

УДК 535

**А.С. Смирнов^{1, 2}, В.В. Бурдин^{1, 2},
Р.Д. Елисеенко¹, Ю.А. Константинов²**

¹ Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

² Лаборатория фотоники Пермского научного центра
Уральского отделения РАН, Пермь, Россия

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ В АНИЗОТРОПНЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ МЕТОДОМ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ БРИЛЛЮЭНОВСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

Важный показатель качества анизотропного волоконного световода – это однородность его поляризационных свойств по длине, в частности параметра двулучепреломления, который равен разности эффективных показателей преломления ортогональных поляризационных мод. Параметр двулучепреломления обычно измеряют на коротких отрезках волокна, что является разрушающим методом, либо измеряют среднее значение по образцу. В настоящей работе рассмотрено применение метода поляризационной бриллюэновской рефлектометрии для оценки однородности двулучепреломления по длине анизотропного световода и количественной оценки его величины.

Ключевые слова: сохраняющие поляризацию световоды, сохраняющие поляризацию волокна, поляризационная бриллюэновская рефлектометрия, двулучепреломление, анизотропные световоды, бриллюэновская рефлектометрия.

**A.S. Smirnov^{1, 2}, V.V. Burdin^{1, 2},
R.D. Eliseenko¹, Iu.A. Konstantinov²**

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

² Photonics Laboratory of Perm Scientific Centre of Ural Branch
of Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

ESTIMATION OF THE BIREFRINGENCE VALUE IN ANISOTROPIC OPTICAL FIBERS BY POLARIZATION BOTDA TECHNIQUE

An important indicator of the quality of anisotropic fiber is longitudinal uniformity of its polarization properties, in particular the value of birefringence, which is equal to the difference between the effective refractive indices of the orthogonal polarization modes. Parameter of birefringence is typically measured in

Статья подготовлена по материалам доклада на конференции «Оптическая рефлектометрия – 2016».

short lengths of fiber by destructive techniques, or the average value is determined. Present paper examines the use of the polarization Brillouin reflectometry (P-BOTDA) technique for estimation of the uniformity of birefringence along the length of an anisotropic fiber and for quantitative estimation of its magnitude.

Keywords: polarization-maintaining optical fibers, polarization-maintaining fibers, polarization BOTDA, P-BOTDA, birefringence, Brillouin reflectometry.

Введение

Однородность поляризационных свойств вдоль анизотропного световода – один из основных его показателей качества. В работах [1–3] рассмотрен метод, основанный на поляризационной рефлектометрии, позволяющий локализовывать области связи поляризационных мод и оценивать величину этой связи. Не менее важен также параметр модового двулучепреломления [4] $B = |n_x - n_y|$, где n_x и n_y – эффективные показатели преломления сердцевины световода для ортогональных поляризационных мод. Сильное двулучепреломление создает условия разделения двух поляризационных мод, что является ключевым фактором для устойчивости линейного состояния поляризации излучения, введенного в одну из поляризационных мод. Двулучепреломление световодов обычно измеряется спектральными методами [5–9] или методами, в которых излучение, вводимое в световод, некоторым образом модулируется. Среди методов модуляции широко распространен метод локального давления [10]. В большинстве случаев в качестве образцов используются короткие отрезки волокна длиной порядка 1 м, либо измеряется среднее значение двулучепреломления на протяженном отрезке волокна. Вследствие случайных изменений параметров световода, неизбежно возникающих в процессе вытяжки, параметр двулучепреломления может изменяться вдоль длины всего исследуемого образца. Существуют также работы [11–14], в которых предлагаются рефлектометрические методы измерения в длинных образцах изотропных волоконных световодов длины биений, обусловленной двулучепреломлением, однако для анизотропных волоконных световодов эти методы не подходят, поскольку длина биений в них на три порядка меньше. В работе [15] было рассмотрено использование метода поляризационной бриллюэновской рефлектометрии для оценки однородности величины двулучепреломления по всей длине анизотропного световода и было показано совпадение наклона линейного изменения двулучепреломления по длине световода и разности бриллюэновских частот поляризационных мод световода.

В настоящей работе рассматривается возможность количественной оценки распределенной величины двулучепреломления по длине световода на примере волоконной линии, собранной из коротких (≈ 10 м) образцов, с известным двулучепреломлением.

Бриллюэновское рассеяние – это рассеяние света в результате взаимодействия с упругими колебаниями среды – акустическими фонами. Смещение частоты рассеянного назад света выражается как [16]

$$f = \frac{2 \cdot n \cdot V}{\lambda}, \quad (1)$$

где n – эффективный показатель преломления среды; V – скорость звука; λ – длина волны в вакууме.

В случае анизотропного одномодового оптического волокна имеются две поляризационные моды с эффективными показателями преломления n_x и n_y . Возбуждая последовательно сначала одну поляризационную моду, а затем другую, можно получить две различные бриллюэновские рефлектограммы. Разность этих рефлектограмм (бриллюэновских смещений частот) на каждом участке световода пропорциональна разности эффективных показателей преломления, т.е. параметру двулучепреломления B :

$$f_x - f_y = \frac{2(n_x - n_y)V}{\lambda} = \frac{2BV}{\lambda}. \quad (2)$$

Отношение разности бриллюэновских частот, отнесенных к среднему значению рассматриваемых бриллюэновских частот, дает следующее выражение:

$$\frac{f_x - f_y}{(f_x + f_y)/2} = \frac{2(n_x - n_y)}{n_x + n_y} = \frac{B}{n}. \quad (3)$$

Основная цель данной работы – определить возможность количественной оценки распределенной величины двулучепреломления по длине световода типа «Панда» [17].

1. Описание эксперимента

Произведение эффективного показателя преломления среды и скорости звука в волокне линейно зависит от температуры и деформации волокна [18]. Это позволяет определять температуру либо

деформацию волокна вдоль волоконной линии посредством измерения распределения частотного бриллюэновского сдвига [18]. Однако эти факторы являются паразитными для измерения двулучепреломления вдоль волокна, их необходимо устранить (минимизировать). Для исключения влияния деформации волокон исследуемые образцы были уложены в свободной намотке. Для исключения влияния температуры применялось пассивное термостатирование: образцы были помещены внутрь многослойного кожуха из пористого полимерного теплоизолирующего материала. Общий вид оптической схемы приведен на рис. 1.

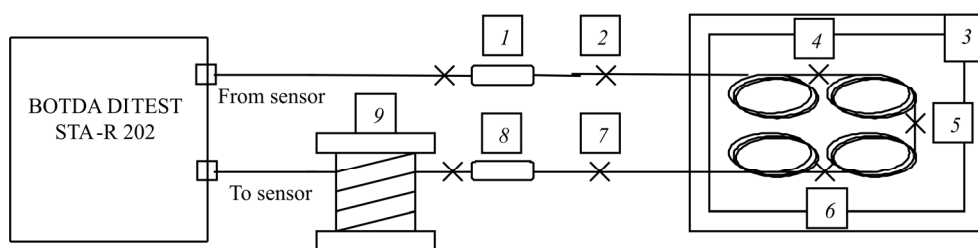


Рис. 1. Экспериментальная установка:

- 1, 8 – оптические поляризаторы с волоконными выходами; 3 – термоизолирующий кожух с исследуемыми образцами; 2, 4–7 – сварные соединения волоконных световодов, сохраняющих поляризацию, с ориентацией по оптическим осям; 9 – буферное волокно

Бриллюэновские рефлектограммы записывались с помощью бриллюэновского анализатора BOTDA Omnisens DiTeSt STA-R202, работа которого основана на явлении вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна [16]. Параметры бриллюэновского анализатора BOTDA Omnisens DiTeSt STA-R202 следующие: рабочая длина волны – 1550 нм, используемое количество усреднений – 4000, используемое пространственное разрешение – 1 м, используемое частотное разрешение – 0,2 МГц.

Для получения бриллюэновской рефлектограммы каждой поляризационной моды исследуемого световода к обоим его концам были приварены оптические поляризаторы с волоконными выходами, поляризационные оси которых параллельны оптической оси выбранной поляризационной моды, т.е. сварки 2 и 7 (см. рис. 1) выполнены под углом 0°

для первой рефлектограммы и 90° для второй. Параметры поляризаторов таковы: рабочий диапазон длин волн – 1550 ± 50 нм, минимальная экстинкция – 30 дБ. Сварка производилась на сварочном аппарате Fujikura PM-100 по встроенному алгоритму.

Для определения возможности количественной, а не только качественной оценки распределенной величины двулучепреломления по длине световода были выбраны образцы световодов типа «Панда» длиной порядка 10 м с известным разным двулучепреломлением (коэффициент затухания оптического сигнала – 1 дБ/км, длина волны отсечки – 1054 ± 5 нм, диаметр поля моды – $6,9 \pm 0,5$ мкм, диаметр оболочки – 80 ± 2 мкм). Измерение двулучепреломления образцов было проведено ранее спектральным интерференционным методом [5]. Точность измерения параметра двулучепреломления спектральным интерференционным методом [5] в абсолютных единицах показателя преломления составляет 10^{-6} , что позволяет использовать ее для проверки представленного метода.

2. Обсуждение полученных результатов

На рис. 2 приведены бриллюэновские рефлектограммы, снятые для обеих поляризационных мод исследуемого анизотропного световода типа «Панда».

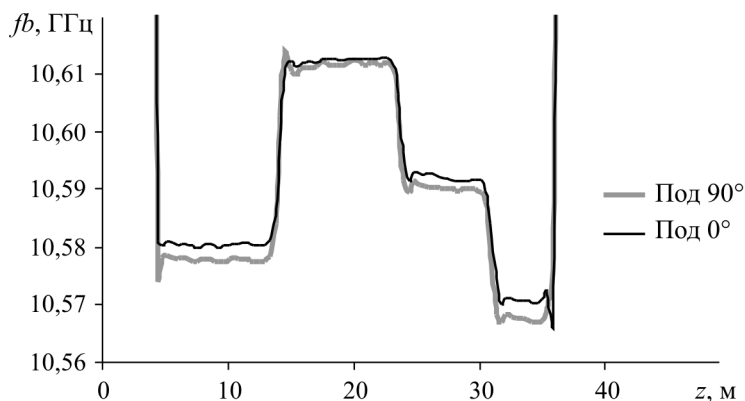


Рис. 2. Зависимость частотного бриллюэновского сдвига от координаты z , измеряемой вдоль волоконной линии

Данные рефлектограммы представляют собой зависимость частотного бриллюэновского смещения от координаты z , измеряемой вдоль оси световода. Наблюдается различие бриллюэновских смеще-

ний частоты поляризационных мод, что обусловлено различным двулучепреломлением образцов. На рис. 3 представлена разность бриллюэновских рефлектограмм поляризационных мод.

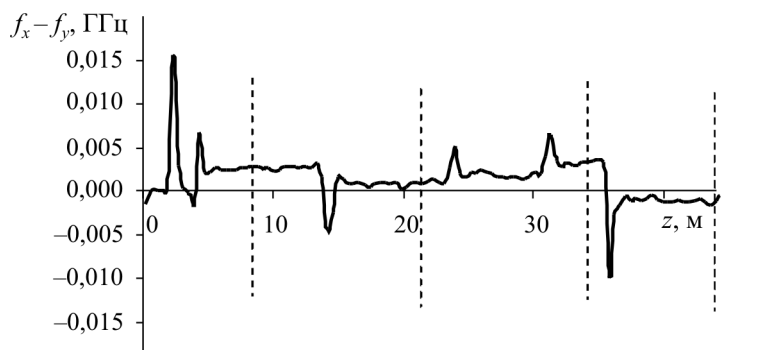


Рис. 3. Разность бриллюэновских рефлектограмм поляризационных мод исследуемой волоконной линии

Вертикальными штриховыми линиями на рис. 3 обозначены места сварных соединений между образцами, выполненные с сохранением ориентации поляризационных осей, т.е. границы образцов. Используя данные бриллюэновской частоты для каждого образца, характерную величину показателя преломления сердцевины световода типа «Панда» $n \approx 1,47$, а также данные разности бриллюэновских частот были рассчитаны величины двулучепреломления с помощью формулы (3) (таблица).

Измеренные и рассчитанные параметры образцов

Параметр	Номер образца			
	1	2	3	4
Средняя бриллюэновская частота f_b , ГГц	10,580	10,612	10,591	10,569
Средняя величина разности бриллюэновских частот $f_x - f_y$, ГГц	0,0026	0,0009	0,0020	0,0031
Рассчитанное из разности бриллюэновских частот двулучепреломление, B^* , $\times 10^{-4}$	3,6	1,2	2,8	4,3
Полученное спектральным методом [5] двулучепреломление, B , $\times 10^{-4}$	7,3	4,2	5,8	8,1

Судя по данным таблицы, для различных образцов наблюдается удовлетворительная корреляция между значениями двулучепреломления, полученными разными способами (с учетом точки 0; коэффициент корреляции равен 0,97).

На рис. 4 представлены величины двулучепреломления (ДЛП), рассчитанного из разности бриллюэновских частот образцов, в зависимости от двулучепреломления, полученного спектральным методом [5], которые тоже приведены на графике и обозначены ромбиками. Для аппроксимации точек рассчитанного ДЛП линейной функции, исходящей из начала координат, был применен метод наименьших квадратов. Коэффициент линейной зависимости получился равным 0,484, т.е. значения ДЛП, рассчитанные из разности бриллюэновских частот образцов, примерно в 2 раза меньше ДЛП, полученного спектральным методом.

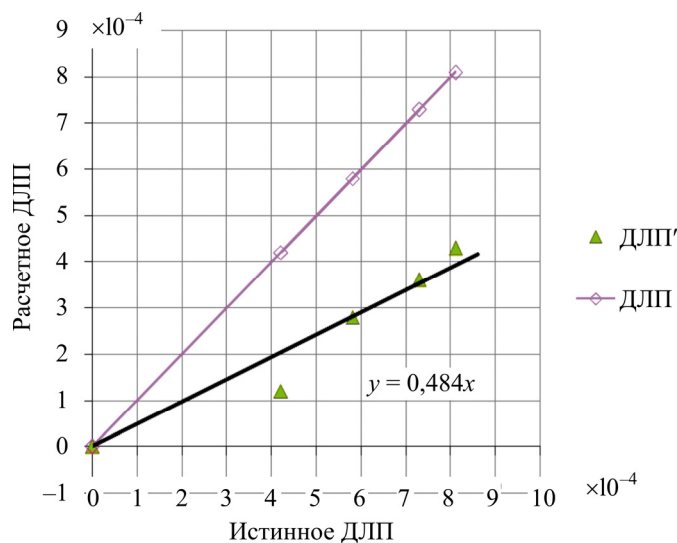


Рис. 4. Двулучепреломление вдоль световода, рассчитанное из разности бриллюэновских частот, в зависимости от двулучепреломления, измеренного спектральным методом

Экспериментальные точки рис. 4 наглядно демонстрируют линейную зависимость между значениями двулучепреломления, полученными разными способами. Такое поведение дает возможность, введя соответствующую линейную калибровку, количественно оценивать величину двулучепреломления, а также судить об однородности этого параметра по длине образцов анизотропных волоконных световодах исходя из данных поляризационной бриллюэновской рефлектометрии.

Наблюдаемое отличие рассчитанных ДЛП от истинных значений ДЛП свидетельствует о том, что в модели расчета ДЛП, пред-

ставленной в формулах (1–3), не в полной мере учтены факторы, влияющие на бриллюэновский частотный сдвиг двух поляризационных мод анизотропного световода. В частности, начальная формула (1) является упрощенной, в ней отсутствуют члены большего порядка малости, которые, судя по полученным экспериментальным данным, становятся сравнимыми с величиной разности бриллюэновских частотных сдвигов двух поляризационных мод. В дальнейшем планируется произвести более точную оценку, которая позволит объяснить наблюдаемое расхождение.

Список литературы

1. Детектирование и локализация дефектов сохранения поляризации в анизотропном волоконном световоде / В.В. Бурдин, Ю.А. Константинов, В.П. Первадчук, А.С. Смирнов // *Квантовая электроника*. – 2013. – № 43. – С. 531–534.
2. Рефлектометрический метод оценки взаимодействия поляризационных мод в анизотропных оптических волокнах / В.В. Бурдин, Ю.А. Константинов, В.П. Первадчук, А.С. Смирнов // *Фотон-экспресс-наука*. – 2013. – № 6. – С. 173–174.
3. Смирнов А.С., Бурдин В.В., Константинов Ю.А. Об оценке h -параметра в сохраняющем поляризацию оптическом волокне на основе данных поляризационной рефлектометрии // *Прикладная фотоника*. – 2014. – № 1. – С. 97–111.
4. Петухов А.С., Смирнов А.С., Бурдин В.В. Температурные свойства волоконной четвертьволновой пластинки минимальной длины // *Прикладная фотоника*. – 2015. – № 2 (1). – С. 97–111.
5. Rashleigh S.C. Measurement of fiber birefringence by wavelength scanning: effect of dispersion // *Optics Letters*. – 1983. – № 8 (6). – P. 336–338.
6. Rashleigh S.C. Wavelength dependence of birefringence in highly birefringent fibers // *Optics Letters*. – 1982. – № 7 (6). – P. 294–296.
7. Shlyagin M.G., Khomenko A.V., Tentori D. Birefringence dispersion measurement in optical fibers by wavelength scanning // *Optics Letters*. – 1995. – № 20. – P. 869–871.
8. Irvine-Halliday D., Raziullah Khan M., Zhang P.-G. Beat-length measurement of high-birefringence polarization-maintaining optical fiber

using the DC Faraday magneto-optic effect // *Optical Engineering*. – 2000. – № 39 (5). – P. 1310–1315.

9. Measurement of the elliptical birefringence of single-mode optical fibers / T. Chartier, A. Hideur, C. Ozkul, F. Sanchez, G.M. Stephan // *Applied Optics*. – 2001. – № 40 (30). – P. 5343–5353.

10. Takada K., Noda J., Ulrich R. Precision measurement of modal birefringence of highly birefringent fibers by periodic lateral force // *Applied Optics*. – 1985. – № 24. – P. 4387–4391.

11. Polarization mode dispersion mapping in optical fibers with a polarization-OTDR / M. Wuilpart, G. Ravet, P. Mégret, M. Blondel // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2002. – № 14 (12). – P. 1716–1718.

12. Measurement of the spatial distribution of birefringence in optical fibers / M. Wuilpart, P. Mégret, M. Blondel, A.J. Rogers, Y. Defosse // *Photonics Technology Letters*. – 2001. – № 13 (8). – P. 836–838.

13. Polarisation OFDR for measurements of birefringence and polarisation mode coupling lengths in optical fibres / B. Huttner, J. Reecht, N. Gisin, R. Passy, J.P. von der Weid // *Technical Digest: Symposium on Optical Fiber Measurements*. – 1998.

14. Wegmuller M., Legre M., Gisin N. Distributed beatlength measurement in single-mode fibers with optical frequency-domain reflectometry // *Journal of Lightwave Technology*. – 2002. – Vol. 20, № 5. – P. 828–835.

15. Исследование двулучепреломления в анизотропных волоконных световодах методом поляризационной бриллюэновской рефлектометрии // А.С. Смирнов, В.В. Бурдин, Ю.А. Константинов, А.С. Петухов, И.Р. Дроздов, Я.С. Кузьминых, В.Г. Беспрозванных // *Квантовая электроника*. – 2015. – № 45 (1). – С. 66–68.

16. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. – М.: Мир, 1996. – 257 с.

17. Труфанов А.Н., Труфанов Н.А. О моделях формирования напряженного состояния в анизотропных оптических волокнах // *Прикладная фотоника*. – 2014. – № 1. – С. 97–111.

18. Kurashima T., Horiguchi T., Tateda M. Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers // *Optics Letters*. – 1990. – Vol. 15, № 18. – P. 1038–1040.

References

1. Burdin V.V., Konstantinov Iu.A., Pervadchuk V.P., Smirnov A.S. Dektirovanie i lokalizatsiia defektov sokhraneniia poliarizatsii v anizotropnom volokonnom svetovode [Detection and localization of defects in the anisotropic polarization maintaining optical fiber]. *Kvantovaia elektronika*, 2013, no. 43, pp. 531-534.
2. Burdin V.V., Konstantinov Iu.A., Pervadchuk V.P., Smirnov A.S. Reflektometricheskii metod otsenki vzaimodeistviia poliarizatsionnykh mod v anizotropnykh opticheskikh voloknakh [Reflectometry method for measuring the interaction of polarization modes in anisotropic optical fibers]. *Foton-ekspress-nauka*, 2013, no. 6.
3. Smirnov A.S., Burdin V.V., Konstantinov Iu.A. Ob otsenke h -parametra v sokhraniiaushchem poliarizatsiiu opticheskom volokne na osnove dannykh poliarizatsionnoi reflektometrii [Evaluation of polarization maintaining fiber h -parameter with polarization reflectometry]. *Prikladnaia fotonika*, 2014, no. 1, pp. 97-111.
4. Petukhov A.S., Smirnov A.S., Burdin V.V. Temperaturnye svoistva volokonnoi chetvert'volnovoi plastinki minimal'noi dliny [The temperature properties of fiber quarter-wave plate of minimum length]. *Prikladnaia fotonika*, 2015, no. 1, pp. 80-87.
5. Rashleigh S.C. Measurement of fiber birefringence by wavelength scanning: effect of dispersion. *Optics Letters*, 1983, no. 8 (6), pp. 336-338.
6. Rashleigh S.C. Wavelength dependence of birefringence in highly birefringent fibers. *Optics Letters*, 1982, no. 7 (6), pp. 294-296.
7. Shlyagin M.G., Khomenko A.V., Tentori D. Birefringence dispersion measurement in optical fibers by wavelength scanning. *Optics Letters*, 1995, no. 20, pp. 869-871.
8. Irvine-Halliday D., Raziullah Khan M., Zhang P.-G. Beat-length measurement of high-birefringence polarization-maintaining optical fiber using the DC Faraday magneto-optic effect. *Optical Engineering*, 2000, no. 39 (5), pp. 1310-1315.
9. Chartier T., Hideur A., Ozkul C., Sanchez F., Stephan G.M. Measurement of the elliptical birefringence of single-mode optical fibers. *Applied Optics*, 2001, no. 40 (30), pp. 5343-5353.
10. Takada K., Noda J., Ulrich R. Precision measurement of modal birefringence of highly birefringent fibers by periodic lateral force. *Applied Optics*, 1985, no. 24, pp. 4387-4391.

11. Wuilpart M., Ravet G., Mégret P., Blondel M. Polarization mode dispersion mapping in optical fibers with a polarization-OTDR. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, no. 14 (12), pp. 1716-1718.

12. Wuilpart M., Mégret P., Blondel M., Rogers A.J., Defosse Y. Measurement of the spatial distribution of birefringence in optical fibers. *Photonics Technology Letters*, 2001, no. 13 (8), pp. 836-838.

13. Huttner B., Reecht J., Gisin N., Passy R., Weid J.P. von der. Polarisation OFDR for measurements of birefringence and polarisation mode coupling lengths in optical fibres. *Technical Digest. Symposium on Optical Fiber Measurements*, 1998.

14. Wegmuller M., Legre M., Gisin N. Distributed beatlength measurement in single-mode fibers with optical frequency-domain reflectometry. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, no. 20 (5), pp. 828-835.

15. Smirnov A.S., Burdin V.V., Konstantinov Iu.A., Petukhov A.S., Drozdov I.R., Kuz'minykh Ia.S., Besprozvannykh V.G. Issledovanie dvulucheprelomleniia v anizotropnykh volokonnykh svetovodakh metodom polarizatsionnoi brilliuenovskoi reflektometrii [Study of the birefringence in anisotropic optical fibers polarization by method of Brillouin reflectometry]. *Kvantovaiia elektronika*, 2015, no. 45 (1), pp. 66-68.

16. Agraval G. Nelineinaia volokonnaia optika [Nonlinear fiber optics]. Moscow, 1996. 257 p.

17. Trufanov A.N., Trufanov N.A. O modeliakh formirovaniia napriazhennogo sostoianiia v anizotropnykh opticheskikh voloknakh [About models of the formation of the stress state in anisotropic optical fibers]. *Prikladnaia fotonika*, 2014, no. 1, pp. 97-111.

18. Kurashima T., Horiguchi T., Tateda M. Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers. *Optics Letters*, 1990, no. 15 (18), p. 1038-1040.

Получено 08.06.2016