

УДК 681.7.068

К.А. Овчинников

Пермская научно-производственная приборостроительная компания,
Пермь, Российская Федерация
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОПТИЧЕСКУЮ СХЕМУ РЕЗОНАТОРНОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Представлено исследование влияния температуры на оптическую схему резонаторного волоконно-оптического гироскопа (РВОГ), а также проведено исследование влияния температуры на полуволновое напряжение фазового модулятора, влияние на спектры и мощность суперлюминесцентного диода, на выходную амплитудно-частотную характеристику волоконно-оптического кольцевого резонатора. Результаты исследования показали, что в диапазоне температур от -30 до $+50$ °C оказывает существенное влияние на параметры оптической схемы РВОГ. Данное исследование является важным этапом разработки РВОГ, указывающее на то, какие параметры необходимо особо тщательно контролировать при дальнейшей разработке датчика для обеспечения температурной стабильности устройства.

Ключевые слова: оптический кольцевой резонатор, оптический гироскоп, датчик угловой скорости, суперлюминесцентный диод, полуволновое напряжение.

K.A. Ovchinnikov

Perm Scientific and Production Instrument-Making Company,
Perm, Russian Federation
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

STUDY OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE OPTICAL SCHEME OF A RESONATOR FIBER-OPTIC GYROSCOPE

The article presents a study of the temperature effect on the optical circuit of a resonator fiber-optic gyroscope (RFOG), as well as a study of the temperature effect on the half-wave voltage of the phase modulator, the effect on the spectra and power of the superluminescent diode, and the output amplitude-frequency characteristic of the fiber-optic ring resonator. The results of the study showed that in the temperature range from -30 to $+50$ °C has a significant effect on the parameters of the optical circuit of the RFOG. This study is an important stage in the development of the RFOG, indicating which parameters must be especially carefully monitored during further development of the sensor to ensure the temperature stability of the device.

Keywords: optical ring resonator, optical gyroscope, angular velocity sensor, superluminescent diode, half-wave voltage.

Введение

Миниатюризация является важной задачей в современной науке и технике, которая также находит развитие в области волоконно-оптических датчиков. Уменьшение размеров датчиков позволяет расширять сферы их применения и решать сложные задачи, не доступные ранее. В области волоконно-оптической гироскопии перспективным кандидатом для решения задачи миниатюризации являются волоконно-оптические резонаторы [1], позволяющие уменьшить габариты чувствительного элемента за счет многократного прохождения оптического пути внутри замкнутой полости резонатора [2–5].

Последнее время все больше исследований касаются новой схемы резонаторных волоконно-оптических гироскопов, работающих на широкополосном излучении, которое позволяет снизить влияние шумов обратно рассеянного излучения и повысить стабильность работы резонаторных гироскопов [6–9].

Проведено экспериментальное исследование влияния температуры окружающей среды в диапазоне от -30 до $+50$ °С на оптическую схему резонаторного волоконно-оптического гироскопа с длиной резонансного контура 50 м и с суперлюминесцентным диодом с центральной длиной волны 1550 нм в качестве источника излучения. Исследование температурного влияния на оптическую схему в целом и на отдельные ее составляющие является важным этапом при разработке устройств, поскольку помогает определить критические параметры для обеспечения температурной стабильности итогового устройства.

Описание резонаторного волоконно-оптического гироскопа

Волоконно-оптический кольцевой резонатор (ВОКР), применяемый в РВОГ, образован двумя волоконно-оптическими делителями, в которых возникает слабая связь, и волоконного контура, который вместе с делителями образует замкнутую полость резонатора. За счет многократного прохождения оптического пути по замкнутой траектории излучение в таком устройстве значительно увеличивает влияние эффекта Саньяка, тем самым обеспечивая высокую чувствительность даже при малых длинах контура. На рис. 1 представлена схема исследуемого резонаторного волоконно-оптического гироскопа.

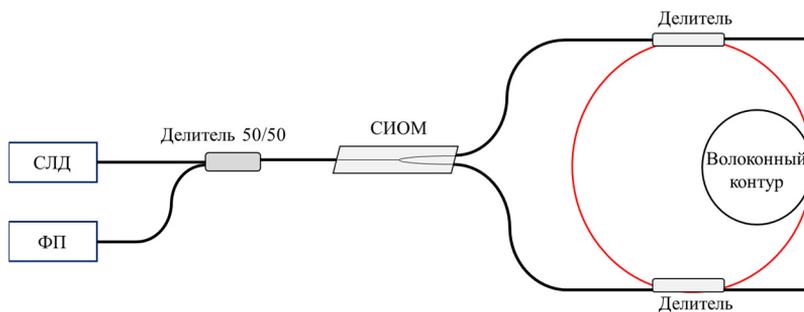


Рис. 1. Схема резонаторно-интерферометрического волоконно-оптического гироскопа

Здесь источником излучения служит суперлюминесцентный диод (СЛД). Свет от источника, проходя через делитель 50/50, попадает на многофункциональную интегрально-оптическую схему (СИОМ), которая выступает в качестве поляризатора, делителя и фазового модулятора. В СИОМ излучение разделяется по двум каналам, каждый из которых связан с ВОКР. После попадания в ВОКР оба излучения движутся во взаимно противоположных направлениях: в направлении по часовой (CW) и против часовой стрелки (CCW). После прохождения ВОКР оба излучения возвращаются к СИОМ, где каждое излучение испытывает дополнительное частотное смещение, вызванное модуляцией, и затем оба излучения интерферируют. Результирующее излучение, проходя через делитель 50/50, попадает на фотодиод.

Основными элементами данной схемы являются СЛД, СИОМ, ВОКР. Наиболее критичными параметрами для работы схемы являются: полуволновое напряжение СИОМ, мощность и центральная дина волны СЛД, амплитудно-частотная характеристика ВОКР и выходная оптическая мощность всей схемы. В данной работе рассмотрены изменения этих параметров в диапазоне температур от -30 до $+50$ °С.

В работе исследовалась схема РВОГ с длиной ВОКР, равной 50 м, и коэффициентом деления 80/20. Параметры ВОКР при комнатной температуре составили (таблица).

Параметры ВОКР при комнатной температуре

Параметры	Значение
FSR, МГц	4,10
FWHM, кГц	430,34
Finesse	9,53

Центральная длина волны исследуемого СЛД при комнатной температуре составляет 1555 нм, ширина спектра составляет 40 нм.

Результаты исследований

В ходе эксперимента схема РВОГ помещалась в термокамеру, в которой задавалась постоянная температура в диапазоне от -30 до $+50$ °С с шагом в 10 °С. При установлении постоянной температуры измерялись исследуемые параметры СЛД, СИОМ, ВОКР. На рис. 2 представлена амплитудно-частотная характеристика ВОКР при разных значениях температур.

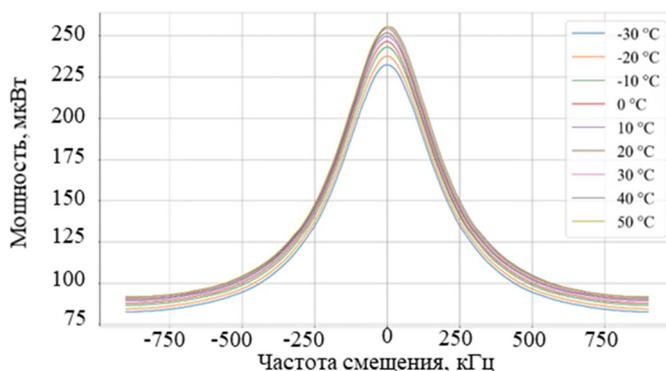


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика ВОКР

Анализ данных показывает, что изменение параметров FSR, FWHM, Finesse составляет не более 5 % в указанном диапазоне температур. При этом уровень выходной мощности при постоянном уровне входной мощности, представленный на рис. 3, изменяется в пределах 10 %, что согласуется с ранее проведенным исследованием [10].

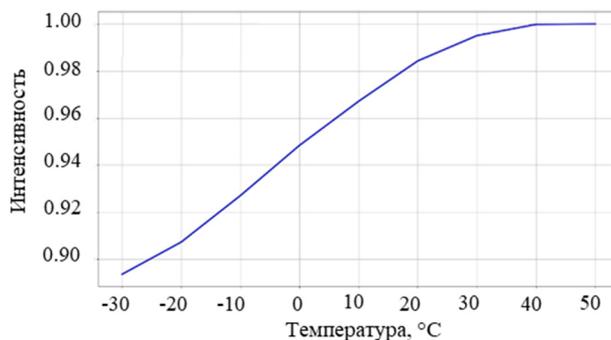


Рис. 3. Отклонение интенсивности выходного сигнала

Исследование изменения полуволнового напряжения СИОМ показывает сильную линейную зависимость от температуры. На рис. 4 показано изменение полуволнового напряжения СИОМ. Температурный коэффициент полуволнового напряжения составил $-5,3 \cdot 10^{-4}$ К. Данная зависимость согласуется с работами [11–14].

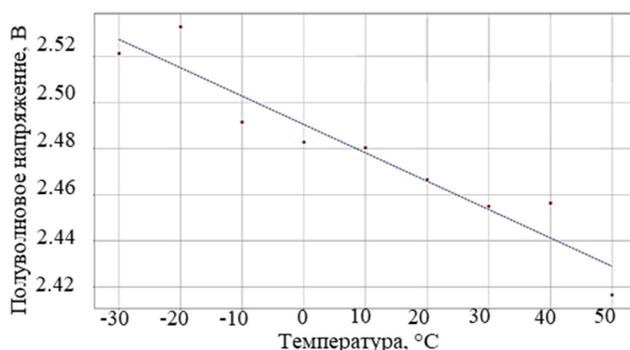


Рис. 4. Изменение полуволнового напряжения фазового модулятора

Измерение спектра СЛД при различных значениях температуры (рис. 5) показывает сильное изменение центральной длины волны, что отражается на чувствительности гироскопа, ширине спектра, а также выходной оптической мощности.

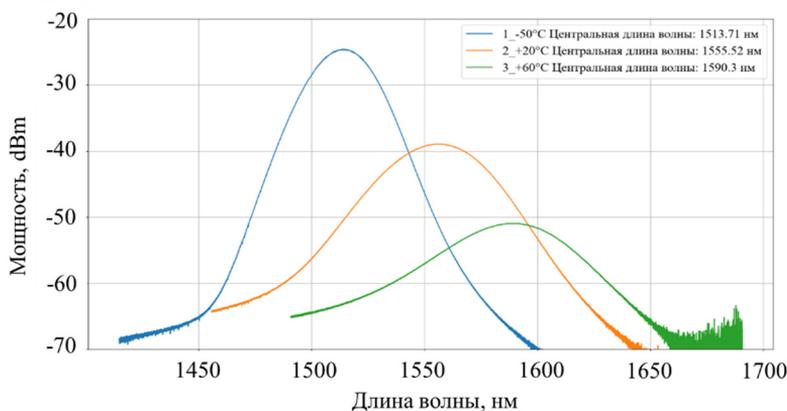


Рис. 5. Спектры СЛД при различных значениях температур

Изменение центральной длины волны демонстрирует линейную зависимость с коэффициентом $0,7$ нм/°C. Ширина спектра изменяется более чем в 2 раза. Выходная мощность при равных значениях тока накачки меняется более чем в 10 раз.

Результаты и обсуждение

Анализ экспериментальных данных показывает, что при разработке такого рода датчиков для повышения стабильности необходимо учитывать и компенсировать влияние таких параметров, как: изменения общих потерь оптической схемы, центральной длины волны источника излучения, полуволнового напряжения применяемого фазового модулятора и изменение входной мощности суперлюминесцентного диода при различных температурах. Наибольшее внимание следует уделять контролю мощности и центральной длины волны СЛД, а также компенсации изменения полуволнового напряжения.

Список литературы

1. Fiber optic resonators for angular rate sensors / D.G. Gilev, K.A. Ovchinnikov, V.V. Krishtop [et al.] // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* – 2022. – Vol. 86. – P. S75–S80.
2. Broadband source-driven resonant micro-optic gyroscope based on a multi-turn waveguide-type ring resonator / Shuang Liu, Junyi Hu, Yuxin Wang, Qingwen Liu, Huilian Ma, Zuyuan He // *Opt. Lett.* – 2023. – Vol. 48. – P. 1152–1155.
3. Navigation-grade three-axis resonant fiber-optic gyroscope employing a multiplexed source / Shuang Liu, Junyi Hu, Yuxin Wang, Qingwen Liu, Huilian Ma, Zuyuan He // *Opt. Lett.* – 2023. – Vol. 48. – P. 2639–2642.
4. Resonant fiber optic gyroscope driven by a broadband light source based on an over-coupled state fiber ring resonator / Kai Xu, Yanru Zhou, Fanyan Xue, Yulin Wang, Wenyao Liu, Jun Tang, Jun Liu // *Appl. Opt.* – 2024. – Vol. 63. – P. 4840–4847.
5. Lefevre, H. *The Fiber-Optic Gyroscope. Third Edition* / H. Lefevre. – Artech, 2022.
6. Navigation-grade resonant fiber-optic gyroscope using ultra-simple white-light multibeam interferometry / Shuangxiang Zhao, Qingwen Liu, Yuanyuan Liu, Huilian Ma, Zuyuan He // *Photon. Res.* – 2022. – Vol. 10. – P. 542–549.
7. A prototype for a passive resonant interferometric fiber optic gyroscope with a 3×3 directional coupler / K.A. Ovchinnikov, D.G. Gilev, V.V. Krishtop [et al.] // *Sensors.* – 2023. – Vol. 23, № 3. – P. 1319.
8. Performance improvement of white-light-driven resonant fiber optic gyroscope using four-frequency sawtooth wave modulation technology / F. Wu, J. Li, S. Lan, B. Yan, J. Zhou, Y. Yue // *Optics Communications.* – 2023. – Vol. 550. – P. 129827.
9. Research progress of the resonant fiber optic gyroscope technology / L. Wang, Y. Yan, H. Ma, Z. Jin // *Proceedings of Applied Optics and Photonics China.* – 2015. – P. 967906.

10. Ovchinnikov, K.A. Study of the temperature stability of the parameters of a fiber-optic resonator with preservation of polarization / K.A. Ovchinnikov, D.G. Gilev, V.V. Krishtop // Proceedings of International Conference Laser Optics (ICLO). – 2024. – P. 561.

11. Овчинников, К.А. Определение температурного коэффициента изменения полуволнового напряжения фазового модулятора на LiNbO₃ / К.А. Овчинников, Д.Г. Гилев, В.В. Криштоп // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 2. – С. 36–48.

12. Hui, R. Chapter 7: External electro-optic modulators. Introduction to Fiber-Optic Communications / ed. R. Hui. – Academic Press. – 2020. – P. 299–335.

13. Smith, D.S. Refractive indices of lithium niobate / D.S. Smith, H.D. Riccius, R.P. Edwin // Optics Communications. – 1976. – Vol. 17, № 3. – P. 332–335.

14. Zook, J.D. Temperature dependence and model of the electro-optic effect in LiNbO₃ / J.D. Zook, D. Chen, G.N. Otto // Applied Physics Letters. – 1967. – Vol. 11, № 5. – P. 159–161.

References

1. Gilev D.G., Ovchinnikov K.A., Krishtop V.V. et al. Fiber optic resonators for angular rate sensors. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2022, vol. 86, pp. S75-S80.

2. Liu Shuang, Hu Junyi, Wang Yuxin, Liu Qingwen, Ma Huilian, He Zuyuan Broadband source-driven resonant micro-optic gyroscope based on a multi-turn waveguide-type ring resonator. *Opt. Lett.*, 2023, vol. 48, pp. 1152-1155.

3. Liu Shuang, Hu Junyi, Wang Yuxin, Liu Qingwen, Ma Huilian, He Zuyuan Navigation-grade three-axis resonant fiber-optic gyroscope employing a multiplexed source. *Opt. Lett.*, 2023, vol. 48, pp. 2639-2642.

4. Xu Kai, Zhou Yanru, Xue Fanyan, Wang Yulin, Liu Wenyaoyao, Tang Jun, Liu Jun Resonant fiber optic gyroscope driven by a broadband light source based on an over-coupled state fiber ring resonator. *Appl. Opt.*, 2024, vol. 63, pp. 4840-4847.

5. Lefevre H. The Fiber-Optic Gyroscope. Third Edition. Artech, 2022.

6. Zhao Shuangxiang, Liu Qingwen, Liu Yuanyuan, Ma Huilian, He Zuyuan Navigation-grade resonant fiber-optic gyroscope using ultra-simple white-light multibeam interferometry. *Photon. Res.*, 2022, vol. 10, pp. 542-549.

7. Ovchinnikov K.A., Gilev D.G., Krishtop V.V. et al. A prototype for a passive resonant interferometric fiber optic gyroscope with a 3×3 directional coupler. *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 3, p. 1319.

8. Wu F., Li J., Lan S., Yan B., Zhou J., Yue Y. Performance improvement of white-light-driven resonant fiber optic gyroscope using four-frequency sawtooth wave modulation technology. *Optics Communications*, 2023, vol. 550, p. 129827.

9. Wang L., Yan Y., Ma H., Jin Z. Research progress of the resonant fiber optic gyroscope technology. *Proceedings of Applied Optics and Photonics China*, 2015, p. 967906.

10. Ovchinnikov K.A., Gilev D.G., Krishtop V.V. Study of the temperature stability of the parameters of a fiber-optic resonator with preservation of polarization. *International Conference Laser Optics (ICLO)*, 2024, p. 561.

11. Ovchinnikov K.A., Gilev D.G., Krishtop V.V. Opredelenie temperaturnogo koeffitsienta izmeneniia poluvolnovogo napriazheniia fazovogo moduliatora na LiNbO₃ [Determination of temperature coefficient of change half-wave voltage phase modulator on LiNbO₃]. *Applied Photonics*, 2024, vol. 11, no. 2, pp. 36-48.

12. Hui R. Chapter 7: External electro-optic modulators. Introduction to Fiber-Optic Communications. Ed. R. Hui. Academic Press, 2020, pp. 299-335.

13. Smith D.S., Riccius H.D., Edwin R.P. Refractive indices of lithium niobate. *Optics Communications*, 1976, vol. 17, no. 3, pp. 332-335.

14. Zook J.D., Chen D., Otto G.N. Temperature dependence and model of the electro-optic effect in LiNbO₃. *Applied Physics Letters*, 1967, vol. 11, no. 5, pp. 159-161.

Сведения об авторах

About the authors

ОВЧИННИКОВ К.А.

e-mail: krishtop@pnppk.ru

OVCHINNIKOV K.A.

e-mail: krishtop@pnppk.ru

Аспирант кафедры «Общая физика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь.

Postgraduate student of the Department of General Physics, Perm National Research Polytechnic University, Perm

Финансирование. Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0006).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценный.

Получена: 15.10.2024

Одобрена: 20.10.2024

Принята к публикации: 23.10.2024

Funding. The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSNM-2023-0006).

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

The contribution of the authors is equal.

Received: 15/10/2024

Approved: 20/10/2024

Accepted for publication: 23/10/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Овчинников, К.А. Исследование влияния температуры на оптическую схему резонаторного волоконно-оптического гироскопа / К.А. Овчинников // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 4. – С. 50–58.

Please cite this article in English as: Ovchinnikov K.A. Study of the influence of temperature on the optical scheme of a resonator fiber-optic gyroscope *Applied photonics*, 2024, vol. 11, no. 4, pp. 50-58.