

УТВЕРЖДАЮ

Проректор Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего  
образования «Московский государственный  
университет имени М. В. Ломоносова» (МГУ),  
начальник Управления научной политики



Доктор физ.-мат. наук, профессор

А. А. Федянин

« 21 » марта 2022 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

*На диссертационную работу 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*

Диссертационная работа Жаднова Никиты Олеговича «Флуктуации частоты высокостабильных лазерных систем с опорным монолитным оптическим резонатором» посвящена разработке 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.

В настоящее время оптическим эталонам, построенным на электромагнитных переходах в сгустках атомов (или ионов) с принудительным лазерным охлаждением принадлежит ведущая роль в физике и технике атомных стандартов частоты. Их относительная частотная стабильность достигает значений  $10^{-17} - 10^{-18}$  на временах порядка единиц секунд при которой уже существенное влияние оказывает релятивистский гравитационный сдвиг электромагнитных уровней. При этом в состав оптического стандарта входит лазер, управляющий атомными переходами, стабилизированный высокочастотным резонатором Фабри-Перо с резкостью (финессе), достигающей до сотен тысяч. Фактически такой лазер является вторичным эталоном т.е. малошумящим локальным осциллятором с узкой линией, но не обладающий достаточной метрологической погрешностью. Последняя приобретает за счет синхронизации по адекватному атомному переходу.

В лабораторной практике лазеры стабилизированные только по опорному резонатору, обладают относительной стабильностью частоты не лучше  $\Delta\nu/\nu = 10^{-14}$  при временах усреднения 100 мс–10 с. В структуре оптических стандартов такие лазеры выполняют две важные функции. Во-первых, обеспечивают сужение спектральной линии излучения, необходимое для спектроскопии часовых переходов шириной от нескольких герц до долей герца, и, во-вторых, играют роль вторичного эталона, т.е. хранителя частоты на временах, меньших времен опроса атомного репера частоты, составляющих доли секунд. Таким образом, прогресс и улучшение качества оптических стандартов частоты прямо связаны с

усовершенствованием вторичных лазерных эталонов, стабилизированных по опорным резонаторам. Вместе с тем существует параллельная мотивация развития этого направления как важной ветви физического эксперимента.

На сегодняшний день множество применений оптических стандартов и вторичных лазерных эталонов частоты включает в себя не только прикладные задачи метрологии и навигации, но и фундаментальные физические исследования. В том числе прецизионная проверка Принципа Эквивалентности как экспериментальной базы ОТО, тестирование следствий конкурирующих релятивистских теорий гравитации и квантовой теории с целью поиска новой физики. Активно развиваются исследования по детектированию частиц темной материи с помощью оптических стандартов и высокочастотных лазерных резонаторов.

В диссертации Жаднова Н. О. рассмотрен ряд задач, относящихся к разработке ультрастабильных лазерных систем на основе опорных резонаторов с низким пределом тепловых шумов. Выполнены исследования влияния разного рода флуктуаций и инструментальных шумов на стабильность частоты таких устройств.

Несомненно, что тема представленной диссертации весьма актуальна для физики и техники прецизионных оптических измерений.

Структура диссертации следующая

Во **Введении** диссертации сформулированы цели, задачи, актуальность, новизна и практическое значение работы, приведены основные физические и технические аспекты, ассоциированные с проблемой создания оптических стандартов частоты.

**Глава 1** представляет собой литературный обзор. В ней рассмотрены различные методы стабилизации частоты лазеров, применения лазерных систем с узкой спектральной линией, а также проанализированы различные шумовые процессы, ограничивающие стабильность частоты таких лазеров.

В **Главе 2** проведен теоретический анализ проблемы тепловых шумов опорных оптических резонаторов высокостабильных лазерных систем. Произведены оценочные расчёты предельного уровня нестабильности частоты, связанного с указанными шумами, для резонаторов Фабри-Перо различных размеров и состава. Выявлены основные пути для создания опорных резонаторов с минимальным пределом шумов. На основе этих исследований были созданы длинные резонаторы ( $\approx 0.5$  м) из температурно-компенсированного стекла и криогенные кремниевые резонаторы, использованные далее в экспериментах. В данной главе предложен метод компенсации тепловых шумов частоты лазера, стабилизированного по основной ТЕМ<sub>00</sub> моде опорного резонатора, при помощи пары «пробных» мод старших порядков. Компьютерное моделирование показало, что данный метод позволяет снизить предел нестабильности частоты на 30–50 %.

**Глава 3** посвящена созданию высокостабильных полупроводниковых лазерных систем на основе длинных опорных ULE-резонаторов с малым пределом тепловых шумов для опороса холодных атомов стронция в оптических часах ( $\lambda=698$  нм). Автор подробно рассказывает о разработке опорных резонаторов с малой чувствительностью к вибрациям и тепловым шумам, высоковакуумных камер, систем стабилизации температуры и оптоэлектронных петель обратной связи для стабилизации частоты излучения. Приведены результаты исследований стабильности частоты созданных лазерных систем и характерных для них шумовых процессов. Величина девиации Аллана флуктуаций частоты сигнала биений лазеров составила не более  $2 \cdot 10^{-15}$  при времени усреднения 100 мс. Значимым практическим результатом является то, что созданные лазерные системы уже используются в российском государственном эталоне единиц времени и частоты ГЭТ-1.

**В Главе 4** рассказано о разработке и создании лазеров телекоммуникационного диапазона ( $\lambda=1.5$  мкм) со стабилизацией частоты по криогенным кремниевым резонаторам. Данный тип опорных резонаторов является самым передовым на сегодняшний день и потенциально обеспечивает минимальный уровень тепловых шумов. Определены ключевые оптические и механические характеристики резонаторов из монокристаллического кремния, описана конструкция высоковакуумных криостатов для их охлаждения. Акцент в данной главе поставлен на исследование флуктуаций остаточной амплитудной модуляции – важного шумового процесса, ограничивающего стабильность привязки частоты лазера к резонатору методом Паунда-Дривера-Холла. Автору удалось разработать и реализовать метод компенсации, уменьшающий вклад данного типа шума в итоговую нестабильность более чем в 50 раз.

**Глава 5** предлагает новый метод для создания опорных резонаторов с нулевым коэффициентом теплового расширения длины. Особенность метода состоит в создании специально подобранной механической деформации тела резонатора, обеспечивающей уменьшение или полное подавление его теплового расширения. В первой части главы изложена суть метода и произведены аналитические оценки. Вторая часть главы описывает результаты моделирования тепловых деформаций резонатора Фабри-Перо из кварцевого стекла, тело которого сжато по диаметру кольцом из алюминия. Показано, что чувствительность длины такого резонатора к изменениям температуры может быть лучше, чем у резонатора из температурно-компенсированного стекла ULE.

**В Заключение** сформулированы основные результаты диссертации. Кроме того, в диссертации имеются два **Приложения**. В первом определены математические характеристики стабильности и шумов частоты, которые используются в основном тексте. Второе приложение рассматривает практические аспекты реализации метода Паунда-Дривера-Холла и может быть руководством для исследователей начинающих работать в данной области.

К основным результатам работы можно отнести следующие

1. Исследована методика уменьшения частотных шумов лазера стабилизированного монолитным опорным ФП резонатором за счет долевого компенсации его тепловых шумов. Численным моделированием показана возможность их частичного подавления на  $30 \div 50 \%$  от начальной величины.
2. Рассчитаны координаты опорных точек горизонтального резонатора (длиной 48 см,) обеспечивающие нулевые смещения и наклоны его зеркал при воздействии вертикальных возмущений. Показано, что вертикальный резонатор биконической формы в два раза менее чувствителен к вибрациям, чем резонатор цилиндрической формы с тем же максимальным диаметром. Расчеты подтверждены экспериментально для резонаторов из стекла ULE..
3. Осуществлена стабилизация частоты двух полупроводниковых лазеров с длиной волны 698 нм по модам горизонтального и вертикального ULE-резонаторов длиной 48 см. Дисперсия Аллана относительных флуктуаций частоты излучения каждой этих лазерных систем составила менее  $2 \cdot 10^{-15}$  на временах усреднения 30 мс – 10 с, что лишь на порядок превышает предел тепловых шумов.
4. Экспериментально показано уменьшение тепловых шумов при использовании опорного резонатора из монолитного кристаллического материала за счёт увеличения добротности



механических резонансов. При этом основной вклад дают тепловые шумы подложек и покрытий зеркал. Для их уменьшения предложено использовать кристаллический арсенид галлия. Эффективность таких зеркал подтверждена расчетами.

5. Экспериментально измерены характеристики – резкость и вибрационная чувствительность - двух образцов опорных ФП резонаторов из монокристаллического кремния и диэлектрических зеркал, покрытых пленками  $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ . Резкости резонаторов оцененные по времени звона и составили 580000. Чувствительность рабочей моды резонатора к вибрация при подвеске за плоскость центра масс составила  $10 \text{ Гц}/(\text{см} \cdot \text{с}^{-2})$ .

6 Тестированы два высоковакуумных криостата с остаточным давлением менее  $10^{-8}$  мбар, позволяющие охлаждать резонаторы из монокристаллического кремния до температуры нулевого теплового расширения (124 К). Охлаждение осуществляется радиационным теплообменом с заливным азотным экраном. Нестабильность температуры  $\sim 1 \text{ мК}$  на времени 1 час; дрейф частоты моды кристаллического кремниевого резонатора  $< 3 \text{ Гц}/\text{час}$ .

7. Разработана схема подавления шумов остаточной амплитудной модуляции в методе Паунда-Драйвера-Холла с помощью активной стабилизации температуры кристалла электро-оптического модулятора и контроля его напряжения. Экспериментально достигнуто уменьшение влияние флуктуаций остаточной амплитудной модуляции на нестабильность частоты лазерной системы до уровня  $< 2 \cdot 10^{-16}$ , близкого к пределу тепловых шумов криогенных кремниевых монокристаллических резонаторов.

8. Предложен способ компенсации теплового расширения оптических опорных резонаторов за счет использования радиального бандажного кольца из материала с коэффициентом теплового расширения превосходящим КТР тела резонатора. Для кварцевого резонатора с алюминиевым кольцом проведено численное моделирование показавшее уменьшение чувствительности к изменению температуры в 2 раза в сравнении с резонаторами из стекла ULE

Результаты диссертации прошли серьезную апробацию на российских и международных конференциях, симпозиумах и семинарах. Они опубликованы в трех статьях входящих в базу WOS и Scopus, Некоторые предложения и разработки диссертации получили патентное оформление.

Несмотря на позитивное общее впечатление диссертационная работа Жаднова не лишена недостатков. В частности, следует сделать ряд принципиальных и технических замечаний.

- 1 К задаче подавления тепловых флуктуаций опорного резонатора (гл 2). При качественном разделении тепловых шумов на три типа (броуновские шумы акустических мод твердотельного резонатора, шумы собственных колебаний зеркал и шумы пленок их отражающих покрытий) нет четкого разъяснения (формулировки) какой именно тип шума можно частично компенсировать методикой предложенной в диссертации. Такое разъяснение требуется, поскольку известно, что тепловые шумы отдельных мод не коррелированы ввиду различия их собственных частот (в частности нельзя убрать броуновские флуктуации, подбирая линейную комбинацию шумов разных мод).

- 2 В задаче оптимизации «подвески», а точнее – «подставки», опорного резонатора аргументация в пользу вертикальной конфигурации состоит в утверждении, что «при вертикальном закреплении горизонтальные вибрации передаются слабо». Здесь упускается из виду, что при жесткой точке опоры (например, витоновый шарик) возмущения неизбежно будут распространяться сферически от точки контакта. Известным признанным преимуществом вертикального размещения (с опорой по периметру сечения в центре продольной симметрии резонатора) является частичная компенсация вариаций его длины при вертикальных вибрациях.

- 3 Вакуумные камеры азотного криостата описаны плохо. Нет важных деталей о материалах внутренних экранов, их толщине. Где располагаются температурные датчики и какие?. Между тем, чтобы «вылавливать» точку «нулевого расширения» нужно детально уметь контролировать температуру. Температура кипения азота на стр 94 указана с ошибкой: 79 К вместо 77К.

- 4 Описан эксперимент по охлаждению резонатора в азотном криостате. В выводах сказано, что требуемая температура 124 К на пробном теле не была достигнута, после чего проводились работы по увеличению «зачернения» и тп. По видимому в диссертацию не следовало давать столь подробное описание эксперимента, который не удался.

- 5 В последней главе 5 предложена прецизионная методика обжата диэлектрического опорного резонатора металлическим кольцом с большим КТР для частичной автокомпенсации тепловых вариаций линейных размеров резонатора. Методика оформлена в виде патентного свидетельства. Однако, нет никаких оценок того, что при этом будет происходить с высокой акустической добротностью резонаторов, ради которой рекомендовано их изготовление из монокристаллов с малыми внутренними потерями.

- 6 В целом диссертация написана хорошим литературным языком с небольшим количеством стилистических и орфографических ошибок. В качестве примеров можем указать следующие:

- на стр.101 опечатка: «проаволоки», на стр.136 пропущен предлог «в», на стр.143 пропущена буква «р» в фразе «настойкой зеркал» и т.д.

- в некоторых местах используются «англицизмы» (транслитерация английских слов): на стр 136 - «пространственный каплинг» - вместо «пространственное согласование», - в нескольких местах «сайдбэнды» - вместо «боковые полосы» и т.д.

- названия ULE стекол в диссертации - «Церодур», в то время как в отечественной литературе пишется «Зеродур»; на стр.39, стр.49 используется английское название «Zerodur». Имеет смысл привести все названия к одному виду.

Приведенные замечания не снижают высокой научной ценности представленной работы и значимости её вклада в физику и технику оптических стандартов. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и корректно представляет достигнутые результаты.

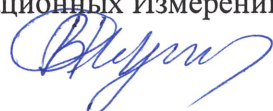
Доклад по материалам диссертации был сделан автором 16 марта 2022 года на семинаре Отдела Гравитационных Измерений ГАИШ МГУ в формате он-лайн с открытым доступом через систему Интернет. Отзыв на диссертацию одобрен на заседании семинара.

Диссертационная работа Н.О. Жаднова «Флуктуации частоты высокостабильных лазерных систем с опорным монолитным оптическим резонатором» 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 её автор заслуживает присуждения степени кандидата физико – математических наук по специальности 1.3.19 Лазерная Физика.

Отзыв на диссертацию составлен:

Зав. отделом Гравитационных Измерений ГАИШ МГУ,

д.ф.м.н., проф.



Руденко Валентин Николаевич

С.н.с. отдела Гравитационных Измерений ГАИШ МГУ, к.ф.м.н.,



Попов Сергей Михайлович

Список основных работ сотрудников ведущей организации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» (МГУ) по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. V. N. Rudenko, N. L. Kvashnin, A. A. Lugovoi et al. "Modernization and Methods of Maintaining the Operating Mode of the OGRAN (Optoacoustic Gravity Antenna) Setup", Phys. Atom. Nuclei 83, 1682–1690 (2020)
2. V. N. Rudenko, Yu. M. Gavriluk, A. V. Gusev et al. "Gravitational wave detector OGRAN as multi-messenger project of RAS-MSU", International Journal of Modern Physics A, 35, 02n03, 2040007 (2020)
3. M. A. Kuvshinskii, S. I. Oreshkin, S. M. Popov et al. "Tests of Cryogenic Fabry–Perot Cavity with Mirrors on Different Substrates", Applied Sciences, 9, 230 (2019)
4. N. N. Kvashnin, M. V. Kuvshinskyi, S. I. Oreshkin et al. "Cryogenic Model of the Gravitational Antenna OGRAN", Physics of Atomic Nuclei, 80, 1606–1612 (2017)
5. В. Н. Руденко "Гравитационно-волновой эксперимент в России", УФН, 187, 892–905 (2017)
6. V. V. Kulagin, S. I. Oreshkin, S. M. Popov et al. "Opto-acoustical gravitational bar detector with cryogenic mirrors", Gravitation and Cosmology, 22, 4 (2016)
7. V. V. Kulagin, S. I. Oreshkin, S. M. Popov "Sensitivity Enhancement of the Gravitational Detector OGRAN", Physics of Atomic Nuclei, 79, 13, (2016)

## Информация о ведущей организации

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

Адрес: 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

Телефон: +7 (495) 939-10-00 Факс: +7 (495) 939-01-26

WWW: [www.msu.ru](http://www.msu.ru) E-mail: [info@rector.msu.ru](mailto:info@rector.msu.ru)