

УДК 681.7.068/.069

**М.И. Скворцов¹, Э.А. Фомиряков², В.Н. Трещиков²,
С.П. Никитин², А.А. Вольф¹, А.А. Власов¹, А.В. Достовалов¹**

¹Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

²ООО «Т8», Москва, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ШИРИН ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Представлены результаты по отработке методики и измерению спектральных характеристик волоконных лазеров с распределенной обратной связью (РОС-лазеров), у которых длины резонаторов отличались на порядок – 5,3 и 60 мм. Резонаторы на основе волоконных брэгговских решёток с фазовым сдвигом в структуре были изготовлены разными методами. Для записи 5,3-мм резонатора в фосфоросиликатном высоколегированном Er^{3+} волоконном световоде использовался метод фемтосекундной поточечной записи, для записи 60-мм резонатора в волоконном световоде Nufern PS-ESF-3/125 использовался голографический метод записи и УФ-лазерное излучение. Спектральная ширина РОС-лазера в конфигурации с длиной резонатора 5,3 мм и выходной мощностью 400 мкВт варьировалась от 0,1 до 3,2 кГц, в зависимости от времени измерения (~10 мкс – 1 с). Спектральная ширина РОС-лазера в конфигурации с длиной резонатора 60 мм и выходной мощностью 600 мкВт на соответствующих временных интервалах составляла от 0,01 до 5 кГц.

Ключевые слова: волоконная брэгговская решетка с фазовым сдвигом, распределенная обратная связь, одночастотный волоконный лазер.

**M.I. Skvortsov¹, E.A. Fomiryakov², V.N. Treshchikov², S.P. Nikitin²,
A.A. Wolf¹, A.A. Vlasov¹, A.V. Dostovalov¹**

¹ Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia

² LLC "T8", Moscow, Russia

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR MEASURING SPECTRAL WIDTHS OF DISTRIBUTED FEEDBACK FIBER LASERS

The paper presents the results of measuring the spectral characteristics of fiber lasers with distributed feedback (DFB), whose resonator lengths differed by an order of magnitude – 5.3 and 60 mm. Resonators based on fiber Bragg gratings with phase shift in the structure were fabricated by different methods. The femtosecond point-by-point method was used for writing a 5.3-mm resonator in phosphorosilicate highly-doped Er^{3+} optical fiber, and a holographic method and UV laser radiation were used for writing a 60-mm resonator in Nufern PS-ESF-3/125 optical fiber. Spectral width of the DFB laser in configuration with a cavity length of 5.3 mm and an output power of 400 μW varied from 0.1 to 3.2 kHz, depending on the time of measurement (~10 μs – 1 s). Spectral width of the DFB laser in configuration with cavity length of 60 mm and output power of 600 μW at corresponding time intervals varied from 0.01 to 5 kHz.

Keywords: phase-shifted fiber Bragg grating, distributed feedback, single-frequency fiber laser.

Введение

Лазеры с распределенной обратной связью (РОС-лазеры) являются перспективными источниками для широкого диапазона применений: от сенсорных систем [1] и спектроскопии [2] до когерентных линий связи. В первую очередь это связано с узкой линией генерации, значение которой находится в диапазоне $\sim 0,1\text{--}10$ кГц. При измерении спектральной ширины данного типа лазеров применяются специальные методики, так как типичное разрешение оптических анализаторов спектров на основе дифракционных решёток составляет ~ 10 пм ($\sim 1,3$ ГГц). Так, в работе [3] применялся сканирующий интерферометр Фабри – Перо с разрешением менее 10 МГц для определения частотного интервала между поляризационными модами в Yb^{3+} РОС-лазере, а также оценки ширины линии генерации. Для более точного определения ширины спектра, как правило, используется методика автогетеродинамирования. В работе [4] для определения ширины полупроводникового лазера использовался интерферометр Маха – Цендера, в котором длинное плечо интерферометра составляло 15 км, что соответствует разрешению ≈ 14 кГц, а в коротком плече был расположен акустооптический модулятор для смещения спектра биений на частоту 40 МГц. Измеренная в работе ширина линии составила ≈ 8 МГц, что является типичным значением для полупроводниковых лазеров. Для улучшения разрешения авторы работы [5] увеличили время задержки, модифицировав интерферометр Маха – Цендера. Волоконные выходы делителя мощности были соединены между собой через 11-километровую линию задержки таким образом, что часть излучения рециркулировала в интерферометре Маха – Цендера. В линии задержки находился акустооптический модулятор, и после каждого прохождения пик биений смещался на значение несущей частоты. Несмотря на то, что наблюдалось тридцатикратное прохождение линии задержки, ширина линии увеличивалась с каждым обходом. Такие внешние факторы, как окружающий шум [6] с характерной частотой ~ 10 Гц – 1 кГц, вносят значительный вклад в уширение линии. Хотя ширина линии дает представление о когерентности лазерной системы, вышеупомянутые методы не позволяют определить частотные/фазовые шумы лазерного источника. В то же время данные характеристики необходимы для понимания источника шума и, как следствие, для улучшения спектральных характе-

ристик лазера на разных временных масштабах. Таким образом, для высококогерентных лазерных систем ширину линии генерации более корректно измерять с помощью спектральной плотности фазовых или частотных шумов. Для измерения этих параметров был предложен ряд методов, основанных на регистрации биений сигналов в широком частотном диапазоне (~ 1 МГц), проходящих через различные варианты интерферометра Маха – Цендера или Майкельсона. Так, авторами [7] был проведен обзор методик по определению фазовых/частотных шумов и нахождению через данные параметры ширины линии генерации. Также было показано, что с помощью осциллографа с полосой пропускания ~ 1 ГГц, который производит непрерывное измерение сигнала во временной области, и методов постобработки осциллограмм могут быть получены фазовые характеристики сигнала биений, что в дальнейшем позволяет сопоставлять их с шириной лазера. В работе [8] было проведено сравнение спектральных характеристик различных коммерческих моделей одночастотных лазеров с применением данной методики на временных интервалах до 0,1 мс.

В данной работе представлены результаты по измерению спектральных ширин РОС-лазеров в конфигурациях с различными резонаторами, изготовленными как в разных активных Er^{3+} -световодах, так и имеющих различные длины резонаторов – 5,3 и 60 мм. Для комплексного определения спектральных характеристик были применены и оптимизированы для конкретной ситуации различные методики измерения: на временах от десятка микросекунд – с получением осциллограммы биений и дальнейшим определением ширины генерации через спектр фазового шума, на временах порядка единиц секунд – через усреднение радиочастотного спектра биений с применением методики автогетеродинамирования.

Эксперимент

Резонаторы на основе ВБР с π -сдвигом были изготовлены в различных активных волоконных световодах. В первом случае структура была записана в фосфоросиликатном высоколегированном Er^{3+} -световоде [9, 10]. Основными параметрами, которые определяют минимальную возможную длину резонатора РОС-лазера, является коэффициент усиления активного волокна g_s , пассивные оптические потери световода α , а также коэффициент связи мод $\kappa = \pi m \Delta n / 2n_{\text{eff}} \Lambda$, где Δn –

амплитуда модуляции показателя преломления ВБР, m – порядок ВБР, n_{eff} – эффективный показателя преломления моды, L – период ВБР. Условие для порога генерации можно представить в виде [6]:

$$g_s \approx \alpha + 4\kappa e^{-\kappa L}. \quad (1)$$

Для того чтобы оценить значение коэффициента усиления, мы использовали отрезок активного волоконного световода длиной ≈ 2 см и лазерный диод накачки с длиной волны 980 нм и максимальной мощностью ≈ 600 мВт. Измеренный коэффициент усиления при максимальной мощности накачки составил ≈ 2 дБ/см на длине волны 1550 нм. Величина пассивных оптических потерь $\alpha \approx 4$ –5 дБ/м была нами оценена из спектра пропускания волоконного световода в области длин волн 1300 нм [9]. Для высокоотражающей ВБР в области длин волн 1550 нм, коэффициента связи $\kappa = 1170 \text{ м}^{-1}$ и коэффициент усиления $g_s \approx 2$ дБ/см минимальная длина резонатора будет составлять ≈ 4 мм.

Запись 5,3-мм ВБР с фазовым сдвигом в центре структуры производилась фемтосекундным поточечным методом в заготовке, которая представляла собой участок активного световода длиной около 8 мм, к которой были подварены пассивные хвосты из волоконного световода Nufem 1060XP. Фокусировка фемтосекундных лазерных импульсов ($\lambda = 1026$ нм, $\Delta t_p = 232$ фс) в область сердцевин активного световода осуществлялась с помощью микрообъектива с числовой апертурой $NA = 0,6$, перемещение волоконного световода с помощью высокоточного линейного транслятора Aerotech ABL1000. Фазовый сдвиг в середине участка ВБР обеспечивался за счет прореживания 1 кГц последовательности лазерных импульсов [11]. Резонансная длина волны для изготовленного образца составила 1550 нм.

Для записи 60-мм ВБР с π -сдвигом был использован непрерывный аргоновый лазер с удвоенной частотой ($\lambda = 244$ нм), выходной мощностью ≈ 30 мВт и шириной пучка 1,3 мм. В качестве активной среды использовался коммерчески доступный волоконный световод Nufem PS-ESF-3/125. Индексирование периодической модуляции показателя преломления в области сердцевин осуществлялось голографическим методом с использованием фазовой маски [3], при этом фазовая маска и активный световод перемещались перпендикулярно распространению УФ-излучения с помощью моторизованного линейного транслятора. Для формирования фазового π -сдвига в центре структуры ВБР фазовая

маска сдвигалась вдоль волокна при помощи пьезоэлемента. Резонансная длина волны для изготовленного образца также составила 1550 нм.

На основе созданных образцов ВБР была собрана схема РОС-лазера (рис. 1). Излучение диода накачки с длиной волны 980 нм и выходной мощностью до 600 мВт заводилось в резонатор через спектрально-селективный разветвитель (ССР). Для минимизации влияния обратной связи по обе стороны от резонатора были установлены изоляторы.

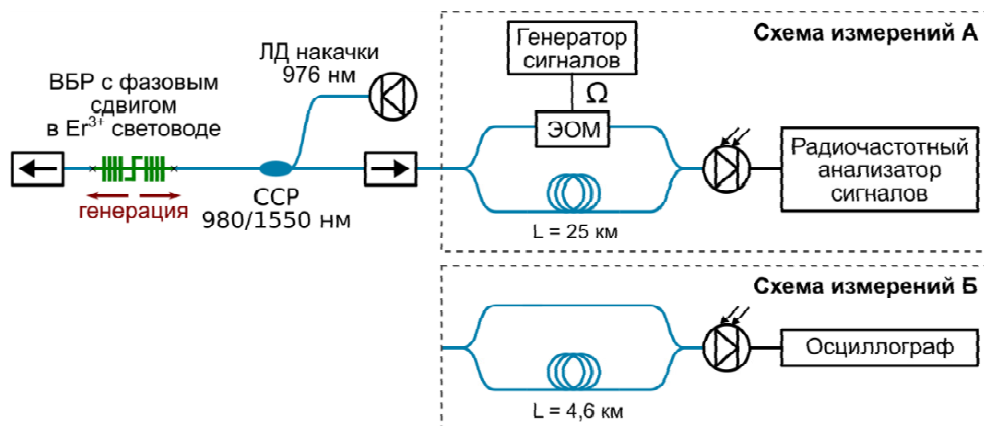


Рис. 1. Экспериментальная схема РОС-лазера с измерительными стендами: схема автогетеродина (А), схема автогомодина (Б)

Для определения ширины линии генерации, распространяющейся в противоположную сторону от накачки, были собраны схемы автогетеродина (схема А, см. рис. 1) и автогомодина (схема Б, см. рис. 1). Для получения значений ширины линий генерации на длительных временах (~ 1 с), использовалась методика автогетеродина [4]: в одном плече интерферометра Маха – Цендера была расположена катушка пассивного волокна длиной 25 км, что соответствует разрешению $\Delta\nu \approx 8$ кГц, в другом – электрооптический модулятор с несущей частотой, равной 80 МГц. Регистрация спектра биений осуществлялась с помощью радиочастотного анализатора спектров Agilent N9010A, работающего в диапазоне 9 кГц – 3,6 ГГц, и 5 ГГц фотодиода Thorlabs DET08CFC. Выходная мощность при максимальном значении накачки составила 600 и 400 мкВт для 60 и 5,3 мм РОС-лазеров соответственно. Значения ширины спектров биений, измеренных на уровне -20 дБ, составили 100 и 64 кГц для РОС-лазеров с длиной резонатора 60 и 5,3 мм соответственно, что соответствует 5 и 3,2 кГц на полувы-

соте спектра биений. Полученные данные накапливались и усреднялись в течение длительного времени – более 1 с. Но даже при измерении мгновенной ширины в данной конфигурации время прохождения линии задержки составляло $\approx 0,12$ мс. Для измерения спектральных ширин на более коротких временах мы воспользовались методикой, описанной в работе [7].

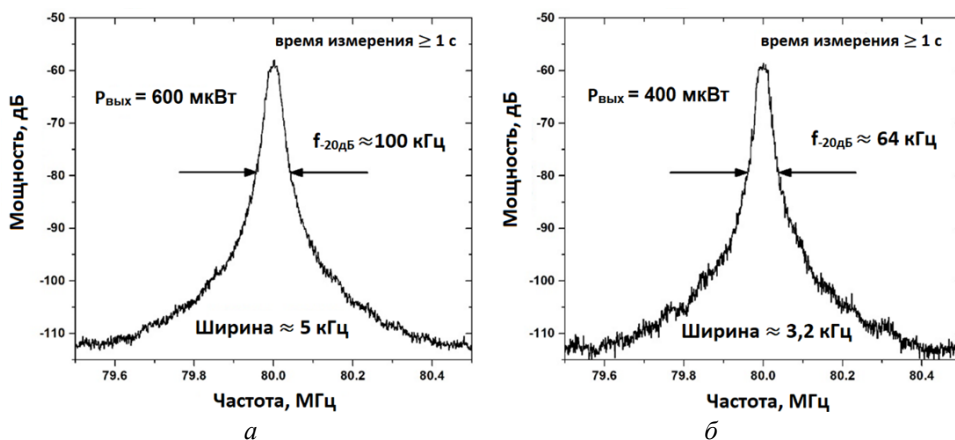


Рис. 2. Радиочастотные спектры биений для РОС-лазера с длиной резонатора 60 мм (а) и 5,3 мм (б)

В отсутствие амплитудных шумов в лазерном источнике сигнал биений на осциллографе представляет вещественную функцию $b(t)$:

$$b(t) = a(t)\cos(\varphi_b(t)) = a_0\cos(\varphi(t) - \varphi(t-T_0)), \quad (2)$$

где $a(t)$ и $\varphi_b(t)$ – это амплитуда и фаза сигнала биений, которые в случае автогомодинирования с линией задержки $L_0 = T_0 c/n$ можно представить через фазу лазерного источника $\varphi(t)$. Для получения аналитического сигнала, связанного с вещественной функцией $b(t)$, необходимо использовать преобразование Гильберта [12]:

$$b_a(t) = b(t) + iH[b(t)], \quad (3)$$

из которого получаем фазу сигнала биений как $\varphi_b(t) = \arctg[H[b(t)]/a(t)]$, где $a(t) = \sqrt{b(t)^2 + H[b(t)]^2}$. Данную величину можно представить в виде $\varphi_b(t) = \overline{\varphi_b(t)} + \widehat{\varphi_b(t)}$, где $\overline{\varphi_b(t)}$ – линейный тренд фазы, $\widehat{\varphi_b(t)}$ – флуктуационная (шумовая) составляющая. Спектр фазы сиг-

нала биений определяется как преобразование Фурье от автокорреляционной функции флуктуационной составляющей фазы:

$$S_{\phi b}(f) = F \left(\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \overline{\phi b(t)} * \overline{\phi b(t+\tau)} dt \right),$$

который, в свою очередь, связан

со спектром фазы лазера $S_{\phi}(f)$ следующим выражением [13]:

$$S_{\phi b}(f) = 2 S_{\phi}(f) [1 - \cos(2\pi f T_0)]. \quad (4)$$

С появлением возможности прямого или косвенного (с применением осциллографа) детектирования фазы сигнала биений отсутствует необходимость использовать линию задержки, превышающую время когерентности лазерной системы, так как спектр фазы сигнала биений напрямую связан с соответствующими величинами исходного лазера. Кроме того, в экспериментальном плане данная методика более доступна, так как вместо радиочастотного анализатора спектра можно применять осциллограф и нет необходимости использовать в схеме электро/акустооптический модулятор.

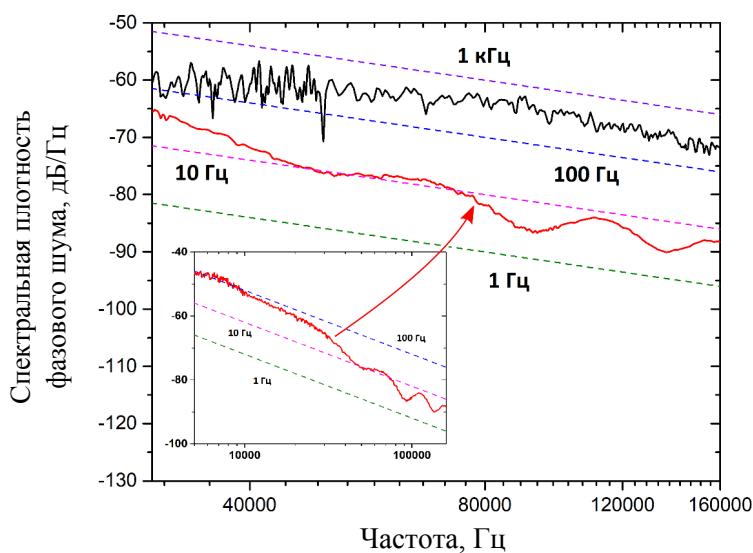


Рис. 3. Спектральная плотность фазового шума для РОС-лазера с длиной резонатора 60 мм (красный цвет) и 5,3 мм (черный цвет). Вставка: спектральная плотность фазового шума для 60 мм РОС-лазера в диапазоне 5–160 кГц

В нашем случае линия задержки составила 4,6 км, а регистрация сигнала осуществлялась с помощью осциллографа Lecroy Wavepro

725zi и 5-ГГц фотодиода Thorlabs DET08CFC. Для определения ширины линии генерации к полученным данным осциллограммы биений последовательно применялись преобразования Гильберта и Фурье, как было описано выше. В результате был получен спектр фазы (рис. 3), который позволял оценить ширину.

Измерения ширины линии также производились для различных конфигураций резонаторов: чёрным цветом обозначена спектральная плотность фазового шума для 5,3-мм РОС-лазера, красным для 60 мм РОС-лазера. Пунктирные линии соответствуют профилю Лоренца с различной шириной (1 Гц – 1 кГц). Можно заметить, что на идентичных временах ширина линии для РОС-лазера с физической длиной резонатора 60 мм на порядок уже, чем для 5,3 мм, и составляет ~10 Гц. Тем не менее, с увеличением времени измерения заметна тенденция к уширению: были произведены дополнительные измерения для 60 мм РОС-лазера в области 5–160 кГц (вставка на рис. 3), где максимальное значение ширины достигало ~100 Гц. На больших временах (>1 с) ширины практически равны, что было показано на рис.2. Таким образом, резонатор с более короткой базой менее подвержен воздействию окружающих шумов, так как измерения проводились в идентичных условиях.

Заключение

В настоящей работе представлены методика и результаты измерений спектральных ширин РОС-лазеров с физическими размерами резонаторов, на порядок отличающимися друг от друга. Для измерения ширины на временах единицы секунд применялась методика автогетеродинамирования. В конфигурации РОС-лазера с длиной резонатора 5,3 мм ширина линии генерации на полувысоте составила 3,2 кГц, с длиной резонатора 60 мм \approx 5 кГц. Несмотря на то, что при длительных временах измерения ширины оказались практически равными, применение методики [7] позволило получить значения ширин, которые отличаются на порядок, на малых временах (~10–100 мкс). Было показано, что мгновенная спектральная ширина генерации для 60-мм РОС-лазера составляла ~10 Гц, когда для 5,3 мм РОС-лазера была более 100 Гц. Таким образом, было показано, что РОС-лазер на основе резонатора с короткой базой менее подвержен воздействию окружающих шумов, из-за которых происходило уширение линии. Такой комплексный подход измерения спектральных

характеристик позволяет определить более подходящий резонатор РОС-лазера для дальнейшего применения в лазерной системе.

Авторы работы выражают благодарность О.Н. Егоровой за предоставленный фосфоросиликатный высоколегированный Er^{3+} -световод, а также О.Е. Нанию и Д.Р. Харасову за консультации по технике измерения спектральной ширины РОС-лазера.

Работа выполнена в рамках темы госзадания ИАиЭ СО РАН (№ АААА-А17-117062110026-3).

Список литературы

1. Huang W., Zhang W., Li F. Acoustic emission source location using a distributed feedback fiber laser rosette // *Sensors* (Basel, Switzerland). – 2013. – Т. 13, № 10. – С.14041–14054.
2. Persijn S., Harren F., Veen Van Der A. Quantitative gas measurements using a versatile OPO-based cavity ringdown spectrometer and the comparison with spectroscopic databases // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. – 2010. – Т. 100, № 2 – С. 383–390.
3. Single frequency single polarization DFB fiber laser / S.A. Babin, D.V. Churkin, A.E. Ismagulov, S.I. Kablukov, M.A. Nikulin // *Laser Physics Letters*. – 2007. – Т. 4, № 6. – С.428–432.
4. Okoshi T., Kikuchi K., Nakayama A. Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum // *Electronics Letters*. – 1980. – Т. 16, № 16. – С. 630–631.
5. Vahala K.J., Dawson J.W., Park N. An improved delayed self-heterodyne interferometer for linewidth measurements // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 1992. – Т. 4, № 9. – С. 1063–1066.
6. Cranch G.A., Flockhart G.M.H., Kirkendall C.K. Distributed Feedback Fiber Laser Strain Sensors // *IEEE Sensors Journal*. – 2008. – Т. 8, № 7. – С. 1161–1172.
7. Time-dependent laser linewidth: beat-note digital acquisition and numerical analysis / N. Andel, M.I. Yara, M. Ohamed, S. Ellahi, T.A.S. Ouici, R. Ardaillon, P. Hilippe, S. Ignoret // *IEEE Sensors Journal*. – 2016. – Т. 24, № 24. – С. 401–407.
8. Characterization of Ultra-Narrow Linewidth Lasers for Phase-Sensitive Coherent Reflectometry Using EOM Facilitated Heterodyning /

S. Nikitin, E. Fomiryakov, D. Kharasov, O. Nanii, V. Treshchikov // *Journal of Lightwave Technology*. – 2020. – Т. 38, № 6. – С. 1446–1453.

9. Gain characteristics of fibers with a heavily erbium-doped phosphate-based core and silica cladding / B.I. Denker, B.I. Galagan, V.A. Kamynin, A.A. Ponosova, K.E. Riumkin, S.L. Semjonov, S.E. Sverchkov, V.B. Tsvetkov // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2019. – Т. 36, № 10. – С. 2705.

10. Single-frequency fibre laser with a cavity formed by Bragg gratings written in the core of an active composite fibre using KrF laser radiation (248 nm) / O.N. Egorova, O.I. Medvedkov, E.S. Seregin, S.A. Vasil, S.E. Sverchkov, B.I. Galagan, B.I. Denker, G.L. Danielyan, V.I. Pustovoi, S.L. Semjonov // *Quantum Electronics*. – 2019. – Т. 49, № 12. – С. 2–7.

11. Point-by-point inscription of phase-shifted fiber Bragg gratings with electro-optic amplitude modulated femtosecond laser pulses / J. Burgmeier, C. Waltermann, G. Flachenecker, W. Schade // *Optics letters*. – 2014. – Т. 39, № 3. – С. 540–543.

12. Hilbert D. Dritter Band: Analysis Grundlagen der Mathematik Physik Verschiedenes. – 1935. – P. 1–443.

13. Dynamic frequency-noise spectrum measurement for a frequency-swept DFB laser with short-delayed self-heterodyne method / Q. Zhou, J. Qin, W. Xie, Z. Liu, Y. Tong, Y. Dong, W. Hu // *Optics Express*. – 2015. – Т. 23, № 22. – С. 29245.

References

1. Huang W., Zhang W., Li F. Acoustic emission source location using a distributed feedback fiber laser rosette // *Sensors (Basel, Switzerland)*. – 2013. – Т. 13, № 10. – С.14041–14054.

2. Persijn S., Harren F., Veen Van Der A. Quantitative gas measurements using a versatile OPO-based cavity ringdown spectrometer and the comparison with spectroscopic databases // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. – 2010. – Т. 100, № 2 – С. 383–390.

3. Single frequency single polarization DFB fiber laser / S.A. Babin, D.V. Churkin, A.E. Ismagulov, S.I. Kablukov, M.A. Nikulin // *Laser Physics Letters*. – 2007. – Т. 4, № 6. – С.428–432.

4. Okoshi T., Kikuchi K., Nakayama A. Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum // *Electronics Letters*. – 1980. – Т. 16, № 16. – С. 630–631.

5. Vahala K.J., Dawson J.W., Park N. An improved delayed self-heterodyne interferometer for linewidth measurements // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 1992. – Т. 4, № 9. – С. 1063–1066.

6. Cranch G.A., Flockhart G.M.H., Kirkendall C.K. Distributed Feedback Fiber Laser Strain Sensors // *IEEE Sensors Journal*. – 2008. – Т. 8, № 7. – С. 1161–1172.

7. Time-dependent laser linewidth: beat-note digital acquisition and numerical analysis / N. Andel, M.I. Yara, M. Ohamed, S. Ellahi, T.A.S. Ouici, R. Ardaillon, P. Hilippe, S. Ignoret // 2016. – Т. 24, № 24. – С. 401–407.

8. Characterization of Ultra-Narrow Linewidth Lasers for Phase-Sensitive Coherent Reflectometry Using EOM Facilitated Heterodyning / S. Nikitin, E. Fomiryakov, D. Kharasov, O. Nanii, V. Treshchikov // *Journal of Lightwave Technology*. – 2020. – Т. 38, № 6. – С. 1446–1453.

9. Gain characteristics of fibers with a heavily erbium-doped phosphate-based core and silica cladding / B.I. Denker, B.I. Galagan, V.A. Kamynin, A.A. Ponosova, K.E. Riumkin, S.L. Semjonov, S.E. Sverchkov, V.B. Tsvetkov // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2019. – Т. 36, № 10. – С. 2705.

10. Single-frequency fibre laser with a cavity formed by Bragg gratings written in the core of an active composite fibre using KrF laser radiation (248 nm) / O.N. Egorova, O.I. Medvedkov, E.S. Seregin, S.A. Vasil, S.E. Sverchkov, B.I. Galagan, B.I. Denker, G.L. Danielyan, V.I. Pustovoi, S.L. Semjonov // *Quantum Electronics*. – 2019. – Т. 49, № 12. – С. 2–7.

11. Point-by-point inscription of phase-shifted fiber Bragg gratings with electro-optic amplitude modulated femtosecond laser pulses / J. Burgmeier, C. Waltermann, G. Flachenecker, W. Schade // *Optics letters*. – 2014. – Т. 39, № 3. – С. 540–543.

12. Hilbert D. Dritter Band: Analysis Grundlagen der Mathematik Physik Verschiedenes. – 1935. – P. 1–443.

13. Dynamic frequency-noise spectrum measurement for a frequency-swept DFB laser with short-delayed self-heterodyne method / Q. Zhou, J. Qin, W. Xie, Z. Liu, Y. Tong, Y. Dong, W. Hu // *Optics Express*. – 2015. – Т. 23, № 22. – С. 29245.