

УДК 681.2

**К.А. Сафарян<sup>1,2</sup>, А.А. Голдобин<sup>1</sup>, И.А. Трефилов<sup>1,2,3</sup>, М.М. Гончаров<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Российская Федерация<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет ИТМО, Пермь, Российская Федерация<sup>3</sup>Инверсия-Сенсор, Пермь, Российская Федерация

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ВИБРАЦИИ НА ОСНОВЕ ЗАКРЕПЛЕННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЕТКИ**

Представлен численный анализ возможности создания волоконно-оптического датчика вибраций на основе закрепленной брэгговской решетки. Датчик состоит из двух инертных масс, которые соединены друг с другом с помощью нескольких мембран и оптического волокна с волоконной брэгговской решеткой (ВБР). Исследование разделено на два основных этапа: моделирование механической части датчика, оценка перекрёстного влияния и влияния внешних температур и разработку алгоритма обработки сигналов.

Было проведено механическое исследование датчика вибрации с целью определения его резонансной частоты и оптимальной длины эластичной перемычки. Оптическая часть исследования была сосредоточена на выборе оптимальных параметров для конфигурации расположения оптических волокон. Результаты показали, что датчик имеет собственную частоту колебаний выше 2000 Гц, наблюдается слабая зависимость чувствительности датчика от частоты колебаний при длине перемычки 1 мм. Исследование вносит вклад в разработку волоконно-оптических акселерометров для измерения и анализа вибрации в различных областях применения.

**Ключевые слова:** акселерометр, вибродатчик, оптика, амплитудно-частотная характеристика, брэгговская решетка.

**K.A. Safaryan<sup>1,2</sup>, A.A. Goldobin<sup>1</sup>, I.A. Trefilov<sup>1,2,3</sup>, M.M. Goncharov<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Perm State National Research University, Perm, Russian Federation<sup>2</sup>National Research University ITMO, Perm, Russian Federation<sup>3</sup>Inversion-Sensor LLC, Perm, Russian Federation

## **MODELING OF FIBER-OPTIC VIBRATION SENSOR BASED ON ATTACHED BRAGG GRATING**

The article presents a numerical analysis of the possibility of creating a fiber-optic vibration sensor based on an attached Bragg grating. The sensor consists of two inert masses connected to each other by several membranes and an optical fiber with a fiber Bragg grating (FBG). The study is divided into two main stages: modeling the mechanical part of the sensor, assessing cross-influence and the influence of external temperatures, and developing a signal processing algorithm.

A mechanical study of the vibration sensor was conducted to determine its resonant frequency and to determine the optimal length of the elastic beam. The optical part of the study focused on selecting

optimal parameters for the configuration of the arrangement of optical fibers. The results showed that the sensor has its own oscillation frequency above 2000 Hz, and there is a weak dependence of the sensor's sensitivity on the frequency of oscillations with a beam length of 1 mm. The research contributes to the development of fiber-optic accelerometers for measuring and analyzing vibration in various application areas.

**Keywords:** accelerometer, vibration sensor, optics, amplitude-frequency characteristic, Bragg grating.

## **Введение**

Измерение ускорения имеет большое значение во многих областях применения, таких как мониторинг состояния гражданской инфраструктуры, освоение космоса и нефтегазовая промышленность [1–3]. Обычные датчики, используемые для измерения ускорения, обычно представляют собой пьезоэлектрические [4] и емкостные преобразователи [5], которые обнаруживают движение по току, генерируемому инерционными силами в чувствительных материалах. Однако они имеют ряд недостатков, к которым относятся низкая температурная стабильность и подверженность электрическим наводкам. Использование волоконно-оптических устройств для реализации датчиков вибрации позволяет преодолеть ограничения, упомянутые ранее, и обладает следующими преимуществами: взрыво- и пожаробезопасность, помехоустойчивость и стойкость к воздействию агрессивных сред. Среди различных вариантов реализации волоконно-оптических датчиков вибрации наиболее перспективными считаются датчики, основанные на ВБР [6–10].

В работе приведены результаты численного моделирования оптического датчика вибраций, работающего по схожему принципу. Основными задачами этой работы является исследование влияния температуры на показания чувствительного элемента, а также исследование перекрестного влияния и разработка программы для симуляции испытаний.

## **Литературный обзор**

В работе [6] описывается разработка акселерометра, использующего волоконные брэгговские решетки (ВБР). Акселерометр представляет собой инерционную массу, которая поддерживается модифицированной консольной балкой L-образной формы с неравномерной площадью поперечного сечения. Его конструкция представлена на рис. 1. Балка соединена с основанием тонким шейным элементом, который служит центром концентрации напряжений и оптимальной зоной для

размещения датчиков ВБР. Акселерометр имеет рабочую полосу пропускания ниже собственной частоты конструкции и линейную реакцию на вибрации. Акселерометр обладает чувствительностью 46 пм/г для частот ниже 50 Гц и 306 пм/г для частот выше 150 Гц.

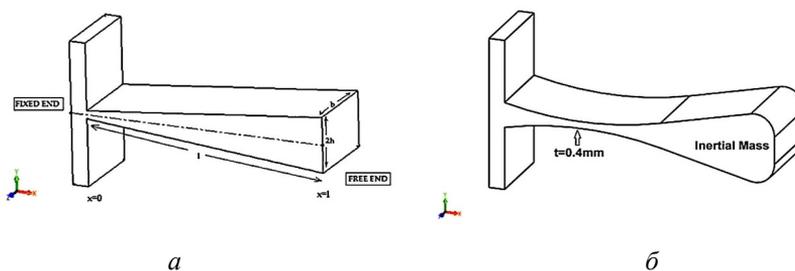


Рис. 1. Обычная консольная балка (а); модифицированная консольная балка (б)

В работе [7] был предложен и экспериментально продемонстрирован компактный акселерометр с использованием волоконной брэгговской решетки (ВБР) и диафрагмы, схема представлена на рис. 2. Система датчика основана на интеграции плоской диафрагмы и жесткой консольной балки в форме буквы L. Для предотвращения нежелательного эффекта чирпа в решетке ВБР заранее натягивается, а две боковые точки фиксируются.

Результаты динамического измерения вибрации показывают, что предложенный акселерометр на ВБР с диафрагмой обладает широким диапазоном частотного отклика (0–110 Гц) и очень высокой чувствительностью (106,5 пм/г).

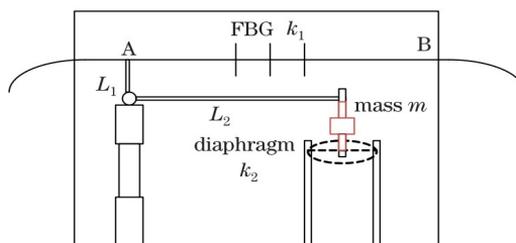


Рис. 2. Схема мембранного датчика вибрации

В работе [8] был изучен ВБР-акселерометр с высокой резонансной частотой, предназначенный для использования в механическом оборудовании. Для измерения осевой вибрации была разработана специальная упругая конструкция, состоящая из стальных трубчатых блоков,

в которых были встроены две ВБР. Результаты экспериментов показали, что датчик обладает высокой резонансной частотой в 3806 Гц, а также имеет широкую область плоского отклика до 1200 Гц, что соответствует теоретическому значению 3993 Гц. Чувствительность датчика составляет 4,01 мкм/г. Были проведены испытания на изменение температуры и возбуждение вдоль и поперек рабочего направления, которые подтвердили помехозащищенность датчика и его способность к температурной компенсации (рис. 3).

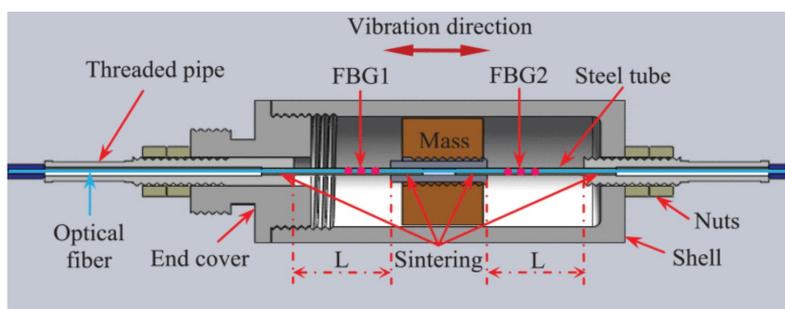


Рис. 3. Схема высокочастотного акселерометра на основе ВБР

В работе [9] была создана новая модель модуля относительного перемещения, которая сокращает погрешность измерений и повышает точность акселерометра. Это позволяет установить точную зависимость между относительной частотой перемещения и собственной частотой пьезоэлектрического акселерометра, что помогает определить оптимальный диапазон частот для работы с данным акселерометром (рис. 4).

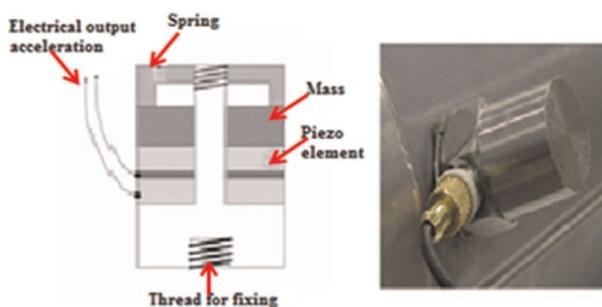


Рис. 4. Схема пьезоэлектрического датчика вибрации

Таким образом, риск возникновения резонанса, который может привести к выходу акселерометра из строя, минимизируется, а пьезоэлектрическая надежность акселерометра оптимизируется. Разработан-

ная модель была подтверждена и проверена на практике через экспериментальные испытания. Основная цель этой работы заключается в улучшении производительности и конструкции акселерометра.

### Механический расчет

Разрабатываемый датчик вибрации представляет собой волоконно-оптический датчик на основе закрепленного волокна. Общий вид датчика приведен на рис. 5. Он состоит из двух инертных масс, которые соединены друг с другом с помощью нескольких мембран и оптического волокна с ВБР. При воздействии на датчик вибрации инертные массы растягивают оптическое волокно и меняется период ВБР. В результате наблюдается изменение длины волны отраженного сигнала.

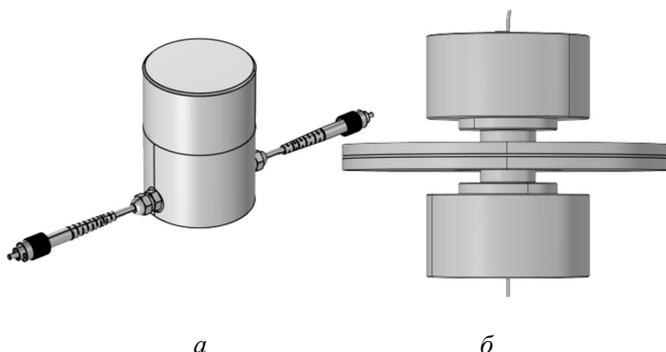


Рис. 5. Общий вид датчика снаружи (а); общий вид датчика внутри (б)

В качестве материалов датчика используется сплав марки 12Х18Н9 (ГОСТ 5632-72). Оптическое волокно изготовлено из кварца (таблица).

#### Свойства материалов

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона
12Х18Н9 (ГОСТ 5632-72)	7900	180	0.3
Кварц	2210	73	0.17

#### Влияние температуры

Предполагается, что датчик будет работать в диапазоне температур от минус 50 до плюс 80 °С, такая разница во внешних условиях может отразиться на работе датчика. Для оценки влияния температуры

в пакете Comsol Multiphysics методом конечных элементов решалась двумерная осесимметричная задача о тепловом расширении. Исследуемая геометрия представлена на рис. 6, а. В качестве начальной температуры была установлена температура минус 50 °С. Расчет проводился согласно уравнению:

$$\varepsilon = \alpha(T - T_0), \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – относительная деформация,  $\alpha$  – коэффициент линейного теплового расширения,  $T_0$  – начальная температура,  $T$  – заданная температура.

На рис. 6, б представлены расчетная область и сетка, которой она дискретизировалась. Сетка состоит из 23 700 элементов. На мембране (обозначена желтым) и оптическом волокне она уплотнена.

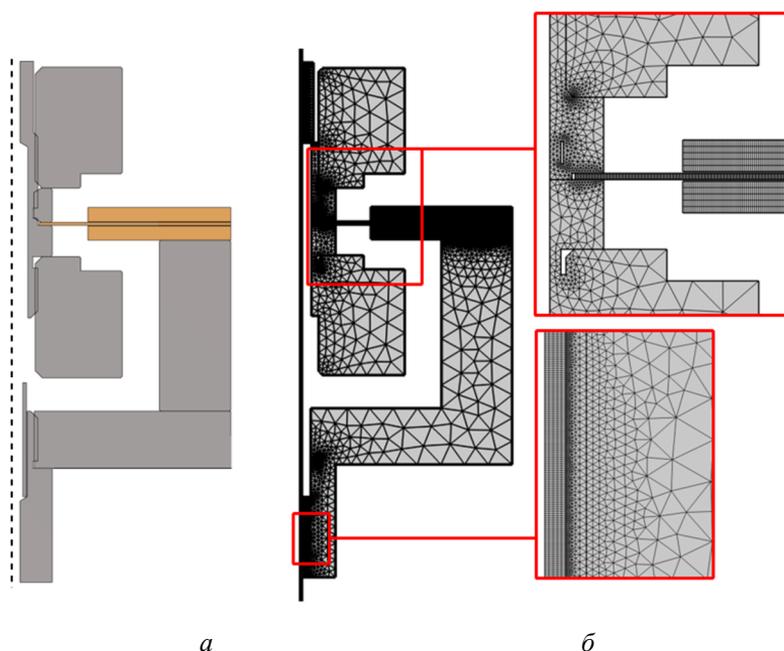


Рис. 6. Исследуемая геометрия (а); расчетная сетка (б)

В результате исследования влияния температуры на показания чувствительного элемента датчика вибрации получена зависимость максимальных напряжений на оптическом волокне и изменения длины волны от температуры (рис. 7).

Таким образом, было определено максимальное изменение длины волны датчика в диапазоне температур от минус 50 °С до плюс 80 °С, равное 2,8 нм.

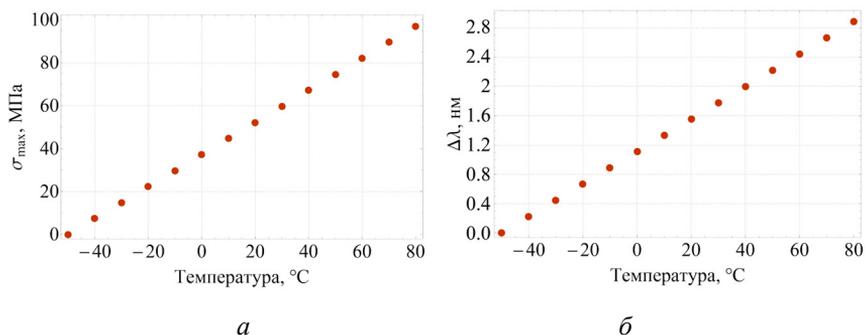


Рис. 7. Зависимость максимальных напряжений на оптическом волокне от температуры (а); зависимость изменения длины волны от температуры (б)

### Перекрестное влияние

Проведено численное исследование нагружения вибрационного датчика методом конечных элементов. Для этого методом конечных элементов в пакете Comsol Multiphysics решалась трехмерная задача, исследуемая геометрия представлена на рис. 8, а. В качестве граничных условий на основании датчика установлены гармонические колебания с разными частотами:

$$\begin{cases} u_z = A_z \sin(\omega t), \\ u_y = 0, \\ u_x = A_x \sin(\omega t), \end{cases} \quad (2)$$

где  $u_z$ ,  $u_y$  и  $u_x$  – смещение основания датчика по координатам  $z$ ,  $y$  и  $x$  соответственно;  $A_z$  и  $A_x$  – амплитуды смещения по координатам  $z$  и  $x$ ;  $\omega$  – циклическая частота колебаний,  $\omega = 2\pi\nu$ ;  $\nu$  – частота колебаний.

Перемещения по оси  $Y$  отсутствуют.

Расчетная область дискретизировалась сеткой, представленной на рис. 8, б. Сетка состоит из 1 346 000 элементов и уплотнена на мембране и оптическом волокне.

Проведено исследование перекрестного влияния на показания датчика. Расчет был проведен для двух случаев: вертикальные колебания и горизонтальные колебания при частоте 35 Гц. В результате была получена зависимость изменения длины волны от задаваемого ускорения при частоте 35 Гц (рис. 9). Чувствительность датчика к вертикальному и горизонтальному воздействию составила 0,04 и 0,0038 нм/г соответственно.

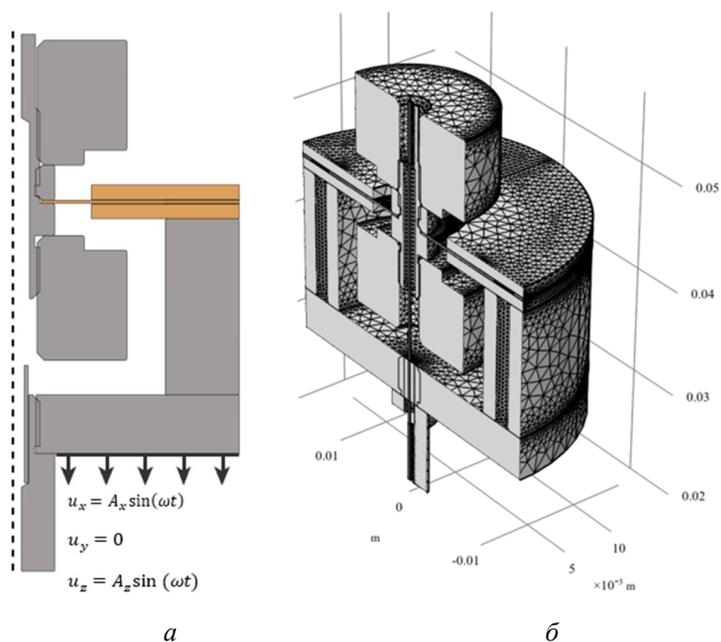


Рис. 8. Граничные условия (а), расчетная сетка (б)

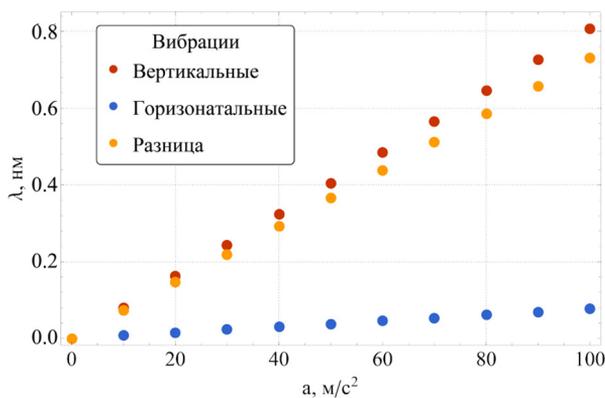


Рис. 9. Зависимость изменения длины волны от вертикально и горизонтально направленного ускорения при частоте 35 Гц

По полученным результатам была рассчитана максимальная относительная поперечная чувствительность датчика вибрации. Параметр определялся как отношение выходного сигнала датчика, ориентированного основной осью чувствительности перпендикулярно направлению входного сигнала, к выходному сигналу этого датчика, основная ось чувствительности которого направлена вдоль того же входного сигнала. Значение было выражено в процентах и составило 9,46 %.

### Алгоритм обработки сигнала волоконно-оптического датчика вибрации

Для обработки экспериментальных данных, измеренных при испытании датчика вибрации, на языке программирования Python разработан инженерный калькулятор. Калькулятор позволяет провести оконное фурье-преобразование экспериментальных данных с выборкой по 1024 точки и построить зависимость амплитуд фурье-преобразования выборок от времени. Полученные результаты можно экспортировать в виде таблицы или готового графика.

Результат работы алгоритма по обработке экспериментальных данных и сравнение с методом определения амплитуды сигнала по половине его размаха показаны на рис. 10. На графике показано как определяется зависимость изменения длины волны от частоты разными методами: теоретическим, по фурье-преобразованию и по половине размаха сигнала. Большое отклонение изменения длины волны при 5 Гц может быть связано с некорректной работой вибрационного стенда. Измерения проведены при ускорении  $1g$  и частотах от 5 до 50 Гц с шагом 5 Гц.

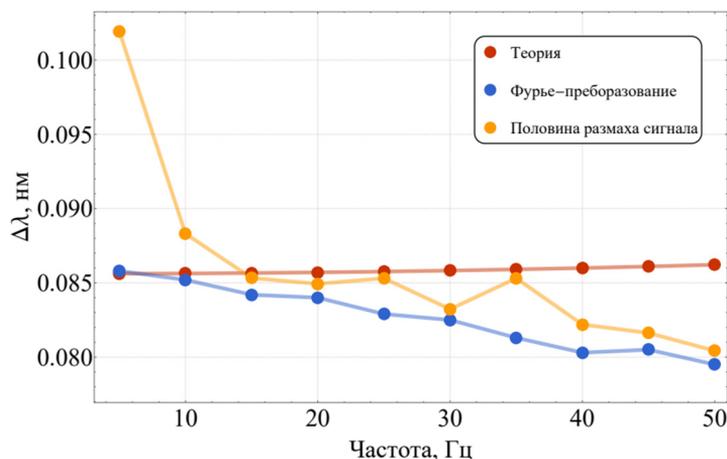


Рис. 10. Сравнение работы по определению амплитуды сигнала предложенным алгоритмом и по половине размаха сигнала для экспериментальных и теоретических данных

На рис. 11 приведен график, показывающий отклонение при определении изменения длины волны методом фурье-преобразования от определения по половине размаха сигнала.

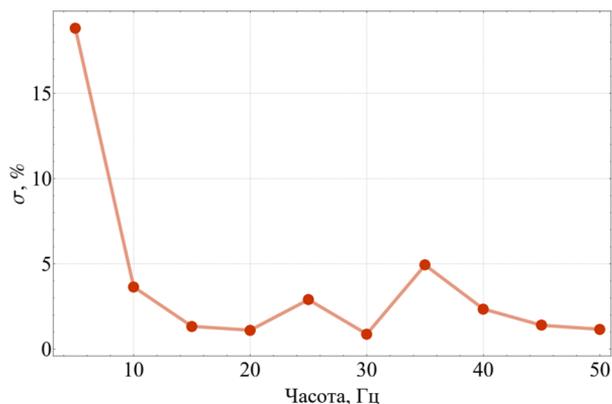


Рис. 11. Отклонение определения амплитуды с помощью фурье-преобразования от метода определения амплитуды по половине размаха сигнала для разных частот

### Заключение

Разработан датчик вибрации на основе закрепленного оптического волокна и проведены его теоретические исследования:

1. Проведен литературный обзор и представлены основные варианты исполнения аналогов датчика вибрации;
2. Определено влияние температуры от минус 50 °С до плюс 80 °С, длина волны при изменении температуры в этом диапазоне меняется на 2,8 нм;
3. Определено влияние перекрестных влияний вибрации на показания датчика, максимальная относительная поперечная чувствительность датчика вибрации составила 9,46 %.

### Список литературы

1. Fiber optic sensors in structural health monitoring / Lopez-Higuera Jose Miguel, Cobo Luis Rodriguez, Incera Antonio Quintela, Cobo Adolfo // Journal of Lightwave Technology. – 2011. – Vol. 29, № 4. – P. 587608.
2. Fibre optic sensor network for spacecraft health monitoring / Ecke Wolfgang, Latka Ines, Willsch Reinhardt [et al.] // Measurement Science and Technology. – 2001. – Vol. 12, № 7. – P. 974.
3. Rong Qiangzhou. FBG for oil and gas exploration / Rong Qiangzhou, Qiao Xueguang // Journal of Lightwave Technology. – 2019. – Vol. 37, № 11. – P. 2502–2515.

4. Piezoelectric accelerometers for ultrahigh temperature application / Zhang Shujun, Jiang Xiaoning, Lapsley Michael [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2010. – Vol. 96, № 1. – P. 013506.
5. Gomathi T., Shaby S. Main. Capacitive accelerometers for microelectromechanical applications: a review // *International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*. – IEEE. – 2016. – P. 486490.
6. Khan Mohd Mansoor. Modified cantilever beam shaped FBG based accelerometer with self temperature compensation / Khan Mohd Mansoor, Panwar Nishtha, Dhawan Ravi // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2014. – Vol. 205. – P. 7985.
7. Compact FBG diaphragm accelerometer based on L-shaped rigid cantilever beam / Weng Yinyan, Qiao Xueguang, Feng Zhongyao [et al.] // *Chinese Optics Letters*. – 2011. – Vol. 9, № 10. – P. 100604.
8. High-frequency optical fiber Bragg grating accelerometer / Wang Xiaofeng, Guo Yongxing, Xiong Li, Wu Heng // *IEEE Sensors Journal*. – 2018. – Vol. 18, № 12. – P. 49544960.
9. New model of piezoelectric accelerometer relative movement modulus / Ghemari Zine, Saad Salah, Amrouche Abdelwaheb, Lakehal Abdelaziz // *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. – 2015. – Vol. 37, № 8. – P. 932941.

### Список литературы

1. Lopez-Higuera J.M., Rodriguez-Cobo L., Quintela Incera A., Cobo A. Fiber optic sensors in structural health monitoring. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, vol. 29, no. 4, p. 587608.
2. Ecke W., Latka I., Willsch R. et al. Fibre optic sensor network for spacecraft health monitoring. *Measurement Science and Technology*, 2001, vol. 12, no. 7, p. 974.
3. Rong Q., Qiao X. FBG for oil and gas exploration. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, vol. 37, № 11, pp. 2502-2515.
4. Zhang S., Jiang X., Lapsley M. et al. Piezoelectric accelerometers for ultrahigh temperature application. *Applied Physics Letters*, 2010, vol. 96, no. 1, p. 013506.
5. Gomathi T., Shaby S.M. Capacitive accelerometers for microelectromechanical applications: a review. *2016 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*. IEEE, 2016, p. 486490.

6. Khan M.M., Panwar N., Dhawan R. Modified cantilever beam shaped FBG based accelerometer with self temperature compensation. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, vol. 205, p. 7985.

7. Weng Y., Qiao X., Feng Z. et al. Compact FBG diaphragm accelerometer based on L-shaped rigid cantilever beam. *Chinese Optics Letters*, 2011, vol. 9, no. 10, p. 100604.

8. Wang X., Guo Y., Xiong L., Wu H. High-frequency optical Bragg grating accelerometer. *IEEE Sensors Journal*, 2018, vol. 18, no. 12, p. 49544960.

9. Ghemari Z., Saad S., Amrouche A., Lakehal A. New model of piezoelectric accelerometer relative movement modulus. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2015, vol. 37, no. 8, p. 932941.

#### Сведения об авторах

##### САФАРЯН К.А.

e-mail: [safaryank@icloud.com](mailto:safaryank@icloud.com)

Ассистент кафедры «Общая физика» Пермского государственного национального исследовательского университета, лаборант научно-исследовательской лаборатории сенсорики и перспективных средств измерения, г. Пермь, Российская Федерация.

##### ГОЛДОБИН А.А.

e-mail: [arseniy34259@gmail.com](mailto:arseniy34259@gmail.com)

Студент кафедры «Общая физика» Пермского государственного национального исследовательского университета, лаборант научно-исследовательской лаборатории сенсорики и перспективных средств измерения, г. Пермь, Российская Федерация.

##### ТРЕФИЛОВ И.А.

e-mail: [igortrefilov59@gmail.com](mailto:igortrefilov59@gmail.com)

Ассистент кафедры «Общая физика» Пермского государственного национального исследовательского университета, лаборант научно-исследовательской лаборатории сенсорики и перспективных средств измерения, г. Пермь, Российская Федерация.

#### About the authors

##### K.A. SAFARYAN

e-mail: [safaryank@icloud.com](mailto:safaryank@icloud.com)

Assistant of the Department of "General Physics" Perm state university, laboratory assistant at the research laboratory of sensorics and advanced measuring Instruments, Perm, Russian Federation.

##### A.A. GOLDOBIN

e-mail: [arseniy34259@gmail.com](mailto:arseniy34259@gmail.com)

Student of the Department of "General Physics" Perm state university, laboratory assistant at the research laboratory of sensorics and advanced measuring Instruments, Perm, Russian Federation.

##### I.A. TREFILOV

e-mail: [igortrefilov59@gmail.com](mailto:igortrefilov59@gmail.com)

Assistant of the Department of "General Physics" Perm state university, laboratory assistant at the research laboratory of sensorics and advanced measuring Instruments, Perm, Russian Federation.

**ГОНЧАРОВ М.М.**

e-mail: [goncharov.m.m@mail.ru](mailto:goncharov.m.m@mail.ru)

**M.M. GONCHAROV**

e-mail: [goncharov.m.m@mail.ru](mailto:goncharov.m.m@mail.ru)

Ассистент кафедры «Общая физика» Пермского государственного национального исследовательского университета, лаборант научно-исследовательской лаборатории сенсорики и перспективных средств измерения, г. Пермь, Российская Федерация.

Assistant of the department of "General Physics" PSU, laboratory assistant of the Research Laboratory of Sensors and Advanced Measuring Instruments, Perm, Russian Federation.

**Финансирование.** Работа не имела спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** Все авторы сделали равноценный вклад в подготовку публикации.

**Получена:** 26.02.2024

**Одобрена:** 27.02.2024

**Принята к публикации:** 29.02.2024

**Financing.** The work was not sponsored.

**Conflict of Interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Author Contributions.** All authors have made an equivalent contribution to the publication.

**Received:** 26/02/2024

**Approved:** 27/02/2024

**Accepted for publication:** 29/02/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Моделирование волоконно-оптического датчика вибрации на основе закрепленной брэгговской решетки / К.А. Сафарян, А.А. Голдобин, И.А. Трефилов, М.М. Гончаров // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 1. – С. 123–135.

Please cite this article in English as: Safaryan K.A., Goldobin A.A., Trefilov I.A., Goncharov M.M. Modeling of fiber-optic vibration sensor based on attached bragg grating. *Applied photonics*, 2024, vol. 11, no. 1, pp. 123-135.