

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-4-643-649

УДК 535-45

Исследование влияния наведенных механических напряжений, вызванных герметизацией стеклоприпоем, на значение коэффициента поляризационной экстинкции в двулучепреломляющем оптическом волокне

Евгений Эдуардович Калугин^{1✉}, Азамат Булатович Мухтубаев²,
 Игорь Касьянович Мешковский³

^{1,2,3} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ znabyaklg@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-8474-1791>

² mukhtubaev.ab@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4848-0483>

³ igorkm@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3470-1000>

Аннотация

Предмет исследования. В работе рассмотрено влияние наведенных механических напряжений, вызванных герметизацией стеклоприпоем пары оптических двулучепреломляющих волокон с эллиптической напрягающей оболочкой на величину коэффициента поляризационной экстинкции. Предложен вариант с размещением в области герметизации нерабочих волокон для создания симметрии наведенных механических напряжений. Выполнено экспериментальное исследование вклада наведенных механических напряжений на величину коэффициента поляризационной экстинкции. Проведена оценка влияния температуры на коэффициент поляризационной экстинкции в области герметизации оптических двулучепреломляющих волокон. **Метод.** Герметизация волокон в металлической трубке произведена путем плавления преформы стеклоприпоя индукционным нагревателем. Оценка коэффициента поляризационной экстинкции получена методом широкополосной интерферометрии с использованием сканирующего поляризационного интерферометра Майкельсона. **Основные результаты.** Измерена величина коэффициента поляризационной экстинкции в четырех образцах с длиной рабочих волокон 4 м. Эксперимент показал, что создание изометрии структуры в области герметизации с помощью добавления нерабочих волокон позволило уменьшить степень изменения коэффициента поляризационной экстинкции с 0,082 дБ/К до 0,035 дБ/К в температурном диапазоне от минус 15 °С до плюс 70 °С. Полученный результат позволил произвести герметизацию нескольких волокон в одной трубке для уменьшения габаритов устройств. **Практическая значимость.** Выполненное исследование может быть полезно в разработках оптоэлектронных устройств, где требуется герметизация выводов двулучепреломляющего оптического волокна в металлическом корпусе.

Ключевые слова

оптические двулучепреломляющие волокна, коэффициент поляризационной экстинкции, стеклоприпой, связь поляризационных мод, герметизация

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Приоритет 2030».

Ссылка для цитирования: Калугин Е.Э., Мухтубаев А.Б., Мешковский И.К. Исследование влияния наведенных механических напряжений, вызванных герметизацией стеклоприпоем, на значение коэффициента поляризационной экстинкции в двулучепреломляющем оптическом волокне // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 4. С. 643–649. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-4-643-649

Polarization extinction ratio in polarization maintaining fiber sealed with glass solder

Evgeniy E. Kalugin¹✉, Azamat B. Mukhtubaev², Igor K. Meshkovskiy³

^{1,2,3} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ znabyaklg@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-8474-1791>

² mukhtubaev.ab@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4848-0483>

³ igorkm@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3470-1000>

Abstract

The paper considers the effect of sealing with glass solder a pair of optical polarization maintaining fibers with an elliptical stress cladding on the value of the polarization extinction ratio. A variant with the placement of non-working fibers in the sealing area to create the symmetry of induced mechanical stresses is proposed. An experimental study of the contribution of the induced mechanical stresses on the value of the polarization extinction ratio has been performed. The assessment of temperature effect on the coefficient of polarization extinction in the place of sealing of optical polarization maintaining fibers has been made. Sealing of fibers in a metal tube was performed using a glass solder preform and an induction heater. Evaluation of the polarization extinction ratio was obtained by white-light interferometry using the scanning Michelson interferometer. The value of the polarization extinction ratio was measured on 4 samples with a length of working fibers of 4 meters. This experiment shows that creation of isometry structure in the area of sealing by addition of non-working fibers allows decreasing the polarization extinction ratio from 0.082 dB/K to 0.035 dB/K in the temperature range from $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$. This method allows the sealing of several fibers in one tube to reduce the size of the devices. The performed research can be useful in the development of optoelectronic devices where it is required to introduce optical birefringent fibers in a sealed housing.

Keywords

polarization maintaining (PM) fibers, polarization extinction ratio, glass solder, cross-polarization coupling, sealing

Acknowledgements

The work is financially supported by Priority 2030 program.

For citation: Kalugin E.E., Mukhtubaev A.B., Meshkovskiy I.K. Polarization extinction ratio in polarization maintaining fiber sealed with glass solder. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 643–649 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-4-643-649

Введение

Оптические волокна с сохранением поляризации часто используются при разработке волоконно-оптических датчиков. В таких волокнах поляризация сохраняется за счет создания в их структуре асимметрии, что создает анизотропию и формирует двулучепреломление. Такие волокна называют двулучепреломляющими (ДЛП). В основном используется два вида ДЛП волокон: волокна с эллиптической сердцевинной и с наведенным механическим напряжением в структуре. В волокнах первого типа двулучепреломление создается за счет геометрии сердцевинки: разное значение эффективных показателей преломлений для каждой из осей эллипса. Второй тип основан на эффекте фотоупругости [1, 2]. В таких ДЛП волокнах постоянные распространения оптического излучения двух ортогональных мод различаются. В ДЛП волокнах выделяют две основные поперечные оси с дифференцированными показателями преломления: одна пересекает область с наведенными напряжениями («медленная ось»), а другая перпендикулярна первой («быстрая ось») [1, 2].

Потребность формирования герметичного ввода оптического волокна в корпус оптоэлектронных устройств продолжает расти в связи с повышающимися требованиями индустрий, использующих оптоэлектронные устройства, к производительности и надежности этих устройств в целом. Ввод оптического излучения в волновод оптоэлектронных устройств, например многофункциональной интегральной оптической схемы (МИОС), требует сверхточного метода позиционирования и крепления оптического волокна

на весь срок службы устройства. Сдвиг или растяжение волокна может привести к потерям мощности оптического излучения в области стыковки волокна с волноводом МИОС. Оптические свойства электрооптических кристаллов, на которых формируют МИОС, меняются в зависимости от прикладываемого электрического напряжения, наличия водяных паров в окружающей среде, изменения температуры и газового состава окружающей атмосферы [3–6]. По этим причинам, требования надежности исключают использование эпоксидной смолы в качестве фиксирующего волокно адгезива из-за ползучести материала, выделения газов и предрасположенности к деградации со временем [7]. Метод с металлизацией голого волокна и последующей впайкой металлическим припоем в металлическую трубку не только дорог, но и образует другие проблемы с надежностью. Из-за различия коэффициента термического расширения кварца и металлов, в используемых припоях при изменении температуры возникают наведенные механические напряжения, которые влияют на оптические свойства оптических волокон [8].

Для таких устройств, как волоконно-оптический гироскоп, используются ДЛП волокна в качестве чувствительного элемента. При возникновении внешних механических воздействий происходит перераспределение напряжений в структуре волокна, что в свою очередь приводит к изменению двулучепреломления и к перекачке оптической мощности из одной поляризационной моды в ортогональную [9, 10]. Напряжения также возникают при изменении температуры, вследствие различия коэффициента термического расширения материалов. Точечные места перекачки оптической мощ-

ности в ДЛП волокнах описываются коэффициентом поляризационной экстинкции (Polarization Extinction Ratio, PER) [1]:

$$PER = \frac{P_{\perp}}{P_{\parallel}},$$

где P_{\perp} — оптическая мощность, перекачавшаяся в ортогональное состояние поляризации; P_{\parallel} — оптическая мощность основного состояния поляризации.

Локальные точки связи поляризационных мод приводят к ошибке сигнала волоконно-оптического гироскопа. Чем больше значение PER, тем больше сдвиг фазы Саньяка [11]. В некоторых волоконно-оптических гироскопах используется МИОС с X-разветвителем, соответственно с каждым из портов МИОС стыкуется ДЛП волокно. Отсюда возникает необходимость формирования гермовывода для пары ДЛП волокон с каждой из сторон, так как делать отдельные выводы часто не позволяют допустимые габариты устройства.

Цель работы — сравнение созданных симметричной и асимметричной структур герметизации оптических ДЛП волокон. Для этого использованы оптические ДЛП волокна с эллиптической напрягающей оболочкой, трубка из ковара, преформа стеклоприпоя в форме кольца и индукционный нагреватель.

Технология герметизации

Для тестирования метода герметизации оптического волокна в пропускной трубке из ковара (сплав 29НК) разработан индукционный нагреватель, разогревающий коваровую трубку, которая плавит преформу стеклоприпоя. Индукционный нагреватель работает в режиме коммутации при нулевом напряжении (Zero Voltage Switch, ZVS).

Мощность нагрева преформы регулируется входным напряжением схемы (максимум 12 В) и обеспечивает нагрев трубки до 400 °С. На рис. 1, а, d представлены фотография индукционного нагревателя в сборе и общая схема герметизации.

Для проведения исследования использованы трубки из ковара и преформы стеклоприпоя в форме кольца (рис. 1, с), подходящие для герметизации 2–4 волокон в металлической трубке. Температура плавления преформ стеклоприпоя 320–350 °С. Материалы данных компонентов выбраны как наиболее близкие по коэффициенту термического расширения к кварцу, из которого изготовлены оптические волокна: коэффициент термического расширения кварца $0,5 \cdot 10^{-6}$ 1/К, ковар $5 \cdot 10^{-6}$ 1/К, стеклоприпой $7,5 \cdot 10^{-6}$ 1/К. Длина коваровой трубки (рис. 1, b) составила 6,5 мм, внешний диаметр — 3 мм, внутренний диаметр 1,5 мм с сужением до 0,8 мм с одной стороны. Сужение предусмотрено для большей плотности заполнения расплавленного стеклоприпоя. Во внутренней части трубки сделан выступ, на который размещена преформа стеклоприпоя, чтобы при плавлении он затекал в узкую часть трубки. Чтобы исключить искажения векторов силовых линий магнитного поля индуктора при изготовлении образцов использована оснастка из керамики и органического стекла.

Трубка закреплена вертикально, волокна зачищены до кварцевого основания на длину около 10 мм и помещены в трубку таким образом, чтобы «голый» участок волокон находился в области герметизации. Преформа стеклоприпоя предварительно расположена во внутреннем выступе трубки.

Для проведения эксперимента были изготовлены четыре образца. В образце № 1 использовано два отрезка оптического ДЛП волокна. В образцах № 2–4 в герметизации участвовало четыре отрезка волокна. Два нерабочих волокна использованы для уплотнения заполнения расплавленного стеклоприпоя и создания изометрии механических напряжений для рабочих волокон. Нерабочие волокна имели длину около 20 см и были зачищены до кварцевой части. Внутри трубки волокна расположены в форме знака «+» таким образом, чтобы рабочие волокна были напротив друг друга (рис. 1, d).

Методика исследования

Для анализа величины коэффициента поляризационной экстинкции в исследуемых образцах использована методика широкополосной интерферометрии. С помощью данной методики можно добиться высокой точности в определении места локальной поляризационно-модовой связи в оптическом тракте, а по амплитуде дать оценку величине PER [12]. В настоящей работе использован сканирующий интерферометр Майкельсона с анализатором на входе для выделения обеих ортогональных поляризационных мод исследуемого образца.

С каждым из образцов выполнены исследования температурных зависимостей коэффициента поляризационной экстинкции в области герметизации оптического ДЛП волокна (рис. 2), запаянного при помощи стеклоприпоя в коваровой трубке. Коваровая трубка каждого из образцов располагалась на элементе Пельтье, а контакт между ними заполнен термопастой. Для контроля и измерения температуры использована термопара, которая также была в контакте с коваровой трубкой через термопасту. Электрическое питание элемента Пельтье контролировалось отдельно стоящим блоком питания с ручным контролем напряжения.

Исследование состояло из трех этапов: нагрев от комнатной температуры до плюс 70 °С, остывание до комнатной температуры и охлаждение до минус 15 °С. Измерения выполнялись каждые 10 °С при нагреве и остывании, и каждые 3 °С при охлаждении. Каждое измерение производилось трижды.

Результаты исследования

В результате проведенного исследования получены значения величины PER в области герметизации оптических ДЛП волокон образцов № 1–4 и зависимости PER в этих образцах от температуры коваровой трубки. Результаты представлены в таблице и на рис. 3.

Из полученных результатов видно, что в точке герметизации оптического ДЛП волокна в коваровой трубке при помощи стеклянного припоя возникает уве-

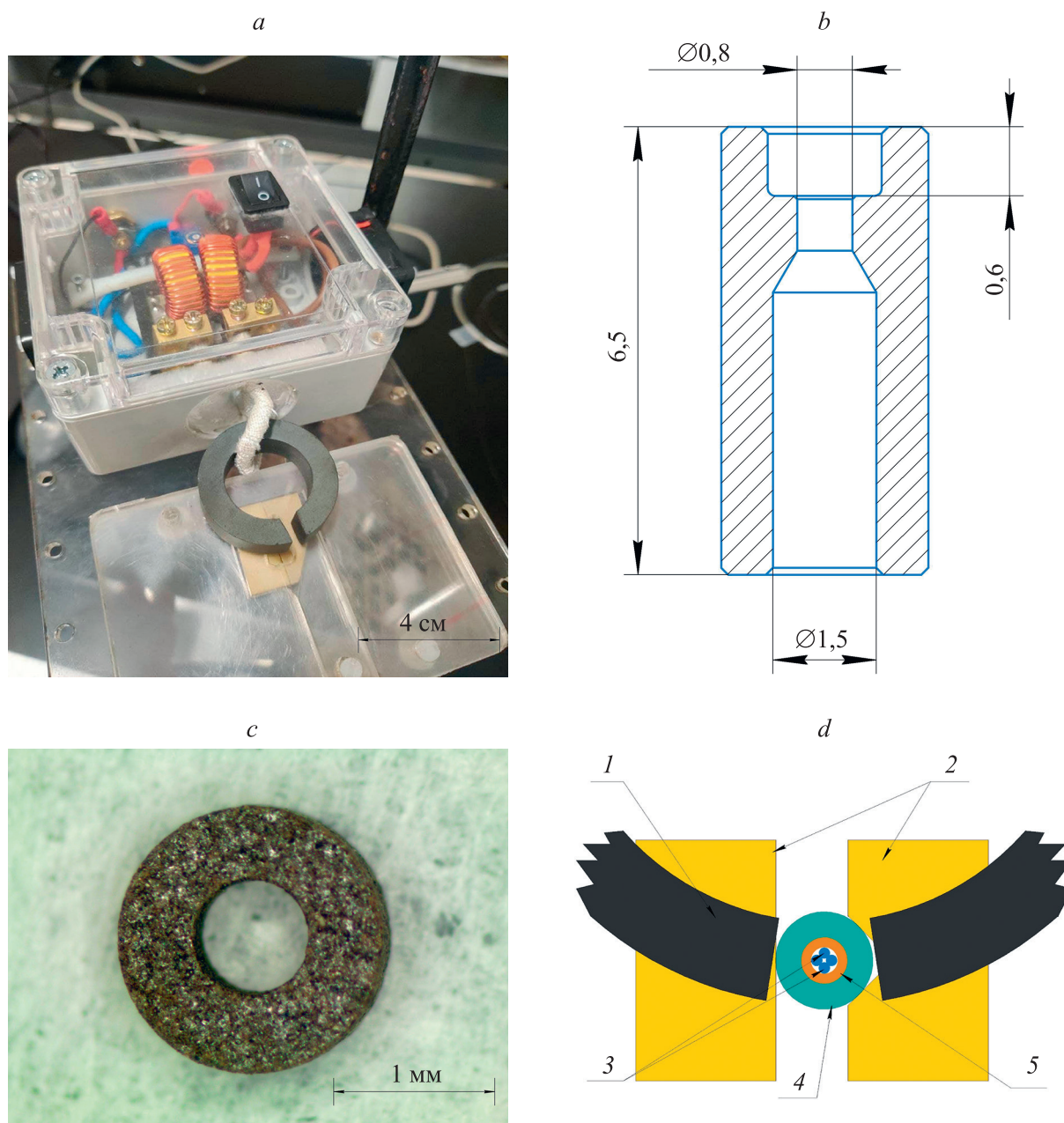


Рис. 1. Индукционный нагреватель в сборе (а); чертёж продольного сечения коваровой трубки (б); преформа стеклоприпоя (с); общая схема герметизации (д).

1 — ферритовое кольцо; 2 — керамические зажимы; 3 — нерабочие оптические волокна; 4 — коваровая трубка; 5 — преформа стеклоприпоя

Fig. 1. Induction heater assembly (a); drawing of a longitudinal section of a kovar tube (b); solder glass preform (c); general sealing scheme (d).

1 — ferrite ring, 2 — ceramic clamps, 3 — “dumb” fibers, 4 — kovar tube, 5 — glass solder preform

личение связи поляризационных мод, так коэффициент поляризационной экстинкции на образце № 1 увеличивается от -65 дБ (уровень чувствительности системы) до -38 дБ, а на образцах № 2–4 в среднем до -30 дБ.

Температурные испытания показали, что при нагреве коваровой трубки в запаянном оптическом волокне коэффициент поляризационной экстинкции понижается с -25 дБ при комнатной температуре до -31 дБ при плюс 70 °С на образце № 4, а при остывании возвращается к прежнему уровню. При охлаждении коэффи-

циент поляризационной экстинкции увеличивается с -39 дБ при комнатной температуре до -32 дБ при минус 10 °С на образце № 1.

Однако значения графиков образца № 4 отличаются от остальных, так как в образцах № 1–3 в одном волокне при нагреве коэффициент поляризационной экстинкции понижается, а в другом увеличивается. Обратная картина наблюдается при охлаждении.

В ходе проведенных экспериментов выявлено, что добавление в области герметизации нерабочих воло-

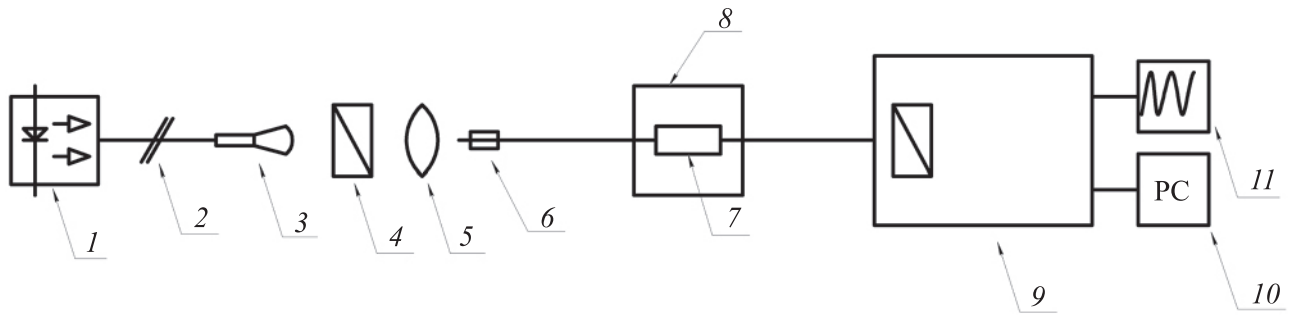


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования зависимости коэффициента поляризационной экстинкции полученных образцов от температуры:

1 — источник излучения; 2 — оптическая розетка; 3 — коллиматор; 4 — поляризатор; 5 — объектив; 6 — держатель; 7 — объект исследования; 8 — элемент Пельтье; 9 — поляризационный интерферометр Майкельсона; 10 — персональный компьютер (PC); 11 — осциллограф

Fig. 2. Scheme of the pilot plant for studying the dependence of PER of the obtained samples vs. temperature:

1 — light source, 2 — optical socket, 3 — collimator, 4 — polarizer, 5 — lens, 6 — clamp, 7 — object of study, 8 — thermoelectric cooler, 9 — Michelson polarization interferometer, 10 — PC, 11 — oscilloscope

Таблица. Результаты сканирования образцов № 1–4 после герметизации

Table. Results of scanning samples 1–4

Номер образца	Волокно	Значение коэффициента поляризационной экстинкции PER, дБ
1	1	-27,45
	2	-37,95
2	1	-42,32
	2	-38,60
3	1	-28,06
	2	-19,95
4	1	-25,13
	2	-26,48

кон увеличивает коэффициент поляризационной экстинкции, но при этом уменьшает его зависимость от температуры, так, например, в волокне 2 образца № 1 значения меняются от -39 дБ до -32 дБ, а в волокне 2 образца № 3 – от -21 дБ до -19 дБ.

Как известно из работ [13–15] величина коэффициента поляризационной экстинкции в оптических ДЛП волокнах зависит от величины механического давления и области его воздействия на волокно. Это наглядно подтверждено на рис. 3.

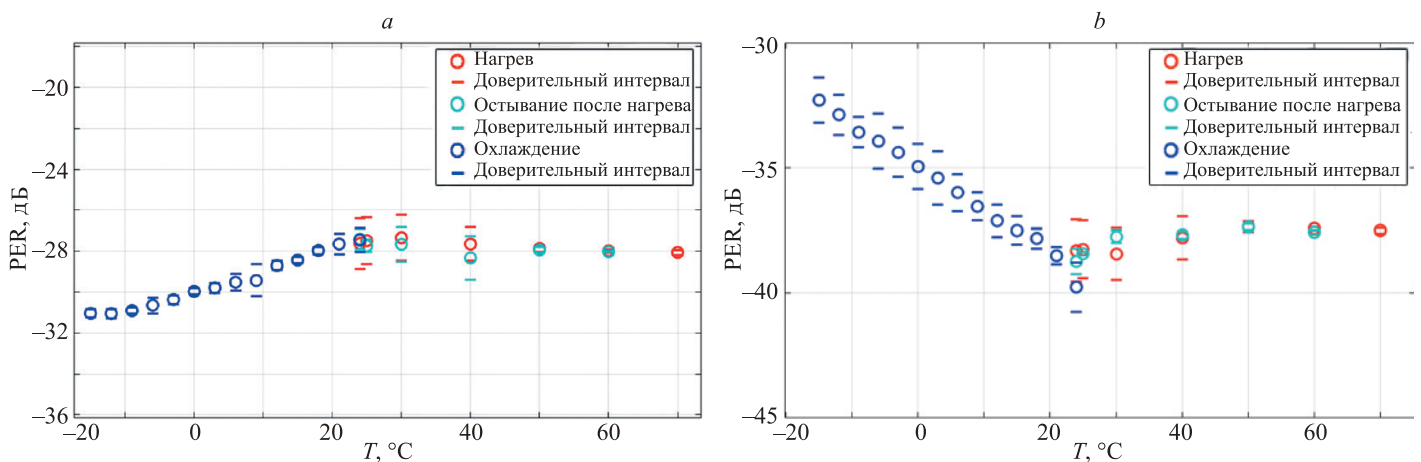


Рис. 3. Зависимость коэффициента поляризационной экстинкции от температуры для: образца № 1 — в волокнах 1 (a) и 2 (b); образца № 2 — в волокнах 1 (c) и 2 (d); образца № 3 — в волокнах 1 (e) и 2 (f); образца № 4 — в волокнах 1 (g) и 2 (h)

Fig. 3. Dependence of PER vs. temperature: fiber 1 sample 1 (a); fiber 2 sample 1 (b); fiber 1 sample 2 (c); fiber 2 sample 2 (d); fiber 1 sample 3 (e); fiber 2 sample 3 (f); fiber 1 sample 4 (g); fiber 2 sample 4 (h)

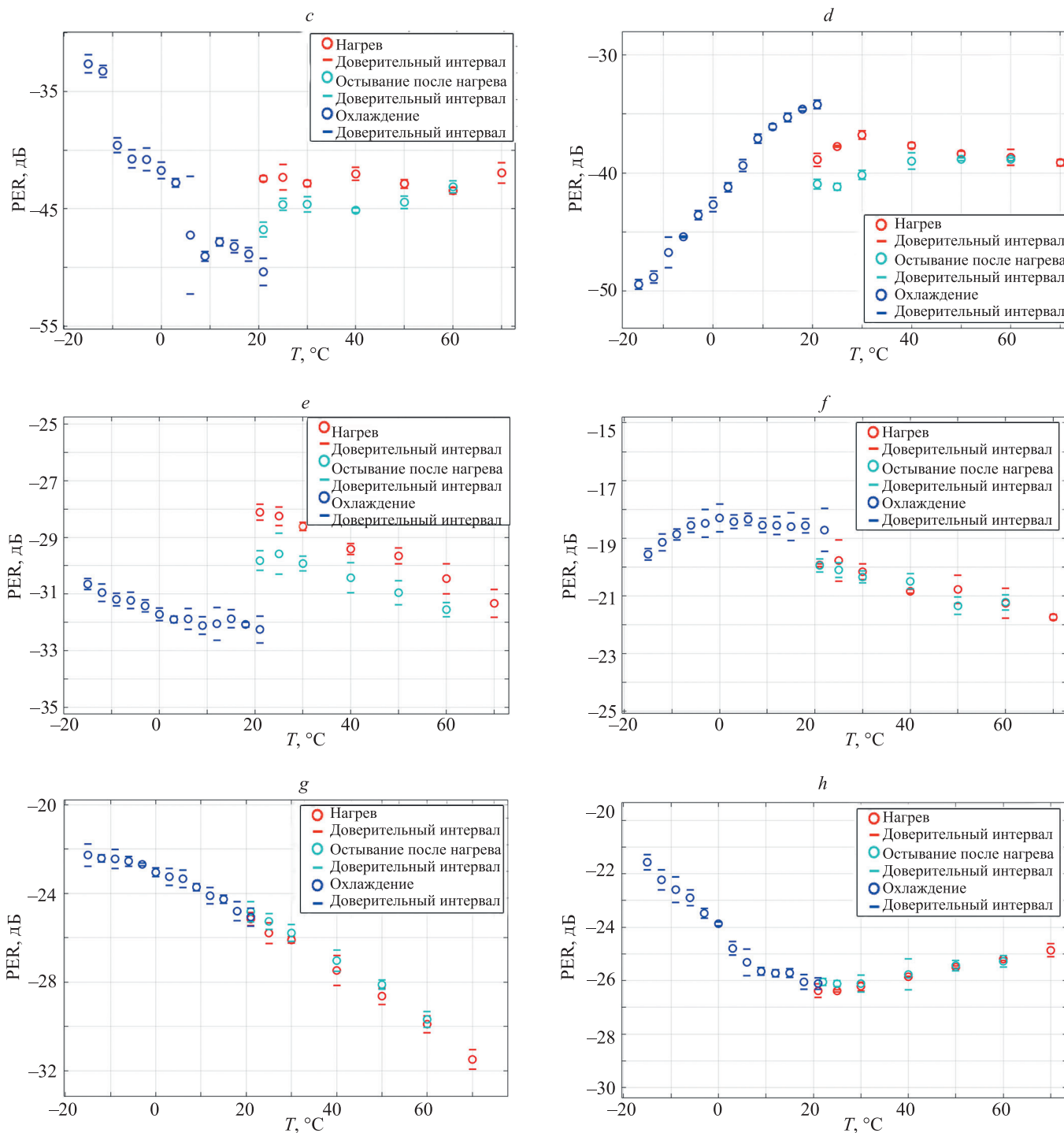


Рис. 3. Продолжение
Fig 3. Continued

Заключение

В работе изучено влияние герметизации стеклоприпоем пары оптических двулучепреломляющих волокон на величину коэффициента поляризационной экстинкции. В волокнах исследована зависимость коэффициента поляризационной экстинкции от напряжений, вызванных изменением температуры. Полученные результаты подтвердили, что механическое давление с разной величиной и в различных областях двулучепре-

ломляющего волокна по-разному влияет на изменение величины коэффициента поляризационной экстинкции. Эксперимент показал, что создание изометрии структуры в области герметизации с помощью добавления нерабочих волокон позволяет уменьшить степень изменения коэффициента поляризационной экстинкции с 0,082 дБ/К до 0,035 дБ/К в температурном диапазоне от минус 15 °С до плюс 70 °С. Данный способ позволяет производить герметизацию нескольких волокон в одной трубке для уменьшения габаритов устройств.

Литература

1. Lefèvre H. *The Fiber-Optic Gyroscopes* / 2nd ed. Artech House, 2014. P. 317–331.
2. Kaminow I.P. Polarization-maintaining fibers // *Applied Scientific Research*. 1984. V. 41. N 3-4. P. 257–270. <https://doi.org/10.1007/BF00382456>
3. Moody J., Morris R. Hermetically packaged LiNbO₃ optical circuit with oxidizing fill gas. Patent US8070368B1. 2010.
4. Iwamoto N.E., Sanders S.J., Gallagher T.J., Yates S., Taranta A., Grooms J.C., Warrensford K.L. Stabilizing gas in an optical gyro based on an inorganic waveguide. Patent EP3270107B1. 2018.
5. Mottet A., Jillard S., Hauden J., Grossard N., Porte H., Tchahame J., Veyrié D., Gilard O. Packaging Improvement of LiNbO₃ modulators and Space evaluation results // *Proceedings of SPIE*. 2018. V. 11180. P. 111803K. <https://doi.org/10.1117/12.2536047>
6. Donaldson A., Freer S.J. Lithium niobate devices. Patent GB2306690A. 1997.
7. Dietz R.L. Sealing optical fibers without metallization: design guidelines // *Proceedings of SPIE*. 2004. V. 5454. P. 111–120. <https://doi.org/10.1117/12.554264>
8. Shaw M., Galeotti R., Coppo G. Method of fixing an optical fibre in a laser package // *Proc. of the Electronic Components and Technology Conference*. 2001. P. 1441–1446. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2001.928025>
9. Ликумович Л.Б. Поляризационные эффекты в волоконных интерферометрах на основе двулучепреломляющих световодов: диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. СПб., 2008. 333 с.
10. Marcuse D. Coupled-mode theory for anisotropic optical waveguides // *Bell System Technical Journal*. 1975. V. 54. N 6. P. 985–995. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1975.tb02878.x>
11. Мухтубаев А.Б. Влияние поляризационных преобразований на сдвиг фазы Саньяка в волоконно-оптическом гироскопе: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб., 2020. 199 с.
12. Аксарин С.М. Исследование поляризационных методов и технологий согласования волоконно-оптических и интегрально-оптических волноводов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб., 2014. 116 с.
13. 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. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2017.09.010>
14. Namihira Y., Kudo M., Mushiaka Y. Effect of mechanical stress on the transmission characteristics of optical fibers // *Trans. Inst. Electron. Commun. Eng. Japan*. 1977. V. 60. N 7. P. 107–115.
15. Suhir E. Mechanical behavior of optical fibers and interconnects: application of analytical modelling // *Encyclopedia of Continuum Mechanics*. Springer, 2020. P. 1528–1532. https://doi.org/10.1007/978-3-662-55771-6_371

Авторы

Калугин Евгений Эдуардович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-8474-1791>, znabyaklg@gmail.com
Мухтубаев Азамат Булатович — кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-4848-0483>, mukhtubayev.ab@gmail.com
Мешковский Игорь Касьянович — доктор технических наук, профессор, директор НИЦ СФ, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-3470-1000>, igorkm@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 11.04.2022
 Одобрена после рецензирования 20.05.2022
 Принята к печати 12.07.2022

References

1. Lefèvre H. *The Fiber-Optic Gyroscopes*. 2nd ed. Artech House, 2014, pp. 317–331.
2. Kaminow I.P. Polarization-maintaining fibers. *Applied Scientific Research*, 1984, vol. 41, no. 3–4, pp. 257–270. <https://doi.org/10.1007/BF00382456>
3. Moody J., Morris R. Hermetically packaged LiNbO₃ optical circuit with oxidizing fill gas. Patent US8070368B1, 2010.
4. Iwamoto N.E., Sanders S.J., Gallagher T.J., Yates S., Taranta A., Grooms J.C., Warrensford K.L. Stabilizing gas in an optical gyro based on an inorganic waveguide. Patent EP3270107B1, 2018.
5. Mottet A., Jillard S., Hauden J., Grossard N., Porte H., Tchahame J., Veyrié D., Gilard O. Packaging Improvement of LiNbO₃ modulators and Space evaluation results. *Proceedings of SPIE*, 2018, vol. 11180, pp. 111803K. <https://doi.org/10.1117/12.2536047>
6. Donaldson A., Freer S.J. Lithium niobate devices. Patent GB2306690A, 1997.
7. Dietz R.L. Sealing optical fibers without metallization: design guidelines. *Proceedings of SPIE*, 2004, vol. 5454, pp. 111–120. <https://doi.org/10.1117/12.554264>
8. Shaw M., Galeotti R., Coppo G. Method of fixing an optical fibre in a laser package. *Proc. of the 51st Electronic Components and Technology Conference*, 2001, pp. 1441–1446. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2001.928025>
9. Liukumovich L.B. *Polarization Effects in Fiber Interferometers Based on Birefringent Optical Fiber Waveguides*. Dissertation for the degree of doctor of physical and mathematical sciences. St. Petersburg, 2008, 333 p. (in Russian)
10. Marcuse D. Coupled-mode theory for anisotropic optical waveguides. *Bell System Technical Journal*, 1975, vol. 54, no. 6, pp. 985–995. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1975.tb02878.x>
11. Mukhtubayev A.B. *The polarization cross-coupling influence on the Sagnac phase shift in a fiber-optic gyroscope*. Academic dissertation candidate of engineering. St. Petersburg, 2020, 199 p. (in Russian)
12. Aksarin S.M. *Investigation of polarization Methods and Technologies for Matching Fiber-Optic and Integrated-Optical Waveguides*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. St. Petersburg, 2014, 116 p. (in Russian)
13. 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. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2017.09.010>
14. Namihira Y., Kudo M., Mushiaka Y. Effect of mechanical stress on the transmission characteristics of optical fibers. *Trans. Inst. Electron. Commun. Eng. Japan*, 1977, vol. 60, no. 7, pp. 107–115.
15. Suhir E. Mechanical behavior of optical fibers and interconnects: application of analytical modelling. *Encyclopedia of Continuum Mechanics*. Springer, 2020, pp. 1528–1532. https://doi.org/10.1007/978-3-662-55771-6_371

Authors

Evgeniy E. Kalugin — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8474-1791>, znabyaklg@gmail.com
Azamat B. Mukhtubayev — PhD, Head of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-4848-0483>, mukhtubayev.ab@gmail.com
Igor K. Meshkovskiy — D. Sc., Professor, Director of the Research Center of Light-Guided Photonics, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3470-1000>, igorkm@itmo.ru

Received 11.04.2022
 Approved after reviewing 20.05.2022
 Accepted 12.07.2022



Работа доступна по лицензии
 Creative Commons
 «Attribution-NonCommercial»