

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-4-659-665

УДК 535.08

Волоконно-оптический амплитудный датчик направления и величины изгиба

Андрей Анатольевич Дмитриев¹✉, Кирилл Вадимович Гребнев²,
 Даниил Сергеевич Смирнов³, Сергей Владимирович Варжель⁴

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

¹ Dmitrievaa1994@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-0674-8381>

² greb.k1r@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8461-301X>

³ dsmirmov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4324-9327>

⁴ Vsv187@gmail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>

Аннотация

Предмет исследования. Предложен вариант реализации волоконно-оптического датчика направления и величины изгиба. В отличие от известных спектральных измерительных комплексов, рассматриваемое решение предполагает использование амплитудной методики опроса, позволяющей увеличить быстродействие сенсора, применив более простые и доступные компоненты. **Метод.** Исследован чувствительный элемент на основе специальных дифракционных структур, который состоит из пар чирпированных волоконных брэгговских решеток. Чувствительные элементы закреплены на оснастке в виде стального стержня, подверженного изгибному воздействию. **Основные результаты.** Продемонстрирована способность датчика определять величину и направление изгиба в диапазоне отклонения от 0 до 30 мм со среднеквадратичным отклонением измеренных значений от реальных в 0,536 мм. Данный результат измерений достигнут с помощью обработки данных, полученных с трех измерительных устройств, нейронной сетью, скрытый слой которой составил 10 нейронов, при этом функцией активации установлена сигмоида. **Практическая значимость.** Результаты исследований имеют существенное значение для современных систем мониторинга. Реализация датчика направления и величины изгиба в формате волоконно-оптического устройства способна преодолеть ограничения пьезоэлектрических сенсоров, благодаря высокой помехозащищенности и стойкости к воздействию внешних сред. Предложенное технологическое решение позволяет отойти от спектральной методики проведения измерений, получившей широкое распространение в волоконно-оптических сенсорных системах. Применение амплитудного датчика величины и направления изгиба дает возможность его использования в составе устройств, где существует необходимость в точном позиционировании управляющих элементов или структурных компонент, подвергаемых изгибному воздействию. Благодаря измерению воздействия при помощи оценки оптической мощности сигнала, конструкция датчика не предполагает наличие сложного измерительного устройства. Работоспособность сенсора может быть обеспечена при помощи каскада недорогих, но при этом высокоскоростных и долговечных фотоприемных устройств.

Ключевые слова

волоконная брэгговская решетка, волоконно-оптический датчик, датчик направления и величины изгиба

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Приоритет 2030».

Ссылка для цитирования: Дмитриев А.А., Гребнев К.В., Смирнов Д.С., Варжель С.В. Волоконно-оптический амплитудный датчик направления и величины изгиба // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 4. С. 659–665. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-4-659-665

Fiber-optic amplitude bend direction and magnitude sensor

Andrei A. Dmitriev¹✉, Kirill V. Grebnev², Daniil S. Smirnov³, Sergei V. Varzhel⁴

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

¹ Dmitrieva1994@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-0674-8381>

² greb.k1r@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8461-301X>

³ dsmirnov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4324-9327>

⁴ Vsv187@gmail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>

Abstract

A variant of the implementation of a fiber-optic sensor for the direction and magnitude of the bend is proposed. Unlike existing spectral measuring systems, the solution under consideration involves the use of an amplitude polling technique which makes it possible to increase the speed of the sensor when using simpler and more affordable components. A sensitive element based on special diffraction structures consisting of pairs of chirped fiber Bragg gratings has been studied. The sensing elements are mounted on a tooling — a steel rod subjected to bending. The ability of the sensor to determine the magnitude and direction of bending in the deviation range from 0 to 30 mm was demonstrated with a standard deviation of the measured values from the real values of 0.536 mm. This measurement result is achieved by processing data obtained from three measuring devices and by the neural network with a hidden layer of 10 neurons and the sigmoid as the activation function. The research results are essential for modern monitoring systems. The implementation of the direction and magnitude of the bend sensor in the format of a fiber-optic device allows you to overcome the limitations of piezoelectric sensors, due to high noise immunity and resistance to environmental influences. The proposed technological solution makes it possible to avoid the spectral measurement technique that has become widely used in fiber-optic sensor systems. The use of an amplitude sensor for the magnitude and direction of bending will allow its use in devices where there is a need for precise positioning of control elements or structural components subjected to bending. Also, due to the measurement of the desired bending effect by estimating the optical power of the signal, the design of the sensor does not require the presence of a complex measuring device, and the sensor's performance can be ensured using a cascade of inexpensive, but at the same time high-speed and durable photodetectors.

Keywords

fiber Bragg grating, fiber optic sensor, bend direction and magnitude sensor

Acknowledgements

The work is financially supported by Priority 2030 Program.

For citation: Dmitriev A.A., Grebnev K.V., Smirnov D.S., Varzhel S.V. Fiber-optic amplitude bend direction and magnitude sensor. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 659–665 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-4-659-665

Введение

Технологический прогресс в отрасли телекоммуникаций дал стимул разработки волоконно-оптических датчиков, которые обладают рядом преимуществ по сравнению с другими существующими измерительными технологиями [1]. Такими преимуществами являются: повышенная чувствительность, невосприимчивость к электромагнитному воздействию, универсальность форм-фактора, высокая скорость отклика, а также пригодность для работы в суровых условиях окружающей среды и возможность создания массивов датчиков с помощью мультиплексирования с разделением по времени и длине волны [2, 3]. Функциональные особенности волоконно-оптических датчиков использованы для замены традиционных пьезоэлектрических решений в широком диапазоне применений, включая деформационные, вибрационные, электрические, акустические измерения, датчики ускорения, вращения, давления, температуры, влажности, вязкости и др.

Измерительные устройства на основе волоконной брэгговской решетки (ВБР) — один из типов волоконно-оптических датчиков, которые совместимы с оптическими системами связи и способны выполнять сканирование на большом удалении от блока обработки без подведения электропитания к непосредственному месту расположения чувствительного элемента.

ВБР — периодическая структура модуляции показателя преломления, индуцированная в сердцевине оптического волокна. В последние годы особое внимание уделяется изготовлению и применению чирпированных ВБР, которые характеризуются непостоянством периода по длине. Чирпированные ВБР ведут себя как каскад ВБР, каждая из которых отражает узкий спектр оптического излучения. Такие решетки применяются в основном для оптической связи, так как обеспечивают компенсацию дисперсии путем введения дифференциальной групповой задержки, зависящей от длины волны [4, 5]. В последнее время чирпированные ВБР приобрели значительный интерес со стороны построения волоконно-оптических датчиков, благодаря своим ключевым характеристикам [6–8]. В настоящей работе исследована конструкция датчика направления и величины изгиба с применением трех пар чирпированных ВБР в качестве чувствительного элемента.

Оптическое волокно и запись чирпированных волоконных брэгговских решеток

Для записи чирпированных ВБР использовано стандартное телекоммуникационное оптическое волокно SMF-28, предварительно подвергнутое водородной обработке в течение двух недель при температуре 50 °С и давлении 10 МПа для повышения фоторефрактивно-

сти [9, 10]. При таких параметрах оптического волокна появляется возможность записи chirпированных ВБР с коэффициентом отражения близким к 100 % [11, 12].

- Запись chirпированных ВБР произведена с помощью оптической схемы интерферометра Тальбота [13]. Во время записи использованы следующие параметры:
- фазовая маска с линейно изменяющимся периодом в 1 нм/см;
 - источник ультрафиолетового излучения — КгF эксимерная лазерная система Optosystems MOPA CL-7550;
 - плотность энергии лазерного импульса — 220 мДж/см²;
 - время экспозиции 120 с при частоте следования импульсов 10 Гц;
 - для фокусировки лазерного излучения в области записи применена цилиндрическая линза с фокусным расстоянием 500 мм.

В результате записи получены chirпированные ВБР с коэффициентом отражения примерно 100 %.

Отметим, что благодаря универсальности данной системы, при ее использовании возможно изготовление таких специальных дифракционных структур как: наклонные ВБР [14], ВБР с фазовым сдвигом [15], массивы [12] и суперпозиции ВБР [16].

Детали эксперимента

Оснастка датчика величины и направления изгиба представляет собой металлический стержень, на котором закреплены три оптических волокна, расположенных по периметру окружности стержня с шагом в 120° относительно друг друга (рис. 1). Внутри каждого волновода индуцирована структура из двух chirпированных ВБР со смещенной на значение полуширины на полувисоте длины волны брэгговского резонанса внутри пары, а также коэффициентом отражения около 100 %.

Одна из структур в паре chirпированных решеток (чувствительная) жестко закреплена на стержне, и испытывает на себе механическое натяжение-сжатие при наведении изгибного воздействия. Вторая (опорная) остается в первоначальном положении.

При приложении механического воздействия чувствительные ВБР претерпевают изменение геометрии, которое приводит к смещению периода данной структуры и центральной длины волны отражения (λ) согласно условию Брэгга (рис. 2).

Смещение центральной длины волны брэгговского резонанса чувствительного элемента приводит к изме-

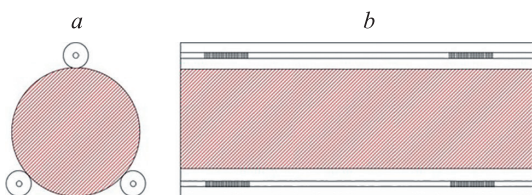


Рис. 1. Схематическое изображение чувствительного элемента измерения величины и направления изгиба: разрез металлического стержня (а); структура волновода (b)

Fig. 1. Scheme of the sensing element for measuring the magnitude and direction of bending

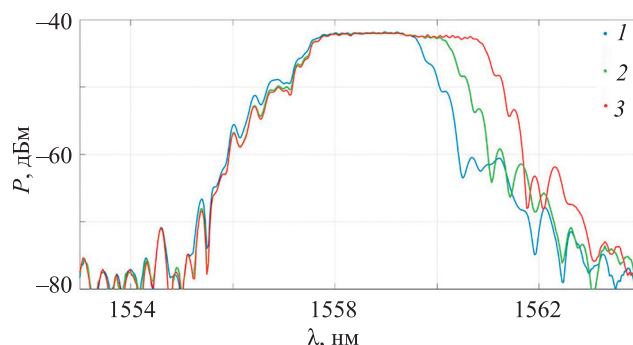


Рис. 2. Спектр пропускания чувствительного элемента при трех различных положениях наведения изгибного воздействия: без приложения изгибного воздействия (кривая 1); с отклонениями конца оснастки на 10 мм (кривая 2) и 20 мм (кривая 3)

Fig. 2. The transmission spectrum of the sensing element at three different exposure positions: without application of bending action (curve 1); with a bending of the tooling end by 10 mm (curve 2) and 20 mm (curve 3)

нению ширины общего спектра отражения (P) структуры чувствительной опорной chirпированный ВБР. Данные изменения приводят к изменению отраженной от структуры оптической мощности, которая может быть измерена при помощи фотоприемного устройства.

Оснастка датчика закреплена на измерительном стенде (рис. 3). Красными линиями обозначено наводимое изгибное воздействие на оснастку. Источником излучения для опроса структур в рамках эксперимента выступает подключенный через ответвитель 1 × 3 СЛД.

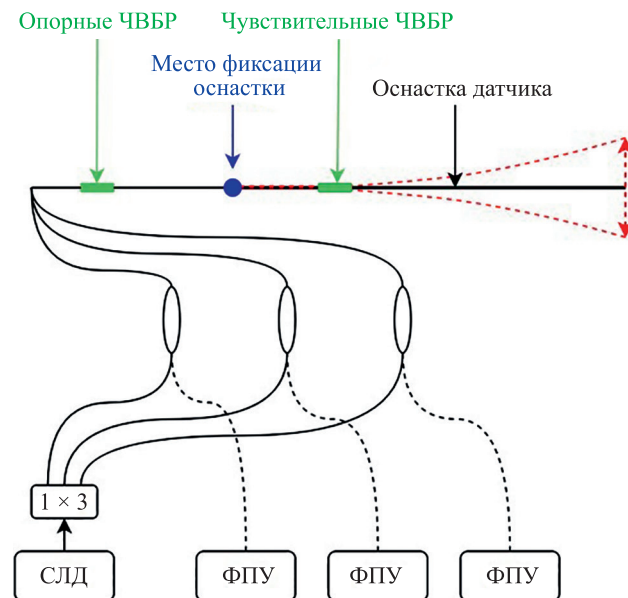


Рис. 3. Схематическое изображение испытательного стенда измерения величины и направления изгиба.

ЧВБР — chirпированная волоконная брэгговская решетка; СЛД — суперлюминисцентный диод; ФПУ — фотоприемное устройство

Fig. 3. Scheme of the test bench for measuring the magnitude and direction of bending

ЧВБР — chirped fiber Bragg grating; СЛД — superluminescent diode; ФПУ — photodetector

Излучение, проходя через оптическое волокно, попадает на опрашиваемые структуры, где, отражаясь от пары чирпированных ВБР, распространяется в обратном направлении и через Y-ответвитель попадает на ФПУ. При приложении изгибающего воздействия три пары специальных структур изменяют приходящую на ФПУ отраженную оптическую мощность. Для контролируемой установки направления и величины изгиба изготовлен шаблон с отверстиями, расположенными с шагом 5 мм при вариации угла 30° (рис. 4, а).

Изгибное воздействие на оснастку датчика выполнено на изготовленном испытательном стенде с помощью установки свободного конца стержня в соответствующие отверстия шаблона (рис. 4, б). Отметим, что температурное воздействие окружающей среды на чувствительный элемент оказывает влияние как на чувствительные, так и на опорные структуры в составе пар чирпированных ВБР. В этом случае спектр отражения испытывает совместное эквивалентное смещение в частотной области. Данное свойство приводит к отсутствию необходимости в дополнительном механизме температурной компенсации. Эксперимент по исследованию температурной стабильности подобного чувствительного элемента в диапазоне от 24°C до 100°C

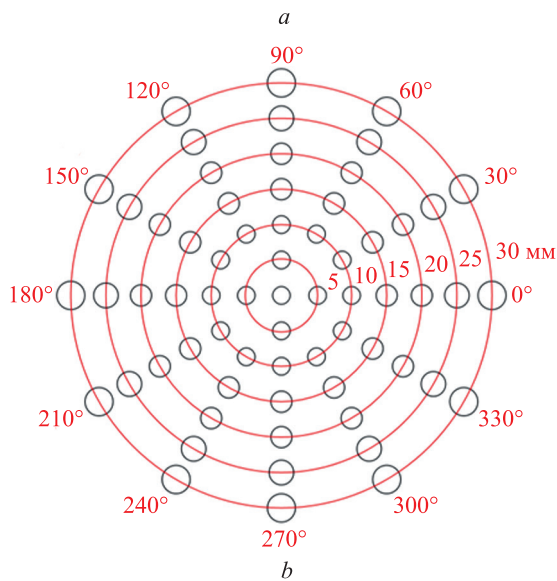


Рис. 4. Схематическое (а) и фотографическое (б) изображения шаблона установки величины и направления изгиба

Fig. 4. Schematic (a) and photographic (b) images of the bending magnitude and direction setting pattern

в составе амплитудного тензометрического датчика представлен в работе [17].

Результаты эксперимента

В ходе эксперимента закрепленная на измерительном стенде оснастка установлена на углы отклонения (α), в диапазоне от 0° до 330° с шагом 30° при значениях отклонения от 10 мм до 30 мм с шагом 5 мм. Отклонение стержня от исходного положения соответствует углам в диапазоне от 5° до 13° с шагом в 2° . При проведении эксперимента зарегистрирована комбина-

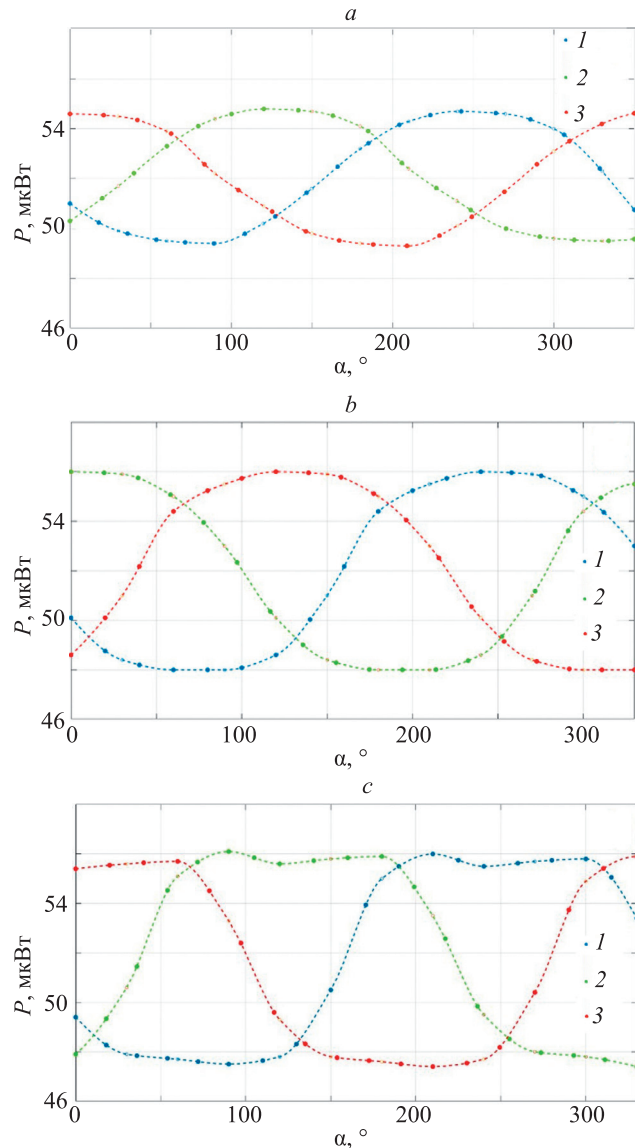


Рис. 5. Изменение отраженной оптической мощности (P) от угла направления изгиба (α) для трех чувствительных элементов при величинах изгиба: 10 мм (а), 20 мм (б), 30 мм (с).

Зависимости, характеризующие: первый (кривая 1), второй (кривая 2) и третий (кривая 3) чувствительные элементы

Fig. 5. Combination of modulation characteristics of the reflected optical power vs. the angle of the bend direction at the amount of bend: 10 mm (a), 20 mm (b), 30 mm (c).

Dependencies characterize the first (curve 1), second (curve 2), and third (curve 3) sensitive elements

ция значений отраженной оптической мощности, состоящая из показаний трех опрашивающих устройств в каждой точке измерения. В ходе исследования получены характеристики изменения отраженной оптической мощности для трех структур при изменении величины и направления изгиба (рис. 5).

Для определения величины и направления изгиба полученные наборы данных использованы для обучения искусственной нейронной сети с применением инструмента MATLAB 2020b Neural Network Toolbox.

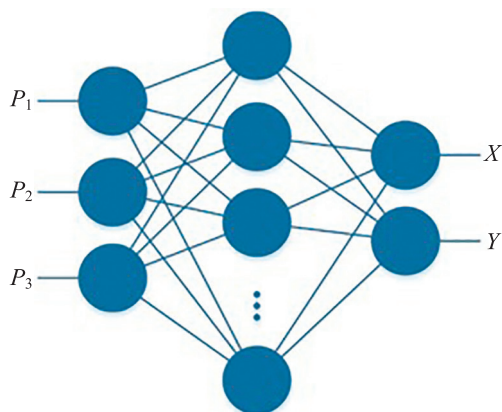


Рис. 6. Архитектура нейронной сети
Fig. 6. Neural network architecture

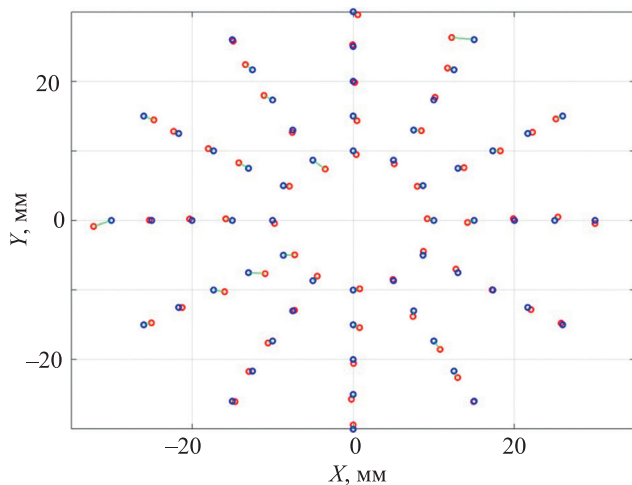


Рис. 7. Распределение измеренных (красные метки) и реальных (синие метки) значений величины и направления изгиба

Fig. 7. Distribution of measured (red marks) and real (blue marks) values of the magnitude and direction of the bend

В рамках данной задачи входными данными нейронной сети являются три значения оптической мощности, отраженной в каждом волокне — (P_1, P_2 и P_3), а выходными значениями — направление (X) и величина изгиба (Y), интерпретируемые как координаты отклонения иглы (рис. 6). Скрытый слой нейронной сети составил 10 нейронов, а функцией активации установлена сигмоида. Обучение нейронной сети произведено с применением метода градиентного спуска.

В результате обучения нейронной сети на базе набора данных из эксперимента получены весовые коэффициенты, которые были применены для проверки работы алгоритма оценки величины и направления отклонения. Результаты проверки приведены на рис. 7, среднее квадратичное отклонение измеренного расположения относительно реального составило 0,536 мм.

Заключение

В работе представлен датчик величины и направления изгиба, в основе чувствительного элемента которого использованы пары чирпированных волоконных брэгговских решеток. Смещение спектрального отклика одной структуры относительно другой внутри пары произвело изменение отраженной оптической мощности, которая детектируется устройствами опроса. Такой принцип проведения измерений определил представленный датчик как амплитудное устройство измерения. В отличие от классических сенсоров на основе волоконной брэгговской решетки с использованием спектральной методики опроса, амплитудные сенсоры обладают более высокой скоростью работы, а также сравнительно низкой себестоимостью устройств опроса. Заметим, что такой чувствительный элемент не требует дополнительного механизма температурной компенсации вследствие близкого расположения компонентов и соответственно синхронного смещения характеристик чувствительной и опорной структур в спектральной области.

Исследованный прототип измерительного устройства позволяет определять направление и величину изгиба с высокой точностью и скоростью опроса. Среднее квадратичное отклонение измеренных значений от реальных значений составило 0,536 мм в диапазоне отклонения свободного конца оснастки от 0 до 30 мм. Датчики величины и направления изгиба, использующие метод, исследованный в рамках проведенной работы, могут найти применение в приложениях для мониторинга состояния конструктивных элементов зданий и сооружений, медицинских исследованиях, а также в других областях науки и техники.

Литература

References

1. Annamdas V.G.M. Review on developments in fiber optical sensors and applications // *International Journal of Materials Engineering*. 2011. V. 1. N 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.5923/j.ijme.20110101.01>
2. Mihailov S.J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments // *Sensors*. 2012. V. 12. N 2. P. 1898–1918. <https://doi.org/10.3390/s120201898>
3. Kersey A.D., Davis M.A., Patrick H.J., LeBlanc M., Koo K.P., Askins C.G., Putnam M.A., Friebele E.J. Fiber grating sensors // *Journal of Lightwave Technology*. 1997. V. 15. N 8. P. 1442–1463. <https://doi.org/10.1109/50.618377>
4. Byron K.C., Sugden K., Brichenno T., Bennion I. Fabrication of chirped Bragg gratings in photosensitive fibre // *Electronics Letters*. 1993. V. 29. N 18. P. 1659–1660. <https://doi.org/10.1049/el:19931104>
5. Hill K.O., Bilodeau F., Malo B., Kitagawa T., Thériault S., Johnson D.C., Albert J., Takiguchi K. Chirped in-fiber Bragg gratings for compensation of optical-fiber dispersion // *Optics Letters*. 1994. V. 19. N 17. P. 1314–1316. <https://doi.org/10.1364/OL.19.001314>
6. Feng K.-M., Chai J.-X., Grubsky V., Starodubov D.S., Hayee M.I., Lee S., Jiang X., Willner A.E., Feinberg J. Dynamic dispersion compensation in a 10-Gb/s optical system using a novel voltage tuned nonlinearly chirped fiber Bragg grating // *IEEE Photonics Technology Letters*. 1999. V. 11. N 3. P. 373–375. <https://doi.org/10.1109/68.748240>
7. Markowski K., Jedrzejewski K., Marzecki M., Osuch T. Linearly chirped tapered fiber-Bragg-grating-based Fabry–Perot cavity and its application in simultaneous strain and temperature measurement // *Optics Letters*. 2017. V. 42. N 7. P. 1464–1467. <https://doi.org/10.1364/OL.42.001464>
8. Wei P., Lang H., Liu T., Xia D. Detonation velocity measurement with chirped fiber Bragg grating // *Sensors*. 2017. V. 17. N 11. P. 2552. <https://doi.org/10.3390/s17112552>
9. Lemaire P.J., Atkins R.M., Mizrahi V., Reed W.A. High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibres // *Electronics Letters*. 1993. V. 29. N 13. P. 1191–1193. <https://doi.org/10.1049/el:19930796>
10. Varzhel' S.V., Mun'ko A.S., Konnov K.A., Gribaev A.I., Kulikov A.V. Recording Bragg gratings in hydrogenated birefringent optical fiber with elliptical stress cladding // *Journal of Optical Technology*. 2016. V. 83. N 10. P. 638–641. <https://doi.org/10.1364/JOT.83.000638>
11. Mikhneva A.A., Gribaev A.I., Varzhel' S.V., Frolov E.A., Novikova V.A., Konnov K.A., Zaleskaya Y.K. Inscription and investigation of the spectral characteristics of chirped fiber Bragg gratings // *Journal of Optical Technology*. 2018. V. 85. N 9. P. 531–534. <https://doi.org/10.1364/JOT.85.000531>
12. Dmitriev A.A., Gribaev A.I., Varzhel S.V., Konnov K.A., Motorin E.A. High-performance fiber Bragg gratings arrays inscription method // *Optical Fiber Technology*. 2021. V. 63. P. 102508. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102508>
13. Gribaev 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>
14. Дмитриев А.А., Гребнев К.В., Варжель С.В., Плотников М.Ю. Волоконно-оптический датчик вибрации на основе SMF-MMF-SMF перехода и наклонной решетки Брэгга // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2021. Т. 21. № 6. С. 801–807. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-6-801-807>
15. Новикова В.А., Варжель С.В., Лосева Е.А., Дмитриев А.А. Экспериментальное исследование и моделирование волоконных брэгговских решёток с фазовым сдвигом // *Оптический журнал*. 2021. Т. 88. № 6. С. 36–44. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-06-36-44>
16. Idrisov R.F., Gribaev A.I., Stam A.M., Varzhel' S.V., Slozhenikina Yu.I., Konnov K.A. Inscription of superimposed fiber Bragg gratings using a Talbot interferometer // *Journal of Optical Technology*. 2017. V. 84. N 10. P. 694–697. <https://doi.org/10.1364/JOT.84.000694>
17. Dmitriev A.A., Varzhel S.V., Grebnev K.V., Anokhina E.V. Strain gauge based on n-pairs of chirped fiber Bragg gratings // *Optical Fiber Technology*. 2022. V. 70. P. 102893. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.102893>
1. Annamdas V.G.M. Review on developments in fiber optical sensors and applications. *International Journal of Materials Engineering*, 2011, vol. 1, no. 1, pp. 1–16. <https://doi.org/10.5923/j.ijme.20110101.01>
2. Mihailov S.J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments. *Sensors*, 2012, vol. 12, no. 2, pp. 1898–1918. <https://doi.org/10.3390/s120201898>
3. Kersey A.D., Davis M.A., Patrick H.J., LeBlanc M., Koo K.P., Askins C.G., Putnam M.A., Friebele E.J. Fiber grating sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, vol. 15, no. 8, pp. 1442–1463. <https://doi.org/10.1109/50.618377>
4. Byron K.C., Sugden K., Brichenno T., Bennion I. Fabrication of chirped Bragg gratings in photosensitive fibre. *Electronics Letters*, 1993, vol. 29, no. 18, pp. 1659–1660. <https://doi.org/10.1049/el:19931104>
5. Hill K.O., Bilodeau F., Malo B., Kitagawa T., Thériault S., Johnson D.C., Albert J., Takiguchi K. Chirped in-fiber Bragg gratings for compensation of optical-fiber dispersion. *Optics Letters*, 1994, vol. 19, no. 17, pp. 1314–1316. <https://doi.org/10.1364/OL.19.001314>
6. Feng K.-M., Chai J.-X., Grubsky V., Starodubov D.S., Hayee M.I., Lee S., Jiang X., Willner A.E., Feinberg J. Dynamic dispersion compensation in a 10-Gb/s optical system using a novel voltage tuned nonlinearly chirped fiber Bragg grating. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, vol. 11, no. 3, pp. 373–375. <https://doi.org/10.1109/68.748240>
7. Markowski K., Jedrzejewski K., Marzecki M., Osuch T. Linearly chirped tapered fiber-Bragg-grating-based Fabry–Perot cavity and its application in simultaneous strain and temperature measurement. *Optics Letters*, 2017, vol. 42, no. 7, pp. 1464–1467. <https://doi.org/10.1364/OL.42.001464>
8. Wei P., Lang H., Liu T., Xia D. Detonation velocity measurement with chirped fiber Bragg grating. *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 11, pp. 2552. <https://doi.org/10.3390/s17112552>
9. Lemaire P.J., Atkins R.M., Mizrahi V., Reed W.A. High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibres. *Electronics Letters*, 1993, vol. 29, no. 13, pp. 1191–1193. <https://doi.org/10.1049/el:19930796>
10. Varzhel' S.V., Mun'ko A.S., Konnov K.A., Gribaev A.I., Kulikov A.V. Recording Bragg gratings in hydrogenated birefringent optical fiber with elliptical stress cladding. *Journal of Optical Technology*, 2016, vol. 83, no. 10, pp. 638–641. <https://doi.org/10.1364/JOT.83.000638>
11. Mikhneva A.A., Gribaev A.I., Varzhel' S.V., Frolov E.A., Novikova V.A., Konnov K.A., Zaleskaya Y.K. Inscription and investigation of the spectral characteristics of chirped fiber Bragg gratings. *Journal of Optical Technology*, 2018, vol. 85, no. 9, pp. 531–534. <https://doi.org/10.1364/JOT.85.000531>
12. Dmitriev A.A., Gribaev A.I., Varzhel S.V., Konnov K.A., Motorin E.A. High-performance fiber Bragg gratings arrays inscription method. *Optical Fiber Technology*, 2021, vol. 63, pp. 102508. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102508>
13. Gribaev 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>
14. Dmitriev A.A., Grebnev K.V., Varzhel S.V., Plotnikov M.Yu. A fiber optic vibration sensor based on SMF-MMF-SMF Structure And A Tilted Fiber Bragg grating. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 6, pp. 801–807. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-6-801-807>
15. Novikova V.A., Varzhel' S.V., Loseva E.A., Dmitriev A.A. Experimental investigation and simulation of phase-shifted fiber Bragg gratings. *Journal of Optical Technology*, 2021, vol. 88, no. 6, pp. 315–320. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000315>
16. Idrisov R.F., Gribaev A.I., Stam A.M., Varzhel' S.V., Slozhenikina Yu.I., Konnov K.A. Inscription of superimposed fiber Bragg gratings using a Talbot interferometer. *Journal of Optical Technology*, 2017, vol. 84, no. 10, pp. 694–697. <https://doi.org/10.1364/JOT.84.000694>
17. Dmitriev A.A., Varzhel S.V., Grebnev K.V., Anokhina E.V. Strain gauge based on n-pairs of chirped fiber Bragg gratings. *Optical Fiber Technology*, 2022, vol. 70, pp. 102893. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.102893>

Авторы

Дмитриев Андрей Анатольевич — инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57215003358](https://orcid.org/0000-0002-0674-8381), <https://orcid.org/0000-0002-0674-8381>, Dmitrievaa1994@yandex.ru

Гребнев Кирилл Вадимович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57390827800](https://orcid.org/0000-0002-8461-301X), <https://orcid.org/0000-0002-8461-301X>, greb.k1r@yandex.ru

Смирнов Даниил Сергеевич — младший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57204933153](https://orcid.org/0000-0003-4324-9327), <https://orcid.org/0000-0003-4324-9327>, dsmirmov@itmo.ru

Варжель Сергей Владимирович — кандидат физико-математических наук, доцент, 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.ru

Authors

Andrei A. Dmitriev — Research Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57215003358](https://orcid.org/0000-0002-0674-8381), <https://orcid.org/0000-0002-0674-8381>, Dmitrievaa1994@yandex.ru

Kirill V. Grebnev — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57390827800](https://orcid.org/0000-0002-8461-301X), <https://orcid.org/0000-0002-8461-301X>, greb.k1r@yandex.ru

Daniil S. Smirnov — Junior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57204933153](https://orcid.org/0000-0003-4324-9327), <https://orcid.org/0000-0003-4324-9327>, dsmirmov@itmo.ru

Sergei V. Varzhel — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, 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.ru

Статья поступила в редакцию 14.04.2022
Одобрена после рецензирования 02.06.2022
Принята к печати 14.07.2022

Received 14.04.2022
Approved after reviewing 02.06.2022
Accepted 14.07.2022



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»