

УДК 681.586.5

М.С. Котлячков^{1,2}, А.М. Минкин^{1,2}, Л.А. Жикина², А.А. Оглезнев³

¹ Пермский государственный национальный
исследовательский университет, Пермь, Россия

² Пермская научно-производственная
приборостроительная компания, Пермь, Россия

³ Инверсия-Сенсор, Пермь, Россия

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК УСКОРЕНИЯ И ВИБРАЦИИ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ–ПЕРО, ВЫПОЛНЕННЫЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ МЭМС

Показана реализация волоконно-оптического акселерометра на базе интерферометра Фабри-Перо, полностью изготовленного из кварцевого стекла по бесклеевой технологии. Предложена конструкция упругого МЭМС-элемента, которая имеет относительную чувствительность к ускорению, равную 130 нм/г, что подтверждено численными и экспериментальными исследованиями. По результатам моделирования определена частота собственных колебаний виброчувствительного элемента, равная 1470 Гц. Проведены испытания датчика в диапазоне частот внешних инерционных воздействий от 20 до 1020 Гц.

Ключевые слова: акселерометр, волоконно-оптический датчик, вибрация, интерферометр Фабри–Перо, кварцевое стекло, микроэлектромеханические системы.

M.S. Kotliachkov^{1,2}, A.M. Minkin^{1,2}, L.A. Zhikina²

¹ Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

² Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company,
Perm, Russian Federation

³ Inversion-Sensor, Perm, Russian Federation

FIBER-OPTIC FABRY–PEROT ACCELERATION AND VIBRATION SENSOR MADE BY MEMS TECHNOLOGY

The paper presents the implementation of a fiber-optic Fabry-Perot accelerometer, completely made of silica glass using glueless technology. A design of an elastic MEMS element with acceleration sensitivity of 130 nm/g is proposed, which is confirmed by numerical and experimental studies. According to the simulation results, the frequency of the first form of natural oscillations of the vibration-sensing element was determined, which is equal to 1470 Hz. The sensor was tested in the frequency range of external inertial influences from 20 to 1020 Hz.

Keywords: accelerometer, fiber-optic sensor, vibration, Fabry–Perot interferometer, silica glass, microelectromechanical systems.

Введение

В настоящее время почти все умные машины содержат акселерометры, включая электронику, автомобили, морской транспорт, самолеты, робототехнику и пр. Они играют важную роль в навигации, стабильности, управлении и мониторинге безопасности [1]. Использование технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) для создания таких устройств показало возможность реализации миниатюрных, бюджетных МЭМС-акселерометров с широким спектром применения [2].

Более двух последних десятилетий волоконно-оптические акселерометры вызывают широкий интерес благодаря своим уникальным свойствам. Волоконно-оптические акселерометры открыли разнообразие возможностей для одноточечного измерения вибрации в труднодоступных местах, обладая высокой чувствительностью и очень компактными размерами для встроенных измерений [3]. Оптический МЭМС-акселерометр с интегрированным механическим преобразователем внешних воздействий может быть реализован на различных оптических принципах интерферометрии (интерферометр Фабри–Перо, Маха–Цендера или Майкельсона), дифракции (решетка Брэгга), изменении условий резонанса микрокольцевых/дисковых резонаторов или ширины запрещенной зоны в полостях фотонного кристалла, модуляции интенсивности излучения, резонансного оптического туннелирования [4].

Среди волоконно-оптических акселерометров наиболее привлекательным методом, позволяющим с высокой точностью восстанавливать ускорение объекта, является фазовая модуляция на основе интерферометра Фабри–Перо (ИФП), который благодаря простоте своей конструкции позволяет обеспечить компактность устройства. Известна реализация высокотемпературного оптоволоконного датчика на базе интерферометра Фабри–Перо с чувствительностью 2,48 нм/g (0,08638 рад/g) и резонансной частотой 10,008 кГц, который может быть использован для измерения вибрации при температуре до 400 °С [5]. Более того, имеются сведения о трехосном волоконно-оптическом акселерометре диаметром 20 мм и массой 6,8 г с высокой чувствительностью 135 рад/g и кросс-осевой погрешностью менее 3 % [6]. Также в одной из работ представлена реализация чувствительного элемента датчика на основе 6H-SiC с использованием сапфирового

волокна, применяемого в литейном цехе плавки чугуна в индукционных печах при температурах более 1200 °С [7].

Целью данной работы является исследование волоконно-оптического датчика ускорения и вибрации на основе ИФП, выполненного по технологии МЭМС, на воздействие вибрации.

Описание конструкции датчика

Волоконно-оптический акселерометр представляет собой двухлучевой ИФП с зазором $L \sim 200$ мкм между опорным (неподвижным) зеркалом и вибросочувствительным зеркалом, нанесенным на инерционную массу (ИМ). Опорным зеркалом с коэффициентом отражения $R_1 \sim 3,3$ % является полированное одномодовое оптическое волокно в полиимидном защитно-упрочняющем покрытии производства ПАО ПНППК (рис. 1). Использованное оптическое волокно обеспечивает высокую стойкость к повышенной температуре эксплуатации до 300 °С. Вибросочувствительным зеркалом с коэффициентом отражения $R_2 \sim 65$ % или, иначе, упругим элементом датчика является профилированная пластина с размерами 15×15 мм из кварцевого стекла толщиной 300 мкм с четырьмя упругими элементами (балками) и осажденной пленкой титана на внутренней поверхности. Внешний вид чувствительного элемента (ЧЭ) датчика представлен на рис. 2.

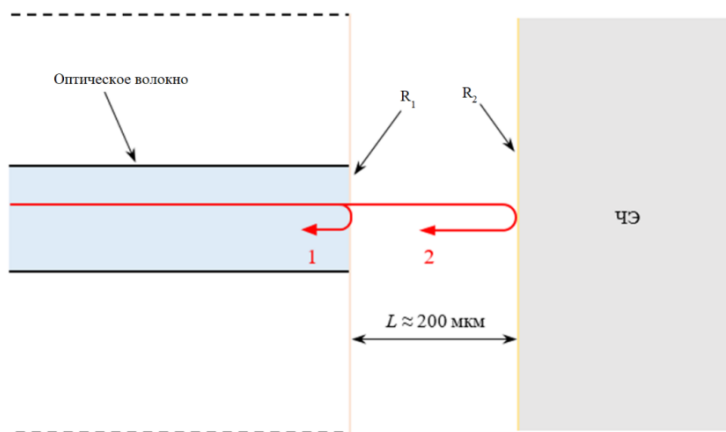


Рис. 1. Схема двухлучевого интерферометра Фабри–Перо

Элементы датчика были изготовлены методом лазерной резки при помощи импульсного CO_2 -лазера с рабочей длиной волны 10,6 мкм на установке прецизионной микрообработки МЛП1-2106. Упругий эле-

мент соединен со стеклянным основанием бесклеевым методом оптического контакта, что обеспечивает получение герметичного, стабильного и достаточно дешевого датчика.

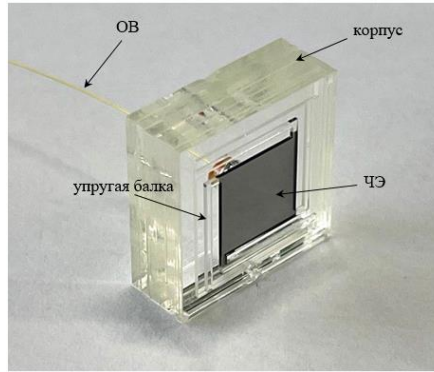


Рис. 2. Внешний вид чувствительного элемента датчика

Спектр интерференции двух лучей, отраженных от зеркал R_1 и R_2 , который представлен далее на рис. 4, можно определить следующим образом [8]:

$$I = I_0 \frac{R_1 + R_2 - 2R_{12} \cos \varphi}{1 + R_{12}^2 - 2R_{12} \cos \varphi},$$

где I , I_0 – интенсивности излучений падающего и отраженного, R_1 , R_2 , R_{12} – коэффициенты отражений первого, второго зеркала и их произведения соответственно; $\varphi = \frac{4\pi nL}{\lambda}$ – разность фаз, которая определяется воздушным зазором длиной L с показателем преломления $n = 1$; λ – длина волны излучения. Упругий элемент обеспечивает преобразование воздействующего на него ускорения в виде перемещения $\Delta L(t)$ инерционной массы, которое описывается уравнением движения с учетом влияния воздушного демпфирования, как [9]:

$$m \frac{d^2 \Delta L(t)}{dt^2} + c \frac{d \Delta L(t)}{dt} + k \Delta L(t) = ma(t),$$

где m – инерционная масса, c – коэффициент демпфирования, k – жесткость упругих перемычек. Когда ускорение вдоль измерительной оси $a(t)$ стремится к постоянному значению, величина зазора в интерферометре Фабри–Перо может быть представлена в виде:

$$L(t) = L_0 + \Delta L(t) = L_0 + \frac{ma(t)}{k}.$$

С помощью метода конечных элементов в программном комплексе инженерного анализа ANSYS проведен модальный анализ виброчувствительного элемента. Модель упругого элемента спроектирована в программе BricCAD. Анализ результатов моделирования показал, что предложенная структура упругого элемента наиболее чувствительна к ускорению вдоль оси, перпендикулярной плоскости зеркала, при этом чувствительность конструкции к ускорению составляет 130 нм/г. На рис. 3 представлены результаты моделирования, согласно которым частота собственных колебаний упругого элемента равна 1470 Гц.

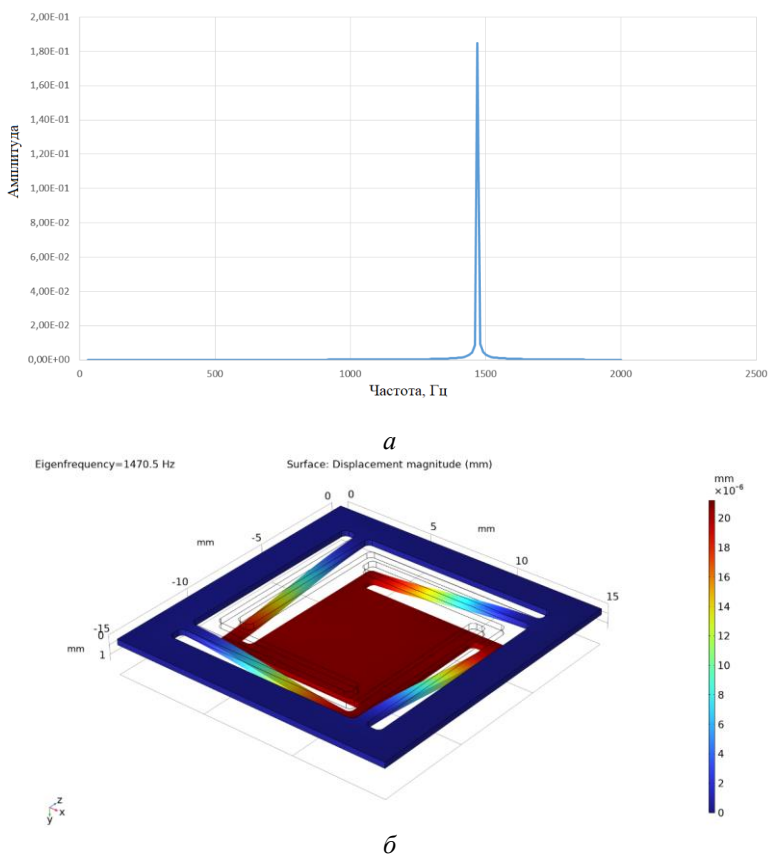


Рис. 3. Результат моделирования упругого элемента с помощью программного комплекса ANSYS: (а) гармонический отклик ЧЭ; (б) деформация ЧЭ на частоте собственных колебаний

Описание экспериментального исследования

Виброиспытание волоконно-оптического акселерометра было проведено на вибростенде IMV Corporation m060/MA1 с рабочим частотным диапазоном от 5 до 3000 Гц. В качестве системы опроса был использован интеррогатор ASTRO DS (далее – прибор), который регистрирует спектральную зависимость опрашиваемого датчика в области длин волн 1,5–1,6 мкм. Для демодуляции сигнала датчика $I(\lambda)$ применялось Фурье-преобразование регистрируемых интерференционных колебаний. На рис. 4, 5 изображены оптический сигнал датчика и схема экспериментальной установки соответственно.

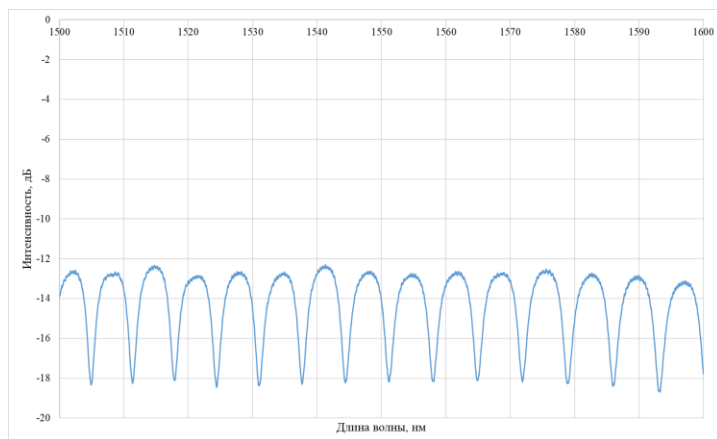


Рис. 4. Оптический сигнал волоконно-оптического акселерометра

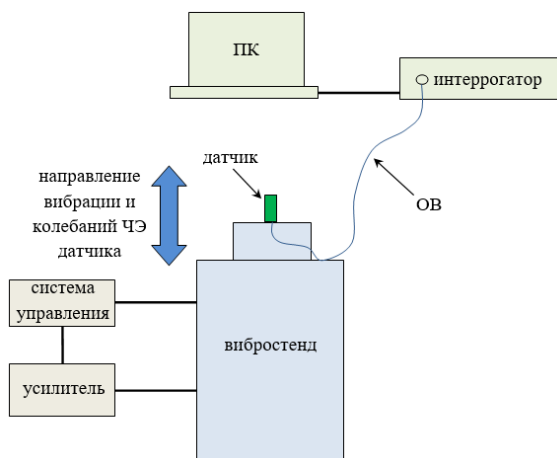


Рис. 5. Схема экспериментальной установки

Для исследования отклика датчика на воздействие вибрации была составлена программа испытаний, которая представлена в таблице. Виброускорение измерялось в единицах «g» – ускорения свободного падения ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$).

Программа виброиспытаний волоконно-оптического акселерометра

Проход 1			Проход 2		
Частота, Гц	Ускорение, g	Время, с	Частота, Гц	Ускорение, g	Время, с
20	1	30	20	2	30
40	1	30	40	2	30
60	1	30	60	2	30
80	1	30	80	2	30
120	1	30	120	2	30
220	1	30	220	2	30
520	1	30	520	2	30
720	1	30	720	2	30
1020	1	30	1020	2	30

Результаты исследования

На рис. 6 представлены графики изменения величины воздушного зазора L датчика при следующих параметрах внешних инерционных воздействий: амплитуды виброускорений до 2g, частотный диапазон до 1 кГц. Из данного графика видно, что в диапазоне частот от 20 до 220 Гц экспериментальные и рассчитанные значения относительной чувствительности датчика к ускорению совпадают, и ее значение составляет $(130 \pm 15) \text{ нм/g}$. Однако на частотах более 1000 Гц наблюдается резкий рост амплитуды колебаний, что указывает на приближение к резонансной частоте собственных колебаний упругого элемента.

Дополнительно проанализированы результаты испытаний при амплитуде виброускорений 1 g и максимальной частоте вибрации 1020 Гц (рис. 7). В верхней части рисунка изображен односекундный интервал изменения воздушного зазора L датчика во время испытаний, а в нижней части представлена амплитудно-частотная характеристика, с помощью которой можно определить частоту и амплитуду колебаний закрепленного на стенде датчика. Детектируемая датчиком частота колебаний соответствует заданным параметрам на вибростенде. Од-

нако полученное значение амплитуды колебаний упругого элемента порядка 310 нм, которое соответствует ускорению 2,4 g, указывает на высокую погрешность измерения из-за приближения к резонансной частоте датчика.

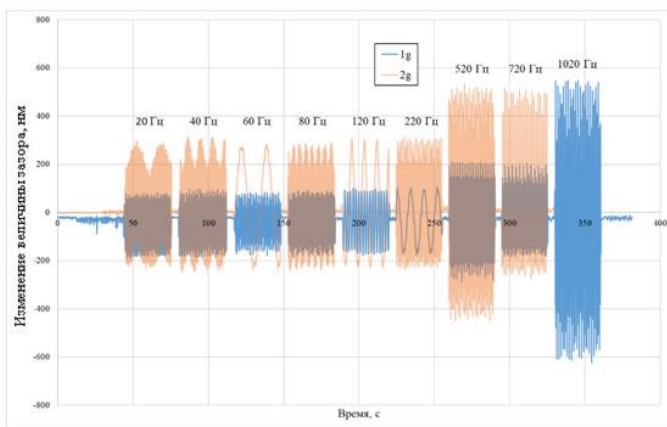


Рис. 6. Изменение величины воздушного зазора датчика во время испытаний при амплитуде виброускорений 1 и 2g

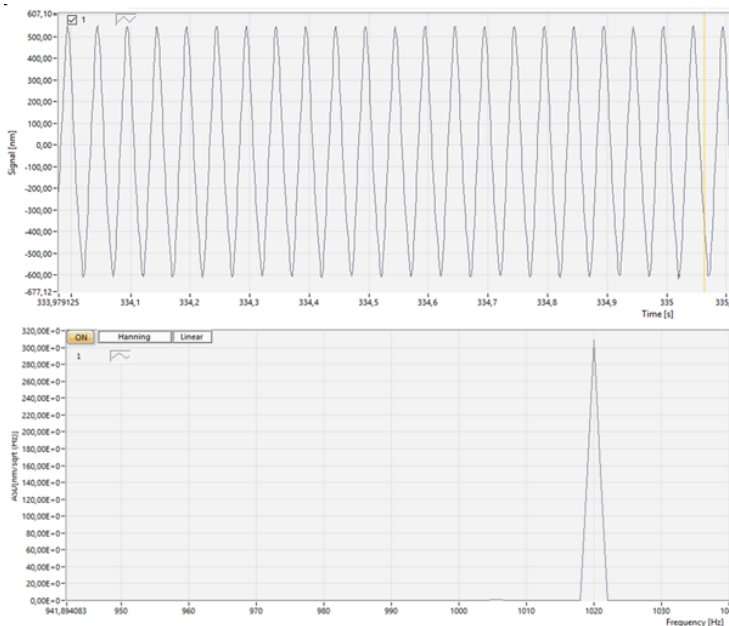


Рис. 7. Определение частоты и амплитуды колебаний волоконно-оптического акселерометра для случая амплитуды виброускорений 1 g и частоты вибрации 1020 Гц

Заключение

Представлена реализация волоконно-оптического датчика ускорения и вибрации на основе интерферометра Фабри–Перо и проведены его виброиспытания. Предложенная конструкция упругого элемента имеет относительную чувствительность к ускорению, равную (130 ± 15) нм/г, что подтверждено численными и экспериментальными исследованиями. По результатам моделирования определена частота собственных колебаний виброчувствительного элемента, равная 1470 Гц. В ходе экспериментального исследования было установлено, что на частотах более 220 Гц наблюдается увеличение параметра чувствительности датчика к ускорению из-за приближения к резонансной частоте. Установлено, что на частоте 1020 Гц чувствительность датчика к ускорению увеличивается в 2,4 раза.

Список литературы

1. Abozyd S., Toraya A., Gaber N. Design and modeling of fiber-free optical MEMS accelerometer enabling 3D measurements // MDPI Micromachines. – 2022. – Vol. 13. – Iss. 3. – P. 1–19.
2. MEMS accelerometer for mechanical vibration analysis: a comprehensive review with applications / M. Varanis, A. Silva, A. Mereles, R. Pederiva // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2018. – Vol. 40. – P. 1–18.
3. Highly sensitive fiber-optic accelerometer by grating inscription in specific core dip fiber / Q. Rong, T. Guo, W. Bao, Z. Shao, G. Peng, X. Qiao // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7. – P. 1–9.
4. Sensing techniques and interrogation methods in optical MEMS accelerometers / B. Malayappan, P. Lakshmi, P. Rao, K. Ramaswamy, P. Pattnaik // IEEE Sensors Journal. – 2022. – Vol. 22. – Iss. 7. – P. 6232–6246.
5. A MEMS fiber-optic Fabry-Perot vibration sensor for high-temperature applications / J. Qian, P. Jia, H. Liu, Q. Ren, J. Liu, L. Qin, J. Xiong // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 42908–42915.
6. Miniature tri-axis accelerometer based on fiber-optic Fabry-Perot interferometer / Z. Qu, P. Lu, W. Zhang, W. Xiong, D. Liu, J. Zhang // Opt. Express. – 2022. – Vol. 30. – Iss. 13. – P. 23227–23237.
7. Design, fabrication, characterization and application of an ultra-high temperature 6H-SiC sapphire fiber optic vibration sensor / Y. Huang,

F. Tang, D. Ma, Z. Liu, X. Wang // *IEEE Photonics Journal*. – 2019. – Vol. 11. – Iss. 5. – P. 1–9.

8. Hernandez G. Fabry-Perot interferometers // *Laser and Particle Beams*. – 1986. – Vol. 4. – Iss. 2. – P. 7–9.

9. A MEMS based Fabry-Perot accelerometer with high resolution / M. Zhao, K. Jiang, H. Bai, H. Wang, X. Wei // *Microsystem Technologies*. – 2020. – Vol. 26. – P. 1961–1969.

References

1. Abozyd S., Toraya A., Gaber N. Design and modeling of fiber-free optical MEMS accelerometer enabling 3D measurements. *MDPI Micromachines*, 2022, vol. 13, iss. 3, pp. 1-19.

2. Varanis M., Silva A., Mereles A., Pederiva R. MEMS accelerometer for mechanical vibration analysis: a comprehensive review with applications. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018, vol. 40, pp. 1-18.

3. Rong Q., Guo T., Bao W., Shao Z., Peng G., Qiao X. Highly sensitive fiber-optic accelerometer by grating inscription in specific core dip fiber. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, pp. 1-9.

4. Malayappan B., Lakshmi P., Rao P., Ramaswamy K., Pattnaik P. Sensing Techniques and Interrogation Methods in Optical MEMS Accelerometers. *IEEE Sensors Journal*, 2022, vol. 22, iss. 7, pp. 6232-6246.

5. Qian J., Jia P., Liu H., Ren Q., Liu J., Qin L., Xiong J. A MEMS Fiber-Optic Fabry-Perot Vibration Sensor for High-Temperature Applications. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 42908-42915.

6. Qu Z., Lu P., Zhang W., Xiong W., Liu D., Zhang J. Miniature tri-axis accelerometer based on fiber-optic Fabry-Perot interferometer. *Opt. Express*, 2022, vol. 30, iss. 13, pp. 23227-23237.

7. Huang Y., Tang F., Ma D., Liu Z., Wang X. Design, Fabrication, Characterization, and Application of an Ultra-High Temperature 6H-SiC Sapphire Fiber Optic Vibration Sensor. *IEEE Photonics Journal*, 2019, vol. 11, iss. 5, pp. 1-9.

8. Hernandez G. Fabry-Perot Interferometers. *Laser and Particle Beams*, 1986, vol. 4, iss. 2, pp. 7-9.

9. Zhao M., Jiang K., Bai H., Wang H., Wei X. A MEMS based Fabry-Perot accelerometer with high resolution. *Microsystem Technologies*, 2020, vol. 26, pp. 1961-1969.

Сведения об авторах

КОТЛЯЧКОВ М.С.

e-mail: *mxmktlchkv@gmail.com*

Магистр кафедры «Нанотехнологии и микросистемная техника» Пермского государственного национального исследовательского университета, инженер-исследователь ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь, Россия

МИНКИН А.М.

e-mail: *minkin.90@gmail.com*

Старший преподаватель кафедры «Физическая химия» Пермского государственного национального исследовательского университета, начальник отдела ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь, Россия

ЖИКИНА Л.А.

e-mail: *lussyzh@gmail.com*

Аспирантка кафедры «Охрана окружающей среды» Пермского национального исследовательского политехнического университета, начальник лаборатории ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь, Россия

ОГЛЕЗНЕВ А.А.

e-mail: *ogleznev@i-sensor.ru*

Технический директор ООО «Инверсия-Сенсор», Пермь, аспирантка кафедры «Прикладная математика» Пермского национального исследовательского политехнического университета

About the authors

KOTLIACHKOV M.S.

e-mail: *e-mail: mxmktlchkv@gmail.com*

Master of the Nanotechnology and Microsystem Engineering Department, PSNRU, Research Engineer, PJSC PNPPC, Perm, Russian Federation

MINKIN A.M.

e-mail: *minkin.90@gmail.com*

Senior Lecturer of the Physical Chemistry Department, PSNRU, Head of Department, PJSC PNPPC, Perm, Russian Federation

ZHIKINA L.A.

e-mail: *lussyzh@gmail.com*

Graduate student of Department of «Environmental Protection» at Perm National Research Polytechnic University, Head of Laboratory at Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company, Perm, Russian Federation

OGLEZNEV A.A.

e-mail: *ogleznev@i-sensor.ru*

CTO of LLC «Inversion-Sensor», Perm Postgraduate student of the Department of Applied Mathematics of PNRPU

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 24.02.2023

Одобрена: 03.03.2023

Принята к публикации: 06.03.2023

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

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

Received: 24/02/2023

Approved: 03/03/2023

Accepted for publication: 06/03/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Волоконно-оптический датчик ускорения и вибрации на основе интерферометра Фабри-Перо, выполненный по технологии МЭМС / М.С. Котлячков, А.М. Минкин, Л.А. Жикина, А.А. Оглезнев // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 2. – С. 56–67.

Please cite this article in English as: Kotliachkov M.S., Minkin A.M., Zhikina L.A., Ogleznev A.A. Fiber-optic Fabry-Perot acceleration and vibration sensor made by MEMS technology // Applied photonics, 2023, no. 2, pp. 56-67.