

ДИСКОВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ ДЛЯ ДАТЧИКОВ УГЛОВОЙ СКОРОСТИЕ. А. ВЬЮЖАНИНА^{1,2}, В. В. КРИШТОП²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, Пермь, Россия
E-mail: vyuzhaninaea@gmail.com

²Пермская научно-производственная приборостроительная компания, 614990, Пермь, Россия
E-mail: krishtop@list.ru

Дисковые и кольцевые резонаторы используются в качестве чувствительных элементов в датчиках угловых скоростей. Чувствительность или минимально детектируемая скорость вращения определяется добротностью резонатора. Предложен подход к реализации новых типов гироскопов на дисковых минирезонаторах с модами шепчущей галереи, теоретически и экспериментально методом анализа резонансной кривой определены характеристики двух образцов пассивных дисковых резонаторов из CaF_2 и MgF_2 (диаметр 5 мм). Полученная экспериментально добротность составила порядка $5 \cdot 10^8$, что совпадает с теоретической оценкой. Оцененная в $\Omega_{\min} = 0,3^\circ / \text{ч}$ минимальная детектируемая угловая скорость позволяет применять такие гироскопы на резонаторах шепчущей галереи в широком спектре различных устройств (в робототехнике, беспилотниках и др.).

Ключевые слова: дисковый резонатор, добротность, чувствительный элемент, датчик угловой скорости, моды шепчущей галереи

Введение. Высокодобротные минирезонаторы, в том числе минирезонаторы на модах шепчущей галереи (МШГ), активно изучаются в настоящее время [1]. Они широко используются в различных областях научных исследований, в частности, для стабилизации частоты излучения лазеров [2], создания конверторов частоты и фотонных фильтров [3—5], генерации частотных оптических гребенок [6—9]. Такие гребенки могут применяться в телекоммуникационных системах в качестве источников света для мультиплексирования с разделением по длине волны (WDM) [10, 11] или в спектроскопии сверхвысокого разрешения [12, 13]. Резонаторы на МШГ наиболее перспективны для создания миниатюрных, энергоэффективных компонентов оптоэлектроники, фотоники и радиофотоники со скоростью передачи и обработки информации, превышающей традиционные электронные компоненты [14]. Микродиски из диоксида кремния были применены в схемах создания оптоэлектронного генератора вместо волоконно-оптической линии задержки [15, 16]. Высокая добротность и, следовательно, большое время жизни фотонов в минирезонаторах на МШГ открывает совершенно новые перспективы для целей спектроскопии и создания датчиков и сенсоров, в которых изменение добротности или резонансной частоты может служить для измерения свойств окружающей среды или малых объемов вещества (вплоть до отдельных молекул), нанесенного на поверхность резонатора. Резонатор может также использоваться для измерения внешних параметров — температуры, давления, смещения и т.д. [17, 18].

Особенно перспективным представляется использование резонаторов на МШГ вместо оптического волокна или кольцевого интерферометра для создания гироскопов [19, 20]. Ожидается, что такие гироскопы будут иметь гораздо меньший уровень обратного отражения и поляризационных шумов по сравнению с традиционными, основанными на волоконных интерферометрах.

Таким образом, целью настоящей статьи является разработка подходов к созданию новых типов гироскопов с чувствительным элементом в виде дисковых резонаторов на МШГ.

Такие гироскопы имеют малые размеры и высокую точность измерения и могут быть использованы в робототехнических системах, высокоточном прецизионном оборудовании, беспилотных летательных аппаратах и др.

Аналитический расчет характеристик пассивного дискового резонатора. При вводе излучения в оптический резонатор в нем возникают стоячие волны, длина которых зависит от геометрических и оптических характеристик резонатора. Спектральный интервал между соседними минимумами или максимумами называется свободным спектральным диапазоном (FSR). Для мод шепчущей галереи дискового резонатора радиусом R [21]:

$$\text{FSR} = \frac{\lambda^2}{2\pi n R}, \quad (1)$$

где λ — длина волны, n — показатель преломления материала резонатора.

Исследуемые в работе резонаторы (диаметром 5 мм) изготовлены из CaF_2 и MgF_2 . Показатель преломления n для MgF_2 определяется дисперсионной формулой Селмейера [22]:

$$n^2 - 1 = \frac{0,48755108\lambda^2}{\lambda^2 - 0,04338408^2} + \frac{0,39875031\lambda^2}{\lambda^2 - 0,09461442^2} + \frac{2,3120353\lambda^2}{\lambda^2 - 23,793604^2}. \quad (2)$$

Для CaF_2 [23]:

$$n^2 - 1 = \frac{0,5675888\lambda^2}{\lambda^2 - 0,050263605^2} + \frac{0,4710914\lambda^2}{\lambda^2 - 0,1003909^2} + \frac{3,8484723\lambda^2}{\lambda^2 - 34,649040^2}, \quad (3)$$

где $\lambda = 1550$ нм. Из (2) и (3) получаем $n_{\text{MgF}_2} = 1,3705$, $n_{\text{CaF}_2} = 1,4260$.

Подставив полученные значения показателей преломления в формулу (1), получим свободный спектральный диапазон для дисковых резонаторов из фторида кальция и фторида магния: $\text{FSR}_{\text{CaF}_2} = 53$ пм, $\text{FSR}_{\text{MgF}_2} = 55$ пм.

Экспериментальная установка. В настоящей работе использован один из наиболее простых методов ввода излучения в дисковый резонатор — с помощью биконического оптического волокна. Биконическое волокно получено методом локального нагрева и вытягивания из одномодового оптического волокна до диаметра области перетяжки порядка 3 мкм. Как показывает анализ литературы, такой способ характеризуется минимальными потерями ввода и в одномодовом режиме обеспечивает режим критической связи.

Схематично установка для возбуждения МШГ в исследуемых оптических резонаторах представлена на рис. 1. Оснастка 1 с закрепленным на нее биконическим волокном 2 устанавливалась на столик с четырехосевыми высокоточными позиционерами (Δx , Δy , Δz , $\Delta \text{Oz} \sim 50$ нм) 3 и юстировалась относительно дискового резонатора 4, установленного на столик с вакуумным прижимом 5. Контроль подвижек выполнялся с помощью компьютера 6. Для оптимального освещения области возбуждения мод шепчущей галереи использовалась светодиодная лента 7, подключенная к источнику питания Instek GPS-74303 8. Для оптимального обзора установлены две камеры технического зрения: над областью стыковки 9 и с торца 10, для контроля высоты биконического волокна относительно резонатора.

Волокно располагалось в экваториальной области резонатора, между волокном и резонатором выдержан зазор порядка 150 нм.

Ввод излучения в резонатор на МШГ осуществлялся с помощью перестраиваемого лазера в диапазоне длин волн от 1510 до 1590 нм. После прохождения через резонатор излучение поступало на фотоприемник Thorlabs PDA50B-EC 12, где происходило преобразование светового сигнала в электрический, который затем передавался на осциллограф Agilent Technologies DS09404A 13, где наблюдалась спектральная зависимость.

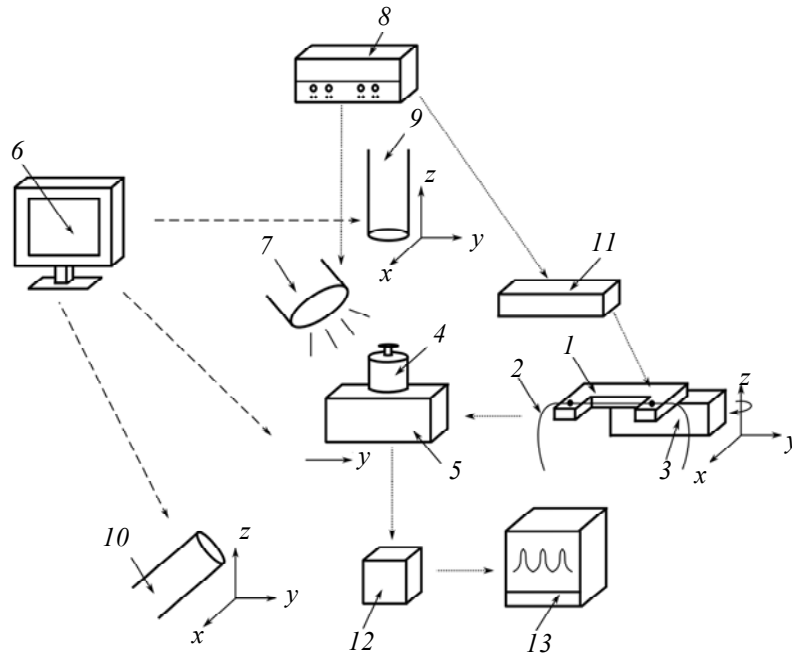


Рис. 1

Расчет основных характеристик резонатора. Определить добротность возможно, измерив время затухания света, с помощью динамического метода биений, а также термодинамических флуктуаций в резонаторе. В настоящей работе использован метод наблюдения и анализа резонансной кривой.

Метод анализа резонансной кривой заключался в следующем: полученная на осциллографе зависимость напряжения от времени, соответствующая зависимости интенсивности излучения на выходе дискового резонатора, сравнивалась со спектром источника излучения, прошедшего через биконическое волокно. Наличие спектральных вырезов максимальной амплитуды означало, что ввод в резонатор выполнен успешно. Для определения оптических характеристик резонатора из всей спектральной картины выделялся один пик и сопоставлялся с пиком встроенного в источник излучения эталонного резонатора Фабри—Перо с известными характеристиками.

На рис. 2 представлена зависимость напряжения от времени, соответствующая зависимости интенсивности излучения от частоты на выходе дискового резонатора из CaF_2 (а, б) и MgF_2 (в, г). Кривая 1 соответствует излучению на выходе из конического волокна, без связи с резонатором, 2 — возбуждению мод шепчущей галереи в дисковом резонаторе.

Для определения оптических потерь резонатора, связанных с вводом излучения, измерена входная оптическая мощность до взаимодействия элемента ввода с резонатором ($I_{\text{вх}}$) и выходная мощность ($I_{\text{вых}}$), полученная после связи биконического волокна с исследуемым образцом:

$$\alpha = 10 \lg \left(\frac{I_{\text{вх}}}{I_{\text{вых}}} \right) = 10 \lg \left(\frac{5,33}{2,93} \right) = 2,60 \text{ дБ} .$$

Таким образом, потери на ввод излучения в дисковый резонатор составили $\alpha = 2,60$ дБ.

Основные характеристики резонаторов получены с использованием рис. 2, б, г. Для образца из CaF_2 :

- 1) спектральный интервал между длинами волн соседних пиков $\text{FSR}=52$ пм;
- 2) по рис. 2, б определены полная ширина на полувысоте амплитуды (FWHM), а также резонансная длина волны (λ_{res}). Добротность рассчитана по формуле [24]:

$$Q = \frac{\lambda_{\text{res}}}{\text{FWHM}} . \tag{4}$$

Таким образом, $Q = (5,2 \pm 0,18) \cdot 10^8$.

Аналогично из рис. 2, *з* определены для образца из MgF_2 : $\text{FSR} = 51$ пм, $Q = (4,8 \pm 0,15) \cdot 10^8$.

Оценена минимальная детектируемая угловая скорость данных резонаторов, важнейшая характеристика чувствительного элемента гироскопа, по формуле [25]:

$$\Omega_{\min} = \frac{\lambda}{2R} \frac{\text{FWHM}}{\sqrt{n_{\text{ph}} \eta_{\text{D}} \tau}}, \quad (5)$$

где n_{ph} — число фотонов в секунду, η_{D} — квантовая эффективность фотодетектора, τ — время усреднения. Для $R = 2,5$ мм, $\lambda = 1550$ нм, $\text{FWHM} = 10$ кГц, $n_{\text{ph}} = 8 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$, $\eta_{\text{D}} = 0,5$, $\tau = 1$ с получена минимальная угловая скорость $\Omega_{\min} = 0,3$ °/ч.

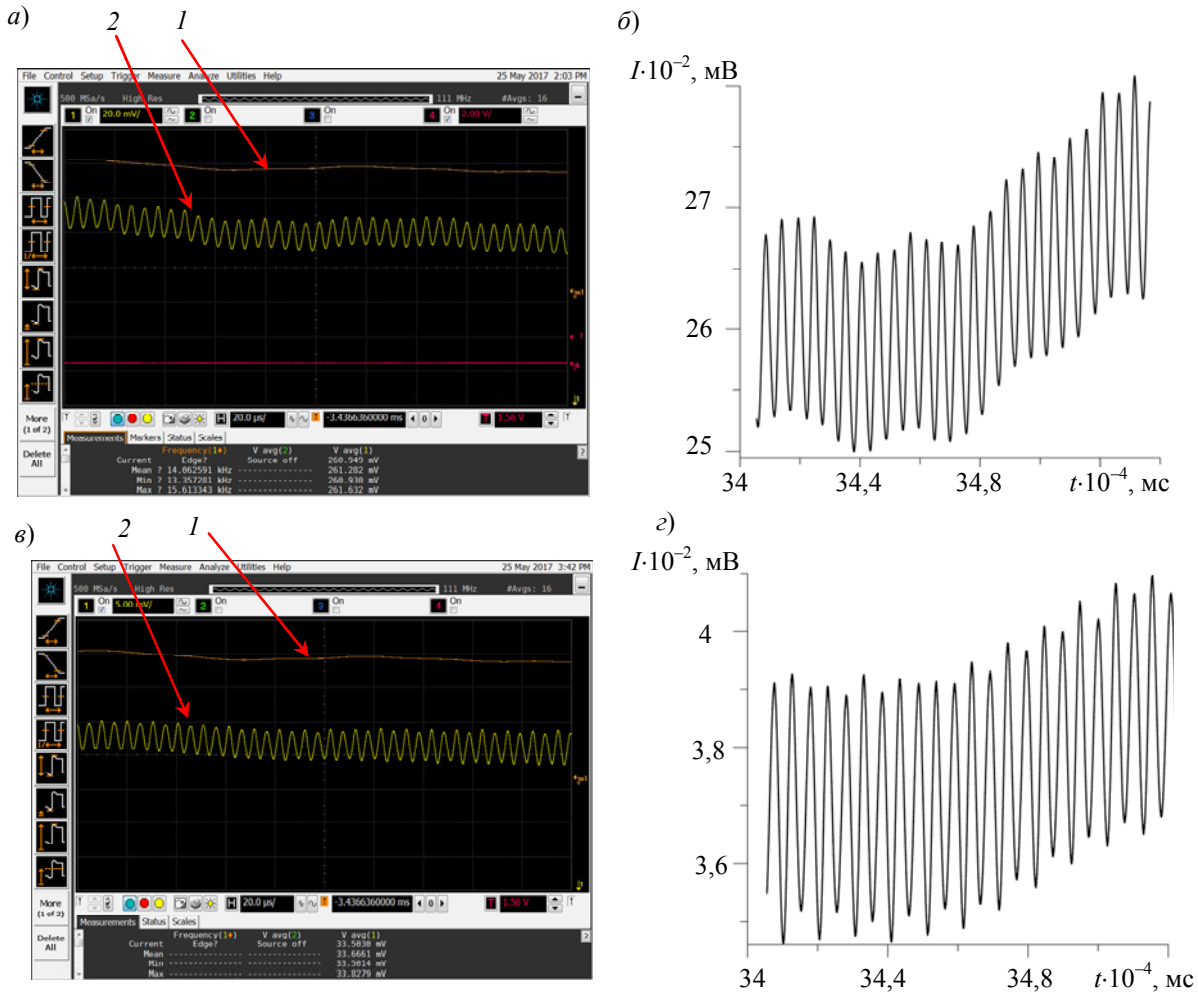


Рис. 2

Выводы. В работе рассмотрен подход к реализации новых типов гироскопов на дисковых минирезонаторах с модами шепчущей галереи. Методом наблюдения и анализа резонансной кривой определены характеристики двух образцов пассивных дисковых резонаторов из CaF_2 и MgF_2 . Теоретически рассчитанный свободный спектральный диапазон составил: $\text{FSR}_{\text{CaF}_2} = 53$ пм, $\text{FSR}_{\text{MgF}_2} = 55$ пм; полученные экспериментальные значения равны соответственно 52 и 51 пм. Отметим, что теоретические и экспериментальные значения для FSR хорошо согласуются.

Показано, что добротность резонаторов из CaF_2 и MgF_2 составила $(5,2 \pm 0,18) \cdot 10^8$ и $(4,8 \pm 0,15) \cdot 10^8$ соответственно, что является высоким значением.

Оценка минимальной угловой скорости, детектируемой чувствительным элементом на рассмотренных дисковых резонаторах, дала величину $\Omega_{\min} = 0,3$ °/ч, что позволяет приме-

нять гироскопы с такими чувствительными элементами в широком спектре различных устройств — в робототехнике, беспилотных летательных аппаратах и др.

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. Зарецкая Г. А., Дроздовский А. В., Калиникоз Б. А. Метод расчета собственных резонансных частот оптических резонаторов с модами шепчущей галереи // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 1. С. 56—62.
2. Галиев Р. Р., Кондратьев Н. М., Павлов Н. Г., Лобанов В. Е., Биленко И. А. Генерация частотной гребенки многочастотным лазером, затянутым на высокодобротный резонатор // Тр. шк.-семинара „Волны-2019“. Когерентные и нелинейные волновые явления. С. 36—37.
3. Minet Y., Reis L., Szabados J., Werner Ch. S., Zappe H., Buse K., and Breunig I. Pockels-effect-based adiabatic frequency conversion in ultrahigh-Q microresonators // Opt. Expr. 2020. Vol. 28. P. 2939—2947.
4. Huibo Fan, Xun Zhang, Jinyi Zhao, Shengjun Li, Shiyue Hua, Mingming Zhao, Yong Hu, Wenjie Wan, Yanhua Zhai, Jianming Wen, Xiaoshun Jiang, and Min Xiao. Controllable coupling between an ultra-high-Q microtoroid cavity and a graphene monolayer for optical filtering and switching applications // Opt. Express. 2020. Vol. 28. P. 7906—7916.
5. Xin-Xin Hu, Jia-Qi Wang, Yuan-Hao Yang, Joshua B. Surya, Yan-Lei Zhang, Xin-Biao Xu, Ming Li, Chun-Hua Dong, Guang-Can Guo, Hong X. Tang, and Chang-Ling Zou. All-optical thermal control for second-harmonic generation in an integrated microcavity // Opt. Express. 2020. Vol. 28. P. 11144—11155.
6. Kondratiev N. M., Cherenkov A. V., and Lobanov V. E. Kerr frequency comb generation and soliton dynamics caused by forward-backward wave interaction in WGM microresonators // 2019 Conf. on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conf. OSA Technical Digest. 2019. Paper ef_p_26. (23.12.2019).
7. Tanabe T., Fujii S. & Suzuki R. Review on microresonator frequency combs // Japanese J. of Applied Physics. 2019. Vol. 58(SJ). P. SJ0801.
8. Yun Zhao, Xingchen Ji, Bok Young Kim, Prathamesh S. Donvalkar, Jae K. Jang, Chaitanya Joshi, Mengjie Yu, Chaitali Joshi, Domenegueti R. R., Barbosa F. A. S., Nussenzveig P., Yoshitomo Okawachi, Lipson M., and Gaeta A. L. Visible nonlinear photonics via high-order-mode dispersion engineering // Optica. 2020. Vol. 7. P. 135—141.
9. Kippenberg T. J., Gaeta A. L., Lipson M., & Gorodetsky M. L. Dissipative Kerr solitons in optical microresonators // Science. 2018. Vol. 361(6402). eaan8083.
10. Zhang M. et al. Electro-optic frequency comb generation in ultrahigh-Q integrated lithium niobate micro-resonators // CLEO: QELS_Fundamental Science. Optical Society of America, 2018. P. FW3E. 4.
11. Fülöp A., Mazur M., Lorences-Riesgo A., Eriksson T. A., Pei-Hsun Wang, Yi Xuan, Leaird D. E., Minghao Qi, Andrekson P. A., Weiner A. M., and Torres-Company V. Long-haul coherent communications using microresonator-based frequency combs // Opt. Express. 2017. Vol. 25. P. 26678—26688.
12. Coddington I., Newbury N., and Swann W. Dual-comb spectroscopy // Optica. 2016. Vol. 3. P. 414—426.
13. Deniel L., Weckenmann E., Pérez Galacho D., Alonso-Ramos C., Boeuf F., Vivien L., and Marris-Morini D. Frequency-tuning dual-comb spectroscopy using silicon Mach-Zehnder modulators // Opt. Express. 2020. Vol. 28. P. 10888—10898.
14. Городецкий М. Л. Основы теории оптических микрорезонаторов. М.: Физ. ф-т МГУ им. М. В. Ломоносова, 2010. 204 с.
15. Volyanskiy K., Salzenstein P., Tavernier H., Pogurmirskiy M., Chembo Y. K., & Larger L. Compact optoelectronic microwave oscillators using ultra-high Q whispering gallery mode disk-resonators and phase modulation // Optics Express. 2010. Vol. 21, N 18. P. 22358—22363.
16. Saleh K., Henriët R., Diallo S., Lin G., Martinenghi R., Balakireva I. V., ... & Chembo Y. K. Phase noise performance comparison between optoelectronic oscillators based on optical delay lines and whispering gallery mode resonators // Optics express. 2014. Vol. 26, N 22. P. 32158—32173.

17. Городецкий М. Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью. М.: Физматлит, 2011. 416 с.
18. Sinclair M., Gallacher K., Sorel M., Bayley J. C., McBrearty E., Millar R. W., Hild S., and Paul D. J. 1.4 million Q factor Si₃N₄ micro-ring resonator at 780 nm wavelength for chip-scale atomic systems // Opt. Express. 2020. Vol. 28. P. 4010—4020.
19. Микляшев А. В. Погрешность волоконно-оптического гироскопа при угловых колебаниях // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 11. С. 982—988.
20. Вьюжанина Е. А., Гилев Д. Г., Струк В. К. Малогабаритные гироскопы на оптических резонаторах // 4-я Всерос. науч.-техн. конф. „Навигация, наведение и управление летательными аппаратами“. Тез. докл. М.: ГосНИИАС, 2019. С. 226—229.
21. Wu J., Guo X., Zhang A. P., and Tam H.-Y. Rapid 3D μ -printing of polymer optical whispering-gallery mode resonators // Optics express. 2015. Is. 23. P. 29708—29714. <https://doi.org/10.1364/OE.23.029708>.
22. Dodge M. J. Refractive properties of magnesium fluoride // Appl. Opt. 1984. Vol. 23. P. 1980—1985.
23. Malitson H. A redetermination of some optical properties of calcium fluoride // Appl. Opt. 1963. Vol. 2. P. 1103—1107.
24. Brambilla G. et al. Optical fiber nanowires and microwires: fabrication and applications // Advances in Optics and Photonics 1. 2009. P. 107—161.
25. Vannahme C. et al. Integrated optical Ti: LiNbO₃ ring resonator for rotation rate sensing // Proc. to the 13th Europ. Conf. on Integrated Optics. WE1. IEEE, Copenhagen, 2007.

Сведения об авторах

- Елена Александровна Вьюжанина** — аспирант; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра прикладной математики; Пермская научно-производственная приборостроительная компания, научно-исследовательский институт радиофотоники и оптоэлектроники; начальник бюро; E-mail: vyuzhaninaea@gmail.com
- Виктор Владимирович Криштон** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Пермская научно-производственная приборостроительная компания, научно-исследовательский институт радиофотоники и оптоэлектроники; главный научный сотрудник; E-mail: krishtop@list.ru

Поступила в редакцию
18.06.2020 г.

Ссылка для цитирования: Вьюжанина Е. А., Криштон В. В. Дисковые резонаторы для датчиков угловой скорости // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 9. С. 823—829.

DISC RESONATORS FOR ANGULAR VELOCITY SENSORS

E. A. Vyuzhanina^{1,2}, V. V. Krishtop²

¹Perm National Research Polytechnic University, 614990, Perm, Russia
E-mail: vyuzhaninaea@gmail.com

²Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company PJSC, 614990, Perm, Russia
E-mail: krishtop@list.ru

Disc and ring resonators are used as sensitive elements in angular velocity sensors. The sensitivity, or minimum detectable angular velocity is determined by the quality factor of the resonator. An approach is proposed for implementation of new types of gyroscopes based on disk mini-resonators with whispering gallery modes is proposed, and characteristics of two samples of passive disk resonators with a diameter of 5 mm, made of CaF₂ and MgF₂, are determined theoretically and experimentally by analyzing the resonance curve. The quality factor obtained from experimental data comprises about 5·10⁸ and coincides with the theoretical result. The derived estimate for minimum detectable angular velocity $\Omega_{\min} = 0.3^\circ/\text{h}$ allows to use such gyroscopes with whispering gallery resonators in a wide range of different devices, e.g., robotics, drones, etc.

Keywords: disk resonator, quality factor, sensitive element, angular rate sensor, whispering gallery modes

REFERENCES

- Zaretskaya G.A., Drozdovskiy A.V., Kalinikos B.A. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2017, no. 1, pp. 56–62. (in Russ.)
- Galiyev R.R., Kondrat'yev N.M., Pavlov N.G., Lobanov V.E., Bilenko I.A. *Trudy shkoly-seminara "Volny-2019". Kogerentnyye i nelineynyye volnovyye yavleniya* (Proceedings of the School-Seminar "Waves-2019". Coherent and Nonlinear Wave Phenomena), pp. 36–37.
- Minet Y., Reis L., Szabados J., Werner Ch.S., Zappe H., Buse K., and Breunig I. *Opt. Express*, 2020, no. 28, pp. 2939–2947.
- Huibo Fan, Xun Zhang, Jinyi Zhao, Shengjun Li, Shiyue Hua, Mingming Zhao, Yong Hu, Wenjie Wan, Yanhua Zhai, Jianming Wen, Xiaoshun Jiang, and Min Xiao. *Opt. Express*, 2020, no. 28, pp. 7906–7916.
- Xin-Xin Hu, Jia-Qi Wang, Yuan-Hao Yang, Joshua B. Surya, Yan-Lei Zhang, Xin-Biao Xu, Ming Li, Chun-Hua Dong, Guang-Can Guo, Hong X. Tang, and Chang-Ling Zou. *Opt. Express*, 2020, no. 28, pp. 11144–11155.
- Kondratiev N.M., Cherenkov A.V., and Lobanov V.E. *2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference*, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2019), paper ef_p_26. (23.12.2019).
- Tanabe T., Fujii S., & Suzuki R. *Japanese journal of applied physics*, 2019, no. SJ(58), pp. SJ0801.
- Zhao Y., Ji X., Kim B.Y., Donvalkar P.S., Jang J.K., Joshi Ch., Yu M., Joshi Ch., Domenegueti R.R., Barbosa F.A.S., Nussenzevig P., Okawachi Y., Lipson M., and Gaeta A.L. *Optica*, 2020, no. 7, pp. 135–141.
- Kippenberg T.J., Gaeta A.L., Lipson M., & Gorodetsky M.L. *Science*, 2018, no. 6402(361), pp. eaan8083.
- Zhang M. et al. *CLEO: QELS_Fundamental Science*, Optical Society of America, 2018, pp. FW3E. 4.
- Fülöp A., Mazur M., Lorences-Riesgo A., Eriksson T.A., Wang P.-H., Xuan Y., Leaird D.E., Qi M., Andrekson P.A., Weiner A.M., and Torres-Company V. *Opt. Express*, 2017, no. 25, pp. 26678–26688.
- Coddington I., Newbury N., and Swann W. *Optica*, 2016, no. 3, pp. 414–426.
- Deniel L., Weckenmann E., Galacho D.P., Alonso-Ramos C., Boeuf F., Vivien L., and Marris-Morini D. *Opt. Express*, 2020, no. 28, pp. 10888–10898.
- Gorodetskiy M.L. *Osnovy teorii opticheskikh mikrorezonatorov* (Fundamentals of the Theory of Optical Microcavities), Moscow, 2010, 204 p. (in Russ.)
- Volyanskiy K., Salzenstein P., Tavernier H., Pogurmirskiy M., Chembo Y.K., & Larger L. *Optics Express*, 2010, no. 21(18), pp. 22358–22363.
- Saleh K., Henriët R., Diallo S., Lin G., Martinenghi R., Balakireva I. V., ... & Chembo Y.K. *Optics Express*, 2014, no. 26 (22), pp. 32158–32173.
- Gorodetskiy M.L. *Opticheskiye mikrorezonatory s gigantskoy dobrotnost'yu* (Giant Q Optical Microcavities), Moscow, 2011, 416 p. (in Russ.)
- Sinclair M., Gallacher K., Sorel M., Bayley J.C., McBrearty E., Millar R.W., Hild S., and Paul D.J. *Opt. Express*, 2020, no. 28, pp. 4010–4020.
- Miklyashev A.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 11(62), pp. 982–988. (in Russ.)
- Vyuzhanina E.A., Gilev D.G., Struk V.K. *Navigatsiya, navedeniye i upravleniye letatel'nymi apparatami* (Navigation, Guidance and Control of Aircraft), Proc. Fourth All-Russian Scientific and Technical Conference, Moscow, 2019, pp. 226–229. (in Russ.)
- Wu J., Guo X., Zhang A.P., and Tam H.-Y. *Optics Express*, 2015, is. 23, pp. 29708–29714, <https://doi.org/10.1364/OE.23.029708>.
- Dodge M.J. *Appl. Opt.*, 1984, no. 23, pp. 1980–1985.
- Malitson H. *Appl. Opt.*, 1963, no. 2, pp. 1103–1107.
- Brambilla G. et al. *Advances in Optics and Photonics 1*, 2009, pp. 107–161.
- Vannahme C. et al. *Proceedings to the 13th European Conference on Integrated Optics, WE1* (IEEE, Copenhagen, 2007), 2007.

Data on authors

- Elena A. Vyuzhanina** — Post-Graduate Student; Perm National Research Polytechnic University, Department of Applied Mathematics; Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company PJSC, Research Institute of Radiophotonics and Optoelectronics; Head of the Bureau;
E-mail: vyuzhaninaea@gmail.com
- Victor V. Krishtop** — Dr. Sci., Professor; Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company PJSC, Research Institute of Radiophotonics and Optoelectronics; Chief Researcher; E-mail: krishtop@list.ru

For citation: Vyuzhanina E. A., Krishtop V. V. Disc resonators for angular velocity sensors. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 9. P. 823–829 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-9-823-829