

УДК 681.7.068

П.М. Валюшина¹, К.А. Овчинников^{1,2}, Д.Г. Гилев^{1,2}¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия²Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, Россия

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА МЕТОДОМ ПЕРЕСТРОЙКИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ ЛАЗЕРА

Предложена модифицированная методика измерения характеристик волоконно-оптических резонаторов с помощью перестраиваемого узкополосного лазера. С помощью разработанной методики для устройств на основе оптических резонаторов можно проводить контрольную операцию для отслеживания параметров чувствительного элемента (оптического резонатора), например, такие параметры, как свободный спектральный диапазон, ширина резонансного пика на полувысоте и добротность резонатора.

Ключевые слова: оптический резонатор, перестраиваемый лазер, оптический резонансный гироскоп.

P.M. Valushina¹, K.A. Ovchinnikov^{1,2}, D.G. Gilev^{1,2}¹Perm State University, Perm, Russia²Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company, Perm, Russia

MEASUREMENT THE PARAMETERS OF A FIBER-OPTIC RESONATOR BY SWEEP THE FREQUENCY OF THE CENTRAL LASER

The paper proposes a modified technique for measuring the characteristics of fiber-optic resonators using a tunable narrow-band laser. The developed technique for devices based on optical resonators can be used as a control operation to monitor the parameters of the sensitive element (optical resonator), for example, such parameters as the free spectral range, the width of the resonant peak at half maximum and the Q-factor of the resonator.

Keywords: optical resonator, tunable laser, optical resonant gyroscope.

Введение

Оптические резонаторы представляют собой систему из нескольких отражающих элементов, например, полость с двумя частично пропускающими зеркалами (интерферометр Фабри – Перо), резонаторы с модами шепчущей галереи, волоконно-оптический кольцевой резонатор (ВОКР) и кольцевые интегрально-оптические резонаторы.

Такие резонаторы находят применение в самых различных областях науки и техники: в лазерной технике для стабилизации частоты излучения [1], в метрологии для сверхточного измерения перемещений [2], в спектроскопии для измерения концентрации различных веществ [3], оптоэлектронных генераторов [4] и т.д. Кроме того, оптический резонатор может являться чувствительным элементом миниатюрного резонансного гироскопа [5–7].

Ключевой характеристикой кольцевого резонатора (КР) является спектр резонатора, по которой можно измерить такие параметры, как свободный спектральный диапазон (FSR) и ширина резонансного пика (FWHM). По измеренной величине FWHM можно оценить добротность Q резонатора. Существуют два подхода к измерению спектра резонатора [8]: метод сканирующего лазера и метод «звнящего» резонатора. Оба метода предполагают использование перестраиваемого лазера, но в случае применения метода сканирующего лазера необходимо правильно фиксировать начало отсчета и перестройки лазера для построения спектрального распределения резонатора. Метод «звнящего» резонатора требует высокоскоростной перестройки и фотоприемник с малым временем отклика ($\tau < 1$ нс).

Предлагаемый метод является модификацией сканирующего метода, и в нем не требуется синхронизировать начало отсчета перестройки с началом измерения. Предлагаемая схема измерения использует значения перестройки лазера, а также в ней применяется аппроксимация резонансного пика для лучшего измерения величины FWHM.

1. Описание кольцевого резонатора

Кольцевой резонатор является интерферометрической схемой и состоит из прямого волноводного канала, области связи и замкнутого оптического контура. Суммирование последовательных лучей в области связи приводит к оптической интерференции, схожей с интерферометром Фабри – Перо [9].

Схема КР с указанием электромагнитных волн E_n ($n = 1, 2, 3, 4$), распространяющихся по контуру, и направление распространения представлены на рис. 1.

Рассмотрим взаимодействие электромагнитных волн, происходящее в КР. Через входной порт в систему вводится световая волна E_1 , далее в области связи мощность сигнала делится в пропорции, опреде-

ляемой; t – коэффициентом связи прохождения, k – коэффициентом связи перекрестный. Коэффициенты связи выполняют условие:

$$t^2 + k^2 = 1. \quad (1)$$

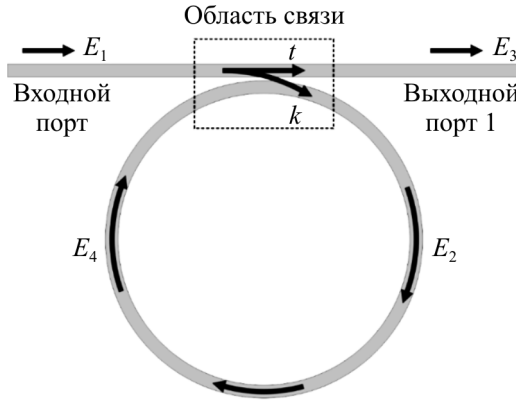


Рис. 1. Схема КР с одним волноводным каналом

Малая часть излучения E_2 от входящей мощности попадает в кольцевой контур, а другая часть E_3 проходит дальше по волноводу в выходной порт I (см. рис. 1).

Световая волна E_4 , совершившая один проход, делится в пропорции согласно коэффициентам связи, таким образом происходят два наложения волн: в прямом волноводу и в замкнутом контуре. Основные соотношения мощностей для проходящих волн E_1 , E_3 и циркулирующих E_2 , E_4 связаны с помощью следующих уравнений [10]:

$$E_3 = tE_1 + ikE_4, \quad (2)$$

$$E_2 = tE_4 + ikE_1. \quad (3)$$

В результате прохождения по кольцевому контуру световой сигнал накапливает фазовое смещение. Связь сигналов внутри резонансного контура описывается соотношением:

$$E_4 = e^{-\alpha 2\pi R} e^{-i\beta 2\pi R} E_2 = ae^{i\varphi} E_2, \quad (4)$$

где α – коэффициент затухания в кольцевом резонаторе; a – амплитуда сигнала при одиночном проходе по кольцу; β – постоянная распространения моды в кольце, $\beta = 2\pi / \lambda n_{\text{eff}}$; n_{eff} – эффективный показатель

преломления оптической моды внутри резонатора для длины волны λ ; R – радиус кольцевого резонатора; φ – фазовое смещение при одиночном проходе.

Определим оптическую мощность выходного излучения с учетом уравнений (2) и (3):

$$P_{\text{out}} = |E_3|^2 = \frac{a^2 + t^2 - 2at \cos(\varphi)}{1 + a^2 t^2 - 2at \cos(\varphi)}. \quad (5)$$

Мощность внутри кольцевой области будет следующей:

$$P_{\text{res}} = |E_4|^2 = \frac{a^2 (1 - t^2)}{1 + a^2 t^2 - 2at \cos(\varphi)}. \quad (6)$$

В области связи происходят две интерференции, когда фазовое смещение световой волны E_4 кратно 2π , тогда внутри резонатора будет наблюдаться конструктивная интерференция, а в прямом волноводе будет наблюдаться деструктивная интерференция. Таким образом, резонансное условие можно определить через фазовое смещение:

$$\varphi = 2\pi m, \quad (7)$$

где m – целое число.

С учетом резонансного условия (7) уравнения (5) и (6) сводятся к следующим:

$$P_{\text{out}} = \frac{(a - t)^2}{(1 - at)^2} (\varphi = 2\pi m), \quad (8)$$

$$P_{\text{res}} = \frac{a^2 (1 - t)^2}{(1 - at)^2} (\varphi = 2\pi m). \quad (9)$$

В частном случае, когда будет выполняться условие $a = |t|$, в случае резонанса выходная мощность будет равна 0. Данный случай называется критической связью.

Найдем связь частоты излучения и выходной мощности. Фаза световой волны по определению связана с частотой соотношением:

$$\varphi = \frac{2\pi f L n_{\text{eff}}}{c}, \quad (10)$$

где L – длина оптического пути, c – скорость света в вакууме.

С помощью (7) и (10) можно найти резонансное условие для частоты:

$$f_m = \frac{c}{n_{\text{eff}}L} \cdot m. \quad (11)$$

Данное резонансное уравнение можно перевести в соотношение для длины волны:

$$\lambda_m m = Ln_{\text{eff}}. \quad (12)$$

Таким образом, резонанс будет наблюдаться на определенной длине волны, если целое число длин волн укладывается по длине резонансного контура.

Переопределим выражения мощностей в терминах частоты с помощью соотношения (10):

$$P_{\text{out}} = \frac{a^2 + t^2 - 2at \cos\left(\frac{2\pi fLn_{\text{eff}}}{c}\right)}{1 + a^2t^2 - 2at \cos\left(\frac{2\pi fLn_{\text{eff}}}{c}\right)}, \quad (13)$$

$$P_{\text{res}} = \frac{a^2(1-t^2)}{1 + a^2t^2 - 2at \cos\left(\frac{2\pi fLn_{\text{eff}}}{c}\right)}. \quad (14)$$

Применяя данные уравнения, можно нарисовать амплитудно-частотную характеристику волоконно-оптического резонатора (длина контура $L = 0,25$ м, коэффициент связи $t = 0,9$, коэффициент потерь $a = 0,6$). Получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) для P_{res} и P_{out} , они приведены на рис. 2.

Применяется также конфигурация с двумя волноводами, схема приведена на рис. 3.

В данном случае уравнения мощности преобразуются следующим образом [9]:

$$T_{\text{out1}} = \frac{t_2^2 a^2 - 2t_1 t_2 a \cos \varphi + t_1^2}{1 - 2t_1 t_2 a \cos \varphi + (t_1 t_2 a)^2}, \quad (15)$$

$$T_{\text{out}2} = \frac{(1-t_1^2)(1-t_2^2)a}{1-2t_1t_2a \cos \varphi + (t_1t_2a)^2}, \quad (16)$$

где t_1 и t_2 – коэффициенты связи прохождения в области связи 1 и 2 соответственно.

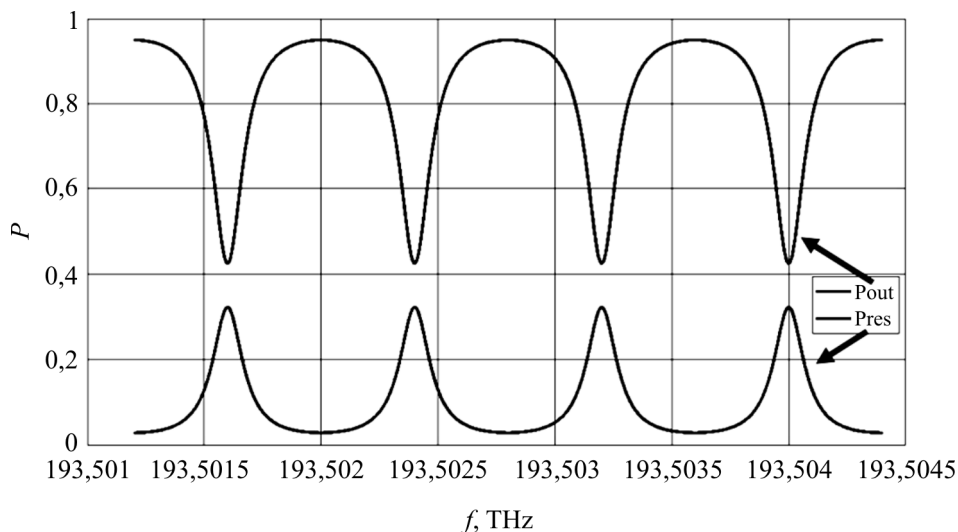


Рис. 2. АЧХ ВОКР с одним волноводом

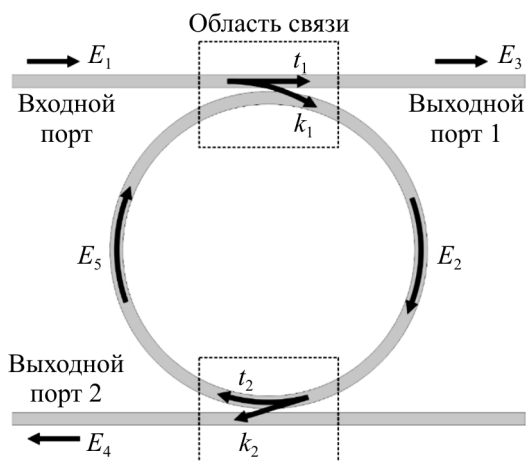


Рис. 3. Конфигурация КР с двумя волноводами

Данные уравнения также можно представить в терминах частоты для построения амплитудно-частотной характеристики ВОКР в случае конфигурации с двумя волноводами:

$$T_{\text{out1}} = \frac{t_2^2 a^2 - 2t_1 t_2 a \cos\left(\frac{2\pi f L n_{\text{eff}}}{c}\right) + t_1^2}{1 - 2t_1 t_2 a \cos\left(\frac{2\pi f L n_{\text{eff}}}{c}\right) + (t_1 t_2 a)^2}, \quad (17)$$

$$T_{\text{out2}} = \frac{(1-t_1^2)(1-t_2^2)a}{1 - 2t_1 t_2 a \cdot \cos\left(\frac{2\pi f L n_{\text{eff}}}{c}\right) + (t_1 t_2 a)^2}. \quad (18)$$

На рис. 4 приведен спектр волоконно-оптического резонатора с двумя волноводами (длина контура $L = 0,25$ м, коэффициент связи $t = 0,9$, коэффициент потерь $a = 0,8$).

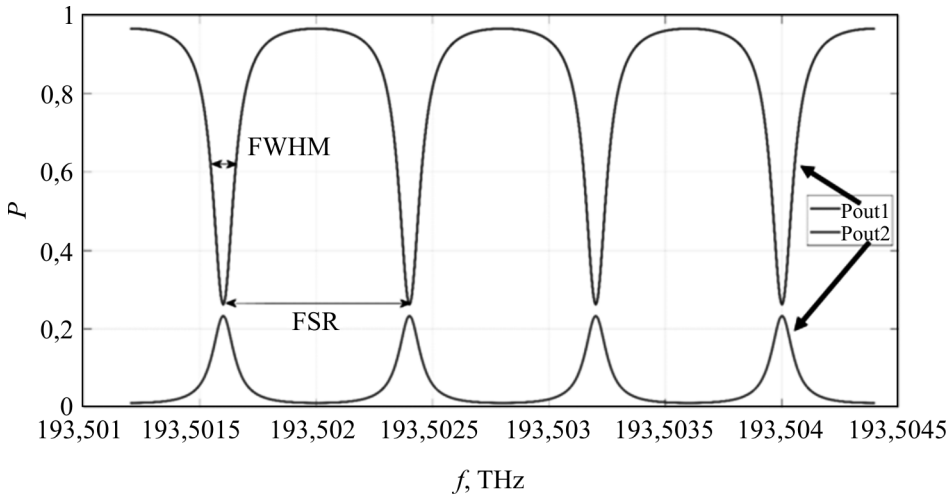


Рис. 4. АЧХ ВОКР с двумя волноводами

Если излучение поступает через верхний волновод, то интерференция происходит только в первой области связи, а вторая область связи действует как направленный ответвитель [9]. Однако необходимо учитывать вносимые потери данного ответвления.

Спектральная характеристика вблизи резонанса может быть аппроксимирована функцией Лоренца [11]. Для одиночного пика функция определяется как [12]

$$L(x) = \frac{1}{\pi} \frac{\frac{\Gamma}{2}}{(x-x_0)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2}, \quad (19)$$

где Γ – ширина на полувысоте лоренцева пика.

На рис. 5 точками показана спектральная характеристика и сплошной линией показана кривая, описывающая функцию Лоренца вблизи резонансной частоты.

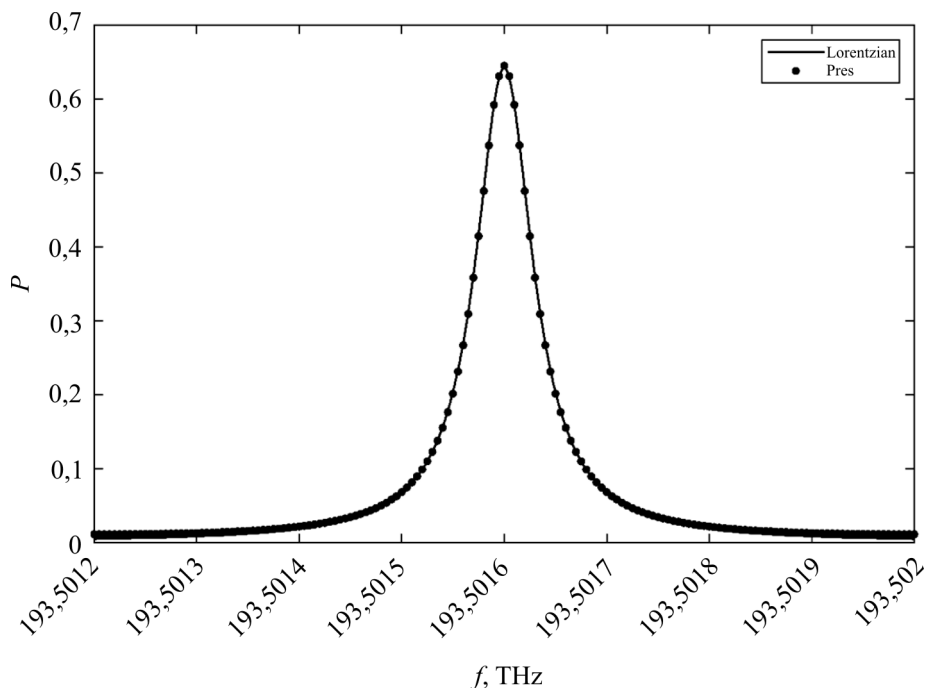


Рис. 5. Резонансный пик, аппроксимированный функцией Лоренца

Для КР выделяют несколько рабочих параметров резонатора – FSR, FWHM, Q -factor. Данные параметры приведены на рис. 4.

FSR (Free Spectral Range) является разностью между резонансными частотами [9]:

$$\text{FSR} = \frac{c}{n_{\text{eff}} \cdot L}, \quad (20)$$

FWHM (Full Width at Half Maximum) – ширина спектра на уровне минус 3 дБ резонансного выреза от максимального значения интенсивности, соответствующего уровню 0 дБ. Определяется следующим уравнением [9]:

$$\text{FWHM} = \frac{(1-t^2)c^2}{\pi n_{\text{eff}} L f^2}. \quad (11)$$

Q -factor или добротность резонатора может быть определена как полная энергия внутри резонатора, деленная на энергию, потерянную за один проход оптического излучения по замкнутому контуру. Добротность можно рассчитать отношением рабочей длины волны λ к ширине резонансного пика, измеренную в длинноволновом диапазоне:

$$Q = \frac{\lambda}{FWHM}. \quad (22)$$

2. Волоконно-оптический кольцевой резонатор

ВОКР может быть изготовлен при сварке двух оптических разветвителей между собой таким образом, что внутри замкнутого контура формируется «слабая» связь. Поэтому для создания контура используют разветвители с коэффициентами деления 90:10, 95:5, 99:1. Добротность волоконно-оптических резонаторов находится в пределах от 10^6 до 10^8 .

Оптические разветвители получают сплавным способом: два волокна с удаленными внешними оболочками перекручивают между собой и сплавляют при температуре, близкой к температуре плавления кварца, отслеживая в процессе соотношение мощностей на выходе. Схематически принцип работы разветвителя показан на рис. 6.

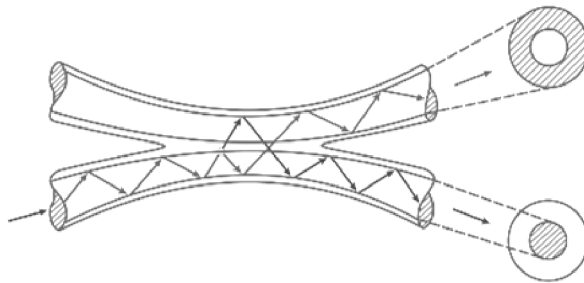


Рис. 6. Принцип работы сварного разветвителя

3. Методика измерения резонансных кривых и рабочих характеристик резонатора

Для экспериментального определения АЧХ методом сканирования центральной частоты был изготовлен волоконно-оптический резонатор длиной 10 м и с коэффициентом деления 99/1. Схема измерения спектральной характеристики резонатора представлена на рис. 7.

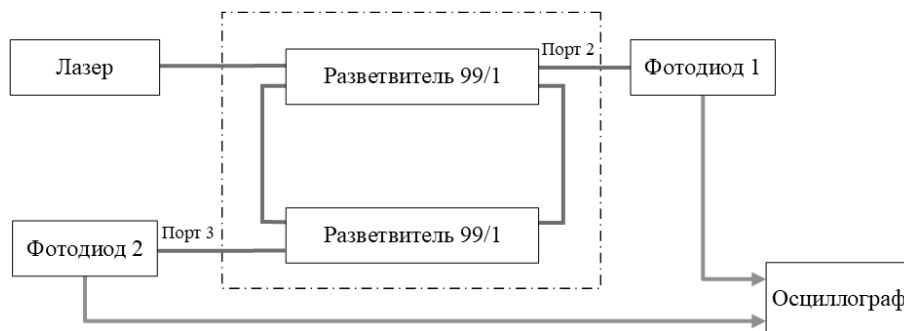


Рис. 7. Экспериментальная схема измерения спектральной характеристики

Для построения АЧХ и измерения параметров ВОКР применялся узкополосный перестраиваемый лазер PPCL300 фирмы Pure Photonics. Основное требование для лазера: ширина лазерного пика должна быть меньше ширины резонансного пика. По паспортным данным ширина пика выбранного лазера составляет не менее 100 кГц.

Рассмотрим экспериментальную схему: излучение с лазера попадает во входной порт резонатора, после в порт 2 и порт 3 подключаются фотоприемники, которые преобразуют оптический сигнал в электрический.

Лазер производит линейное изменение центральной частоты излучения с заданной скоростью перестройки ν , таким образом снимаемый сигнал с фотоприемников будет изменять и свою мощность в зависимости от АЧХ резонатора. Для этого фотоприемники подключаются к осциллографу. На осциллографе будет наблюдаться резонансный спектр (рис. 8), что соответствует теоретическим АЧХ.

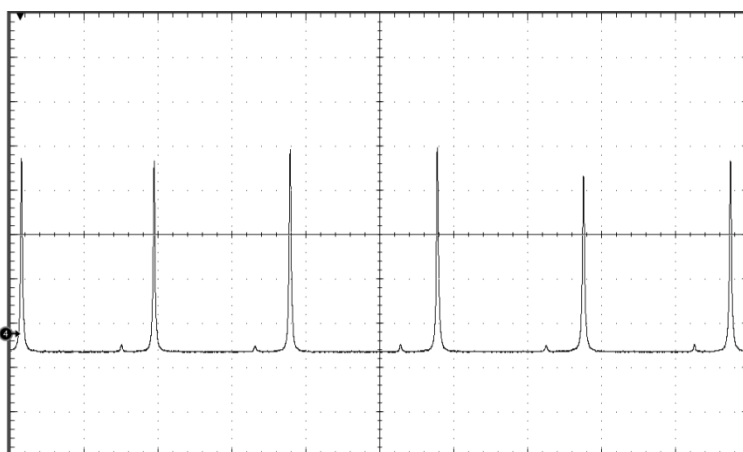


Рис. 8. Измеренный резонансный спектр на осциллографе

Полученные данные обрабатываются в Matlab. Программа находит максимальное значение представленного спектра по мощности и соответствующее значение по оси времени. В дальнейшем находим разницу между максимальными значениями во временном диапазоне Δt_{FSR} . С помощью данного значения считаем FSR в частотном диапазоне:

$$\text{FSR} = \nu \Delta t_{\text{FSR}}. \quad (23)$$

Измеряется несколько значений FSR для различных спектров и усредняется. В таблице указано среднее значение, полученное для данного резонатора.

Измерение ширины резонансного пика производится с помощью аппроксимации пика функцией Лоренца (19). На рис. 9 изображены один измеренный резонансный пик и кривая аппроксимирования. Один из параметров функции (19) является значением ширины на полувысоте.

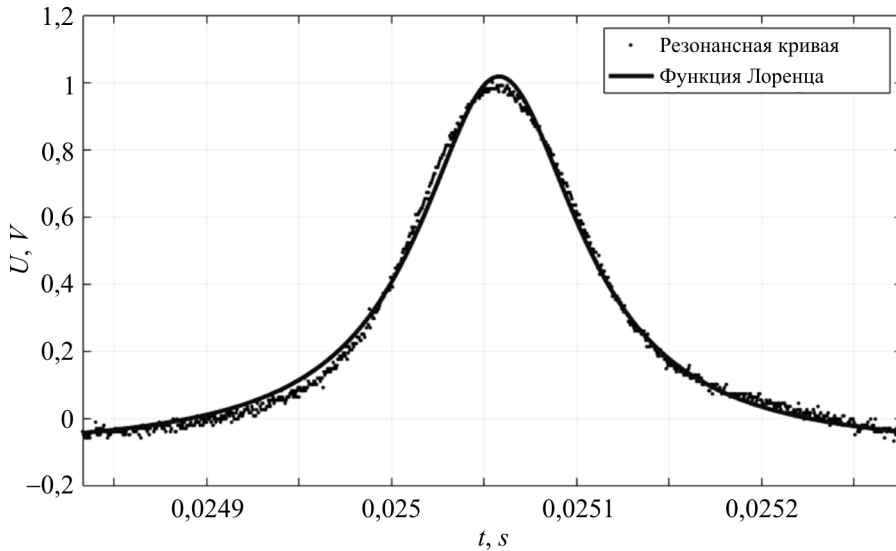


Рис. 9. Измеренная резонансная кривая, аппроксимированная функцией Лоренца

С помощью Matlab находим данное значение для нескольких резонансных пиков и усредняем. Измеренные параметры для изготовленного ВОКР приведены в таблице.

Параметры изготовленного образца ВОКР

Параметры резонатора, ед. измерения	Измеренные значения
FSR, МГц	29,9
FWHM, МГц	0,85
Q	$2 \cdot 10^8$

Выводы

С помощью модифицированного метода сканирования резонансного спектра были получены параметры изготовленного ВОКР. Полученные значения будут применены в разработке миниатюрного резонансного оптического гироскопа. Также возможно применение и в других приложениях.

Данная методика позволяет измерять параметры КР без дополнительных синхронизирующих элементов, что упрощает схему измерения спектральных характеристик КР.

Полученный результат имеет практическую ценность при разработке устройств на основе оптических резонаторов, например, при разработке миниатюрного резонансного гироскопа данная методика может использоваться как контрольная операция для отслеживания параметров чувствительного элемента (оптического резонатора)

Данная работа выполнена в рамках Программы государственной поддержки компаний-лидеров, разрабатывающих и обеспечивающих внедрение продуктов, сервисов и платформенных решений преимущественно на основе технологий и решений для цифровой трансформации приоритетных отраслей экономики и социальной сферы (договор № 2/549/2020 от 23.07.2020 г).

Список литературы

1. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator / R.W.P. Drever [et al.] // Applied Physics B. – 1983. – Т. 31, № 2. – P. 97–105.
2. Zhou X., Yu Q. Wide-range displacement sensor based on fiber-optic Fabry–Perot interferometer for subnanometer measurement // IEEE sensors journal. – 2010. – Т. 11. – №. 7. – P. 1602–1606.
3. Coddington I., Newbury N., Swann W. Dual-comb spectroscopy // Optica. – 2016. – 3. – P. 414–426.
4. Optoelectronic oscillator based on fiber ring resonator: overall system optimization and phase noise reduction / K. Saleh [et al.] // 2012 IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings. – IEEE, 2012. – P. 1–6.

5. Advances in gyroscope technologies / M.N. Armenise [et al.]. – Springer Science & Business Media. – 2010.
6. Resonant microphotonic gyroscope / W. Liang [et al.] // *Optica*. – 2017. – Т. 4, № 1. – P. 114–117.
7. Resonant micro-optic gyro using a short and high-finesse fiber ring resonator / H. Ma [et al.] // *Optics letters*. – 2015. – Т. 40, №. 24. – P. 5862–5865.
8. High-Q optical resonators: characterization and application to stabilization of lasers and high spectral purity microwave oscillators / O. Llopis [et al.] // *Laser Resonators and Beam Control XII – International Society for Optics and Photonics*. – 2010. – Т. 7579. – C. 75791B.
9. Menéndez R.J.P. Fiber-Optic Ring Resonator Interferometer // *Interferometry-Recent Developments and Contemporary Applications*. – Intech Open, 2018.
10. Rabus D.G. Integrated ring resonators. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
11. Determination of coupling regime of high-Q resonators and optical gain of highly selective amplifiers / Y. Dumeige [et al.] // *JOSA B*. – 2008. – Т. 25, № 12. – P. 2073–2080.
12. URL: <https://mathworld.wolfram.com/LorentzianFunction.html>.

References

1. Drever R.W.P. et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator. *Applied Physics B*, 1983, vol. 31, no. 2, pp. 97-105.
2. Zhou X., Yu Q. Wide-range displacement sensor based on fiber-optic Fabry-Perot interferometer for subnanometer measurement. *IEEE sensors journal*, 2010, vol. 11, no. 7, pp. 1602-1606.
3. Coddington I., Newbury N., Swann W. Dual-comb spectroscopy. *Optica*, 2016, 3, pp. 414-426.
4. Saleh K. et al. Optoelectronic oscillator based on fiber ring resonator: overall system optimization and phase noise reduction. *2012 IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings*. IEEE, 2012, pp. 1-6.
5. Armenise M.N. et al. Advances in gyroscope technologies. Springer Science & Business Media, 2010.
6. Liang W. et al. Resonant microphotonic gyroscope. *Optica*, 2017, vol. 4, no. 1, pp. 114-117.

7. Ma H. et al. Resonant micro-optic gyro using a short and high-finesse fiber ring resonator. *Optics letters*, 2015, vol. 40, no. 24, pp. 5862-5865.

8. Llopis O. et al. High-Q optical resonators: characterization and application to stabilization of lasers and high spectral purity microwave oscillators. *Laser Resonators and Beam Control XII*. International Society for Optics and Photonics, 2010, vol. 7579, 75791B p.

9. Menéndez R.J.P. Fiber-Optic Ring Resonator Interferometer. *Interferometry-Recent Developments and Contemporary Applications*. Intech Open, 2018.

10. Rabus D.G. Integrated ring resonators. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.

11. Dumeige Y. et al. Determination of coupling regime of high-Q resonators and optical gain of highly selective amplifiers. *JOSA B*, 2008, vol. 25, no. 12, pp. 2073-2080.

12. URL: <https://mathworld.wolfram.com/LorentzianFunction.html>

Получено 05.09.2021