

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-801-807

УДК 535.08

Волоконно-оптический датчик вибрации на основе SMF-MMF-SMF перехода и наклонной решетки Брэгга

Андрей Анатольевич Дмитриев¹, Кирилл Вадимович Гребнев²✉,
 Сергей Владимирович Варжель³, Михаил Юрьевич Плотников⁴

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

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

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

³ Vsv187@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>

⁴ plotnikov-michael@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2506-0379>

Аннотация

Предмет исследования. Предложен вариант реализации волоконно-оптического датчика вибрации. Датчик обладает повышенным рабочим диапазоном частот при использовании в качестве устройств опроса измерителей оптической мощности. В отличие от существующих спектральных измерительных комплексов, датчик обладает более низкими требованиями к условиям эксплуатации. **Метод.** Исследован чувствительный элемент на основе волоконного SMF-MMF-SMF перехода и индуцированной в данной структуре наклонной волоконной брэгговской решетки. Частота внешнего вибрационного воздействия на датчик определена с использованием преобразования Фурье-сигнала, полученного с фотоприемного устройства. **Основные результаты.** Созданная в ходе исследования структура с индуцированной в ней наклонной волоконной брэгговской решеткой может быть использована в качестве чувствительного элемента волоконно-оптического датчика вибрации. Показано, что сенсор на основе разработанной чувствительной структуры способен определять частоту внешней вибрации в диапазоне 20–9000 Гц с точностью до 1 %. **Практическая значимость.** Результаты исследований имеют существенное значение для систем мониторинга состояния конструктивных элементов зданий и сооружений. Реализация датчика вибрации в формате волоконно-оптического устройства позволяет преодолеть ограничения пьезоэлектрических сенсоров, обладая высокой помехозащищенностью и стойкостью к воздействию внешних сред.

Ключевые слова

волоконная брэгговская решетка, волоконно-оптический датчик, датчик вибрации, моды оболочки, преобразование Фурье

Благодарности

Работа выполнена в Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, название проекта «Создание производства волоконно-оптических гироскопов для контрольно-измерительных устройств и наземных транспортных систем», соглашение № 075-11-2019-026 от 27.11.2019.

Ссылка для цитирования: 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. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-801-807

A fiber optic vibration sensor based on SMF-MMF-SMF structure and a tilted fiber Bragg grating

Andrei A. Dmitriev¹, Kirill V. Grebnev²✉, Sergei V. Varzhel³, Mikhail Yu. Plotnikov⁴

^{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 Vsv187@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>

⁴ plotnikov-michael@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2506-0379>

Abstract

The paper proposes a version of realization for a fiber optic vibration sensor. The sensor possesses a wide range of operation frequencies with such interrogation devices as optical power meters. In comparison to spectral measuring complexes, the sensor imposes lower requirements on operating conditions. The authors investigated a sensing head based on a fiber SMF-MMF-SMF structure and a fiber Bragg grating inscribed in this structure. The external vibration frequency applied to the tested sensor structure is obtained using the Fourier transform of the signal received from the photodetector. The structure designed in this study with a fiber Bragg grating inscribed in it can be used as a sensing head of a fiber optic vibration sensor. It is demonstrated that the sensor based on the developed sensitive structure is able to obtain the external vibration frequency in the range of 20-9000 Hz with accuracy up to 1 %. The research results are essential for monitoring systems for the state of structural elements of buildings and structures. The implementation of the vibration sensor in the format of a fiber optic device allows overcoming the limitations of piezoelectric sensors, providing high noise immunity and resistance to harsh environmental effects.

Keywords

fiber Bragg grating, fiber optic sensor, vibration sensor, cladding modes, Fourier transform

Acknowledgements

This work was done at ITMO University and was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the Agreement No. 075-11-2019-026 dated November 27, 2019, within the project “The production development of fiber-optic gyroscopes for application in measuring instruments and land vehicle systems”.

For citation: 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). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-801-807

Введение

Наряду с датчиками температуры, давления и растяжения, устройства для измерения вибрации находят применение в составе систем мониторинга состояния протяженных конструкций и сооружений: линий связи, топливно-энергетических комплексов, объектов строительства, мостов, дамб [1]. Наиболее распространенными на данный момент являются пьезоэлектрические устройства, при использовании которых возникает необходимость контроля влажности окружающей среды и герметичности устройства [2]. Данные устройства обладают низкой температурной стабильностью, так как пьезоэлектрические материалы проявляют свойства пьезоэлектриков. При этом изменение температуры может вызвать деформацию кристалла, что влечет за собой искажение выходного сигнала датчика [3]. Также для возможности их подключения необходимо использовать электрические соединения с высоким импедансом, что определяется физической природой пьезоэффекта [4].

Реализация датчиков вибрации в формате волоконно-оптического устройства позволяет преодолеть приведенные выше ограничения и обладает следующими преимуществами: взрыво- и пожаробезопасность, помехоустойчивость, стойкость к воздействию агрессивных сред. Наиболее перспективными считаются волоконно-оптические датчики на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР).

За последние несколько лет были предложены различные варианты реализации датчиков вибрации на основе ВБР: с использованием в конструкции сенсора опорной металлической пластины, бесконтактные устройства, низко- и высокочастотные датчики на балке равного сопротивления изгибу.

В работе [5] рассмотрен датчик вибрации на основе ВБР с постоянным значением периода, закрепленной на гибкой алюминиевой пластине, на которую передаются механические колебания от исследуемого объекта. Детектируя сдвиг длины волны брэгговского резонанса при воздействии внешней вибрации, с помощью обработки полученных интеррогатором данных, авторам работы удалось осуществить измерения в диапазоне 50–200 Гц.

В [6] описан эксперимент, сравнивающий точность измерений волоконно-оптического датчика вибрации (на основе ВБР) с пьезоэлектрическим устройством. В исследуемом диапазоне 10–200 Гц оба сенсора имеют одинаковую точность определения частоты в пределах 0,3 Гц.

Волоконно-оптические средства измерения вибрации имеют также и бесконтактные реализации. В [7] представлен сенсор на основе двух ВБР, в котором одна решетка используется для измерения полезного сигнала, а вторая — для реализации механизма температурной компенсации. При приложении внешней вибрации на исследуемый объект изменяется расстояние от него до закрепленного на корпусе датчика магнита. Магнит, воз-

действуя на соединенную с измерительной частью диафрагму, сжимает ВБР, смещая резонансную длину волны. Экспериментальные данные демонстрируют чувствительность сенсора 0,67 пм/мкм в диапазоне 0–150 Гц.

В работе [8] в состав датчика входит балка равного сопротивления изгибу, наклонная ВБР (НВБР) с наклоном штрихов относительно оси волокна более 67° и пьезоэлектрик, к которому прилагается внешняя вибрация. НВБР с высоким значением угла наклона штрихов по принципу работы схожи с длиннопериодными ВБР – они связывают моду сердцевины с модами оболочки, распространяющимися в одном направлении. Регистрация частоты внешней вибрации выполнена в диапазоне 50–250 Гц, ошибка определения частоты составила порядка 3 %.

В рассмотренных работах описаны методы и устройства, использующие спектральную методику опроса ВБР, которая предъявляет высокие требования к условиям эксплуатации блока опроса измерительной системы и квалификации персонала. Представленный в настоящей работе метод, основанный на опросе чувствительного элемента путем измерения изменений мощности оптического сигнала, существенно снижает требования к конструкции опрашиваемых устройств при сохранении чувствительности, что позволяет использовать его в экстремальных условиях окружающей среды. При описанной методике опроса выходной сигнал может быть измерен высокоскоростным фотоприемником и интерпретирован в прилагаемую к чувствительному элементу вибрацию.

В [9] представлен волоконно-оптический датчик вибрации, чувствительным элементом которого является участок волоконного световода, выполненный в виде петли с закрепленным на ней грузом. Приложенная внешняя вибрация приводит к изгибу оптического волокна (ОВ), что сопровождается увеличением потерь ввиду нарушения условий полного внутреннего отражения, которые можно интерпретировать в изменение искомого сигнала вибрации. Испытания проведены в диапазоне 5–100 Гц, чувствительность датчика составила 0,18 мВт/г.

Рассмотренный в работе [10] датчик основан на паре ВБР – измерительная и опорная. На части оснастки с измерительной ВБР закрепляется груз. Опорная ВБР изолирована от внешнего механического воздействия. Приложение вибрации влечет за собой сдвиг спектра отражения измерительной ВБР, за счет сжатия-растяжения ввиду воздействия колебаний груза, что модулирует интенсивность проходящего через обе ВБР излучения. В диапазоне 20–4000 Гц была достигнута точность регистрации частоты внешней вибрации в 1 % от значения регистрируемой частоты.

Для приведенных выше датчиков в качестве недостатков можно выделить узкий диапазон рабочих частот и наличие механических частей — грузов, что негативно сказывается на стабильности датчика. В то время как полностью волоконно-оптическое исполнение лишено зависимости от механических преобразований и позволяет добиться большей точности, и увеличить срок службы за счет высокой стойкости к воздействию внешних сред.

Принцип работы и изготовление чувствительного элемента

Исследуемый чувствительный элемент датчика вибрации представляет собой структуру SMF-MMF-SMF (переход с одномодового волокна на многомодовое и снова на одномодовое), изготовленную при помощи сварного соединения ОВ, в которой индуцирована НВБР (рис. 1). Известна структура [2], отличие которой состоит в геометрических параметрах использованных ОВ — диаметрах сердцевин и длины многомодового участка. Недостатком датчика вибрации данной структуры является узкий диапазон рабочих частот — 50–400 Гц.

В исследуемом образце диаметр сердцевины одномодового участка составляет 8,2 мкм, многомодового — 50 мкм. Длина многомодового участка — 2 мм. При создании структуры использовано одномодовое ОВ стандарта G.657.A2 и многомодовое — G.651.1. Спектр пропускания записанной НВБР показан на рис. 2, а. Представленная НВБР имеет следующие параметры: $\lambda_{\text{Брэгга}} = 1561$ нм, внешний угол наклона $\Theta_{\text{ext}} = 1,5^\circ$, длина решетки 10 мм.

Для поворота ОВ в плоскости интерференционной картины световод закреплен на моторизированной поворотной подвижке. Угол поворота ОВ Θ_{ext} отличается от угла наклона штрихов НВБР относительно поперечного сечения волокна Θ_{int} , поскольку само ОВ дополнительно фокусирует излучение из-за цилиндрической формы [11].

НВБР изготовлена при помощи KrF эксимерной лазерной системы с использованием интерферометра Тальбота на базе Научно-исследовательского центра Световодной фотоники Университета ИТМО [12]. Схема использованной для записи установки показана на рис. 2, б. Ввиду универсальности данного стенда, с его помощью может быть создан широкий спектр волоконно-оптических дифракционных структур, таких как чирпированные ВБР [13], ВБР с фазовым сдвигом [14], массивы [15] и суперпозиции ВБР [16].

Принцип работы представленного решения заключается в следующем: НВБР связывает основную моду сердцевины ОВ с модами оболочки, распространяющимися в обратном направлении. Изгиб ОВ, вызванный внешней вибрацией, влечет за собой изменение эффективности выведения мощности излучения из мод сердцевины ОВ в оболочечные и обратно на переходе SMF-MMF-SMF. Ввиду высокой чувствительности оболочечных мод к изгибу ОВ, изменение амплитуды сигнала может быть измерено и интерпретировано в прилагаемую к чувствительному элементу вибрацию.

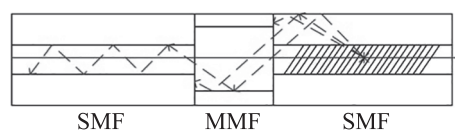


Рис. 1. Схематическое изображение структуры чувствительного элемента

Fig. 1. Simplified structure of the sensing head

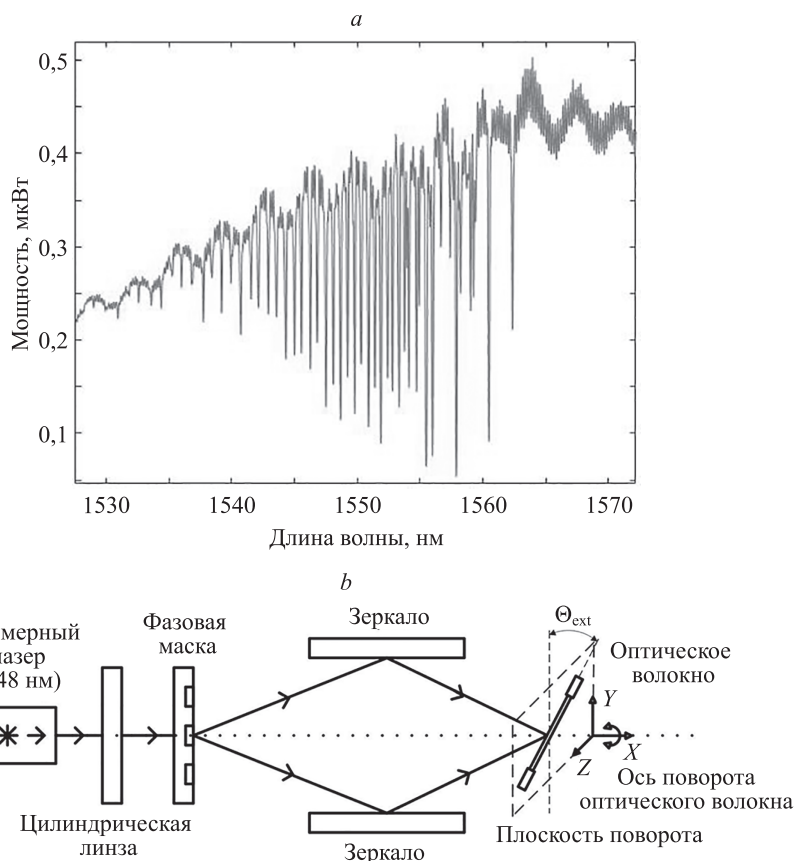


Рис. 2. Спектр пропускания (a) и принципиальная схема записи (b) наклонных волоконных брэгговских решеток
 Fig. 2. TFBG transmission spectrum (a) and Principal Fiber Bragg gratings inscription scheme (b)

Для проведения испытаний чувствительного элемента датчика вибрации был создан лабораторный стенд, принципиальная схема которого показана на рис. 3. Генератор электрических сигналов подключен к электроакустическому преобразователю с закрепленной на нем оснасткой ОВ. Оптическое излучение, генерируемое широкополосным источником, через Y-ответвитель поступает на сенсор, где взаимодействует с чувствительной структурой. Введенное обратно в ОВ излучение через Y-ответвитель регистрируется высокоскоростным фотоприемником. Приложенная внешняя вибрация модулирует оптическую мощность излучения, вводимую из мод оболочки в сердцевину ОВ, изменяя ее с заданной на генераторе частотой.

На оснастке ОВ закреплялось за предварительно зачищенную от акрилатной оболочки кварцевую часть в двух точках эпоксидной смолой ЭД-20, с предварительным изгибом. Введение предварительного изгиба необходимо для повышения точности измерения вибрации [17].

Результаты эксперимента

В ходе эксперимента в течение 1 мин произведена регистрация оптической мощности, поступающей на фотоприемное устройство с помощью аналого-цифрового преобразователя с частотой дискретизации 1 МГц, при приложенной внешней вибрации с постоянной

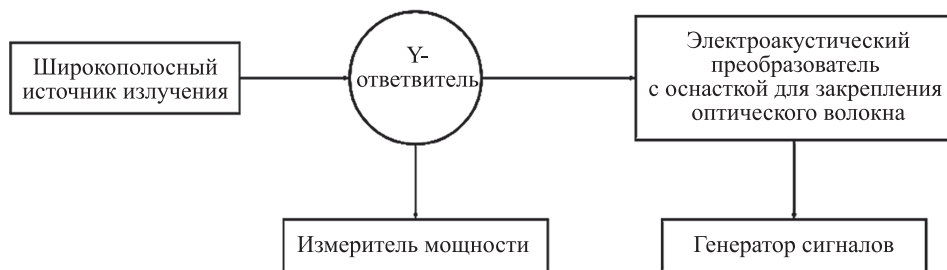


Рис. 3. Принципиальная схема лабораторного стенда
 Fig. 3. Experimental setup scheme

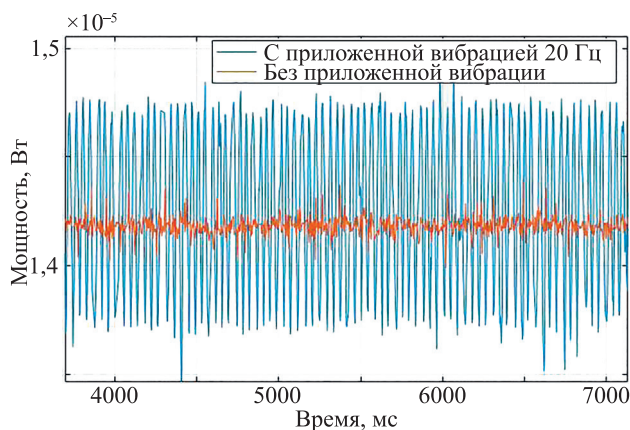


Рис. 4. Сигнал на выходе фотоприемного устройства при наличии и в отсутствии внешнего вибрационного воздействия на датчик. Частота внешнего вибрационного воздействия 20 Гц

Fig. 4. Photodetector output with applied external vibration to the sensor and without it. At this graph, the external vibration frequency is 20 Hz

частотой в диапазоне 20–9000 Гц. Для исследования частоты внешнего воздействия, полученные показания обработаны в программной среде Matlab с помощью преобразования Фурье. Амплитуда внешней вибрации вычислена напрямую из показаний измерителя мощности. Примеры выходных данных измерителя мощности

без вибрации и с приложенной вибрацией на частоте 20 Гц представлены на рис. 4.

На рис. 5 представлено фурье-преобразование сигнала, полученного с измерителя мощности, для частот из исследуемого диапазона 20–9000 Гц при приложенной к датчику внешней вибрации.

На рис. 6 представлена амплитудная характеристика датчика – зависимость уровня сигнала на фотоприемном устройстве от амплитуды напряжения на генераторе сигналов, при частоте внешней вибрации 20 Гц. В случае увеличения напряжения на выходе генератора сигналов, линейно увеличивается амплитуда сигнала на этой частоте.

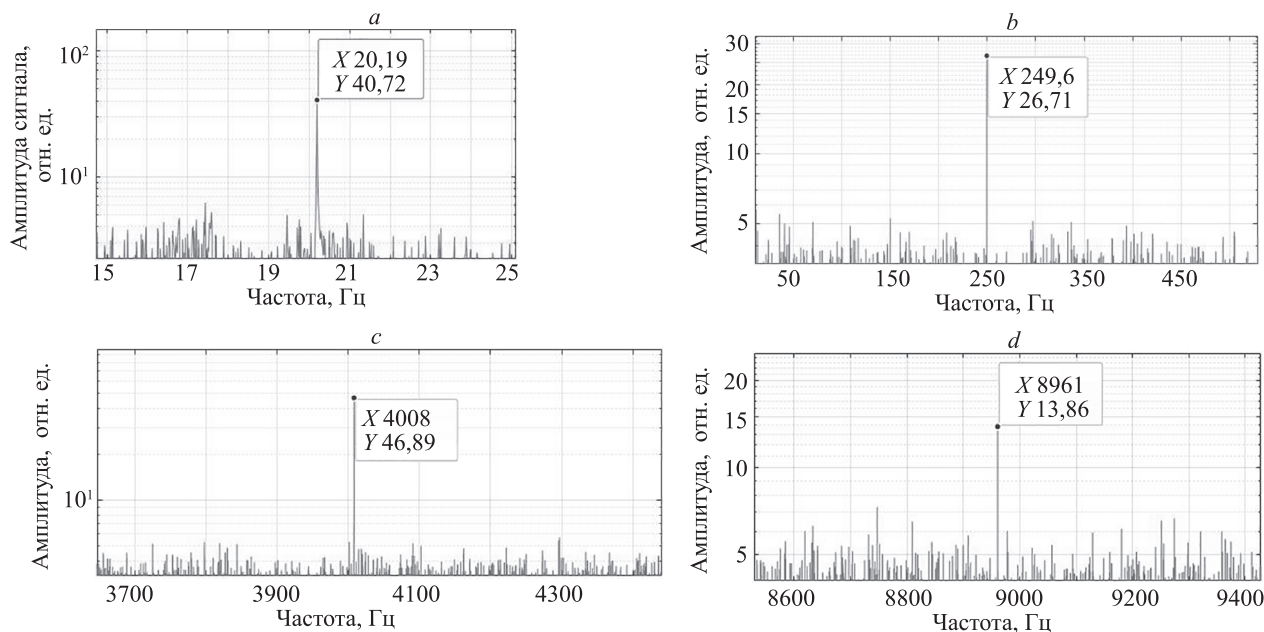
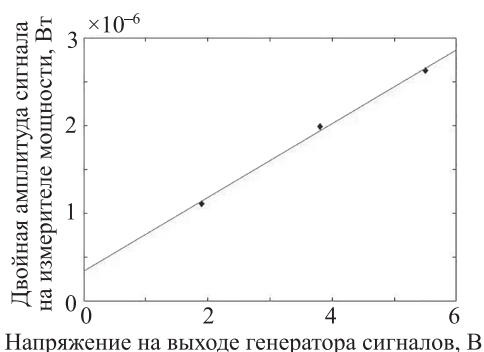


Рис. 5. Результат фурье-преобразования выходного сигнала датчика при частоте внешней вибрации: 20 Гц (a); 250 Гц (b); 4 кГц (c); 9 кГц (d)

Fig. 5. Fourier transform of the sensor's output signal at 20 Hz (a), 250 Hz (b), 4 kHz (c) and 9 kHz (d)



Исходя из полученных результатов, в исследуемом диапазоне 20–9000 Гц предложенный вариант датчика регистрирует частоту внешней вибрации с отклонением менее 1 %, что соответствует точности выставления частоты на генераторе сигналов.

Рис. 6. Двойная амплитуда сигнала на измерителе мощности при различных напряжениях на выходе генератора сигналов

Fig. 6. Double amplitude of the sensor's output signal at various voltages at the signal generator

Заключение

В работе предложен вариант реализации волоконно-оптического датчика вибрации на основе волоконного SMF-MMF-SMF перехода и наклонной волоконной брэгговской решетки. Продемонстрировано, что разработанный чувствительный элемент способен определять частоту внешней вибрации в диапазоне 20–9000 Гц с точностью 1 %.

В схеме опроса представленного устройства выполнена регистрация изменения мощности оптиче-

ского сигнала, модулируемого внешним воздействием. Полученный сигнал может быть интерпретирован в прилагаемую к устройству внешнюю вибрацию.

Описанная схема опроса с использованием измерителей оптической мощности, а также широкий диапазон рабочих частот составляют научную новизну представленной работы и позволяют существенно снизить требования к устройствам опроса, расширяя при этом спектр возможных применений.

Литература

1. Cai L., Pan J., Yue P., Zhong N. Theoretical analysis and application of MTM fiber structure based low-frequency vibration sensor // *Optik*. 2019. V. 195. P. 163161. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163161>
2. An J., Liu T., Jin Y. Fiber optic vibration sensor based on the tilted fiber bragg grating // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2013. V. 2013. P. 545013 <https://doi.org/10.1155/2013/545013>
3. Regtien P., Dertien E. *Sensors for Mechatronics*. Elsevier, 2018. 379 p. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-05059-3>
4. Kalange A.E., Gangal S.A. Piezoelectric sensor for human pulse detection // *Defence Science Journal*. 2007. V. 57. N 1. P. 109–114. <https://doi.org/10.14429/dsj.57.1737>
5. Mohanty L., Yang Y., Tjin S.C. Passively conducted vibration sensing with fiber bragg gratings // *Applied Sciences*. 2018. V. 8. N 9. P. 1599. <https://doi.org/10.3390/app8091599>
6. Pay R., Saurabh S., Srinivassan U., Srinivasan B. Fiber Bragg grating-based vibration sensing for machine prognostics // *Proc. of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation, NDE 2014, Pune, December 4-6, 2014 (NDE-India 2014)*.
7. Li T.L., Tan Y.G., Zhou Z.D., Zheng K. A non-contact FBG vibration sensor with double differential temperature compensation // *Optical Review*. 2016. V. 23. N 1. P. 26–32. <https://doi.org/10.1007/s10043-015-0153-y>
8. Luo B.B., Yang W.M., Hu X.Y., Lu H.Y., Shi S.H., Zhao M.F., Lu Y., Xie L., Sun Z.Y., Zhang L. Study on vibration sensing performance of an equal strength cantilever beam based on an excessively tilted fiber grating // *Applied Optics*. 2018. V. 57. N 9. P. 2128–2134. <https://doi.org/10.1364/AO.57.002128>
9. Бурдышева О.В., Никулин И.И. Амплитудный волоконно-оптический датчик вибрации // *Фотоника*. 2019. Т. 13. № 1. С. 80–85. <https://doi.org/10.22184/FRos.2019.13.1.80.85>
10. Липатников К.А., Сахабутдинов А.Ж., Нуреев И.И., Кузнецов А.А., Морозов О.Г., Феofilaktov С.В. Волоконно-оптический датчик вибрации «Виб-А» // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 4. С. 26.
11. Коннов К.А., Фролов Е.А., Грибаев А.И., Захаров В.В., Михнева А.А., Новикова В.А., Варжель С.В. Запись и визуализация волоконных решеток показателя преломления с наклонными штрихами // *Оптика и спектроскопия*. 2018. Т. 125. № 1. С. 51–56. <https://doi.org/10.21883/OS.2018.07.46266.2-18>
12. 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>
13. Михнева А.А., Грибаев А.И., Варжель С.В., Фролов Е.А., Новикова В.А., Коннов К.А., Залеская Ю.К. Запись и исследование спектральных характеристик chirпированных волоконных решеток Брэгга // *Оптический журнал*. 2018. Т. 85. № 9. С. 12–16. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2018-85-09-12-16>
14. Новикова В.А., Варжель С.В., Лосева Е.А., Дмитриев А.А. Экспериментальное исследование и моделирование волоконных брэгговских решеток с фазовым сдвигом // *Оптический журнал*. 2021. Т. 88. № 6. С. 36–44. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-06-36-44>
15. 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>

References

1. Cai L., Pan J., Yue P., Zhong N. Theoretical analysis and application of MTM fiber structure based low-frequency vibration sensor. *Optik*, 2019, vol. 195, pp. 163161. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163161>
2. An J., Liu T., Jin Y. Fiber optic vibration sensor based on the tilted fiber bragg grating. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, vol. 2013, pp. 545013 <https://doi.org/10.1155/2013/545013>
3. Regtien P., Dertien E. *Sensors for Mechatronics*. Elsevier, 2018, 379 p. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-05059-3>
4. Kalange A.E., Gangal S.A. Piezoelectric sensor for human pulse detection. *Defence Science Journal*, 2007, vol. 57, no. 1, pp. 109–114. <https://doi.org/10.14429/dsj.57.1737>
5. Mohanty L., Yang Y., Tjin S.C. Passively conducted vibration sensing with fiber bragg gratings. *Applied Sciences*, 2018, vol. 8, no. 9, pp. 1599. <https://doi.org/10.3390/app8091599>
6. Pay R., Saurabh S., Srinivassan U., Srinivasan B. Fiber Bragg grating-based vibration sensing for machine prognostics. *Proc. of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation, NDE 2014, Pune, December 4-6, 2014 (NDE-India 2014)*.
7. Li T.L., Tan Y.G., Zhou Z.D., Zheng K. A non-contact FBG vibration sensor with double differential temperature compensation. *Optical Review*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 26–32. <https://doi.org/10.1007/s10043-015-0153-y>
8. Luo B.B., Yang W.M., Hu X.Y., Lu H.Y., Shi S.H., Zhao M.F., Lu Y., Xie L., Sun Z.Y., Zhang L. Study on vibration sensing performance of an equal strength cantilever beam based on an excessively tilted fiber grating. *Applied Optics*, 2018, vol. 57, no. 9, pp. 2128–2134. <https://doi.org/10.1364/AO.57.002128>
9. Burdysheva O.V., Nikulin I.I. Amplitude fiber-optic vibration sensor. *Photonics Russia*, 2019, vol. 13, no. 1, pp. 80–85. (in Russian). <https://doi.org/10.22184/FRos.2019.13.1.80.85>
10. Lipatnikov K.A., Sakhabutdinov A.Zh., Nureev I.I., Kuznetsov A.A., Morozov O.G., Feofilaktov S.V. Fiber-optical vibration sensor «Vib-A». *Engineering journal of Don*, 2018, no. 4, pp. 26. (in Russian)
11. Konnov K.A., Frolov E.A., Gribaev A.I., Zakharov V.V., Mikhneva A.A., Novikova V.A., Varzhel S.V. Inscription and visualization of tilted fiber Bragg gratings. *Optics and Spectroscopy*, 2018, vol. 125, no. 1, pp. 54–59. <https://doi.org/10.1134/S0030400X18070172>
12. 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>
13. 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>
14. 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>
15. Dmitriev A.A., Gribaev A.I., Varzhel S.V., Konnov K.A., Motorin E.A. High-performance fiber Bragg gratings arrays

16. Идрисов Р.Ф., Грибаев А.И., Стам А.М., Варжель С.В., Сложеникина Ю.И., Коннов К.А. Запись суперпозиций волоконных решеток Брэгга с использованием интерферометра Тальбота // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 10. С. 56–60.
17. Ong K.S., Png W.H., Lin H.S., Pua C.H. Rahman F.A. Acoustic vibration sensor based on macro-bend coated fiber for pipeline leakage detection // Proc. of the 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2017). 2017. P. 167–171. <https://doi.org/10.23919/ICCAS.2017.8204436>
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. Ong K.S., Png W.H., Lin H.S., Pua C.H. Rahman F.A. Acoustic vibration sensor based on macro-bend coated fiber for pipeline leakage detection. *Proc. of the 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2017)*, 2017, pp. 167–171. <https://doi.org/10.23919/ICCAS.2017.8204436>

Авторы

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

Гребнев Кирилл Вадимович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-8461-301X>, greb.k1r@yandex.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.com

Плотников Михаил Юрьевич — кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57193069973](https://orcid.org/0000-0003-2506-0379), <https://orcid.org/0000-0003-2506-0379>, plotnikov-michael@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 17.08.2021
Одобрена после рецензирования 28.09.2021
Принята к печати 29.11.2021

Authors

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

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

Sergei V. Varzhel — PhD, 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.com

Mikhail Yu. Plotnikov — PhD, Associate Professor, Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57193069973](https://orcid.org/0000-0003-2506-0379), <https://orcid.org/0000-0003-2506-0379>, plotnikov-michael@yandex.ru

Received 17.08.2021
Approved after reviewing 28.09.2021
Accepted 29.11.2021



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»