

МИНИАТЮРНЫЕ ВЫСОКОДОБРОТНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ ULE ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Д. С. Крючков¹, К. С. Кудеяров¹, Г. А. Вишнякова¹, Н. О. Жаднов¹,
К. Ю. Хабарова¹, Н. Н. Колачевский^{1,2}

Лазерные системы, стабилизированные по опорным резонаторам, имеют множество применений в науке и современных технологиях. В данной работе исследуется малогабаритный высокодобротный резонатор из ULE-стекла (Ultra Low Expansion) в компактной вакуумной камере. Излучение, стабилизированное по резонатору, имеет ширину спектра 50 Гц при времени усреднения 50 мс и относительную нестабильность $1.3 \cdot 10^{-13}$ на времени усреднения 15 мс. Резонаторы могут быть использованы для создания компактных лазерных систем для передачи высокостабильных сигналов по оптическим линиям связи, дальнометрии и других приложений.

Ключевые слова: ультрастабильные оптические резонаторы, высокоотражающие зеркала, метод Паунда–Дривера–Холла, ширина линии излучения лазера, девиация Аллана.

Введение. Создание оптических стандартов частоты с неточностью и нестабильностью на уровне 10^{-16} сегодня носит скорее технический, нежели исследовательский характер: существуют коммерчески доступные наборы компонентов для создания оптических реперов частоты [1] и готовые решения для программно-аппаратных комплексов управления ими. Чтобы полностью охарактеризовать стандарт частоты, необходимо сравнить его с другими, обладающими стабильностью и точностью того же уровня или лучше [2], что требует передачи высокостабильного сигнала с сохранением его характеристик. Однако при приближении значений точности и стабильности передаваемо-

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: kost1994@yandex.ru.

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

го сигнала к 16-му знаку после запятой, шумовой вклад со стороны существующих радиочастотных методов передачи сигналов частоты становится доминирующим и не позволяет передать исходную стабильность сигнала оптического репера [3]. Решить эту проблему позволяет передача с использованием фазы оптической несущей [4]. Данный метод передачи сигналов частоты находит широкое применение в формировании национальных и международных шкал времени [5], геодезии [6], астрономии [7], телекоммуникациях [8]. В этих задачах лазерные системы выступают в роли высокостабильного локального осциллятора, работающего на оптической частоте (подобно кварцевому осциллятору в радиочастотных источниках). Использование таких лазеров вместе с системой активной компенсации фазовых шумов линии позволяет осуществлять когерентную передачу сигнала на большие расстояния [9, 10]. Критерием возможности использования лазерной системы в данных приложениях является соотношение длины когерентности ее излучения L_{coh} и оптической длины канала L .

Для того чтобы система активной компенсации фазовых шумов работала корректно, т. е. в случае, когда собственными шумами лазерной системы можно пренебречь, должно выполняться условие $L_{\text{coh}} \gg 2L$ [11]. Например, для передачи высокостабильного сигнала частоты на расстояние 1000 км необходимо, чтобы ширина спектра лазерного излучения была менее 100 Гц на времени усреднения 10 мс. Кроме того, для использования лазерной системы во многих приложениях требуется ее компактность, удобность, технологичность и коммерчески оправданная стоимость изготовления. Одним из наиболее надёжных и используемых способов уменьшения фазовых шумов и создания ультрастабильных лазерных систем является стабилизация частоты лазера по моде внешнего опорного резонатора Фабри–Перо методом Паунда–Драйвера–Холла [12–15].

Данная работа посвящена созданию и исследованию компактного резонатора из стекла ULE (Ultra Low Expansion) с высокоотражающими зеркалами для длины волны 1550 нм. Поглощение на этой длине волны в стандартном оптическом волокне не превышает 0.23 дБ/км, что обуславливает её широкое использование в экспериментах по передаче оптических сигналов на большие расстояния. Описаны особенности конструкции резонатора и вакуумной камеры, измерение резкости (fineness) резонатора, характеристики лазерной системы, стабилизированной по этому резонатору: ширина линии излучения и нестабильность в терминах девиации Аллана.

Конструкция резонатора. Тело резонатора представляет собой цилиндр длиной 20 мм и диаметром 12.7 мм из материала Corning ULE 7972 Premium Grade, облада-

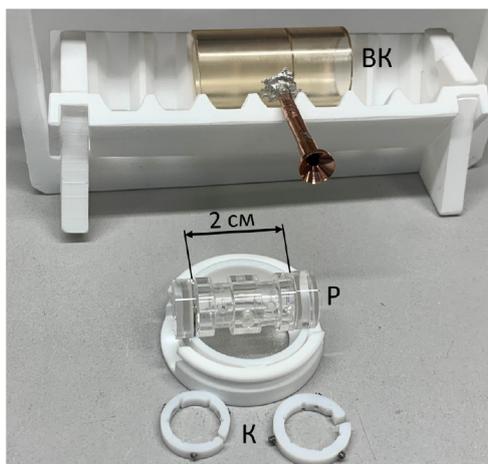


Рис. 1: Сборка тела резонатора (P) с зеркалами, кольца (K) системы подвеса с фиксирующими шпильками и вакуумная камера (BK). В отверстие вакуумной камеры индиевым припоем впаяна медная трубка для внешней откачки. Резонатор на фотографии расположен на вспомогательной подставке.

ющего нулевой точкой теплового расширения при температуре, близкой к комнатной. По оси цилиндра просверлено сквозное отверстие диаметром 8 мм для прохождения оптического пучка. Для откачки центрального канала служит дополнительное отверстие, перпендикулярное оптической оси. Конфигурация подвеса резонатора, наиболее устойчивая к вибрациям, была разработана на основе моделирования методом конечно-элементного анализа [16]. Фотография резонатора с закреплёнными на нём зеркалами представлена на рис. 1.

Зеркала резонатора. На плоскоплоскую и плосковогнутую ($R = 230$ мм) подложки зеркал резонатора толщиной 5 мм и диаметром 12.7 мм (также из материала ULE) в Троицком обособленном подразделении (ТОП) ФИАН было напылено диэлектрическое высокоотражающее покрытие $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ с центральной длиной волны 1550 нм, обратные поверхности были просветлены. Зеркала закреплены на торцах тела при помощи оптического контакта. Предел тепловых шумов [17], ограничивающий потенциальную нестабильность лазерной системы на основе данного резонатора, составляет $5 \cdot 10^{-15}$ в терминах нормированной девиации Аллана.

Зеркала были охарактеризованы методом измерения амплитуды поля затухающей световой волны в резонаторе (ringdown) [18]. Время жизни фотона в резонаторе составило 2.75 мкс, что соответствует резкости 130 000 и коэффициенту отражения зеркал по мощности 99.997%.

Вакуумная камера и система подвеса. Для изоляции от влияния окружения резонатор P помещён в вакуумную камеру диаметром 20 мм с системой подвеса по двум группам из трех радиально-симметричных точек согласно ранее разработанной геометрии

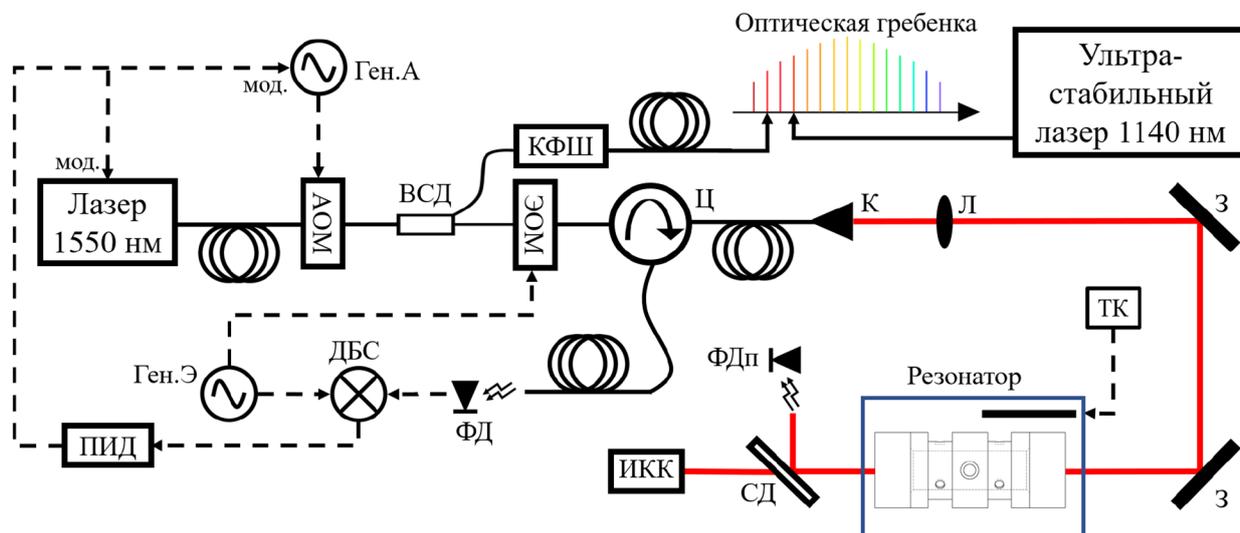


Рис. 2: Схема стабилизации частоты лазера по моде резонатора. Излучение волоконного лазера направляется в волоконный акустооптический модулятор (АОМ). После этого часть излучения с помощью волоконного светоделиителя (ВСД) отправляется на электрооптический модулятор (ЭОМ), который осуществляет фазовую модуляцию лазерного излучения, а другая – к фемтосекундной гребенке оптических частот по оптоволокну с компенсацией фазовых шумов (КФШ). Затем излучение направляется в волоконный циркулятор (Ц), из которого через коллиматор (К) и согласующую линзу (Л) заводится в резонатор с помощью двух зеркал (З). Прошедшее излучение регистрируется фотодиодом (ФДп) и камерой с InGaAs матрицей (ИКК). Отраженное излучение отводится циркулятором на фотодиод метода ПДХ (ФД), сигнал с которого демодулируется на двойном балансном смесителе (ДБС) сигналом генератора (Ген.Э), накачивающего ЭОМ. Полученный таким образом сигнал ошибки подается на пропорционально-интегрально-дифференциальный контроллер (ПИД), выход которого управляет частотой генератора накачки АОМа (вход мод. Ген.А) и напряжением на встроенной пьезокерамике лазера (вход мод.), замыкая тем самым петлю обратной связи. ТК – температурный контроллер, СД – светоделиитель. Сплошными чёрными линиями показаны оптические волокна, красными – пучки в свободном пространстве, пунктирными чёрными – электрические сигналы.

тела (см. рис. 1). Выбор размеров вакуумной камеры и резонатора обусловлен возможностями производства: дальнейшее уменьшение габаритов приведёт к существенному усложнению технологического процесса. В корпусе вакуумной камеры из оптического ситалла находится отверстие для откачки внешним насосом. Температурная стабилизация итоговой сборки на основе элемента Пельтье и радиатора, установленных на внешней поверхности вакуумной камеры, и терморезистора обеспечивает нестабильность температуры вакуумной камеры менее 100 мК на времени усреднения 1 сутки.

Схема стабилизации частоты. Для исследования стабильности частоты моды резонатора была осуществлена стабилизация частоты лазера Koheras AdjustIK E15 с длиной волны 1550 нм модуляционным методом Паунда–Дривера–Холла (ПДХ) [12] по собственной моде резонатора. Принципиальная схема представлена на рис. 2. Ширина полосы обратной связи составила 250 кГц, что многократно превышает ширину линии свободной генерации используемого лазерного источника.

Спектральная ширина линии излучения. Часть излучения, доставленная по оптоволокну с активной компенсацией фазовых шумов к оптической гребёнке, формировала сигнал биений с соответствующей спектральной компонентой гребёнки, который регистрировался балансным фотодетектором. Гребёнка была активно стабилизирована по частоте независимой ультрастабильной лазерной системы на длине волны 1140 нм. Такой метод обеспечивает нестабильность частоты всех спектральных компонент не более $2 \cdot 10^{-14}$ на временах усреднения 1 мс – 100 с. Для анализа ширины линии частота сигнала биений гетеродинировалась до 211 кГц, полученный низкочастотный сигнал записывался осциллографом в течение 1 секунды, количество точек выборки 10^6 . Ширина линии излучения зависит от времени усреднения в соответствии с характером остаточных шумов, поэтому был проведён анализ для нескольких значений в интересующем нас диапазоне: 50 мс, 100 мс, 1 с. Для корректного определения ширины на времени 50 мс весь набор данных делился на участки по 50 мс, к каждому из которых применялось преобразование Фурье. Затем полученные спектры приводились к общему центру для учёта медленных флуктуаций частоты и усреднялись между собой. Итоговый контур аппроксимировался лоренцевским контуром, результат показан на рис. 3(а). Полученная ширина не превышает 50 Гц на времени усреднения 50 мс, что соответствует $L_{\text{coh}} = 6000$ км. Аналогично были получены значения ширины для времён 100 мс и 1 с, при этом стоит отметить, что с увеличением времени более достоверный результат даёт аппроксимация гауссовским контуром [19]. Полученные значения не превышают 100 Гц на времени усреднения 100 мс и 150 Гц на времени усреднения 1 с. Ширина

линии используемого лазера без стабилизации на временах 10–100 мс составляет 5–7 кГц, что соответствует длине когерентности 40–60 км.

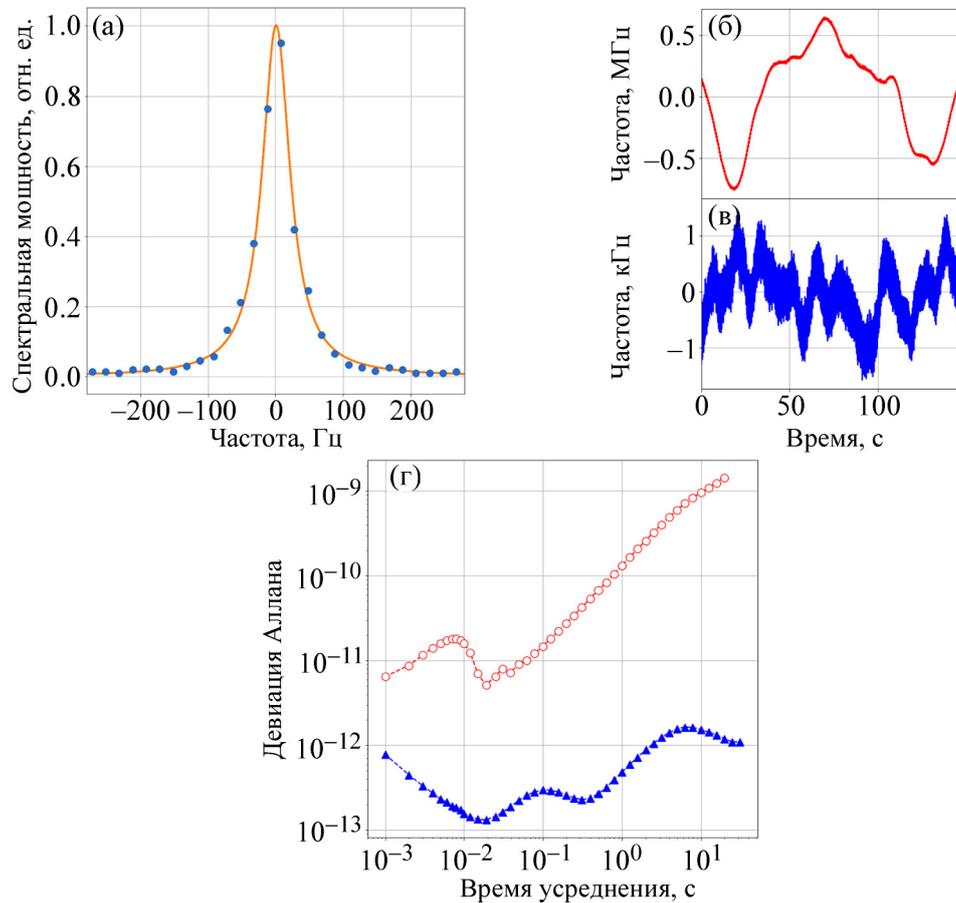


Рис. 3: (а) спектр излучения волоконного лазера, стабилизированного по созданному резонатору. Синие кружки – измерение при усреднении 50 мс, оранжевая кривая – аппроксимация лоренцевским контуром; ((б), (в)) частота биений лазера без и со стабилизацией и фемтосекундной гребёнкой, стабилизированной по независимому лазеру, в зависимости от времени после вычета линейного дрейфа; (г) синие треугольники (красные полые кружки) – девиация Аллана сигнала биений лазера, стабилизированного по миниатюрному резонатору (нестабилизованного).

Нестабильность частоты излучения. Для анализа нестабильности частота сигнала биений была записана измерителем фазы К+К Messtechnik с высоким разрешением без мертвого времени [20]. Аппроксимация данных линейной функцией показала наличие дрейфа ~ 50 Гц/с, который был вычтен для дальнейшего анализа. На рис. 3((б),(в))

показаны зависимости частоты биений от времени для лазера без и со стабилизацией, соответственно. На рис. 3(г) приведена девиация Аллана [21] частоты сигнала биений. Значение нестабильности достигает $1.3 \cdot 10^{-13}$ на времени усреднения 15 мс, что заметно больше уровня $5 \cdot 10^{-15}$ тепловых шумов для такого резонатора, и может быть обусловлено флуктуациями остаточной амплитудной модуляции [22]. На больших временах девиация возрастает, что может быть связано с остаточными флуктуациями температуры резонатора. Для сравнения на том же рисунке приведена девиация Аллана частоты лазера в отсутствие стабилизации.

Заключение. Был разработан и создан малогабаритный (2 см) оптический резонатор Фабри–Перо оригинальной конструкции из ULE-стекла. Излучение волоконного лазера, стабилизированного по частоте методом ПДХ по собственной моде резонатора, обладает следующими характеристиками: ширина спектра излучения составила 50 Гц на времени 50 мс, что соответствует длине когерентности 6000 км, относительная нестабильность – $1.3 \cdot 10^{-13}$ на времени усреднения 15 мс. Такие характеристики позволяют использовать подобные лазеры в экспериментах по сличению удалённых оптических часов, в которых частота излучения передающего лазера сличается на обоих концах линии со стандартами частоты, и таким образом даёт возможность их сличения между собой [23]. Также использование подобных лазеров целесообразно в приложениях, где не требуются рекордные показатели стабильности частоты, но важны надёжность и удобство в использовании: в качестве лазеров-повторителей на промежуточных станциях длинных оптоволоконных линий или в качестве усиливающих бриллюэновских лазеров [24]. Обсуждается также применимость таких лазерных источников в экспериментах по квантовой криптографии и когерентной рефлектометрии [25] и дальнометрии.

Авторы благодарят коллектив группы Прецизионной оптики и вакуумных технологий ТОП ФИАН в лице Филонова Евгения Вадимовича и Губина Михаила Александровича за изготовление деталей вакуумной камеры и напыление высокоотражающих покрытий зеркал.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-72-10166.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] www.menlosystems.com/products/quantum-laser-systems/fc1500-quantum/.
- [2] J. E. Gray, D. W. Allan, 28th Annual Symposium on Frequency Control, 243 (1974). <https://doi.org/10.1109/FREQ.1974.200027>.

- [3] F. Riehle, *Nature Photonics* **11**(1), 25 (2017). <https://doi.org/10.1038/nphoton.2016.235>.
- [4] L.-S. Ma, P. Jungner, J. Ye, J. L. Hall, *Optics Letters* **19**(21), 1777 (1994). <https://doi.org/10.1364/OL.19.001777>.
- [5] W. R. Milner, J. M. Robinson, C. J. Kennedy, et al., *Physical Review Letters* **123**(17), 173201 (2019). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.173201>.
- [6] T. Takano, M. Takamoto, I. Ushijima, et al., *Nature Photonics* **10**(10), 662 (2016). <https://doi.org/10.1038/nphoton.2016.159>.
- [7] S. F. E. Karpathakis, C. T. Gravestock, D. R. Gozzard, et al., *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* **6**(04), 1 (2020). <https://doi.org/10.1117/1.jatis.6.4.044002>.
- [8] B. P. Dix-Matthews, D. R. Gozzard, S. F. E. Karpathakis, et al., *IEEE Communications Letters* **25**(5), 1610 (2021). <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2021.3053943>.
- [9] S. Droste, F. Ozimek, T. Udem, et al., *Physical Review Letters* **111**(11), 110801 (2013). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.110801>.
- [10] D. Calonico, E. K. Bertacco, C. E. Calosso, et al., *Applied Physics B* **117**(3), 979 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00340-014-5917-8>.
- [11] K. S. Kudeyarov, G. A. Vishnyakova, K. Y. Khabarova, N. N. Kolachevsky, *Laser Physics* **28**(10), 1 (2018). <https://doi.org/10.1088/1555-6611/aacfa1>.
- [12] R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski, et al., *Applied Physics B Photophysics and Laser Chemistry* **31**(2), 97 (1983). <https://doi.org/10.1007/BF00702605>.
- [13] D. G. Matei, T. Legero, S. Häfner, et al., *Physical Review Letters* **118**, 263202 (2017). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.263202>.
- [14] S. Häfner, S. Falke, Ch. Grebing, et al., *Optics Letters* **40**(9), 2112 (2015). <http://dx.doi.org/10.1364/OL.40.002112>
- [15] A. Didier, J. Millo, B. Marechal, et al., *Applied Optics* **57**(22), 6470 (2018). <https://doi.org/10.1364/AO.57.006470>.
- [16] N. O. Zhadnov, K. S. Kudeyarov, D. S. Kryuchkov, et al., *Quantum Electronics* **48**(5), 425 (2018). <https://doi.org/10.1070/QEL16654>
- [17] T. Kessler, T. Legero, U. Sterr, *Journal of the Optical Society of America B* **29**(1), 178 (2012). <https://doi.org/10.1364/JOSAB.29.000178>.
- [18] F. Riehle, *Frequency Standards. Basics and Applications* (Weinheim, Wiley, 2004; Moscow, Fizmatlit, 2009).
- [19] С. М. Рытов, *Введение в статистическую радиофизику* (М., Наука: главная редакция физико-математической литературы, 1976).

- [20] G. Kramer, W. Klische, Proceedings of the 2001 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition (Cat. No.01CH37218), 144 (2001). <https://doi.org/10.1109/FREQ.2001.956178>.
- [21] D. W. Allan, Proceedings of the IEEE **54**(2), 221 (1966). <https://doi.org/10.1109/PROC.1966.4634>.
- [22] H. Shen, L. Li, J. Bi, et al., Physical Review A – Atomic, Molecular, and Optical Physics **92**(6), 1 (2015). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.92.063809>.
- [23] K. Predehl, G. Grosche, S. M. F. Raupach, et al., Science **336**(6080), 441 (2012). <https://doi.org/10.1126/science.1218442>.
- [24] S. M. F. Raupach, A. Koczwara, G. Grosche, Physical Review A – Atomic, Molecular, and Optical Physics **92**(2), 021801 (2015). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.92.021801>.
- [25] S. Nikitin, E. Fomiryakov, D. Kharasov, et al., Journal of Lightwave Technology **38**(6), 1446 (2020). <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2952688>.

Поступила в редакцию 30 апреля 2021 г.

После доработки 26 августа 2021 г.

Принята к публикации 27 августа 2021 г.