

ИЗМЕРЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОЛОКНА ТИПА PANDA
С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА САНЬЯКА

К. А. Овчинников^{1,2*}, В. В. Криштоп^{1,2,3}, Д. Г. Гилев^{1,2},
В. А. МАКСИМЕНКО², А. В. ПЕРМИНОВ²

¹Пермская научно-производственная приборостроительная компания
Пермь, Россия

*ovchinnikovka@pnppk.ru

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Пермь, Россия

³Пермский государственный национальный исследовательский университет
Пермь, Россия

Аннотация. Представлена методика измерения величины двулучепреломления оптических волокон с применением интерферометра Саньяка и источника излучения с перестраиваемой длиной волны. Рассмотрены физические принципы, лежащие в основе представленной методики. Для устранения влияния нелинейности скорости перестройки длины волны источника излучения на точность измерений применен вспомогательный интерферометр с известными параметрами. Полученные значения двулучепреломления волокна совпадают с паспортными, что подтверждает эффективность предложенной методики измерения.

Ключевые слова: двулучепреломление, волокна с сохранением поляризации, волокно Panda, интерферометр Саньяка, перестраиваемый лазер

Благодарности: исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0005).

Ссылка для цитирования: Овчинников К. А., Криштоп В. В., Гилев Д. Г., Максименко В. А., Перминов А. В. Измерение величины двулучепреломления волокна типа Panda с помощью интерферометра Саньяка // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 10. С. 845—851. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-845-851.

MEASURING THE BIREFRINGENCE VALUE OF A PANDA
FIBER USING A SAGNAC INTERFEROMETER

K. A. Ovchinnikov^{1,2*}, V. V. Krishtop^{1,2,3}, D. G. Gilev^{1,2},
V. A. Maksimenko², A. V. Perminov²

¹Perm Research and Production Instrument-Making Company, Perm, Russia
*ovchinnikovka@pnppk.ru

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

³Perm State University, Perm, Russia

Abstract. A technique for measuring the birefringence of optical fibers using a Sagnac interferometer and a radiation source with a tunable wavelength is presented. Physical principles that form the basis the presented methodology are considered. To eliminate the influence of the nonlinearity of the radiation source wavelength tuning rate on the measurement accuracy, an auxiliary interferometer with known parameters is used. The obtained values of measured fiber birefringence coincide with the passport values, which confirms the proposed measurement technique effectiveness.

Keywords: birefringence, polarization maintaining fibers, PANDA fiber, Sagnac interferometer, tunable laser

Acknowledgment: research was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSNM-2023-0005).

For citation: Ovchinnikov K. A., Krishtop V. V., Gilev D. G., Maksimenko V. A., Perminov A. V. Measuring the birefringence value of a PANDA fiber using a Sagnac interferometer. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 10. P. 845—851 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-845-851.

Введение. С развитием волоконно-оптических датчиков большую популярность получили PMF (polarization maintaining fiber) — оптические волокна, сохраняющие поляризацию, поскольку они способны передавать линейно-поляризованное излучение по всей длине волновода. Способность сохранять поляризацию в таких волокнах достигается за счет создания асимметричной структуры, которая приводит к возникновению двулучепреломления [1—3].

Двулучепреломление характеризует способность удерживать состояние поляризации при распространении излучения. Величина двулучепреломления определяет важные параметры PMF, такие как длина биений и дисперсия моды поляризованной волны. В ряде случаев при проектировании волоконно-оптических датчиков важно учитывать эти параметры и определять их значения [4—10].

В PMF различие показателей преломления из-за асимметричной структуры приводит к различию скоростей распространения света между двумя собственными поляризационными модами. Из-за различия скоростей распространения поляризационные моды имеют разные постоянные распространения, соответствующие „быстрой“ (fast) и „медленной“ (slow) поляризационным модам [11—13]. При этом величина двулучепреломления определяется как разница постоянных распространения между поляризационными модами:

$$\Delta\beta = \beta_s - \beta_f, \quad (1)$$

где $\beta_{s,f} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{s,f}$ — постоянные распространения для „медленной“ и „быстрой“ поляризационных мод, λ — длина волны излучения, $n_{s,f}$ — показатели преломления волокна вдоль „медленной“ и „быстрой“ осей. Это выражение можно также записать в виде:

$$\Delta\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n, \quad (2)$$

где $\Delta n = n_s - n_f$ — разность показателей преломления волокна вдоль „медленной“ и „быстрой“ осей.

Одним из основных параметров PMF является длина биений Λ , определяющая пространственный период, через который две ортогональные поляризационные моды, распространяясь по собственным осям, приходят в фазе [14, 15]:

$$\Lambda = \frac{2\pi}{\Delta\beta} = \frac{\lambda}{\Delta n}. \quad (3)$$

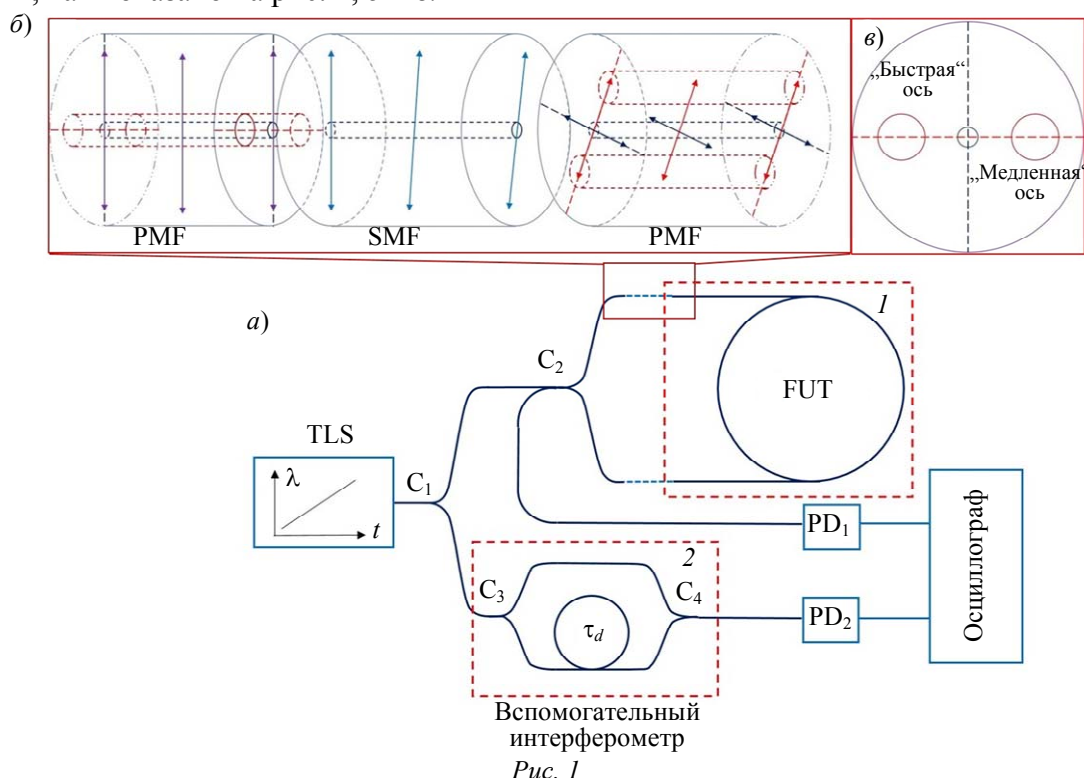
Таким образом, параметры $\Delta\beta$ и Λ характеризуют разность фазовых задержек двух поляризационных мод. Временная разность групповых задержек поляризационных мод для длины участка L :

$$\tau_p = \frac{\Delta n}{c} L \quad (4)$$

называется поляризационной модовой дисперсией (PMD).

В настоящей работе представлена методика определения величины двулучепреломления с применением интерферометра Саньяка [16] и перестраиваемого по длине волны источника излучения.

Описание методики. На рис. 1, а представлена схема эксперимента по определению двулучепреломления оптических волокон с применением интерферометра Саньяка. В данном случае линейно-поляризованное излучение от перестраиваемого лазерного источника (TLS) поступает на волоконный делитель 1×2 (C_1), где разделяется по двум направлениям. Часть излучения поступает на вспомогательный интерферометр 2, представляющий собой несимметричный интерферометр Маха—Цандера, образованный двумя волоконными делителями C_3 и C_4 , с известной временной задержкой τ_d между плечами интерферометра. Другая часть излучения поступает в интерферометр Саньяка, образованный волоконным делителем C_2 и волоконным контуром 1 (FUT, Fiber Under Test — исследуемое волокно). Все оптические элементы схемы изготовлены из PMF типа PANDA. Для соединения волоконного контура с C_2 использовано изотропное одномодовое волокно для нарушения соосности PMF волокон исследуемого контура и C_2 , с целью „разбиения“ линейной поляризации по двум ортогональным осям, как показано на рис. 1, б и в.



Частота оптического излучения от перестраиваемого лазерного источника изменяется согласно линейному закону [17]:

$$\omega = \gamma t + \omega_0, \quad (5)$$

где γ — скорость перестройки циклической частоты, ω_0 — начальная частота оптического излучения. Данное излучение после прохождения C_2 разделяется по двум направлениям обхода волоконного контура: по часовой стрелке (CW) и против (CCW). В местах соединения C_2 с волоконным контуром линейно-поляризованное излучение „разбивается“ на две собственные ортогональные поляризационные моды. Вследствие наличия двулучепреломления эти моды как будто распространяются по двум различным оптическим контурам для каждого из направлений. При повторном прохождении областей соединения волоконного контура и C_2 поляризационные моды для каждого направления „смешиваются“ между собой, при этом происходит интерференция полей для обоих направлений CW и CCW. Результат интерференции регистрируется фотоприемником PD_1 , сигнал с которого записывается при помощи осциллографа.

Интенсивность излучения, приходящего на фотоприемник, можно описать как:

$$I \approx 1 + \cos(\Delta\varphi(t)), \quad (6)$$

где $\Delta\varphi(t) = \varphi_s(t) - \varphi_f(t)$ — разность фаз между поляризационными модами. Поскольку частота излучения изменяется во времени согласно (5), то разность фаз не является постоянной величиной и зависит от времени. Рассмотрим данное обстоятельство подробнее. Фаза сигнала определяется как интеграл от частоты, поэтому, учитывая (5):

$$\varphi(t) = \int \omega(t) dt = \int (\gamma t + \omega_0) dt = \frac{1}{2} \gamma t^2 + \omega_0 t + \varphi_0. \quad (7)$$

Поляризационная мода, распространяющаяся по „быстрой“ оси, опережает моду, распространяющуюся по „медленной“ оси, на величину поляризационной модовой дисперсии τ_p , так что $\varphi_f(t) = \varphi_s(t - \tau_p)$. Учитывая это, а также (7), уравнение (6) можно записать как:

$$I \approx 1 + \cos(\gamma \tau_p t - \gamma \tau_p^2 - \omega_0 \tau_p). \quad (8)$$

Применяя к (8) преобразование Фурье, можно вычленивать частоту периодического сигнала f , которая в данном случае определяется как $f = \gamma \tau_p / 2\pi$. Вычислив данную частоту и учитывая (4), можно найти разность показателей преломления:

$$\Delta n = \frac{2\pi f c}{\gamma L} = \frac{f \lambda^2}{v L}, \quad (9)$$

где $v = d\lambda/dt$ — скорость перестройки длины волны лазера. Определив разность показателей преломления по (9) и учитывая (2)—(4), можно найти основные параметры РМФ.

Сигнал вспомогательного интерферометра формируется аналогично рассмотренному выше сигналу, только время задержки τ_d определяется разницей оптических путей между плечами интерферометра. Если известна величина τ_d , можно, проанализировав сигнал вспомогательного интерферометра, определить реальную скорость перестройки; далее по алгоритму, представленному в [18—20], можно скомпенсировать нелинейность перестройки лазера для повышения точности определения измеряемых величин.

Результаты эксперимента. Для проведения эксперимента согласно рис. 1 была собрана схема. В работе использовался TLS 81606A производства Keysight с параметрами перестройки $\lambda = 1550$ нм — центральная длина волны, $\Delta\lambda = 4$ нм — диапазон перестройки лазера, $v = 100$ нм/с — скорость перестройки, фотоприемники FPD 610-FC NIR производства MenloSystems, осциллограф Tektronix DPO 7254. В эксперименте использовался волоконный контур длиной $L = 500$ м из РМФ производства ПАО „ПНППК“.

На рис. 2 представлен пример нормированного выходного сигнала интерферометра Саньяка.

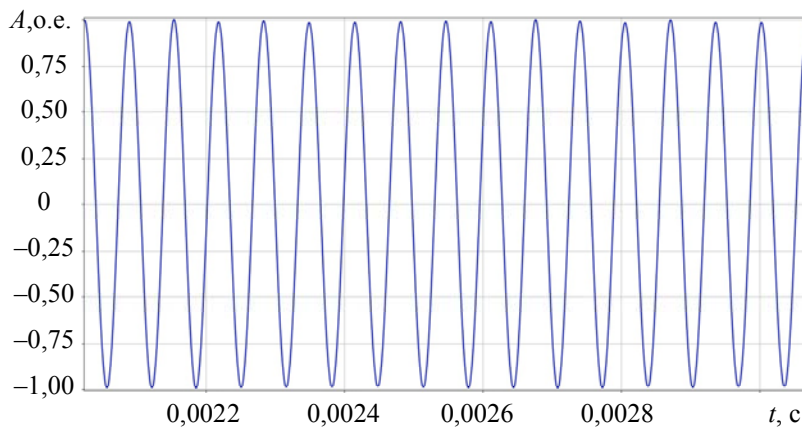


Рис. 2

В ходе эксперимента снят ряд интерференционных сигналов. Для их обработки написана программа на языке Python. Результат обработки в виде частотного спектра представлен на рис. 3.

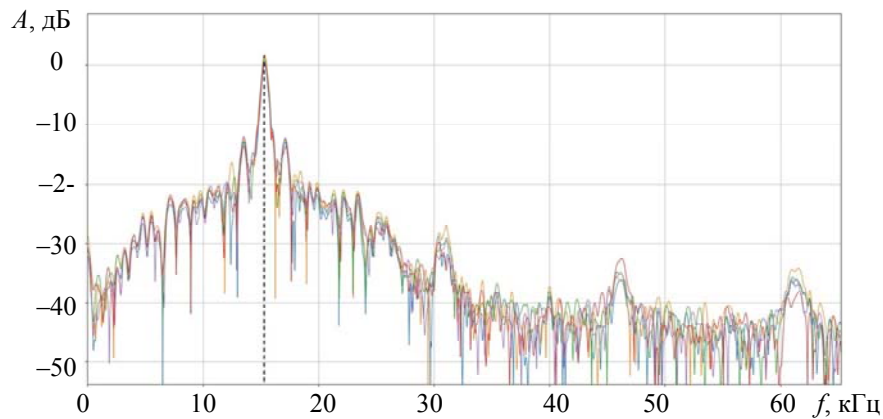


Рис. 3

В данном эксперименте спектры на рис. 3 имеют пик на частоте $f = 15,342$ кГц. Полученное значение частоты позволяет рассчитать основные параметры РМФ согласно (2)—(4), (9). Значения полученных параметров приведены ниже:

- разность показателей преломления $\Delta n = 7,4 \cdot 10^{-4}$;
- двулучепреломление $\Delta\beta = 3 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$;
- длина биений $\Lambda = 2$ мм;
- поляризационная модовая дисперсия $\tau_p = 1,23$ нс;
- удельная поляризационная модовая дисперсия $\tau_p/L = 2,46$ нс/км.

Измеренная разница показателей преломления $\Delta n = 7,4 \cdot 10^{-4}$ попадает в диапазон паспортных значений $\Delta n = (7,1—7,7) \cdot 10^{-4}$, что подтверждает работоспособность представленной методики.

Заключение. Представлена методика определения величины двулучепреломления с применением перестраиваемого лазерного источника и интерферометра Саньяка. По результатам эксперимента данная методика показала высокую точность определения параметров волокна типа Panda, в том числе за счет использования вспомогательного интерферометра. Измеренная с применением предложенной методики разность показателей преломления вдоль „быстрой“ и „медленной“ осей составила $7,4 \cdot 10^{-4}$, что попадает в диапазон паспортных значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fujii Y. and Sanos K. Polarization transmission characteristics of optical fibers with elliptical cross section // Electron. Comm. Jpn. 1980. Vol. 63. Pt. I. P. 87—93. <https://doi.org/10.1002/ecja.4400630812>.
2. Kumar A., Varshney R. K., Thyagarajan K. Birefringence calculations in elliptical-core optical fibres // Electronics Letters. 1984. Vol. 20. P. 112.
3. Noda J., Okamoto K. and Sasaki Y. Polarization-maintaining fibers and their applications // Journal of Lightwave Technology. 1986. Vol. 4, N 8. P. 1071—1089. DOI: 10.1109/JLT.1986.1074847.
4. Medeiros A., Barcelos S., Rigon E., Rando R., Seminario J., Santos M., and Oliveira R. PMD Characterization of Installed Fiber Networks – Compromise Between Result Accuracy and Measurement Time // Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference, Technical Digest (CD). Optica Publishing Group, 2006. Art. no. NTuC4.
5. Ten S., Edwards M. An Introduction to the Fundamentals of PMD in Fibers // White Paper. 2006. Vol. WP5051.
6. Gilev D. G., Valiushina P. M., Maksimenko V. A., and Krishtop V. V. Determination of induced birefringence in fiber-optic resonator from frequency difference between main and additional resonance peaks // Opt. Continuum. 2022. Vol. 1, N 3. P. 487—493.
7. Drozdov I. R., Ovchinnikov K. A., Boychuk E. S., & Krishtop V. V. Two-stage method for comparing the lengths of optical fibers using OFDR // Intern. Conf. Laser Optics (ICLO). June 2022.

8. Гилев Д. Г. Оценка динамического диапазона датчика угловой скорости на основе волоконно-оптического резонатора // Прикладная фотоника. 2023. Т. 10, № 1. С. 116—130.
9. Денисов И. В., Лисовский Н. В. Систематизация чувствительных к изгибу волоконных световодов // Прикладная фотоника. 2023. Т. 10, № 1. С. 131—148.
10. Краузин П. В., Трефилов И. А., Сагирова А. Р., Оглезнев А. А., Кондрашов А. Н., Юрина А. Д., Мельников Р. М. Алгоритм калибровки распределенного датчика температуры // Прикладная фотоника. 2023. Т. 10, № 2. С. 68—87.
11. Kumar A., Ghatak A. Polarization of light with applications in optical fibers. SPIE, 2011. 246 p. ISBN: 9780819482150. <https://doi.org/10.1117/3.861761>.
12. Rogers A. Polarization in Optical Fibers. Artech house, 2008. 250 p. ISBN: 9781580535342.
13. Lefevre H. Fiber-optic gyroscopes. Artech house, 2022. 416 p.
14. Бурдин В. А. Измерения длины биений оптических волокон при зондировании импульсами увеличенной длительности // Т-Сотм-Телекоммуникации и Транспорт. 2009. № S1. С. 175—177.
15. Моршнев С. К. и др. Измерение длины биений в двулучепреломляющих волоконных световодах // Фотоника. 2018. Т. 12, №. 6. С. 616—633.
16. Малькин Г. Б. Эффект Саньяка. Корректные и некорректные объяснения // Успехи физических наук. 2000. Т. 170, №. 12. С. 1325—1349.
17. Song J. Optical frequency domain reflectometry: Sensing range extension and enhanced temperature sensitivity: M.Sc. Thesis. University of Ottawa, 2014. 113 p.
18. Song Jia, Li Wenhai, Lu Ping, Xu Yanping, Chen Liang & Bao Xiaoyi. Long-Range High Spatial Resolution Distributed Temperature and Strain Sensing Based on Optical Frequency-Domain Reflectometry // Photonics Journal. 2014. Vol. 6. P. 1—8. doi 10.1109/JPHOT.2014.2320742.
19. 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, Suppl. 1. P. S75—S80. <https://doi.org/10.3103/S1062873822700423>. Ovchinnikov K. A., Gilev D. G., Krishtop V. V. et al. Application of Optical Frequency Domain Reflectometry for the Study of Polarization Maintaining Fibers // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. Vol. 86, Suppl. 1. P. S156—S162. <https://doi.org/10.3103/S1062873822700599>.
20. Ovchinnikov K. A., Gilev D. G., Krishtop V. V. et al. Application of Optical Frequency Domain Reflectometry for the Study of Polarization Maintaining Fibers // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. Vol. 86, Suppl. 1. P. S156—S162. <https://doi.org/10.3103/S1062873822700599>.

Сведения об авторах

Константин Александрович Овчинников

— аспирант; Пермский национальный исследовательский политехнический университет; Пермская научно-производственная приборостроительная компания, начальник лаборатории; E-mail: ovchinnikovka@pnppk.ru

Виктор Владимирович Криштоп

— д-р физ.-мат. наук, профессор; Пермский государственный национальный исследовательский университет; Пермский национальный исследовательский политехнический университет; Пермская научно-производственная приборостроительная компания, главный научный сотрудник; E-mail: Krishtop@pnppk.ru

Даниил Георгиевич Гилев

— канд. техн. наук; Пермская научно-производственная приборостроительная компания, начальник бюро; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, научный сотрудник; E-mail: gilevdg@pnppk.ru

Виталий Александрович Максименко

— канд. физ.-мат. наук, доцент; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра общей физики; доцент; E-mail: mva30@mail.ru

Анатолий Викторович Перминов

— д-р физ.-мат. наук, доцент; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра общей физики; заведующий кафедрой; E-mail: perminov1973@mail.ru

Поступила в редакцию 07.06.23; одобрена после рецензирования 19.06.23; принята к публикации 28.08.23.

REFERENCES

1. Fujii Y. and Sanos K. *Electron. Comm. Jpn.*, pt. I, 1980, vol. 63, pp. 87–93, <https://doi.org/10.1002/ecja.4400630812>.
2. Kumar A., Varshney R.K., Thyagarajan K. *Electronics Letters*, 1984, vol. 20, pp. 112.
3. Noda J., Okamoto K. and Sasaki Y. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, no. 8(4), pp. 1071–1089, DOI: 10.1109/JLT.1986.1074847.
4. Medeiros A., Barcelos S., Rigon E., Rando R., Seminario J., Santos M., and Oliveira R. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference*, Optica Publishing Group, 2006, paper NTuC4.
5. Ten S., Edwards M. *White Paper*, 2006, vol. WP5051.
6. Gilev D.G., Valiushina P.M., Maksimenko V.A., and Krishtop V.V. *Opt. Continuum*, 2022, no. 1(3), pp. 487–493.
7. Drozdov I.R., Ovchinnikov K.A., Boychuk E.S., & Krishtop V.V. *International Conference Laser Optics (ICLO)*, 2022, pp. 1-1.
8. Gilev D.G. *Applied photonics*, 2023, no. 1(10), pp. 116–130. (in Russ.)
9. Denisov I.V., Lisovsky N.V. *Applied photonics*, 2023, no. 1(10), pp. 131–148. (in Russ.)
10. Krauzin P.V., Trefilov I.A., Sagirova A.R., Ogleznev A.A., Kondrashov A.N., Yurina A.D., Melnikov R.M. *Applied photonics*, 2023, no. 2(10), pp. 68–87. (in Russ.)
11. Kumar A., Ghatak A. *Polarization of light with applications in optical fibers*, SPIE, 2011, 246 p., ISBN: 9780819482150, <https://doi.org/10.1117/3.861761>.
12. Rogers A. *Polarization in Optical Fibers*, Artech house, 2008, 250 p., ISBN: 9781580535342.
13. Lefevre H. *Fiber-optic gyroscopes*, Artech house, 2022, 416 p.
14. Burdin V.A. *T-Comm: Telecommunications and transport*, 2009, no. S1, pp. 175–177. (in Russ.)
15. Morshnev S.K., Gubin V.P., Starostin N.I., Prshiyalkovsky Ya.V., Sazonov A.I. *Photonics Russia*, 2018, no. 6(12), pp. 616–633. (in Russ.)
16. Malykin G.B. *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 2000, no. 12(43), pp. 1229–1252.
17. Song J. *Optical frequency domain reflectometry: Sensing range extension and enhanced temperature sensitivity*. M.Sc. Thesis, Université d'Ottawa, 2014, 113 p.
18. Song Jia, Li Wenhai, Lu Ping, Xu Yanping, Chen Liang, & Bao Xiaoyi. *Photonics Journal*, 2014, vol. 6, pp. 1–8, DOI: 10.1109/JPHOT.2014.2320742.
19. Gilev D.G., Ovchinnikov K.A., Krishtop V.V. et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2022, vol. 86, suppl. 1, pp. S75–S80, <https://doi.org/10.3103/S1062873822700423>.
20. Ovchinnikov K.A., Gilev D.G., Krishtop V.V. et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2022, vol. 86, suppl. 1, pp. S156–S162, <https://doi.org/10.3103/S1062873822700599>.

Data on authors

- Konstantin A. Ovchinnikov** — Post-Graduate Student; Perm National Research Polytechnic University; Perm Research and Production Instrument-Making Company, Head of Laboratory; E-mail: ovchinnikovka@pnppk.ru
- Victor V. Krishtop** — Dr. Sci., Professor; Perm State University; Perm National Research Polytechnic University; Perm Research and Production Instrument-Making Company, Chief Researcher; E-mail: Krishtop@pnppk.ru
- Daniil G. Gilev** — PhD; Perm Research and Production Instrument-Making Company; Perm National Research Polytechnic University, Researcher; E-mail: gilevdg@pnppk.ru
- Vitaliy A. Maksimenko** — PhD, Associate Professor; Perm National Research Polytechnic University, Department of General Physics, Associate Professor; E-mail: mva30@mail.ru
- Anatoliy V. Perminov** — Dr. Sci., Associate Professor; Perm National Research Polytechnic University, Department of General Physics, Head of the Department; E-mail: perminov1973@mail.ru

Received 07.06.23; approved after reviewing 19.06.23; accepted for publication 28.08.23.