

# Новое поколение охлаждаемых высокодобротных резонаторов Фабри–Перо для ультрастабильных лазеров

Н.О.Жаднов, А.В.Масалов, В.Н.Сорокин, К.Ю.Хабарова, Н.Н.Колачевский

*Проведен сравнительный анализ характеристик лазерных резонаторов из различных материалов. Наибольшее внимание уделено проблеме броуновских шумов, приводящих к флуктуациям длины резонатора и ограничивающих стабильность частоты лазера, активно стабилизированного по пику пропускания высокодобротного резонатора Фабри–Перо. Показана возможность создания ультрастабильных лазерных систем нового поколения на основе охлаждаемых кристаллических резонаторов.*

**Ключевые слова:** высокодобротный кремниевый резонатор, ультрастабильная лазерная система, тепловые шумы.

## 1. Введение

В работе приводится сравнительный анализ характеристик резонаторов из различных материалов и показана возможность создания ультрастабильных лазерных систем нового поколения на основе охлаждаемых кристаллических резонаторов.

Высокостабильные лазерные системы востребованы во многих областях современной фундаментальной и прикладной физики. Они находят применение в задачах прецизионной спектроскопии, метрологии времени и частоты, навигации и телекоммуникации. Лазерные системы с относительной нестабильностью частоты на уровне  $10^{-15}$ – $10^{-16}$  при времени усреднения 1 с являются ключевым элементом современных оптических часов [1, 2]. Кроме того, ультрастабильные лазерные системы могут использоваться как самостоятельные источники стабильных сигналов оптической частоты. Уступая по стабильности при больших временах усреднения (свыше 100 с) оптическим атомным часам с показателями нестабильности на уровне  $10^{-18}$ , лазерные системы, стабилизированные по макроскопическим резонаторам, имеют лучшие массогабаритные характеристики и более высокую надёжность, что делает их привлекательными для разработки транспортируемых и компактных приборов. Такие устройства могут найти применение в системах спутниковой навигации, радиолокации, радиоастрономии и в высокостабильных линиях связи.

В большинстве современных систем стабилизации частоты лазеров используются ультрастабильные оптические резонаторы Фабри–Перо. Частота излучения ла-

ра может стабилизироваться по пику пропускания резонатора, например методом Паунда–Дривера–Холла [3]. В результате стабильность частоты излучения лазера определяется стабильностью частоты собственных мод резонатора и отношением сигнал/шум в сигнале ошибки. Частота моды, в свою очередь, непосредственно связана с расстоянием между зеркалами резонатора.

Случайные изменения расстояния между зеркалами резонатора могут быть вызваны внешними вибрациями, изменением линейных размеров тела резонатора за счет флуктуаций температуры, а также тепловыми броуновскими шумами, неизбежно присутствующими в составных частях резонатора: теле резонатора, подложках и покрытиях зеркал. Для уменьшения влияния температурных флуктуаций тело резонатора изготавливается из материала, имеющего «нулевую» точку температурного расширения. В этой точке коэффициент линейного теплового расширения материала обращается в нуль. Кроме того, резонатор помещают в теплоизолированную высоковакуумную камеру. В работе [4] была продемонстрирована возможность стабилизации температуры вблизи комнатной с точностью до 100 мкК.

Правильный выбор формы тела резонатора и способа его подвеса, а также применение вибрационной компенсации позволяют существенно уменьшить влияние вибраций. Одним из возможных подходов является использование биконической формы (рис. 1) и вертикального расположения резонатора с подвесом в плоскости его центра тяжести [4].

В настоящее время ультрастабильные лазерные системы могут обеспечить относительную нестабильность частоты  $\delta\nu/\nu$  на уровне  $10^{-16}$  при времени усреднения 1–1000 с [5, 6], ограниченную в основном тепловыми броуновскими шумами. В работе [7] выполнено сравнение двух лазерных систем, стабилизированных относительно независимых криогенных кремниевых резонаторов, и показано, что спектральная ширина лазерного излучения составляет около 10 мГц при времени усреднения 1–1000 с. Это открывает новые возможности для повышения точности оптических часов и прецизионной спектроскопии.

В настоящей работе проводится сравнительный анализ тепловых механических шумов интерферометров

**Н.О.Жаднов, К.Ю.Хабарова, Н.Н.Колачевский.** Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141701 Долгопрудный, Институтский пер., 9; Российский квантовый центр, Россия, 143025 Москва, Сколково, ул. Новая, 100; e-mail: nik.zhadnov@yandex.ru

**А.В.Масалов, В.Н.Сорокин.** Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

Поступила в редакцию 8 марта 2017 г.

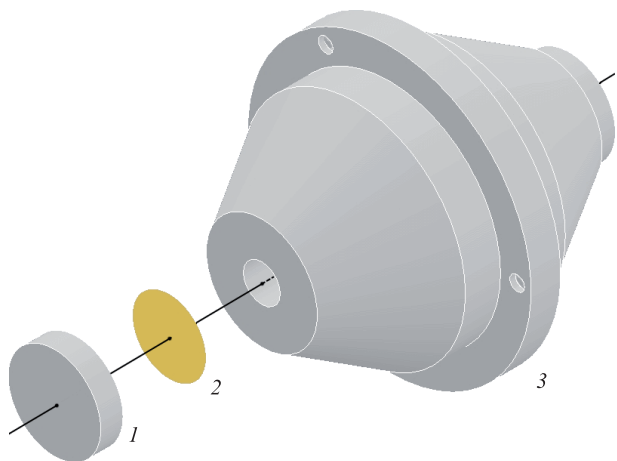


Рис.1. Составные части резонатора: 1 – подложка зеркала; 2 – отражающее покрытие; 3 – тело резонатора.

Фабри–Перо, изготовленных из различных материалов, а также рассматривается возможность создания ультрастабильных лазерных систем нового поколения на основе кристаллических резонаторов.

## 2. Тепловой шум

Тепловые шумы – одна из главных проблем в физике прецизионных измерений. Случайные тепловые дрожания резонатора, в особенности зеркал, вызывают флуктуации его длины, а следовательно, и собственных частот [8]. Такие микродвижения совершаются любым телом, имеющим ненулевую температуру.

Для расчета тепловых флуктуаций используют флуктуационно-диссипативную теорему (ФДТ), которая связывает спектр теплового шума и диссипативные характеристики системы. С помощью ФДТ можно оценить величину чрезвычайно слабых тепловых шумов, исследуя более доступные для измерений эффекты рассеяния энергии в системе. Согласно ФДТ, спектральная плотность мощности тепловых шумов механической системы пропорциональна мнимой части функции отклика резонансных колебаний на механическое возмущение данной частоты. Традиционно, для вычисления функции отклика использовался метод разложения движения по собственным модам, однако этот способ громоздок, т. к. требует полного расчёта резонансов системы с учётом влияния их на длину резонатора. Более простой способ был предложен в работе [9], где спектр теплового шума и рассеиваемая системой мощность рассчитывались при воздействии периодической силы, приложенной к поверхности резонатора в тех местах, которые прямо задают его длину, т. е. в области отражения лазерного излучения. При этом спектр теплового шума и общее затухание механических колебаний могут быть представлены в виде суммы вкладов от отдельных элементов резонатора в соответствии с долями энергетического заполнения и параметрами затухания [8, 10]. Этот метод даёт феноменологические оценочные формулы, позволяющие вычислить вклады в спектр частот  $f$  теплового шума резонатора Фабри–Перо, используя величины, характеризующие его форму и размеры, а также константы упругости и коэффициенты потерь ма-

териалов, из которых изготовлен резонатор. Так, вклад тела резонатора в спектральную плотность мощности тепловых колебаний

$$S_{sp}(f) = \frac{2k_B T}{\pi f} \frac{L}{3\pi R^2 E_{sp}} \varphi_{sp}, \quad (1)$$

где  $T$  – температура тела резонатора;  $L$  – длина резонатора;  $R$  – радиус тела резонатора;  $E_{sp}$  и  $\varphi_{sp}$  – модуль Юнга и коэффициент механических потерь материала тела резонатора соответственно. Вклад теплового шума подложек зеркал

$$S_{sub}(f) = \frac{2k_B T}{\pi f} \frac{1 - \sigma^2}{\sqrt{\pi} w_0 E_{sub}} \varphi_{sub}, \quad (2)$$

где  $w_0$  – радиус моды резонатора на зеркале;  $E_{sub}$ ,  $\sigma$  и  $\varphi_{sub}$  – соответственно модуль Юнга, коэффициенты Пуассона и механических потерь материала подложки зеркала. Для вклада покрытий зеркал в спектр теплового шума имеем выражение

$$S_{coat}(f) = \frac{4k_B T}{\pi^2 f} \frac{d}{E_{coat} w_0^2} (1 + \sigma)(1 - 2\sigma) \varphi_{coat}, \quad (3)$$

где  $d$  – толщина отражающего покрытия;  $E_{coat}$  и  $\varphi_{coat}$  – модуль Юнга и коэффициент механических потерь в покрытиях зеркал.

По формулам (1)–(3) оценивается низкочастотное крыло спектра тепловых шумов. Действительно, самый низкочастотный резонанс механических колебаний интерферометра представляет собой основное колебание тела резонатора Фабри–Перо с частотой  $\nu \sim 10$  кГц, а при временах усреднения 1–1000 с актуальна только спектральная плотность шумов в субгерцовой области частот. Хотя используемые формулы и не являются точными, они вполне могут описывать с точностью лучше 10% экспериментальные достижения последних лет в области применения резонаторов для стабилизации частоты излучения лазеров.

Формулы (1)–(3) содержат обобщённый феноменологический параметр – коэффициент механических потерь  $\varphi$ , равный обратной добротности механических колебаний элементов интерферометра  $Q = 1/\varphi$ . Подразумевается, что  $Q$  не зависит от частоты колебаний (по крайней мере, в области низких частот), и это связано с характером доминирующего механизма затухания механических колебаний в материале элементов конструкции – с так называемым структурным затуханием. Отдельный интерес представляет задача измерения параметра  $Q$  для разных материалов, особенно если он достигает больших значений (свыше  $10^4$ ). Подобные эксперименты требуют высокой точности и мастерства [11].

Выбор материала резонатора решающим образом влияет на его потенциальный уровень стабильности. На амплитуду тепловых шумов влияют, в первую очередь, добротность и температура, значение которой определяется положением нулевой точки.

В настоящее время распространённым материалом для высокодобротных резонаторов, применяемых в системах стабилизации частоты излучения лазеров, является стекло ULE [12]. Несколько систем на основе резонаторов из стекла ULE были созданы и используются нашей группой в ФИАНе [13, 14]. Нулевая точка коэффициента

теплого расширения стекол ULE обычно находится в области комнатных температур, что делает удобным их применение. Однако в стекле постоянно протекает процесс рекристаллизации, который приводит к линейному дрейфу частоты собственных мод резонатора на уровне сотен миллигерц в секунду. Тем не менее увеличение линейных размеров резонатора позволило добиться относительной нестабильности частоты излучения лазера  $8 \times 10^{-17}$  при временах усреднения до 1000 с [6].

Одним из перспективных материалов для изготовления резонаторов является монокристаллический кремний [5]. Этот материал не подвержен рекристаллизации, имеет превосходные характеристики упругих свойств, а также нулевую точку при температуре  $T_0 = 124$  К и добротность  $\sim 10^8$ , что как минимум на порядок выше, чем у всех известных альтернативных материалов.

В табл.1 представлены результаты расчёта, проведённого для пяти реализаций резонаторов с помощью формул (1)–(3). Были выполнены численные оценки для различных сочетаний материалов тела резонатора, подложки зеркал и их отражающего покрытия (параметры материалов указаны в табл.2). Геометрические параметры резонаторов одинаковы и соответствуют использованным нами в системах первого поколения [4, 13]. Характерно, что отражающее покрытие вносит большой вклад в амплитуду тепловых шумов. Для грубых оценок соотношения вкладов элементов резонатора в полный шум, можно воспользоваться пропорцией

$$S_{sp}:S_{sub}:S_{coat} \propto \left(\frac{L}{R^2} \frac{\varphi_{sp}}{E_{sp}}\right) \cdot \left(\frac{1}{W_0} \frac{\varphi_{sub}}{E_{sub}}\right) \cdot \left(\frac{d}{W_0^2} \frac{\varphi_{coat}}{E_{coat}}\right). \quad (4)$$

Табл.1. Расчетный предел относительной нестабильности частоты для резонаторов из разных материалов (размеры резонаторов соответствуют описанным в [4]).

Материал корпуса/подложки	Покрытие	Вклад шума подложки (%)	Вклад шума покрытия (%)	Нестабильность частоты за 1 с ( $10^{-16}$ )
ULE/ULE	SiO <sub>2</sub> /Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	89	11	2.879
ULE/SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub> /Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	25	75	1.539
Si/Si	SiO <sub>2</sub> /Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2	98	0.200
Si/Si	GaAs/AlGaAs	9	91	0.084
GaAs/GaAs	GaAs/AlGaAs	34	66	0.133

Последнее время внимание исследователей привлекла возможность создания высокоотражающих покрытий на основе многослойных кристаллических структур. Так, для кристаллических покрытий на основе GaAs/AlGaAs, перенесённых на подложки из плавного кварца, был продемонстрирован достаточно низкий уровень тепловых шумов [15]. В наших расчётах рекордно низкую не-

Табл.2. Параметры материалов.

Материал	$E$ (Па)	$T_0$ (К)	$\sigma$	$\varphi$
ULE	$6.8 \times 10^{10}$	300	0.18	$1.6 \times 10^{-5}$
Si	$18.8 \times 10^{10}$	124	0.266	$10^{-8}$
GaAs	$8.6 \times 10^{10}$	56	0.31	$10^{-7}$
SiO <sub>2</sub> /Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	–	–	–	$4 \times 10^{-4}$
GaAs/AlGaAs	–	–	–	$2.5 \times 10^{-5}$

стабильность частоты, вызванную тепловыми шумами, имел резонатор с телом и подложками зеркал из монокристаллического кремния и с кристаллическим (GaAs/AlGaAs) высокоотражающим покрытием зеркал.

Также был рассмотрен образец, материалом тела и подложек зеркал которого являлся монокристаллический GaAs. Использование этого материала могло бы значительно упростить технологию изготовления зеркал с покрытиями на основе GaAs/AlGaAs. Кроме того, температура нулевой точки у GaAs меньше, чем у кристаллического кремния и находится в окрестности 56 К. К сожалению, в литературе отсутствуют достоверные результаты измерений добротности данного материала, поэтому необходимо проведение дополнительных экспериментов, чтобы сделать обоснованные выводы о его перспективности.

### 3. Разработка ультрастабильного лазера на основе кремниевого резонатора Фабри–Перо

Нашей группой в ФИАНе начаты работы по созданию системы стабилизации частоты узкополосного эрбиевого волоконного лазера с длиной волны излучения

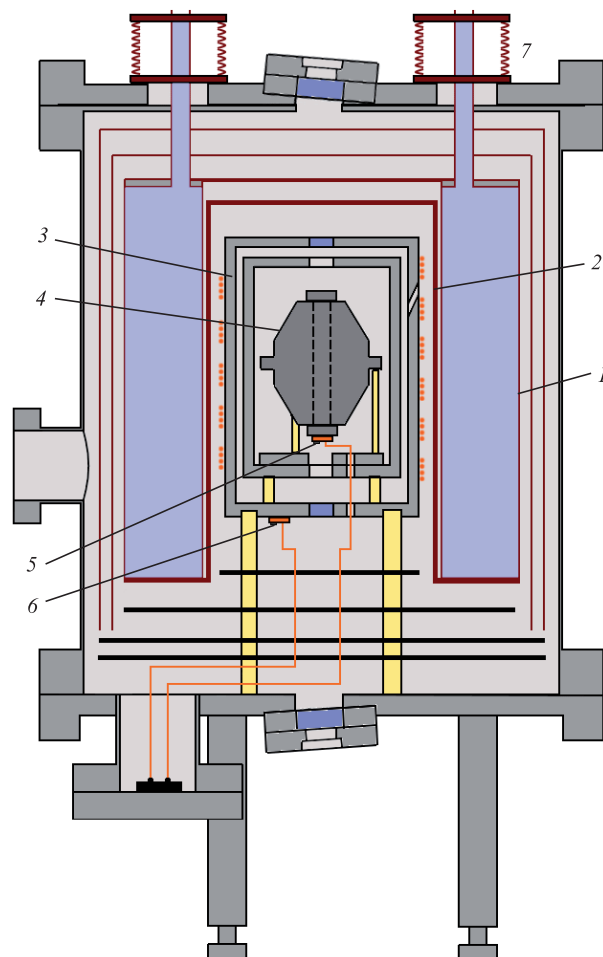


Рис.2. Сечение вакуумного криостата:

1 – ёмкость с жидким азотом; 2 – внутренняя поверхность ёмкости, подвергавшаяся чернению; 3 – тепловой экран с нагревателем; 4 – кремниевый резонатор (или, в ходе тестовых испытаний, его модель); 5, 6 – температурные датчики на модели резонатора и на тепловом экране 3 соответственно; ёмкость с азотом имеет отдельную точку опоры и соединена с вакуумной камерой только с помощью мягких сильфонов 7.

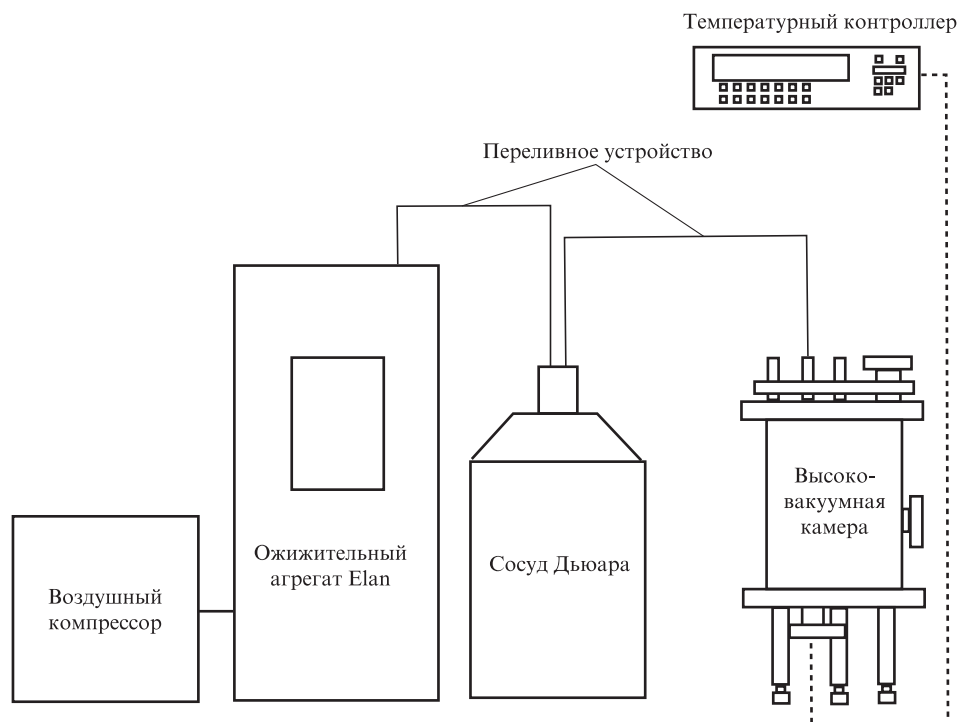


Рис.3. Схема криосистемы непрерывного охлаждения.

1.5 мкм с помощью высокостабильного резонатора из монокристаллического кремния с диэлектрическими отражающими зеркалами. Сейчас эксперимент находится в фазе наладки оборудования. Для охлаждения кремниевого образца до 124 К используется разработанный в ФИАНе азотный вакуумный криостат (рис.2). Общая схема криосистемы представлена на рис.3. Одна из её осо-

бенностей – наличие генератора Elan 2, способного полностью обеспечивать систему жидким азотом в рабочем режиме. Стабилизация температуры обеспечивается нагревателем, контролирующим температуру одного из внешних экранов. Дополнительный внутренний экран и глубокий вакуум (на уровне  $5 \times 10^{-9}$  мбар) обеспечивают фильтрацию высокочастотных флуктуаций температуры, так что постоянная времени системы составляла около 10 ч. Система также предусматривает возможность вибрационной развязки части криостата, на которой закреплён интерферометр, и азотного экрана, потенциально являющегося источником вибраций за счет кипения жидкого азота.

В ходе первых тестовых экспериментов было выяснено, что резонатор не может быть охлажден до температуры нулевой точки кремния  $T_0 = 124$  К (рис.4,а). При высоком вакууме теплообмен между азотным экраном и экраном с нагревателем осуществляется тепловым излучением, однако его мощность оказалась ниже мощности подвода тепла по ножкам, на которых установлены внутренние части криостата. Для увеличения теплообмена с внутренним экраном за счёт уменьшения альбедо ёмкости с азотом её никелированная поверхность подвергалась чернению. Чернение осуществлялось нанесением на поверхность криогенного лака VGE-7031. После данной процедуры удалось достичь требуемой температуры (рис.4,б).

Ввиду большой постоянной времени системы (более 9 ч) установление заданной температуры происходит в течение длительного времени, которое может составлять вплоть до нескольких дней. На рис.4,б приведены временные зависимости температур внешнего экрана с нагревателем и модельного резонатора из дюралюминия (рис.1). Флуктуации температуры тела резонатора составляют менее 0.01 К на суточном интервале, что достаточно для достижения требуемой стабильности частоты излучения разрабатываемой лазерной системы.

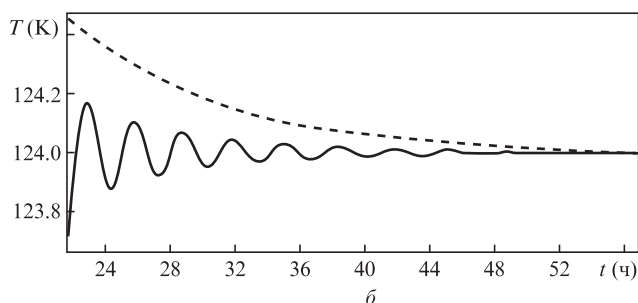
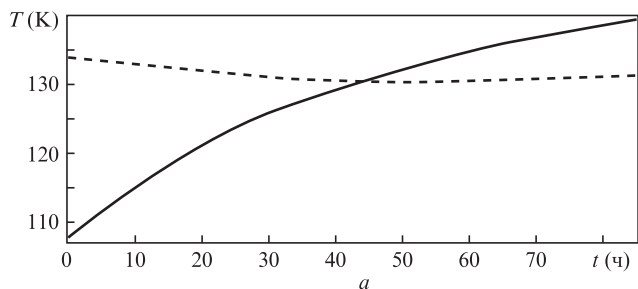


Рис.4. Временные зависимости температур экрана с нагревателем (сплошные кривые) и модели резонатора (штриховые кривые) при использовании азотной ёмкости с никелированной (а) и чернённой (б) поверхностями. Для достижения начальной температуры ниже 120 К в камеру напускался газ при давлении  $10^{-2}$  мбар, что обеспечивало быстрый теплообмен с азотным резервуаром, после этого газ откачивался и начинались измерения динамики температуры.

## 4. Заключение

Представлен краткий обзор работ по актуальному направлению лазерной физики – разработке и созданию ультрастабильных лазерных систем, широко используемых в прецизионных измерениях. Наибольшее внимание уделено проблеме тепловых шумов как фундаментальному фактору, ограничивающему стабильность частоты излучения этих систем. Выполнены расчёты, показывающие, что относительная нестабильность частоты излучения порядка  $10^{-17}$  может быть достигнута с использованием компактных монокристаллических кремниевых резонаторов с кристаллическими зеркалами на основе многослойных структур AlGaAs/GaAs. Рассмотрен новый, ранее не использовавшийся при создании резонаторов материал – кристалл GaAs. Отмечена необходимость измерения механических потерь в кристалле, которые существенным образом зависят от наличия примесей и дислокаций. При достижении механической добротности на уровне  $10^7$  резонаторы из GaAs могут конкурировать с кремниевыми образцами.

Описана конструкция вакуумной камеры криогенного кремниевого резонатора и приведены результаты экспериментов по охлаждению и стабилизации температуры модели резонатора, изготовленного из дюралюминия. Показано, что резонатор охлаждается до температуры, соответствующей нулевой температурной точке кремния (124 К); остаточные флуктуации температуры составляют менее 0.01 К на суточном интервале. Достигнутые характеристики обеспечивают требуемые показатели стабильности частоты лазерной системы с  $\lambda = 1.5$  мкм, которая

будет стабилизирована по частоте пика пропускания резонатора. Мы надеемся на достижение относительной нестабильности частоты излучения лучше, чем  $10^{-16}$ , при времени усреднения 1–100 с.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №16-29-11723 и 15-02-03936).

1. Bloom B.J. et al. *Nature*, **506**, 71 (2014).
2. Chou C.W., Hume D.B., Koelemeij J.C.J., Wineland D.J., Rosenband T. *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 070802 (2010).
3. Риле Ф. *Стандарты частоты. Принципы и приложения* (М.: Физматлит, 2009).
4. Alnis J., Matveev A., Kolachevsky N., Udem T., Hänsch T.W. *Phys. Rev. A*, **77**, 053809 (2008).
5. Kessler T., Hagemann C., Grebing C., Legero T., Sterr U., Riehle F., Martin M.J., Chen L., Ye J. *Nat. Photonics*, **6**, 687 (2012).
6. Häfner S., Falke S., Grebing C., Vogt S., Legero T., Merimaa M., Lisdat C., Sterr U. *Opt. Lett.*, **40**, 2112 (2015).
7. Matei D.G. et al. arXiv:1702.04669 (2017).
8. Braginsky V.B., Gorodetsky M.L., Vyatchanin S.P. *Phys. Lett. A*, **264**, 1 (1999).
9. Levin Yu. *Phys. Rev. D: Part. Fields*, **57**, 659 (1998).
10. Numata K., Kemery A., Camp J. *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 250602 (2004).
11. Nawrodt R., Zimmer A., Nietzsche S., Thurk M., Vodel W., Seidel P. *Cryogenics*, **46** (10), 718 (2006).
12. <http://www.corning.com/media/worldwide/csm/documents/D20FD2EA-7264-43DD-B544-E1CA042B486A.pdf>.
13. Хабарова К.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **42**, 1021 (2012) [*Quantum Electron.*, **42**, 1021 (2012)].
14. Вишнякова Г.А. и др. *УФН*, **186**, 176 (2016) [*Phys. Usp.*, **59**, 168 (2016)].
15. Cole G.D., Zhang W., Martin M.J., Ye J., Aspelmeyer M. *Nat. Photonics*, **7**, 644 (2013).