультростабильная лазерная система для спектроскопии часового перехода  $1S_0 - 3P_0$  в атомах Sr // *Квантовая Электроника*, 2017,

т. 47, № 5, стр. 400–405.

26. *Matei D.G. et al.* 1.5  $\mu\text{m}$  Lasers with Sub-10 mHz Linewidth // *Phys. Rev. Lett.*, 2017, vol. 118, № 26, P. 263202.
27. *Жаднов Н.О. и др.* О пределе теплового шума высокостабильных оптических резонаторов // *Квантовая электроника*, 2018, т. 48, № 5, стр. 425–430.
28. *Жаднов Н.О., Колачевский Н.Н.* Частичная компенсация тепловых шумов в основной моде оптического резонатора // *Краткие сообщения по физике ФИАН*, 2021, т. 8, стр. 27–37.
29. *Zhadnov N.O. et al.* 48-cm-long room-temperature cavities in vertical and horizontal orientations for Sr optical clock // *Appl. Opt.*, 2021, vol. 60, № 29, P. 9151.
30. *Крючков Д.С. и др.* Компенсация флуктуаций остаточной амплитудной модуляции в оптоэлектронной системе стабилизации частоты лазерного излучения // *Квантовая электроника*, 2020, т. 6, № 50, стр. 590–594.
31. *Legero T., Kessler T., Sterr U.* Tuning the thermal expansion properties of optical reference cavities with fused silica mirrors // *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, vol. 27, № 5, P. 914.