

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-5-871-877

УДК 535.8

Исследование изменения чувствительности волоконной брэгговской решетки к температуре и растяжению с помощью нанесения покрытий из легкоплавких металлов

Елизавета Артуровна Майорова¹✉, Сергей Владимирович Варжель²,
Виктория Александровна Клишина³, Александра Игоревна Козлова⁴

^{1,2,3,4} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ elizaveta.lsv@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5409-4282>

² vsv187@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>

³ novivial@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5254-2133>

⁴ sashakozlova80@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1941-6861>

Аннотация

Введение. Разработаны и исследованы методы изменения чувствительности волоконных брэгговских решеток к температуре и деформации путем нанесения различных легкоплавких металлов. **Метод.** Выполнено исследование чувствительных элементов на основе одномодовых оптических волокон SMF-28 со сформированными волоконными брэгговскими решетками и нанесенными на волокно различными металлическими покрытиями. **Основные результаты.** Исследовано влияние покрытия волоконной брэгговской решетки легкоплавкими металлами на ее чувствительность к температуре и деформации. Разработаны различные волоконно-оптические чувствительные элементы, представляющие собой волокна со сформированными в них волоконными брэгговскими решетками, при этом на область с такими дифракционными структурами были нанесены покрытия различной толщины из олова или припоя в виде сплава олова и свинца (Sn63Pb37). Представленные экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными. Температурная чувствительность брэгговского резонанса волоконной решетки с покрытием из припоя или олова примерно в 4 раза превышает чувствительность решетки без покрытия. Анализ чувствительности к растяжению позволил сделать вывод о том, что по сравнению со стандартной волоконной брэгговской решеткой, чувствительность такой решетки с покрытием уменьшается и составляет порядка 0,017 пм/(мкм/м) по сравнению с 1,2 пм/(мкм/м) (для длины волны брэгговского резонанса 1530 нм) для стандартной волоконной решетки без покрытия. **Обсуждение.** Полученные результаты могут быть использованы для контроля и изменения чувствительности волоконной брэгговской решетки к температуре и/или деформации в зависимости от условий решаемой задачи в области создания волоконно-оптических измерительных устройств.

Ключевые слова

волоконная брэгговская решетка, температурная чувствительность, деформация, фотоупругий эффект, волоконно-оптические сенсоры

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, госзадание № 2019-0923.

Ссылка для цитирования Майорова Е.А., Варжель С.В., Клишина В.А., Козлова А.И. Исследование изменения чувствительности волоконной брэгговской решетки к температуре и растяжению с помощью нанесения покрытий из легкоплавких металлов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 5. С. 871–877. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-5-871-877

Investigation of changes in the sensitivity of a fiber Bragg grating to temperature and strain using coatings from low-melting metal

Elizaveta A. Maiorova¹✉, Sergey V. Varzhel², Victoria A. Klishina³, Alexandra I. Kozlova⁴

^{1,2,3,4} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ elizaveta.lsv@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5409-4282>

² vsv187@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>

³ novivial@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5254-2133>

⁴ sashakozlova80@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1941-6861>

Abstract

We carried out the development and study of methods for changing the sensitivity of Fiber Bragg Gratings (FBG) to temperature and strain by applying various low-melting metals. Investigation of sensitive elements based on SMF-28 single-mode optical fibers with formed FBG and various metal coatings applied over the fiber have been made. The influence of FBG coating with low-melting metals on its sensitivity to temperature and deformation has been studied. Various fiber-optic sensitive elements have been developed, which are fibers with fiber Bragg gratings formed in them, while coatings of various thicknesses of tin or solder in the form of an alloy of tin and lead (Sn63Pb37) were deposited on the area with such diffraction structures. The presented experimental data are in good agreement with the calculated ones. The temperature sensitivity of the Bragg grating resonance with a solder or tin coatings is 4 times higher than the sensitivity of an uncoated grating. In turn, the analysis of the sensitivity to stretching allows us to conclude that, in comparison with the standard FBG, the sensitivity of the grating in the coating decreases and is about 0.017 pm/($\mu\text{m}/\text{m}$) compared to 1.2 pm/($\mu\text{m}/\text{m}$) (for the wavelength of the Bragg resonance 1530 nm) for a standard FBG without coating. The results obtained can be used to control and change the FBG sensitivity to temperature and/or deformation, depending on the conditions of the problem being solved in the field of creating fiber-optic measuring devices.

Keywords

fiber Bragg grating, temperature sensitivity, deformation, photoelastic effect, fiber optic sensors

Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Government assignment no. 2019-0923.

For citation: Maiorova E.A., Varzhel S.V., Klishina V.A., Kozlova A.I. Investigation of changes in the sensitivity of a fiber Bragg grating to temperature and strain using coatings from low-melting metal. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 5, pp. 871–877 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-5-871-877

Введение

Изменение чувствительности волоконных брэгговских решеток (ВБР) к внешним воздействиям (температуре, деформации и пр.) является актуальной задачей для широкого спектра практических применений. Результаты подобных исследований могут использоваться при создании высокоточных температурных датчиков, подвергающихся деформации, или в областях, где необходимо применение атермальных ВБР. Первый способ изменения чувствительности ВБР — легирование сердцевины волокна специальными добавками. В работе [1] представлен датчик температуры на ВБР на основе кварцевого оптического волокна (ОВ), легированного сульфидом свинца, полученного способом атомно-слоевого осаждения. При этом на длине волны 1540 нм чувствительность полученной решетки составляет примерно 19 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ (на длине волны 1540 нм) в диапазоне температур 20–150 $^\circ\text{C}$, в свою очередь, чувствительность обычной ВБР в стандартном одномодовом ОВ 10 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ на этой же длине волны. В [2] проведены исследования для датчиков температуры и деформации с использованием волокна, легированного неодимом. В [3] волокно легировано эрбием таким образом, что чувствительность датчика составила примерно 0,05 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ (на длинах волн 530 и 555 нм) в диапазоне от 20 до 100 $^\circ\text{C}$. Второй способ для изменения чувствительности ВБР — нанесение различных покрытий. В работе [4] предложено наносить на ВБР поли-

мерные материалы для увеличения диаметра волокна с покрытием в области решетки до 147 μm и повышения средней чувствительности к температуре с 11,256 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ (для акрилатного покрытия) до 11,322 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ (на длине волны 1550 нм) (для полиимидного покрытия). В [5] ВБР покрывали полидиметилсилоксаном, что приводит к повышению температурной чувствительности в 4,2 раза по сравнению с ВБР без покрытия из-за высокого коэффициента теплового расширения (КТР) полидиметилсилоксана. Однако данное покрытие оказало негативное воздействие на кожу и глаза человека и является горючим веществом.

При изменении чувствительности ВБР (или иных волоконных чувствительных элементов, например, волоконных интерферометров Фабри-Перо, и т. д.) перечисленными способами, необходимо однозначно определять влияние покрытия на изменение чувствительности волоконной структуры к внешним воздействиям (например, изменение температуры и деформации). Подобные исследования рассмотрены в работах [6, 7] с использованием интерферометрических и поляриметрических методов и в [8, 9] с двухволновыми внутриволоконными решетками Брэгга. Отметим, что эти методы изменения чувствительности образцов при определенных условиях имеют некоторые ограничения. Несмотря на ряд уже проведенных исследований, актуальность данной тематики объясняется необходимостью разработки более новых, простых и потенциально более эффективных методов. В настоящей работе

рассмотрены варианты изменения чувствительности ВБР к температуре и деформации с помощью нанесения на ОВ таких материалов, как олово и сплав олова со свинцом (Sn63Pb37), имеющих разные КТР, при этом исследования проведены для разной толщины указанных материалов. Так как данные металлы являются легкоплавкими, это позволяет работать с ними при относительно невысоких температурах, что делает методику их нанесения на ОВ простой и не требующей дорогостоящего оборудования.

Моделирование и экспериментальные установки

Построим модели участка ОВ, покрытого металлом, с целью получения значений относительного растяжения образца при увеличении температуры. Моделирование произведено в программной среде COMSOL, изображение чувствительного элемента показано на рис. 1.

По полученным значениям относительного растяжения длины участка ОВ при нагревании рассчитаны относительные изменения длины волны брэгговского резонанса $\Delta\lambda$ в соответствии с формулой:

$$\Delta\lambda = \lambda_B \Delta T (\alpha + \xi) + \lambda_B \alpha_{me} \Delta T (1 - p_e), \quad (1)$$

где $\alpha = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$; $\xi = 7 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$; $p_e \approx 0,22$ — коэффициенты для кварцевого ОВ; λ_B — длина волны Брэгга; α_{me} — КТР выбранного материала; $T \in [10; 70] \text{ }^\circ\text{C}$ [10, 11].

Выполним исследование влияния температурного и механического воздействий на ВБР подготовленных образцов [12]. На первом этапе осуществлена процедура снятия защитного акрилатного покрытия ОВ SMF-28 с помощью серной кислоты. Данный этап для сохранения механической прочности световода, которая существенно ухудшается при механическом снятии защитного покрытия из-за появления на поверхности кварцевого световода микроповреждений. Далее выполнена запись ВБР на интерферометре Тальбота с помощью KrF эксимерной лазерной системы, излу-

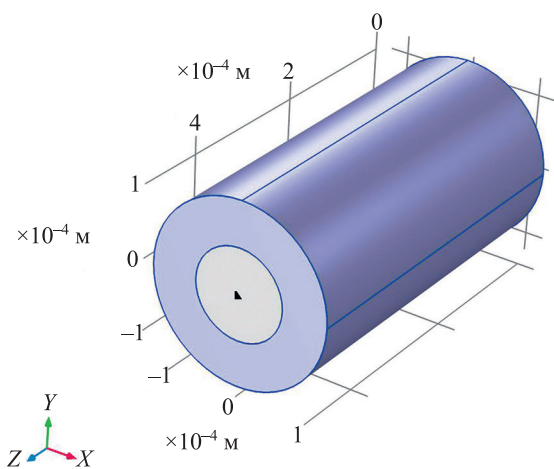


Рис. 1. Изображение модели оптического волокна, покрытого металлом

Fig. 1. Image of a model of an optical fiber coated with a metal

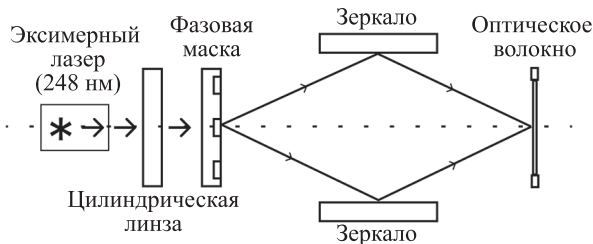


Рис. 2. Схематичное изображение интерферометрической установки для записи волоконной брэгговской решетки
Fig. 2. Schematic representation of an interferometric setup for FBGs inscription

чающей на длине волны 248 нм [13, 14]. Схематичное изображение интерферометрической установки показано на рис. 2. Центральная длина волны брэгговского резонанса полученных структур $\lambda_B \approx 1530 \text{ нм}$, длины решеток $l = 1 \text{ мм}$. ОВ с образцом ВБР имеет общую длину около 1 м, при этом решетка расположена в середине отрезка.

На втором этапе подготовки образцов на ВБР исследуемые материалы: в первом случае — олово, во втором — припой в виде сплава на основе олова и свинца (Sn63Pb37), толщинами 1,5 и 3 мм каждый. Выбраны данные металлы, так как являются легкоплавкими.

Для исследования влияния на спектральные характеристики образцов температуры и механического растяжения собрано две установки, представленные на рис. 3.

Установка на рис. 3, а работает следующим образом: излучение от широкополосного источника проходит через Y-ответвитель, доходит до чувствительного элемента с ВБР, отражаясь от которой сигнал в обратном направлении через Y-ответвитель поступает на спектроанализатор Anritsu MS9740B, где фиксируются спектры отражения, и при последующей обработке вычисляется смещение длины волны брэгговского резонанса. Образец ОВ расположен в емкости, заполненной водой. Выполняется нагрев от 10 до 70 °С и охлаждение в том же диапазоне. Для точного контроля температуры воды рядом с решеткой статично зафиксирован температурный датчик (термопара). По экспериментальным данным рассчитаем чувствительность образцов к температуре:

$$K_T = \Delta\lambda_B / \Delta T. \quad (2)$$

Схема на рис. 3, б работает подобным способом: через Y-ответвитель подключается источник излучения и спектроанализатор с одной стороны, а с другой — исследуемый чувствительный элемент, на конец которого с помощью ультрафиолетового клея закрепляются грузы массой до 150 г.

По данным, полученным при механическом растяжении, рассчитана чувствительность (K_ϵ) образцов с помощью выражения:

$$K_\epsilon = \Delta\lambda_B / \epsilon, \quad (3)$$

где ϵ — относительное растяжение.

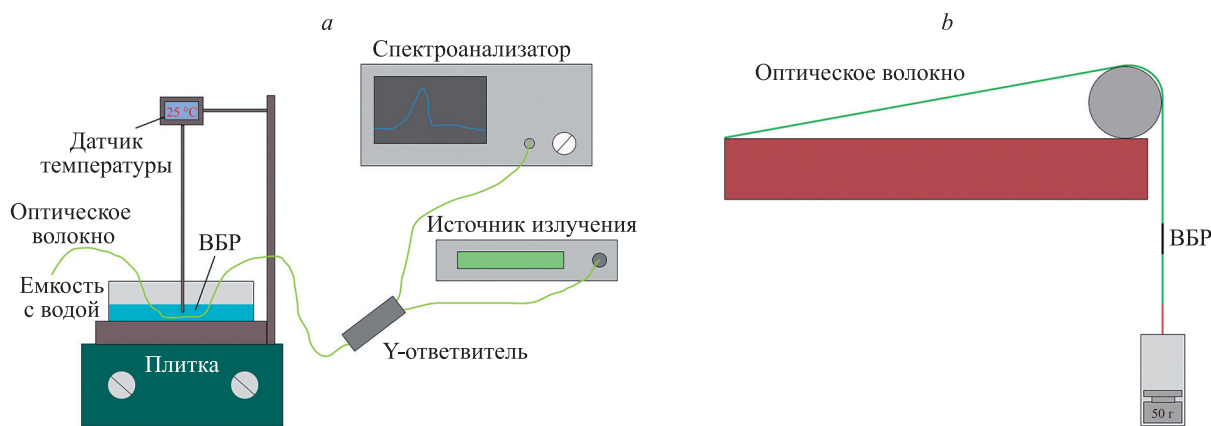


Рис. 3. Экспериментальные установки по исследованию влияния на спектральные характеристики образцов: температуры (а) и механического растяжения (б)

Fig. 3. Experimental facility for conducting tests for temperature changes (a); experimental setup for tensile testing of the test specimen (b)

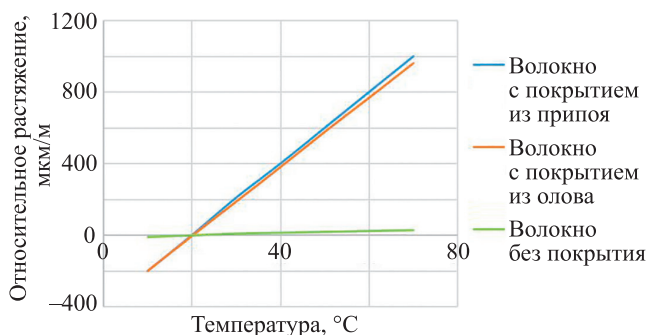


Рис. 4. Результаты моделирования зависимостей относительного растяжения исследуемого образца от изменения температуры для волокна с покрытием и без

Fig. 4. The results of modeling the dependence of the relative stretching of the test sample vs. temperature changes for coated and uncoated fibers

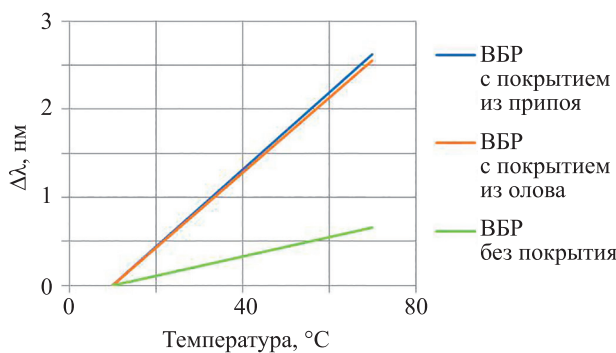


Рис. 5. Расчетные зависимости относительного изменения длины волны брэгговского резонанса от температуры для волоконных брэгговских решеток с покрытием и без

Fig. 5. Dependence of the relative change in the wavelength of the Bragg resonance vs. temperature for coated and uncoated fiber Bragg gratings

Результаты моделирования

В ходе моделирования получены зависимости относительного растяжения от изменения температуры для образцов ОВ с нанесенными на них покрытиями и без.

По формуле (1) рассчитаем относительное изменение длины волны брэгговского резонанса ВБР с учетом влияния КТР ОВ, термооптического эффекта, а также фотоупругого эффекта при нанесении на ОВ дополнительного покрытия. Результаты представлены на рис. 5.

Результаты температурных испытаний

Для температурных испытаний использованы образцы ВБР с нанесенным припоем или оловом толщинами по 1,5 и 3 мм каждый, длиной 10 мм. На рис. 6 представлена зависимость сдвига длины волны брэгговского резонанса от температуры до и после нанесения покрытий. В табл. 1 приведены значения теоретической и экспериментальной температурной чувствительности образцов, рассчитанные по формуле (2).

Как видно из табл. 1, данные моделирования и эксперимента хорошо коррелируют. ВБР с нанесенным покрытием из припоя или олова обладает большей

примерно в 4 раза температурной чувствительностью по сравнению с ВБР без покрытия.

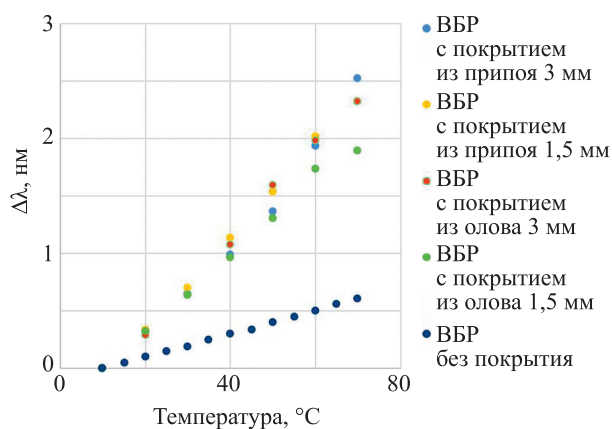


Рис. 6. Зависимости сдвига длины волны брэгговского резонанса решетки от температуры для образцов с покрытием и без

Fig. 6. Temperature dependence of the Bragg resonance wavelength shift for coated and uncoated samples

Таблица 1. Результаты температурной чувствительности, полученные теоретическим и экспериментальным путями
Table 1. Temperature sensitivity results obtained by theoretical and experimental methods

Материал ВБР	$\Delta\lambda_{\text{теор}}$, нм	$\Delta\lambda_{\text{эксп}}$, нм	Чувствительность, пм/°С	
			теоретическая	экспериментальная
без покрытия	0,70	0,609	11,63	10,16
с покрытием из припоя	2,62	2,520	43,66	42,00
с покрытием из олова	2,55	2,323	42,50	38,72

Результаты испытаний на растяжение

В экспериментах на растяжение проведено сравнение образцов ВБР без покрытия и с нанесенным припоем или оловом толщинами по 1,5 и 3 мм. На рис. 7 приведены графики измеренных спектральных откликов (отклик опорного и отклик «нагруженной» ВБР) для образца с припоем (рис. 7, а) и ВБР без покрытия (рис. 7, b). По мере увеличения нагрузки, спектр смещается вправо, таким образом спектр опорной решетки находится слева и далее идут спектры для 50, 100 и 150 г соответственно.

Результаты экспериментов, представленные на рис. 8, показали, что образцы ВБР с покрытием из при-

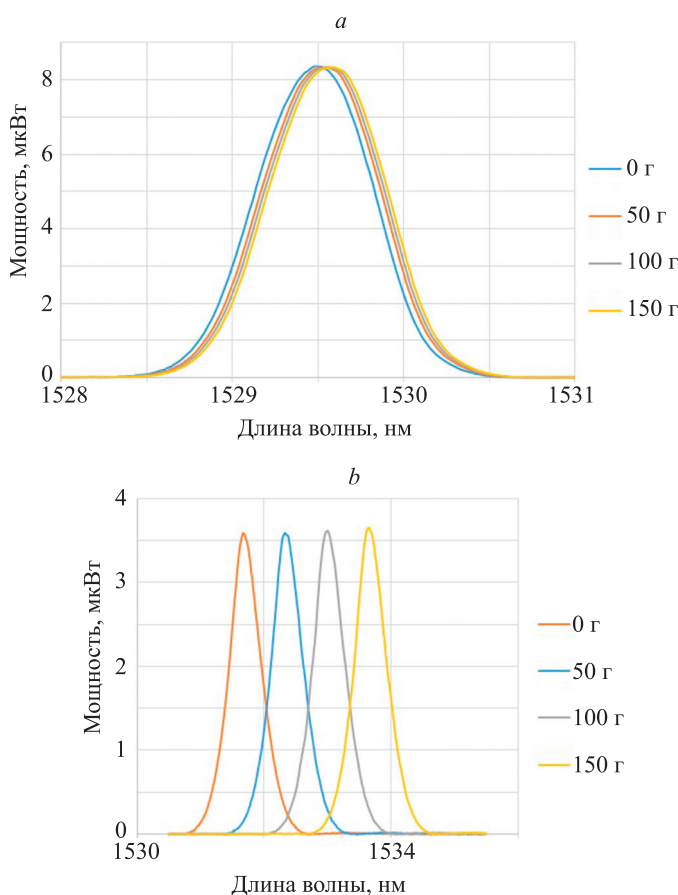


Рис. 7. Спектральные отклики волоконной брэгговской решетки с припоем (а) и без покрытия (b) при механической нагрузке

Fig. 7. Spectral responses of FBG with solder (a) and FBG without coating (b) under mechanical load

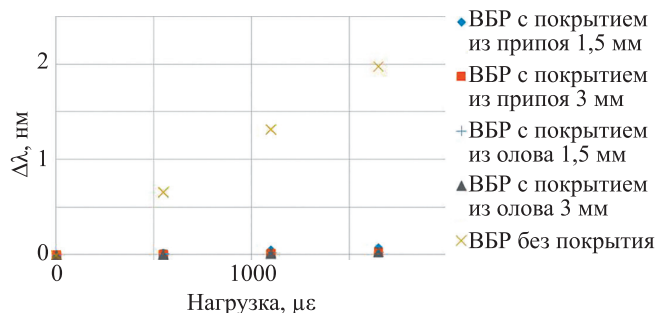


Рис. 8. Зависимости сдвига длины волны брэгговского резонанса решетки от продольного растяжения оптического волокна для образцов с покрытием и без

Fig. 8. Dependences of the wavelength shift of the Bragg resonance of the grating vs. the long fabrication of the optical fiber for coated and uncoated samples

Таблица 2. Полученные экспериментальные результаты чувствительности образцов к растяжению

Table 2. Obtained experimental results of the samples sensitivity to tension

Образец ВБР	$\Delta\lambda_{\text{эксп}}$, нм	Чувствительность, пм/(мкм/м)
без покрытия	1,981	1,200
с покрытием из олова	0,028	0,017
с покрытием из припоя	0,028	0,017

поя или олова обладают меньшей почти на два порядка чувствительностью к механическому растяжению по сравнению с ВБР без покрытия.

По полученным данным рассчитана чувствительность по формуле (3). Результаты из табл. 2 демонстрируют низкую чувствительность образцов ВБР с нанесенным припоем или оловом, относительно образца без покрытия.

Выводы

Полученные результаты могут быть применены в исследованиях, связанных с изменением чувствительности к внешним воздействиям ВБР или иной волоконной структуры, являющейся составной частью конструкции чувствительного элемента для измерения различных физических величин. Например, для создания области горячей проволоки с последующим измерением скорости и направления потоков [15].

Заключение

В работе рассмотрено влияние покрытий в виде припоя или олова на чувствительность волоконной брэгговской решетки с длиной волны брэгговского резонанса 1530 нм. По результатам экспериментов видно, что нанесение припоя на образец с волоконной решеткой Брэгга увеличивает температурную чувствительность с 10,16 пм/°С (для волоконной решетки Брэгга без покрытия) до 42 пм/°С, а нанесение олова изменяет

до 38,72 пм/°С. При этом снижается чувствительность решетки к деформации с 1,2 пм/(мкм/м) (для волоконной решетки Брэгга без покрытия) до 0,017 пм/(мкм/м) для образцов волоконной брэгговской решетки с нанесенным оловом или припоем. Таким образом, можно утверждать, что нанесение исследуемых материалов на волоконную решетку Брэгга увеличивает чувствительность к температуре в 4 раза и уменьшает воздействие деформации в 70 раз.

Литература

- Ahmad H., Noor S.F.S.M., Arusin A.F., Samsudin S.A., Thambiratnam K., Chong W.Y., Lim K.S., Zulkifli M.Z. Enhancing temperature sensitivity using cyclic polybutylene terephthalate-(c-PBT-) coated fiber Bragg grating // *Journal of Sensors*. 2018. P. 1–6. <https://doi.org/10.1155/2018/3790326>
- Liu T., Fernando G., Zhang Z., Grattan K. Simultaneous strain and temperature measurements in composites using extrinsic Fabry-Perot interferometric and intrinsic rare-earth doped fiber sensors // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2000. V. 80. N 3. P. 208–215. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(99\)00309-X](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00309-X)
- Wang Y., Geng L. Rare earth doped optical fibers for temperature sensing utilizing ratio-based technology // *Journal of Rare Earths*. 2006. V. 24. N 1. P. 171–174. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(07\)60352-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(07)60352-4)
- Lu P., Men L., Chen Q. Resolving cross sensitivity of fiber Bragg gratings with different polymeric coatings // *Applied Physics Letters*. 2008. V. 92. N 17. P. 171112. <https://doi.org/10.1063/1.2919796>
- Park C., Joo K., Kang S., Kim H. A PDMS-coated optical fiber Bragg grating sensor for enhancing temperature sensitivity // *Journal of the Optical Society of Korea*. 2011. V. 15. N 4. P. 329–334. <https://doi.org/10.3807/josk.2011.15.4.329>
- Farahi F., Webb D.J., Jones J.D.C., Jackson D.A. Simultaneous measurement of temperature and strain: cross-sensitivity considerations // *Journal of Lightwave Technology*. 1990. V. 8. N 2. P. 138–142. <https://doi.org/10.1109/50.47862>
- Vengsarkar A.M., Michie W.C., Jankovic L., Culshaw B., Claus R.O. Fiber-optic dual-technique sensor for simultaneous measurement of strain and temperature // *Journal of Lightwave Technology*. 1994. V. 12. N 1. P. 170–177. <https://doi.org/10.1109/50.265750>
- Xu M.G., Archambault J.-L., Reekie L., Dakin J.P. Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors // *Electronics Letters*. 1994. V. 30. N 13. P. 1085–1087. <https://doi.org/10.1049/el:19940746>
- Brady G.P., Kalli K., Webb D.J., Jackson D.A., Zhang L., Bennion I. Recent developments in optical fiber sensing using fiber Bragg gratings // *Proceedings of SPIE*. 1996. V. 2839. P. 8–19. <https://doi.org/10.1117/12.255350>
- Li C., Zhang Y.-M., Zhao Y.-G., Li L.-J. *Fiber Grating: Principles, Techniques, and Sensing Applications*. Beijing, China: Science Press, 2005. P. 108–116.
- Othonos A. Fiber Bragg gratings // *Review of Scientific Instruments*. 1997. V. 68. N 12. P. 4309–4341. <https://doi.org/10.1063/1.1148392>
- Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. Волоконные решетки показателя преломления и их применения // *Квантовая электроника*. 2005. Т. 35. № 12. С. 1085–1103.
- Griboev A.I., Pavlishin I.V., Stam A.M., Idrisov R.F., Varzhel S.V., Konnov K.A. Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer // *Optical and Quantum Electronics*. 2016. V. 48. N 12. P. 540. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0816-3>
- Стам А.М., Идрисов Р.Ф., Грибаев А.И., Варжель С.В., Коннов К.А., Сложеникина Ю.И. Запись волоконных решеток Брэгга с использованием интерферометра Тальбота и эксимерной KrF-лазерной системы // *Известия вузов. Приборостроение*. 2017. Т. 60. № 5. С. 466–473. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-5-466-473>

References

- Ahmad H., Noor S.F.S.M., Arusin A.F., Samsudin S.A., Thambiratnam K., Chong W.Y., Lim K.S., Zulkifli M.Z. Enhancing temperature sensitivity using cyclic polybutylene terephthalate-(c-PBT-) coated fiber Bragg grating. *Journal of Sensors*, 2018, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1155/2018/3790326>
- Liu T., Fernando G., Zhang Z., Grattan K. Simultaneous strain and temperature measurements in composites using extrinsic Fabry-Perot interferometric and intrinsic rare-earth doped fiber sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, vol. 80, no. 3, pp. 208–215. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(99\)00309-X](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00309-X)
- Wang Y., Geng L. Rare earth doped optical fibers for temperature sensing utilizing ratio-based technology. *Journal of Rare Earths*, 2006, vol. 24, no. 1, pp. 171–174. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(07\)60352-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(07)60352-4)
- Lu P., Men L., Chen Q. Resolving cross sensitivity of fiber Bragg gratings with different polymeric coatings. *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 92, no. 17, pp. 171112. <https://doi.org/10.1063/1.2919796>
- Park C., Joo K., Kang S., Kim H. A PDMS-coated optical fiber Bragg grating sensor for enhancing temperature sensitivity. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2011, vol. 15, no. 4, pp. 329–334. <https://doi.org/10.3807/josk.2011.15.4.329>
- Farahi F., Webb D.J., Jones J.D.C., Jackson D.A. Simultaneous measurement of temperature and strain: cross-sensitivity considerations. *Journal of Lightwave Technology*, 1990, vol. 8, no. 2, pp. 138–142. <https://doi.org/10.1109/50.47862>
- Vengsarkar A.M., Michie W.C., Jankovic L., Culshaw B., Claus R.O. Fiber-optic dual-technique sensor for simultaneous measurement of strain and temperature. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, vol. 12, no. 1, pp. 170–177. <https://doi.org/10.1109/50.265750>
- Xu M.G., Archambault J.-L., Reekie L., Dakin J.P. Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors. *Electronics Letters*, 1994, vol. 30, no. 13, pp. 1085–1087. <https://doi.org/10.1049/el:19940746>
- Brady G.P., Kalli K., Webb D.J., Jackson D.A., Zhang L., Bennion I. Recent developments in optical fiber sensing using fiber Bragg gratings. *Proceedings of SPIE*, 1996, vol. 2839, pp. 8–19. <https://doi.org/10.1117/12.255350>
- Li C., Zhang Y.-M., Zhao Y.-G., Li L.-J. *Fiber Grating: Principles, Techniques, and Sensing Applications*. Beijing, China, Science Press, 2005, pp. 108–116.
- Othonos A. Fiber Bragg gratings. *Review of Scientific Instruments*, 1997, vol. 68, no. 12, pp. 4309–4341. <https://doi.org/10.1063/1.1148392>
- Vasil'ev S.A., Medvedkov O.I., Korolev I.G., Bozhkov A.S., Kurkov A.S., Dianov E.M. Fibre gratings and their applications. *Quantum Electronics*, 2005, vol. 35, no. 12, pp. 1085–1103. <https://doi.org/10.1070/qe2005v035n12abeh013041>
- Griboev A.I., Pavlishin I.V., Stam A.M., Idrisov R.F., Varzhel S.V., Konnov K.A. Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, vol. 48, no. 12, pp. 540. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0816-3>
- Stam A.M., Idrisov R.F., Griboev A.I., Varzhel S.V., Konnov K.A., Slozhenikina Yu.I. Fiber Bragg gratings inscription using Talbot interferometer and KrF excimer laser system. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, vol. 60, no. 5, pp. 466–473. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-5-466-473>

15. Klishina V., Varzhel S.V., Loseva E. Method for simultaneous measurement of velocity and direction of fluid flow using fiber Bragg gratings // *Optical Fiber Technology*. 2023. V. 75. P. 103215. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.103215>

15. Klishina V., Varzhel S.V., Loseva E. Method for simultaneous measurement of velocity and direction of fluid flow using fiber Bragg gratings. *Optical Fiber Technology*, 2023, vol. 75, pp. 103215. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.103215>

Авторы

Майорова Елизавета Артуровна — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57226565630](https://orcid.org/0000-0001-5409-4282), <https://orcid.org/0000-0001-5409-4282>, elizaveta.lsv@yandex.ru

Варжель Сергей Владимирович — кандидат физико-математических наук, доцент, начальник лаборатории, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 55247304200](https://orcid.org/0000-0002-3120-8109), <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>, vsv187@gmail.com

Клишина Виктория Александровна — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57202829251](https://orcid.org/0000-0001-5254-2133), <https://orcid.org/0000-0001-5254-2133>, novivial@mail.ru

Козлова Александра Игоревна — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-1941-6861>, sashakozlova80@gmail.com

Authors

Elizaveta A. Maiorova — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57226565630](https://orcid.org/0000-0001-5409-4282), <https://orcid.org/0000-0001-5409-4282>, elizaveta.lsv@yandex.ru

Sergey V. Varzhel — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Chief of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 55247304200](https://orcid.org/0000-0002-3120-8109), <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>, vsv187@gmail.com

Victoria A. Klishina — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57202829251](https://orcid.org/0000-0001-5254-2133), <https://orcid.org/0000-0001-5254-2133>, novivial@mail.ru

Alexandra I. Kozlova — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-1941-6861>, sashakozlova80@gmail.com

Статья поступила в редакцию 18.04.2023
Одобрена после рецензирования 28.07.2023
Принята к печати 17.09.2023

Received 18.04.2023
Approved after reviewing 28.07.2023
Accepted 17.09.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»