



УДК 535.92

ВЛИЯНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЕЛИЧИНУ h -ПАРАМЕТРА В ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩИХ ВОЛОКНАХ

А.Б. Мухтубаев, С.М. Аксарин, Е.Э. Калугин

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
Адрес для переписки: Mukhtubayev.ab@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 31.10.18, принята к печати 08.12.18
doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-21-26

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Мухтубаев А.Б., Аксарин С.М., Калугин Е.Э. Влияние значения температуры на величину h -параметра в двулучепреломляющих волокнах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 1. С. 21–26. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-21-26

Аннотация

Предмет исследования. Исследовано влияние температуры на величину h -параметра в двулучепреломляющих оптических волокнах для различных образцов: с эллиптической напрягающей оболочкой с двойным акрилатным покрытием (диаметр 250 мкм), а также волокна Bow-Tie с двойным акрилатным покрытием (диаметр 170 мкм).

Метод. Применяется метод широкополосной интерферометрии. Использован поляризационный сканирующий интерферометр Майкельсона с широкополосным источником с центральной длиной волны 1575 нм и полушириной спектра 45 нм. Температура изменялась с помощью термостата до +70 °С и с помощью «сухого» льда до –70 °С.

Основные результаты. Выявлено, что в области отрицательных температур величина h -параметра увеличивается с $\sim 10^{-7}$ 1/м при +22 °С до $\sim 10^{-3}$ – 10^{-4} 1/м при –70 °С, в то время как в области положительных температур изменение h -параметра незначительно для всех образцов волокон. **Практическая значимость.** Сканирующий интерферометр Майкельсона может найти широкое применение для определения качества двулучепреломляющего оптического волокна в процессе производства: отсутствия локальных дефектов, значения h -параметра волокна и длины биения. Понимание влияния температуры на величину h -параметра в двулучепреломляющих волокнах, используемых при создании волоконно-оптических датчиков, позволит расширить эксплуатационные характеристики разрабатываемого устройства, а также повысить его точностные параметры.

Ключевые слова

оптическое волокно, поляризация, двулучепреломление, h -параметр, температура

Благодарности

Работа выполнена в Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект №03.G25.31.0245).

TEMPERATURE VALUE EFFECT ON h -PARAMETER IN BIREFRINGENCE FIBERS

А.Б. Mukhtubayev, S.M. Aksarin, E.E. Kalugin

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
Corresponding author: Mukhtubayev.ab@gmail.com

Article info

Received 31.10.18, accepted 08.12.18
doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-21-26
Article in Russian

For citation: Mukhtubayev A.B., Aksarin S.M., Kalugin E.E. Temperature value effect on h -parameter in birefringence fibers. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 21–26 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-21-26

Abstract

Subject of study. The paper presents the study of temperature value effect on the h -parameter in birefringence optical fibers for different samples: fibers with an elliptical tension cladding with a double acrylate coating (250 μm in diameter), Bow-Tie fibers with a double acrylate coating (170 μm in diameter). **Method.** The research method is based on wideband interferometry application. We used polarization scanning Michelson interferometer with the central wavelength of the optical source equal to 1575 nm and the width equal to 45 nm. The temperature was changed by thermostat up to +70 °C, and by “dry” ice down to –70 °C. **Main results.** It was found that the value of the h -parameter increases from $\sim 10^{-7}$ 1/m at +22 °C to $\sim 10^{-3}$ – 10^{-4} 1/m at –70 °C in the negative temperature region, while in the positive temperature region h -parameter

variation is insignificant for all fiber samples. **Practical relevance.** The scanning Michelson interferometer can find wide application in birefringent optical fiber production for its quality analysis: the absence of local defects, control of the fiber h -parameter value and beat length. Understanding of the temperature effect on the h -parameter value in birefringent fibers used in creation of fiber-optic sensors, will expand the performance characteristics of the developed device, as well as improve its accuracy parameters.

Keywords

optical fiber, polarization, birefringence, h -parameter, temperature

Acknowledgements

This work was performed in ITMO University and was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Project No. 03.G25.31.0245)

Введение

Оптические волокна с двулучепреломлением способны сохранять линейно-поляризованное излучение по всей длине. Это свойство двулучепреломляющих (ДЛП) волокон широко используют при построении волоконно-оптических датчиков и систем, в которых необходима высокая точность и чувствительность. Эффект сохранения состояния линейной поляризации достигается за счет создания асимметрии в структуре волокна. Широко используются ДЛП волокна с эллиптической напрягающей оболочкой и волокна типа Bow-Tie [1–3].

Наиболее важными параметрами ДЛП-волокон являются: длина биений и h -параметр. Поскольку технология изготовления ДЛП-волокон не позволяет создать полностью однородную структуру, то по всей его длине возникают дефекты. На этих дефектах возникают точки взаимодействия ортогонально поляризованных мод в виде перекачки энергии из одной моды в другую – поляризационные преобразования. Усредненное значение преобразования, нормированное на единицу длины, характеризуется h -параметром [1].

Волокна такого типа используются в качестве чувствительного элемента волоконно-оптического гироскопа, представляющего собой оптический контур Саньяка в виде многослойной катушки с ДЛП-волоконном. Длина волокна в таком контуре может составлять от 50 м до 5 км. Для минимизации размеров конечного устройства оптическое волокно укладывается в катушки малого диаметра. Это приводит к увеличению числа слоев ДЛП-волокон. В таком контуре возникают перехлесты оптических волокон, микро- и макроизгибы, с вариацией силы натяжения волокна [4]. Использование таких устройств в широком интервале изменения внешних температур (от -60 до $+70$ °C) приводит к деформациям каркаса контура, что, в свою очередь, вызывает перераспределение механических напряжений в структуре оптического контура и возникновение локальных точек преобразований поляризации. Известно [1], что локальные точки преобразований поляризации приводят к возникновению ошибки сигнала волоконно-оптического гироскопа, а изменение их величины может приводить к дрейфу выходного сигнала.

В работах [5–8] показано влияние на величину h -параметра диаметра намотки ДЛП-волокон и его натяжения, в работе [9] показано влияние значения точечного механического воздействия на величину поляризационного преобразования в ДЛП-волокон с эллиптической напрягающей оболочкой. Целью настоящей работы является исследование влияния значения температуры на величину h -параметра в ДЛП-волокон.

Объект исследования

Объектом исследования настоящей работы являются распределенные поляризационные преобразования, которые характеризуются h -параметром. Величина h -параметра исследовалась на трех образцах ДЛП-волокон: два разных образца с эллиптической напрягающей оболочкой и один образец волокна типа Bow-Tie.

В табл. 1 приведены основные параметры исследуемых образцов. ДЛП-волокон с эллиптической напрягающей оболочкой (образцы № 1 и 2) широко применяются в отечественных волоконно-оптических гироскопах [10]. Зарубежные производители, а также ряд отечественных производителей широко используют ДЛП-волокон типа Bow-Tie (образец № 3) [11]. Во всех образцах использовано двойное акрилатное защитное покрытие.

Таблица 1. Параметры исследуемых образцов

Параметр	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
Длина биений, мм	2,5	3,5	1,5
Диаметр оболочки, мкм	125	125	80
Диаметр покрытия, мкм	250	250	170
Тип анизотропии	Эллиптическая напрягающая оболочка	Эллиптическая напрягающая оболочка	Bow-Tie
Производитель	АО «НИТИОМ «ВНЦ ГОИ им. С.И. Вавилова» (Россия)	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (Россия)	Fibercore (Англия)

На рис. 1 приведены изображения торцов исследуемых образцов. Каждый образец представляет собой отрезок оптического волокна длиной 10 м, свободно свернутый в кольцо диаметром 0,12 м.

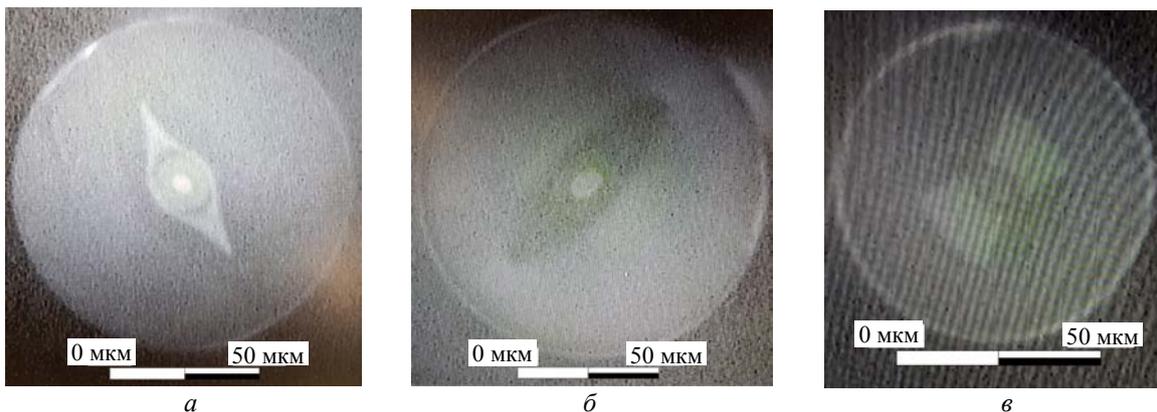


Рис. 1. Торцы исследуемых образцов ДПП-волокон:
а – образец № 1; б – № 2; в – № 3

Методика проведения исследования

Для анализа величины h -параметра в исследуемых образцах использовалась широкополосная интерферометрия. С помощью данной методики можно добиться высокой точности в определении места локального преобразования в оптическом тракте, а по амплитуде интерференционного сигнала оценить величину поляризационного преобразования [12–16].

В настоящей работе использовался поляризационный сканирующий интерферометр Майкельсона с анализатором на входе для выделения обеих ортогональных поляризационных мод исследуемого образца.

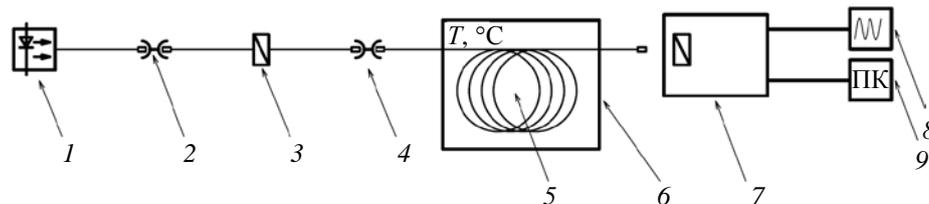


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования влияния температуры на распределенные поляризационные преобразования в двулучепреломляющем волокне:

- 1 – широкополосный источник излучения; 2, 4 – оптическая розетка;
3 – волоконно-оптический поляризатор; 5 – объект исследования; 6 – термокамера;
7 – поляризационный интерферометр Майкельсона; 8 – осциллограф; 9 – персональный компьютер

В качестве широкополосного источника излучения использовался суперлюминесцентный диод ThorLabs S5FC1005SXL с центральной длиной волны 1575 нм и полушириной спектра 45 нм. Линейно-поляризованное излучение от источника вводится в одну из поляризационных осей исследуемого образца (рис. 2). Анализатор на входе в интерферометр ориентирован к поляризационным осям образца под углом 45° . При сканировании исследуемого образца смещением зеркала поляризационного интерферометра Майкельсона на интерферограмме будут возникать интерференционные пики. По полученной интерферограмме, зная средний уровень интерференционной картины, можно определить величину h -параметра [1, 2]:

$$h = \frac{V_c^2}{L_d}, \quad (1)$$

где V_c – видимость интерференционной картины; L_d – длина деполаризации исследуемого образца

$$L_d = \frac{\lambda \cdot B}{\Delta\lambda}, \quad (2)$$

где λ – центральная длина волны источника оптического излучения (1575 нм); $\Delta\lambda$ – ширина спектра источника оптического излучения (45 нм); B – длина биений ДПП-волокна (см. табл. 1).

Температура изменялась в два этапа: нагрев осуществлялся с помощью термостата, охлаждение производилось в термобоксе с «сухим» льдом. Температура исследуемых образцов контролировалась с помощью термопары, установленной в контакте с волокном исследуемых образцов.

Результаты исследования

В настоящей работе температурное воздействие было циклическим: нагрев от комнатной температуры $+22$ до $+70$ °С, охлаждение до комнатной температуры. После этого производилось охлаждение

до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ и нагрев до комнатной температуры. В результате были получены значения h -параметра в исследуемых образцах, представленные на рис. 3.

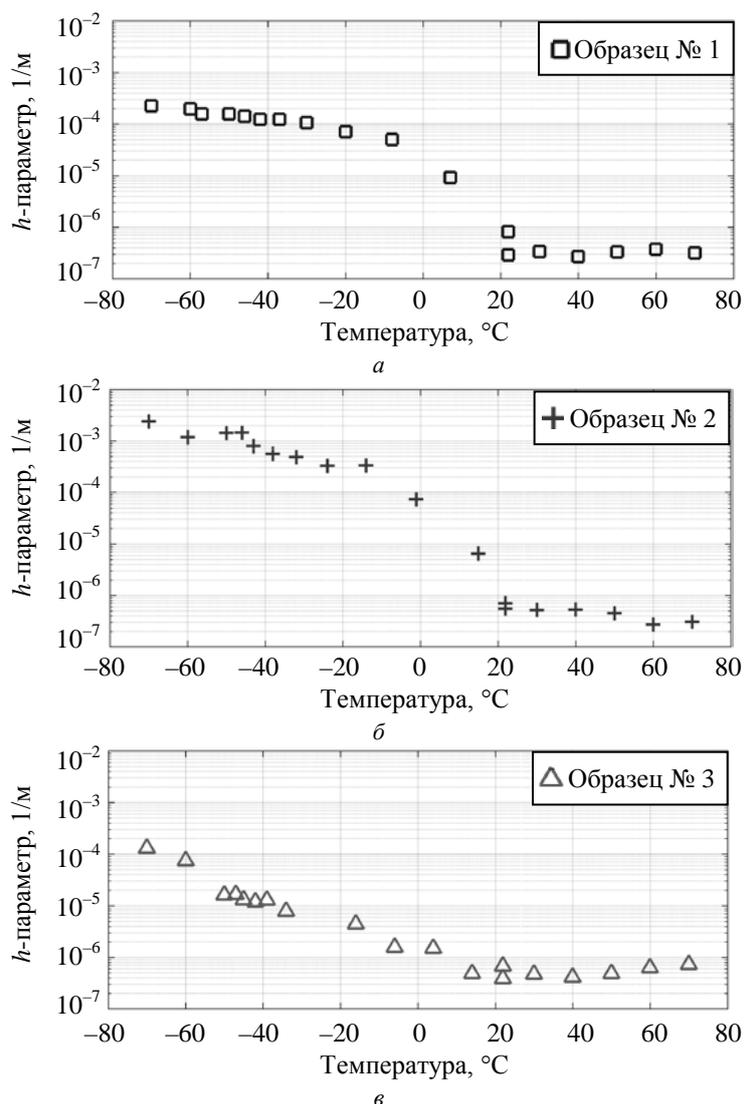


Рис. 3. Зависимость h -параметра исследуемых образцов ДЛП-волокон при изменении абсолютной температуры: а – образец № 1; б – № 2; в – № 3

Из полученных зависимостей видно, что охлаждение до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к увеличению h -параметра для образца № 1 с $8,22 \cdot 10^{-7}$ до $2,28 \cdot 10^{-4}$, для № 2 – с $7,09 \cdot 10^{-7}$ до $2,46 \cdot 10^{-3}$, а для № 3 – с $4,85 \cdot 10^{-7}$ до $1,3 \cdot 10^{-4}$ $1/\text{м}$. Однако из полученных зависимостей видно, что для образца № 3 изменение h -параметра происходит медленнее, чем в других образцах. Так, например, при абсолютной температуре $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ для образца № 1 $h=1,07 \cdot 10^{-4}$, для № 2 – $4,98 \cdot 10^{-4}$, для № 3 – $7,82 \cdot 10^{-6}$ $1/\text{м}$. В табл. 2 представлены значения h -параметра в исследуемых образцах ДЛП-волокон при их охлаждении в крайних точках -70 и $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблица 2. Величина h -параметра при охлаждении исследуемых образцов ($1/\text{м}$)

Температура	Образец №1	Образец №2	Образец №3
Комнатная, до охлаждения	$8,22 \cdot 10^{-7}$	$7,09 \cdot 10^{-7}$	$4,85 \cdot 10^{-7}$
$-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, охлаждение	$2,28 \cdot 10^{-4}$	$2,46 \cdot 10^{-3}$	$1,30 \cdot 10^{-4}$
Комнатная, после охлаждения	$6,72 \cdot 10^{-7}$	$5,05 \cdot 10^{-7}$	$4,33 \cdot 10^{-7}$

В области положительных температур при нагреве до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ величина h -параметра для каждого исследуемого образца изменяется незначительно.

В условиях отрицательных температур предпочтительно использование ДЛП-волокна образца № 3, так как оно обладает более широким диапазоном рабочих температур. Такой результат можно объяснить отличием структуры волокна. Также, по некоторым источникам [17], существенную роль играет

защитное покрытие волокна, специальный материал покрытия позволит избежать возникновения механических напряжений при изменении абсолютной температуры в особенности в области отрицательных температур, что, в свою очередь, не приведет к увеличению величины h -параметра.

Заключение

В ходе исследования выявлено, что в области отрицательных температур величина распределенных поляризационных преобразований, которая характеризуется h -параметром, возрастает до $\sim 10^{-3}$ – 10^{-4} 1/м при -70 °С для рассмотренных образцов двулучепреломляющих волокон (см. табл. 2). Это, в свою очередь, может привести к возникновению ошибок в сигнале волоконно-оптического датчика. Однако предпочтительно использовать более стойкое в области отрицательных температур двулучепреломляющее волокно. Так, для образца № 3 (с анизотропией Bow-Tie), имеющему диаметр защитного покрытия 170 мкм, h -параметр возрастает медленнее, чем для образцов с эллиптической напрягающей оболочкой (рис. 3). В области положительных температур увеличение h -параметра для рассмотренных образцов незначительно.

В заключение отметим, что при разработке высокоточных волоконно-оптических датчиков, в конструкции которых имеются намотки из двулучепреломляющих волокон, необходимо контролировать условия эксплуатации прибора, поскольку изменение температуры приводит к возникновению распределенных поляризационных преобразований в волокне, вызывая ошибки.

Литература

1. Lefevre H.C. *The Fiber-Optic Gyroscopes*. Boston: Artech House, 1993. 332 p.
2. Аксарин С.М. Исследование поляризационных методов и технологий согласования волоконно-оптических и интегрально-оптических волноводов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб, 2014. 116 с.
3. Kaminow I.P. Polarization-maintaining fibers // *Applied Scientific Research*. 1984. V. 41. N 3–4. P. 257–270. doi: 10.1007/BF00382456
4. Jia M., Yang G. Research of optical fiber coil winding model based on large-deformation theory of elasticity and its application // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2011. V. 24. N 5. P. 640–647. doi: 10.1016/S1000-9361(11)60075-7
5. Мухтубаев А.Б., Аксарин С.М., Стригалева В.Е., Новиков Р.Л. Исследование влияния намотки анизотропных оптических волокон с различной величиной натяжения на степень сохранения H -параметра // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2015. Т. 15. № 5. С. 803–808. doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-5-803-808
6. Аксарин С.М., Архипов С.В., Варжель С.В., Куликов А.В., Стригалева В.Е. Исследование зависимости параметров анизотропных одномодовых волоконных световодов от диаметра намотки // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2013. № 6 (88). С. 22–26.
7. Мешковский И.К., Киселев С.С., Куликов А.В., Новиков Р.Л. Дефекты намотки оптического волокна при изготовлении чувствительного элемента волоконно-оптического интерферометра // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2010. Т. 53. № 2. С. 47–51.
8. Шрамко О.А., Рупасов А.В., Новиков Р.Л., Аксарин С.М. Метод исследования зависимости h -параметра анизотропного световода от радиуса изгиба // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2014. № 1 (89). С. 26–31.
9. Mukhtubayev A.B., Aksarin S.M., Strigalev V.E. Polarization extinction ratio of the polarization crosstalk caused by point pressure force in the polarization-maintaining fiber // *Optical Fiber Technology*. 2017. V. 38. P. 119–122. doi: 10.1016/j.yofte.2017.09.010
10. Meshkovskiy I.K., Strigalev V.Y., Deineka G.B., Peshekhonov V.G., Volynsky D.V., Untilov A.A. Three-axis fiber-optic gyroscope: development and test results // *Gyroscopy and Navigation, IET* – 2011. V. 2. N 4. P. 208–213. doi: 10.1134/s2075108711040122
11. Kolevatov A.P., Nikolaev S.G., Andreev A.G., Ermakov V.S., Dunaev D.A., Kel O.L., Malgin N.V. Development of a dual mode attitude and heading reference system on fiber optic gyros for land vehicles // *Proc. 13th St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*. 2006.

References

1. Lefevre H.C. *The Fiber-Optic Gyroscope*. London, Artech House, 1993, 332 p.
2. Aksarin S.M. *Issledovanie Polyarizatsionnykh Metodov i Tekhnologii Soglasovaniya Volokonno-Opticheskikh i Integral'no-Opticheskikh Volnovodov: kand. fiz.-mat. nauk* [Study of Polarization Methods and Technologies of Fiber Optic and Integrated Optical Waveguides Matching. Phys.-Math. Sci. Dissertation]. St. Petersburg, 2014, 116 p. (in Russian)
3. Kaminow I.P. Polarization-maintaining fibers. *Applied Scientific Research*, 1984, vol. 41, no. 3–4, pp. 257–270. doi: 10.1007/BF00382456
4. Jia M., Yang G. Research of optical fiber coil winding model based on large-deformation theory of elasticity and its application. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2011, vol. 24, no. 5, pp. 640–647. doi: 10.1016/S1000-9361(11)60075-7
5. Mukhtubayev A.B., Aksarin S.M., Strigalev V.E., Novikov R.L. Impact study of anisotropic optical fibers winding with different tension value on the H -parameter invariance degree. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 5, pp. 803–808. (in Russian) doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-5-803-808
6. Aksarin S.M., Arkhipov S.V., Varzhel S.V., Kulikov A.V., Strigalev V.E. Dependence investigation of the anisotropic single-mode fiber parameters on a winding diameter. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 6, pp. 22–26. (in Russian)
7. Meshkovskii I.K., Kiselev S.S., Kulikov A.V., Novikov R.L. Defects of optical fiber winding in manufacturing of sensitive element of fiber-optic interferometer. *Izv. Vuzov. Priborostroenie*, 2010, vol. 53, no. 2, pp. 47–51. (in Russian)
8. Shramko O.A., Rupasov A.V., Novikov R.L., Aksarin S.M. Analysis method of anisotropic lightguide h -parameter dependence on its bending radius. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 1, pp. 26–31. (in Russian)
9. Mukhtubayev A.B., Aksarin S.M., Strigalev V.E. Polarization extinction ratio of the polarization crosstalk caused by point pressure force in the polarization-maintaining fiber. *Optical Fiber Technology*, 2017, vol. 38, pp. 119–122. doi: 10.1016/j.yofte.2017.09.010
10. Meshkovskiy I.K., Strigalev V.Y., Deineka G.B., Peshekhonov V.G., Volynsky D.V., Untilov A.A. Three-axis fiber-optic gyroscope: development and test results. *Gyroscopy and Navigation, IET* – 2011, vol. 2, no. 4, pp. 208–213. doi: 10.1134/s2075108711040122
11. Kolevatov A.P., Nikolaev S.G., Andreev A.G., Ermakov V.S., Dunaev D.A., Kel O.L., Malgin N.V. Development of a dual mode attitude and heading reference system on fiber optic gyros for land vehicles. *Proc. 13th St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*, 2006.
12. Irodov I.E. *Wave Processes. Basic Laws*. 4th ed. Moscow,

12. Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы. 4-е изд. М.: БИНОМ, 2007. 263 с.
13. Sezerman O., Best G. Accurate alignment preserves polarization // *Laser Focus World*, 1997. V. 33. N 12. P. 27–30.
14. Аксарин С.М., Стригалева В.Е. Методика и аппарат исследования локальных преобразований в оптических волокнах с двулучепреломлением // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. СПб, 2012. Вып. 2. С. 44–45.
15. Martin P., Le Boudec G., Lefevre H.C. Test apparatus of distributed polarization coupling in fiber gyro coils using white light interferometry // *Proceedings of SPIE*. 1992. V. 1585. P. 173–179. doi: 10.1117/12.135045
16. Li Z., Yao X.S., Chen X., Chen H., Meng Z., Liu T. Complete characterization of polarization-maintaining fibers using distributed polarization analysis // *Journal of Lightwave Technology*. 2015. V. 33. N 2. P. 372–380. doi: 10.1109/jlt.2014.2377091
17. Emsley C. Fiber-optic components: harsh-environment optical fiber coatings: beauty is only skin deep // *Laser Focus World*. 2015. V. 51. N 4. P. 1–8.
- BINOM, 2007, 263 p. (in Russian)
13. Sezerman O., Best G. Accurate alignment preserves polarization. *Laser Focus World*, 1997, vol. 33, no. 12, pp. 27–30.
14. Aksarin S.M., Strigalev V.E. Method and apparatus for studying local changes in optical fibers with birefringence. *Sbornik Tezisov Dokladov Kongressa Molodykh Uchenykh* [Proc. Congress of Young Scientists]. St. Petersburg, 2012, no. 2, pp. 44–45. (in Russian)
15. Martin P., Le Boudec G., Lefevre H.C. Test apparatus of distributed polarization coupling in fiber gyro coils using white light interferometry. *Proceedings of SPIE*, 1992, vol. 1585, pp. 173–179. doi: 10.1117/12.135045
16. Li Z., Yao X.S., Chen X., Chen H., Meng Z., Liu T. Complete characterization of polarization-maintaining fibers using distributed polarization analysis. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, vol. 33, no. 2, pp. 372–380. doi: 10.1109/jlt.2014.2377091
17. Emsley C. Fiber-optic components: harsh-environment optical fiber coatings: beauty is only skin deep. *Laser Focus World*, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 1–8.

Авторы

Мухтубаев Азамат Булатович – инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57195632244, 57198779748, ORCID ID: 0000-0002-4848-0483, Mukhtubaev.ab@gmail.com

Аксарин Станислав Михайлович – заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57191417852, ORCID ID: 0000-0002-7482-3072, staksar@gmail.com

Калугин Евгений Эдуардович – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-8474-1791, znabyaklg@gmail.com

Authors

Azamat B. Mukhtubayev – engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57195632244, 57198779748, ORCID ID: 0000-0002-4848-0483, Mukhtubaev.ab@gmail.com

Stanislav M. Aksarin – Laboratory head, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57191417852, ORCID ID: 0000-0002-7482-3072, staksar@gmail.com

Evgeniy E. Kalugin – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-8474-1791, znabyaklg@gmail.com