

ДЛИННЫЕ РЕЗОНАТОРЫ ULE С ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СКОРОСТЬЮ ДРЕЙФА ЧАСТОТЫ МЕНЕЕ $5 \cdot 10^{-16}/\text{с}$ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Н. О. Жаднов¹, К. С. Кудеяров¹, Д. С. Крючков¹, Г. А. Вишнякова¹,
К. Ю. Хабарова^{1,2}, Н. Н. Колачевский^{1,2}

Созданы две ультрастабильные лазерные системы, предназначенные для спектроскопии “часового” перехода в стронциевом стандарте частоты. Высокая стабильность частоты лазерного излучения обеспечивается активной петлёй привязки частоты к моде опорного резонатора Фабри–Перо. Использованные резонаторы изготовлены из стекла со сверхнизким коэффициентом теплового расширения и имеют длину 48 см, что обеспечивает чрезвычайно низкий предел теплового шума $7 \cdot 10^{-17}$. Относительная скорость дрейфа частот лазерных систем, составляет 216 мГц/с, что позволяет реализовать высокоточную спектроскопию часового перехода в стронции.

Ключевые слова: ультрастабильные резонаторы, тепловой шум, температура нулевого теплового расширения, дрейф частоты резонатора.

Лазеры с узкой спектральной линией излучения и высокой стабильностью частоты находят широкое применение в прецизионной спектроскопии [1], задачах лазерного охлаждения [2], передаче точных сигналов частоты и времени [3], спектроскопии астрофизических объектов [4], космических миссиях по измерению геопотенциала Земли [5], генерации микроволновых сигналов с низким шумом [6]. Кроме того, они являются неотъемлемой частью современных стандартов частоты на нейтральных атомах и

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: nik.zhadnov@yandex.ru.

² Российский Квантовый Центр, Территория Инновационного Центра “Сколково”, 121205 Россия, Москва, Большой бульвар, д. 30, стр. 1.

одинокими ионами [7, 8] – важнейшего инструмента для систем глобальной навигации, астрономии и тестов фундаментальных теорий [9, 10].

Для сужения линии лазерного излучения как правило используется высокостабильный эталон частоты, с помощью которого можно точно отслеживать флуктуации частоты лазерного источника. При этом флуктуации частоты излучения лазера компенсируются петлей обратной связи. Моде TEM₀₀ высокодобротного резонатора Фабри–Перо, состоящего из пары зеркал и тела, фиксирующего расстояние между ними, является одним из лучших эталонов частоты на коротких (до нескольких десятков секунд) интервалах времени. Обеспечить привязку частоты лазерного излучения к собственной моде оптического резонатора позволяет, например, модуляционный метод Паунда–Драйвера–Холла (ПДХ) [11]. При этом стабильность частоты лазерного излучения в значительной степени определяется механической и температурной стабильностью опорного резонатора [12].

В данной работе представлены созданные в ФИАНе ультрастабильные лазерные системы с длинными резонаторами для опроса “часового” перехода в атомах стронция на длине волны 698 нм. Они необходимы для достижения относительной погрешности 10^{-17} в следующем поколении оптических стандартов частоты на атомах стронция, создаваемых в Национальном метрологическом институте ВНИИФТРИ в рамках реализации ФЦП [13]. Стабильность частоты стандарта в том числе ограничена шумами лазерной системы, используемой для опроса часового перехода, как на малых, так и на больших временах усреднения [14]. В настоящей статье описываются две различные созданные нашей группой лазерные системы, стабилизированные по длинным (48 см) резонаторам из стекла ULE (UltraLowExpansionGlass), имеющего нулевую точку коэффициента теплового расширения в области комнатных температур.

Достижимая стабильность частоты мод опорного резонатора Фабри–Перо определяется так называемым “пределом тепловых шумов”, связанным, в первую очередь, с броуновским движением частиц поверхности зеркал, приводящим к фликкер-шуму длины резонатора [15]. Уменьшение предела тепловых шумов резонатора открывает возможность создания все более стабильных лазерных систем и является актуальной задачей на пути разработки пассивных стандартов частоты. Одним из возможных путей решения данной проблемы является использование кристаллических материалов с высокими значениями механической добротности и, следовательно, малым уровнем тепловых шумов. Рекордное на сегодняшний день значение относительной нестабильности частоты лазерного излучения $\frac{\delta f}{f} = 3 \cdot 10^{-17}$ было достигнуто при использовании

оптического резонатора длиной 21 см при криогенных температурах, тело и подложки зеркал которого вырезаны из единого монокристалла кремния [16]. В этой работе предел тепловых шумов на 99% определялся диэлектрическими отражающими поверхностями зеркал, представляющими собой чередующиеся слои $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$. Альтернативой этим традиционным многослойным отражающим покрытиям являются кристаллические зеркала из $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.92}\text{Ga}_{0.08}\text{As}$, расчетные характеристики которых с точки зрения тепловых шумов значительно превосходят диэлектрические [17]. На настоящий момент нет опубликованных результатов исследований, где в качестве опорного используется резонатор, изготовленный полностью из кристаллических материалов. Работы в данном направлении ведутся в ФИАН [18].

Использование кристаллических кремниевых резонаторов, обладающих рядом несомненных преимуществ, тем не менее, имеет ряд ограничений. Во-первых, кремний не прозрачен для длин волн короче 1200 нм, из-за чего кремниевые резонаторы не могут быть напрямую использованы для стабилизации частоты лазеров, использующихся для спектроскопии сильно запрещенных переходов в нейтральных атомах (Sr ($\lambda_{\text{ч}} = 698$ нм), Tm ($\lambda_{\text{ч}} = 1140$ нм), Yb ($\lambda_{\text{ч}} = 578$ нм)) и ионах, длины волн переходов в которых зачастую лежат в ультрафиолетовой области. Во-вторых, температуры нулевого теплового расширения (T_0) кристаллического кремния составляют 124 К и 17 К, что создаёт необходимость охлаждения резонатора в высоковакуумном криостате и заметно усложняет систему.

При использовании более традиционного материала для создания резонаторов – стекла ULE – также возможно создавать резонаторы с чрезвычайно низкими значениями предела тепловых шумов ($\sigma_{\text{тш}} < 10^{-16}$), но для этого необходимо увеличивать их длину. Резонаторы большей длины менее чувствительны к тепловым шумам по двум причинам. Во-первых, при увеличении расстояния между зеркалами абсолютная нестабильность длины резонатора (δL) из-за теплового “дрожания” поверхности зеркал вносит меньший вклад в относительную нестабильность частоты $\left(\frac{\delta f}{f} = -\frac{\delta L}{L}\right)$. Во-вторых, в более длинных резонаторах гауссова TEM_{00} мода имеет большие поперечные размеры на зеркалах, что приводит к эффективному усреднению тепловых колебаний (например, в резонаторах с одним вогнутым зеркалом радиусом кривизны 1 м и длинами 8 см и 48 см радиусы пучков TEM_{00} мод для длины волны 698 нм на плоских зеркалах составят 245 мкм и 333 мкм, соответственно). Благодаря этим факторам предел теплового шума, выраженный в единицах относительной нестабильности частоты резонатора,

уменьшается с увеличением длины как $\sigma_{\text{тш}} \sim \frac{1}{L^{5/4}}$ [16]. Переход к резонаторам длиной около 0.5 м позволил достичь относительной нестабильности частоты $8 \cdot 10^{-17}$ [19].

В ФИАН созданы две лазерные системы с длиной волны излучения 698 нм, соответствующей переходу $1S_0-^3P_0$ в атомах стронция, стабилизированных по модам опорных резонаторов Фабри–Перо из стекла ULE длиной 48 см каждый. Предел теплового шума для данных резонаторов составляет $7 \cdot 10^{-17}$ [18]. Основное различие этих систем состоит в расположении резонатора – в одном случае оптическая ось ориентирована вертикально, в другом – горизонтально (см. рис. 1). Геометрия тел резонаторов и особенности систем подвеса описаны в [18]. Оба резонатора размещены внутри высоковакуумных камер, остаточное давление в которых составляет $5 \cdot 10^{-8}$ мБар и в обоих случаях поддерживается ионно-геттерными насосами.

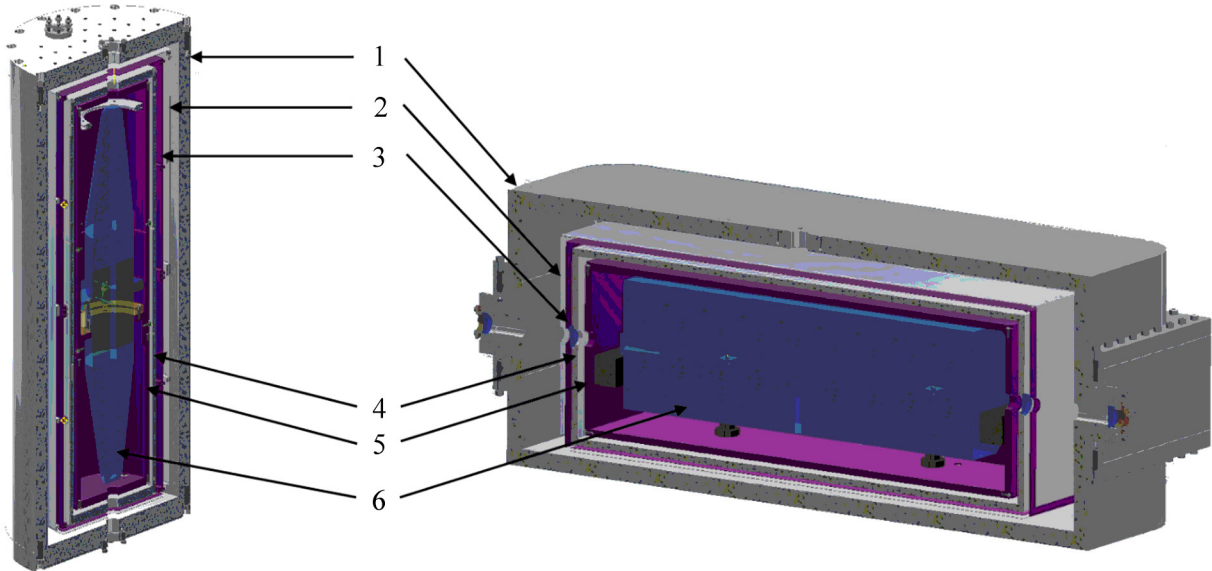


Рис. 1: Модели вакуумных камер вертикального (слева) и горизонтального (справа) резонаторов. 1 – внешняя стенка вакуумной камеры; 2, 3 – внешние тонкие тепловые экраны, 4 – тепловой экран с нагревателем и элементом Пельтье, 5 – внутренний тепловой экран, 6 – резонатор Фабри–Перо.

Тела резонаторов изготовлены из ULE-стекла класса Lasergrade, для которого температура нулевой точки T_0 должна быть заведомо выше комнатной. Зеркала представляют собой многослойные структуры $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ на подложке из кварца и закреплены на теле резонатора при помощи оптического контакта. Кварц имеет высокую механи-

ческую добротность и малый уровень тепловых шумов, его использование в качестве материала подложек вместо стекла ULE позволяет понизить предел теплового шума резонатора более чем в два раза.

Частота излучения полупроводниковых ECDL лазеров (TopticaDLpro) стабилизировалась по моде резонаторов TEM₀₀ методом Паунда–Драйвера–Холла. Схема стабилизации аналогична описанной в [2].

Одной из важных характеристик ультрастабильных лазерных систем является скорость линейного дрейфа частоты моды опорного резонатора. Необходимо, чтобы дрейфы частоты лазеров, используемых в стандартах частоты, были как можно более медленными и постоянными, поскольку ими определяется стабильность опроса часового перехода. Исследование относительного дрейфа частот созданных лазерных систем проводилось методом сличения. Для этого лазерные пучки двух лазерных систем были пространственно совмещены. Полученный сигнал биений регистрировался фотодиодом с малым временем отклика. Выходной сигнал фотодиода направлялся на счётчик частоты.

Для достижения минимальных дрейфов необходимо стабилизировать температуру опорного резонатора в точке нулевого теплового расширения. Поскольку изначально точное значение T_0 неизвестно, требуется провести ее поиск. На первом этапе температура каждого резонатора была стабилизирована в значении 21.0 °С при помощи нагревательного провода, установленного на внутренний тепловой экран (обозначен 4 на рис. 1). Затем температура вертикального резонатора была перестроена в точку 24.12 °С. В результате перестройки температуры было выяснено, что частота биений $f_b = f_v - f_h$ между двумя лазерами уменьшилась на 7.43 МГц, из чего следует, что вертикальный резонатор с увеличением температуры увеличивался в длине, а значит имел положительный коэффициент теплового расширения. По положению этих двух точек и известной зависимости коэффициента теплового расширения (КТР) ULE стекла ($\eta_{ULE} = 10^{-9} \cdot (T - T_0)$, [20]) возможно оценить температуру нулевого теплового расширения, которая составляет ориентировочно 19.7 °С. Полученное значение лежит значительно ниже заявленной температуры нулевого расширения стекла ULE, из которого изготовлено тело резонатора. Причина этого заключается в различии коэффициентов теплового расширения стекла ULE и кварца, из которого изготовлены подложки зеркал, которое создаёт температурно-зависимую деформацию зеркала резонатора [21]. В результате значение T_0 для сборки резонатора смещается в область < 20 °С. Для того, чтобы доказать наличие точки нулевого теплового расширения в области температур

ниже комнатной, не открывая вакуумную камеру, была реализована система водяного охлаждения: внешняя стенка вакуумной камеры вертикального резонатора была обернута шлангом, по которому текла вода температурой $\sim 12^\circ\text{C}$ из системы водоснабжения. За трое суток внутреннюю часть вакуумной камеры удалось охладить до температуры 15°C . В ходе охлаждения непрерывно фиксировалась частота сигнала биений и было обнаружено, что частота моды вертикального резонатора сначала растёт, а затем начинает уменьшаться. Такое поведение характерно для перехода температуры через точку нулевого теплового расширения: из области с положительным КТР в область с отрицательным. Для обеспечения возможности стабилизации температуры при значениях ниже комнатной, внутрь каждой вакуумной камеры были установлены два элемента Пельтье, соединенные с одним из внутренних тепловых экранов медной шиной. Проблема смещения нулевой точки сборки резонатора из материалов с разными зависимостями коэффициента теплового расширения в область низких, даже отрицательных по шкале Цельсия температур, может быть решена с использованием компенсационных колец из ULE-стекла [21]. В описываемых системах их применение оказалось затруднительно из-за конструктивных особенностей вакуумных камер.

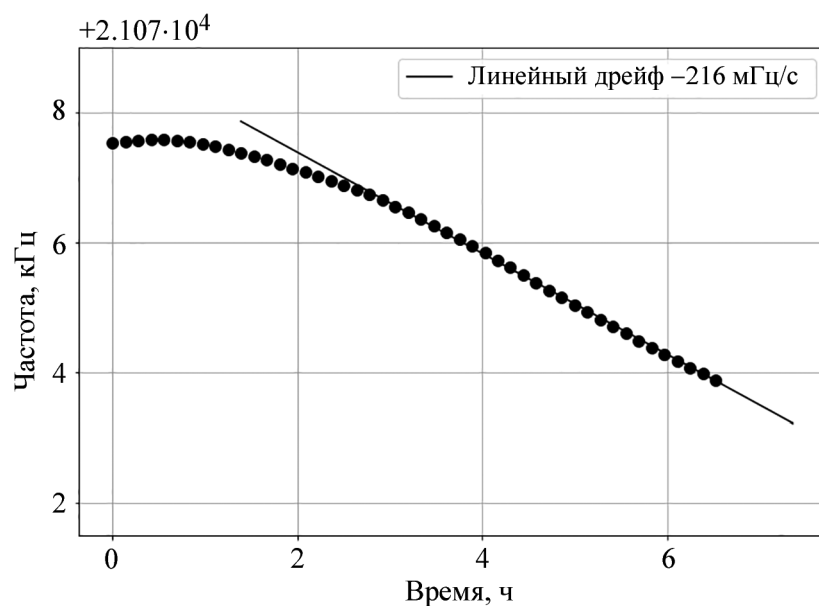


Рис. 2: Дрейф частоты сигнала биений лазерных систем после стабилизации температуры в точках нулевого теплового расширения T_0 . Аппроксимация линейной функцией произведена для части графика, соответствующей стабильным температурам резонаторов (для времён > 3 часов).

Описанным выше методом в несколько итераций были определены точки T_0 для обоих резонаторов. Температуры вертикального и горизонтального резонаторов были стабилизированы соответственно в значениях 17.20 °С и 15.10 °С. В силу того, что резонаторы имеют большую теплоёмкость, установление температуры происходит с постоянной времени 12 часов на горизонтальной системе и 8 часов на вертикальной. После того как температура установилась с точностью не хуже 0.01 °С (предельная точность показаний датчиков температуры), были произведены измерения относительного дрейфа частоты двух лазерных систем. Скорость относительного дрейфа после установления температуры составила 216 мГц/с, что соответствует относительной скорости дрейфа частоты менее $5 \cdot 10^{-16}$ /с.

Использованным в работе методом можно исследовать только относительный дрейф частот мод резонаторов, что не дает возможности получить точное представление о скорости дрейфа частоты каждой системы. Характерный и довольно медленный дрейф 216 мГц/с может в некоторых случаях означать и то, что обе системы дрейфуют с большими, но близкими скоростями. Нестабильности, связанные с процессами в петле привязки частоты или в системе сличения лазерных частот, не могут вызвать настолько длительный уход частоты в одну сторону, поэтому причины дрейфа связаны с уходом частоты резонатора. Абсолютный дрейф частоты резонатора обычно связан с процессом дегазации ULE-стекла. Резонатор длиной 48 см, изготовленный из нового стекла, в условиях вакуума сжимается со скоростью ~ 7 пм/час, что соответствует скорости дрейфа частоты 2 Гц/с. В результате старения резонатора дрейф, вызванный дегазацией стекла, замедляется [22].

Измеренный в ходе исследований относительный дрейф частот двух лазерных систем обладает практически линейной зависимостью от времени с наклоном 216 мГц/с. Полученные данные свидетельствуют о стабильности температур резонаторов и целостности оптических контактов. Порядок величины дрейфа соответствует лучшим системам, реализованным в мире, и позволяет реализовывать высокоточную спектроскопию часового перехода в стронции. Абсолютные значения дрейфа частоты будут измерены с помощью спектроскопии перехода $^1S_0-^3P_0$ в атомах стронция. По полученным данным будет произведена компенсация линейного абсолютного дрейфа частоты.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ гранта 19-32-90207).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] C. G. Parthey, A. Matveev, J. Alnis, et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 233001 (2010), doi.org/10.1103/PhysRevLett.70.2261.

- [2] К. Ю. Хабарова, С. Н. Слюсарев, С. А. Стрелкин и др., *Квантовая электроника* **42**(11), 1021 (2012), doi.org/10.1070/QE2012v042n11ABEH014989
- [3] O. Lopez, A. Kanj, Paul-Eric Pottie, et al., “Simultaneous remote transfer of accurate timing and optical frequency over a public fiber network”, 2013 Jt. Eur. Freq. Time Forum Int. Freq. Control Symp. EFTF/IFC 2013, pp. 474–476, (2013), doi: 10.1109/EFTF-IFC.2013.6702214.
- [4] Andrew J. Metcalf, Tyler Anderson, Chad F. Bender, et al., *Optica* **6**, 233 (2019), doi: 10.1364/OPTICA.6.000233.
- [5] R. Thompson, W. M. Folkner, G. deVine, et al., “A flight-like optical reference cavity for GRACE follow-on laser frequency stabilization”, 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Proceedings, San Francisco, CA, USA, 2011, pp. 1-3, doi: 10.1109/FCS.2011.5977873.
- [6] A. Bartels, S. A. Diddams, C. W. Oates, et al., *Opt. Lett.* **30**, 667 (2005), doi.org/10.1364/OL.30.000667.
- [7] E. Oelker, R. B. Hutson, C. J. Kennedy, et al., *Nat. Photonics* **13**, 714 (2019), doi.org/10.1038/s41566-019-0493-4.
- [8] S. M. Brewer, J.-S. Chen, A. M. Hankin, et al., *Phys. Rev. Lett.* **123**, 033201 (2019), doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.033201.
- [9] W. Lewandowski, E. F. Arias, *Metrologia* **48**, 219 (2011), doi.org/10.1088/0026-1394/48/4/e01.
- [10] P. Delva, J. Lodewyck, S. Bilicki, et al., *Phys. Rev. Lett.* **118**, 221102 (2017), doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.221102.
- [11] R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski, et al., *Applied Physics B* **31**(2), 97 (1983), doi.org/10.1007/BF00702605.
- [12] R. W. Fox, C. W. Oates, L. W. Hollberg, *Experimental Methods in the Physical Sciences* **40**, 1 (2003), doi.org/10.1016/S1079-4042(03)80017-6.
- [13] Д. В. Сутырин, О. И. Бердасов, С. Ю. Антропов и др., *Квантовая электроника* **49**(2), 199 (2019), doi.org/10.1070/QEL16885.
- [14] C. Audoin, G. Santarelli, A. Makdissi, and A. Clairon, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* **45**(4), 877 (1998), doi: 10.1109/58.710546.
- [15] T. Kessler, T. Legero, and U. Sterr, *J. Opt. Soc. Am. B* **29**, 178 (2012), doi.org/10.1364/JOSAB.29.000178.

- [16] D. G. Matei, T. Legero, S. Häfner, et al., Phys. Rev. Lett. **118**(26), 1 (2017), doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.263202.
- [17] Garrett D. Cole, Wei Zhang, Michael J. Martin, et al., Nature Photonics **7**, 644 (2013), doi.org/10.1038/nphoton.2013.174.
- [18] Н. О. Жаднов, К. С. Кудеяров, Д. С. Крючков и др., Квантовая электроника **48**(5), 425 (2018), doi.org/10.1070/QEL16654.
- [19] S. Häfner, S. Falke, C. Grebing, et al., Optics Letters **40**(9), 2112 (2015), doi.org/10.1364/OL.40.002112.
- [20] <https://www.corning.com/ru/ru/products/advanced-optics/product-materials/semiconductor-laser-optic-components/ultra-low-expansion-glass.html>
- [21] T. Legero, T. Kessler, and U. Sterr, J. Opt. Soc. Am. B **27**, 914 (2010), doi.org/10.1364/JOSAB.27.000914.
- [22] A. Golovizin, V. Bushmakin, S. Fedorov, et al., J. Russ. Laser Res. **40**, 540 (2019), doi.org/10.1007/s10946-019-09835-y.

Поступила в редакцию 30 июня 2020 г.

После доработки 30 июня 2020 г.

Принята к публикации 15 июля 2020 г.