

Научная статья

УДК 531.717.53, 53.087.92

DOI: 10.17072/1993-0550-2025-3-71-79

<https://elibrary.ru/zyobkk>



Формирование оптического полимерного моста для волоконно-оптического датчика температуры

Мария Алексеевна Чеснокова¹, Даниль Илдарович Нурмухаметов², Роман Сергеевич Пономарев³, Татьяна Александровна Терехина⁴, Валерий Нагимович Аптуков⁵

^{1, 2, 3, 4, 5}Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

¹mariachesnokova@psu.ru

²danur@psu.ru

³rsponomarev@gmail.com

⁴tat21042002@mail.ru

⁵aptukov@psu.ru

Аннотация. В работе представлен метод изготовления волоконно-оптического датчика температуры на основе торцевого интерферометра Фабри–Перо, выполненного в виде полимерного "моста", часть которого является чувствительным элементом датчика. Основным материалом для создания чувствительной части является УФ-отверждаемая смола, прозрачная для оптического и ближнего инфракрасного диапазона. Проверка работоспособности датчика проводилась с помощью оптического анализатора спектра. Пики и провалы, видимые на спектре отражения широкополосного источника излучения, свидетельствовали о правильной работе интерферометра Фабри–Перо, а их смещение при изменении температуры образца позволило измерить чувствительность предложенного типа датчика. В результате выполнения работы показано, что чувствительность разрабатываемого датчика выше, чем у существующих аналогов, а габариты позволяют применять его в задачах биомедицины и ответственных измерениях температуры.

Ключевые слова: датчик температуры; оптическое волокно; интерферометр Фабри–Перо; полимерный мост.

Для цитирования: Чеснокова М. А., Нурмухаметов Д. И., Пономарев Р. С., Терехина Т. А., Аптуков В. Н. Формирование оптического полимерного моста для волоконно-оптического датчика температуры // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2025. № 3(70). С. 71–79. DOI: 10.17072/1993-0550-2025-3-71-79. <https://elibrary.ru/zyobkk>.

Благодарности: исследование выполнено за счет средств Государственного задания № FSNF-2024-0001.

Статья поступила в редакцию 30.04.2025; одобрена после рецензирования 24.08.2025; принята к публикации 27.09.2025.



© 2025 Чеснокова М. А., Нурмухаметов Д. И., Пономарев Р. С., Терехина Т. А., Аптуков В. Н. Лицензировано по CC BY 4.0. Чтобы ознакомиться с условиями этой лицензии, перейдите по ссылке <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Research article

Formation of Optical Polymer Bridge for Fiber-Optic Temperature Sensor

Maria A. Chesnokova¹, Danil I. Nurmukhametov², Roman S. Ponomarev³,
Tatyana A. Terekhina⁴, Valery N. Aptukov⁵

^{1, 2, 3, 4, 5}Perm State University, Perm, Russia

¹mariachesnokova@psu.ru

²danur@psu.ru

³rsponomarev@gmail.com

⁴tat21042002@mail.ru

⁵aptukov@psu.ru

Abstract. The paper presents a method of fabrication of a fiber-optic temperature sensor based on an end-face Fabry-Perot interferometer made in the form of a polymer “bridge”, a part of which is a sensitive element of the sensor. The main material for creation of the sensitive part is UV-curable resin, transparent for optical and near-infrared range. The performance of the sensor was tested using an optical spectrum analyzer. The peaks and dips visible on the reflection spectrum of the broadband radiation source indicated the correct operation of the Fabry-Perot interferometer, and their displacement when the sample temperature changes allowed to measure the sensitivity of the proposed type of sensor. As a result of this work it is shown that the sensitivity of the developed sensor is higher than that of existing analogs, and its dimensions allow its application in biomedical applications and critical temperature measurements.

Keywords: *temperature sensor; optical fiber; Fabry-Perot interferometer; polymer bridge.*

For citation: Chesnokova, M. A., Nurmukhametov, D. I., Ponomarev, R. S., Terekhina, T. A. and Aptukov, V. N. (2025), "Formation of Optical Polymer Bridge for Fiber-Optic Temperature Sensor", *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, no 3(70), pp. 71–79, DOI: 10.17072/1993-0550-2025-3-71-79, <https://elibrary.ru/zyobkk>.

Acknowledgments: the work was supported by the State Task No. FSNF-2024-0001.

The article was submitted 30.04.2025; approved after reviewing 24.08.2025; accepted for publication 27.09.2025.

Введение

Среди различных типов волоконно-оптических сенсоров особое место занимают чувствительные элементы на базе интерферометра Фабри–Перо, так как они обладают рядом преимуществ перед аналогами: простота конструкции, компактность, высокая чувствительность и хорошая работоспособность при высоких температурах [1–3]. Эти характеристики делают данный тип интерферометра особенно привлекательным для создания датчиков температуры. Однако практическое применение таких устройств усложняется высокой стоимостью и специфичностью компонентов, необходимых для создания чувствительного элемента.

В качестве решения этой проблемы предлагается создавать интерферометр Фабри–Перо непосредственно на торце оптического волокна, используя доступный фотополимерный материал, который прозрачен в диапазоне длин волн 700–1600 нм.

Формирование чувствительной части

В качестве материала для чувствительной части датчика температуры был использован фоточувствительный полимер, а именно оптический клей АС 545, который

прозрачен для видимого света и ближнего инфракрасного диапазона (ИК-диапазона). Выбор данного полимера обоснован тем, что он чаще всего применяется в фотонике для соединения оптических компонентов. Процесс формирования заготовки основан на технике формирования полимерного "моста" между торцами двух оптических волокон [4]. Подготовленные волокна укладываются в микропозиционеры напротив друг друга (см. рис. 1) под микроскопом, далее при помощи измерителя оптической мощности проводится точная юстировка оптических волокон. Оптические волокна сводятся друг к другу торец в торец. После чего на торец одного из волокон наносится капля из фотополимерного материала.

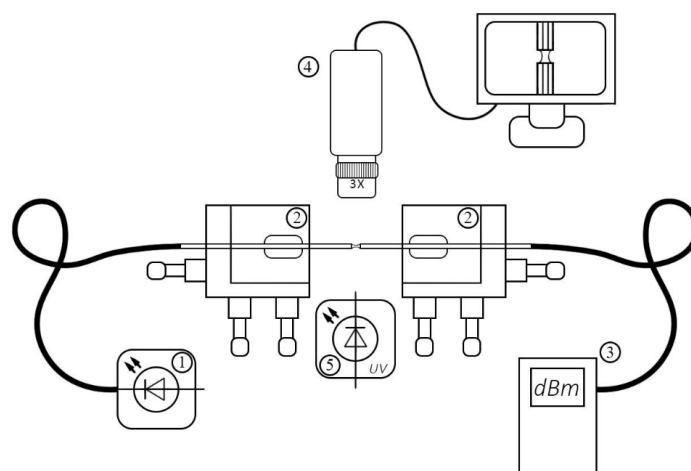


Рис. 1. Общая схема формирования чувствительного элемента:
1 – источник излучения (1550 нм), 2 – микропозиционеры с волокнами,
3 – измеритель оптической мощности, 4 – микроскоп, подключенный к компьютеру,
5 – источник УФ-излучения

За счет смачиваемости оптического волокна и сил поверхностного натяжения полимер располагается между торцами оптических волокон. Поочередно засвечивая ультрафиолетовым источником FUWO (FUV-6L) полимер и разводя волокна относительно друг друга по одной из осей, – формируется полимерный "мост". Управление скоростью и дистанцией между оптическими волокнами, длительностью и мощностью излучения на каждом этапе позволяет контролировать длину, толщину и форму получаемой структуры. Скол полученного полимерного "моста" вблизи из одного из торцов обеспечивает формирование "столбика" с прямым торцом. Таким образом, две границы раздела сред: оптическое волокно – полимер и полимер – воздух в совокупности формируют интерферометр Фабри–Перо на торце волокна (см. рис. 2).

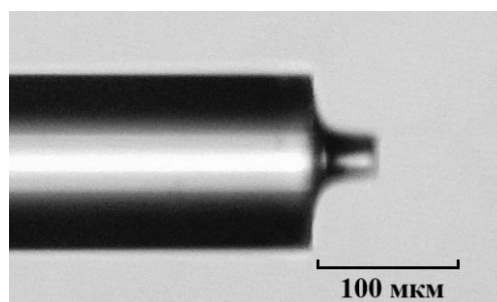
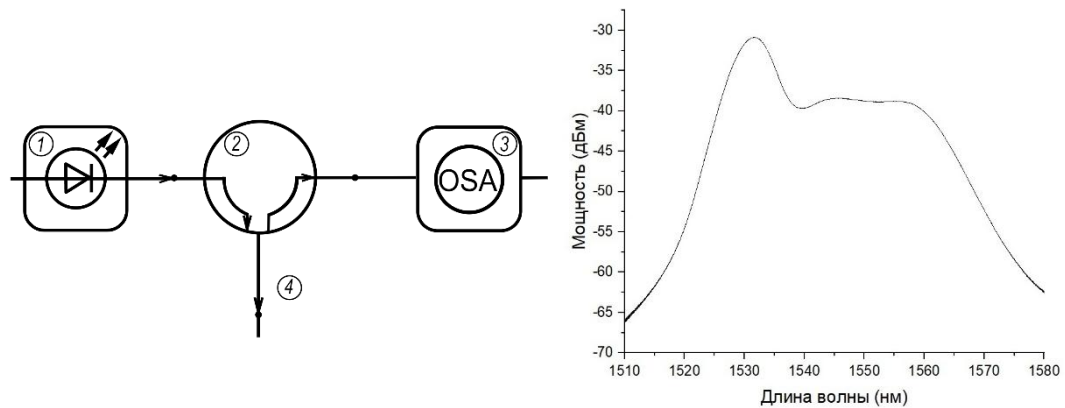


Рис. 2. Микрофотография датчика чувствительного элемента, сформированного из полимера на основе оптического клея AC 545

Работоспособность датчика оценивалась при помощи собранной установки (см. рис. 3а) для получения спектра отражения от сформированной структуры из полимера. Спектр излучения суперлюминесцентного волоконного источника (1510–1580 нм с выходной мощностью до 4 мВт) приведен на рис. 3б.



а)

б)

Рис. 3. а) Принципиальная схема измерения:

1 – суперлюминесцентный волоконный источник, 2 – циркулятор,
3 – оптический анализатор спектра, 4 – чувствительный элемент;

б) спектр источника излучения

Полученный спектр представлен на рис. 4 при температуре $t = 25^\circ\text{C}$, параметры чувствительного элемента полимерного "столбика": диаметр – 32 мкм, длина – 51,2 мкм, материал – оптический клей АС 545.

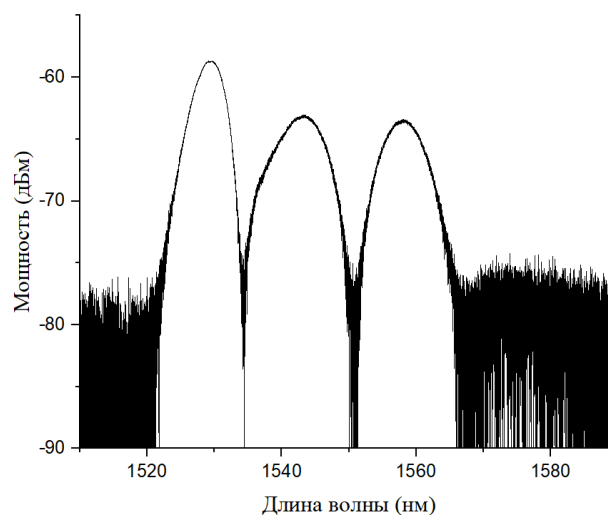


Рис. 4. Спектр чувствительного элемента из оптический клей АС 545
(диаметр – 32 мкм, длина – 51,2 мкм) при температуре 25°C

Огибающая спектра, представленного на рис. 4, повторяет форму спектра излучения источника, что говорит о достоверности полученных данных. Провалы на спектре объясняются возникновением интерференции: любое минимальное воздействие на интерферометр изменяет длину оптического пути, то есть расстояние между плечами, в

результате чего на интерферограмме изменяется расстояние между соседними максимумами (область свободной дисперсии, FSR):

$$\text{FSR} = \frac{\lambda^2}{\Delta L},$$

где λ – длина волны, ΔL – длина чувствительной части датчика.

Для подтверждения того, что интерференция происходит именно в чувствительной части датчика, были рассчитаны FSR для оптического волокна ($\text{FSR}_{\text{опт}} = 0,26$ мкм) и FSR для "столбика" ($\text{FSR}_{\text{столб}} = 0,0457$ мкм).

Температурные испытания

Датчик размещался внутри климатической камеры 60/150-80 KTX, температура внутри климатической камеры линейно изменялась от 30 до 50 °C с шагом в 5 °C с выдержкой на каждой ступени в 5 мин при скорости нагрева 4 °C/мин.

Согласно теории оптоволоконных интерферометров Фабри–Перо [5], при изменении температуры форма спектра отражения сохраняется, а сам спектр смещается по длине волны. Полученные экспериментальные данные позволяют с высокой точностью определить смещение спектра отражения, а, следовательно, и действующую на чувствительный элемент температуру (см. рис. 5).

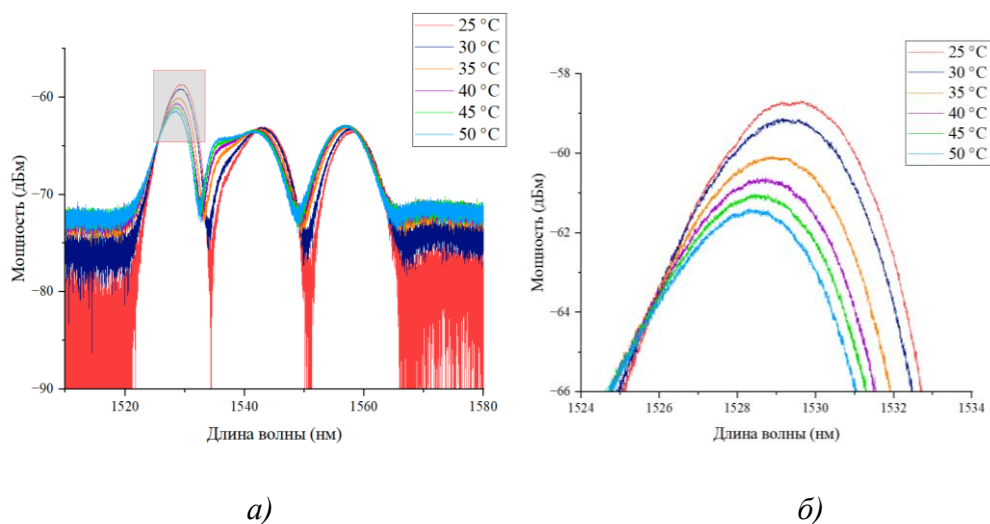


Рис. 5. Спектр а) датчика температуры на основе оптического клея АС 545; б) фрагмент спектра для различных значений температуры

Смещение спектра (пикового значения) при изменении внешней температуры (рис. 5б) позволяет использовать предложенный чувствительный элемент в качестве датчика температуры. Чувствительность изготовленного датчика составила ~44 пм/°C. В работе [6] предложен метод изготовления аналогичного Фабри–Перо на торце оптического волокна из боросиликатного стекла, результаты экспериментальных исследований образцов интерферометров показали, что они демонстрируют близкую температурную чувствительность спектральных откликов, которая составила 42 пм/°C и 37 пм/°C. Однако повторяемость геометрии датчиков при использовании существующих технологий изготовления затруднительна. Аналогичный датчик был разработан учеными из Китая [7], в качестве материала для формирования чувствительной части был использован фотополимерный материал с примесями полидиметилсилоксана (ПДМС). Данный датчик

работает в диапазоне длин волн 1500–1600 нм и имеет чувствительность -1,18 нм/°С при 20–110 °С.

Одномерная модель деформации и отверждения оптического волокна

Рассмотрим модель отверждения материала капли/стержня путем перехода из жидкого состояния в твердое с изменением механических характеристик, а также усадки, связанной со структурными изменениями.

Скорость полной деформации "столбика" $\dot{\varepsilon}$ является суммой скоростей упругой $\dot{\varepsilon}^e$ и вязкой $\dot{\varepsilon}^v$ деформации, а также деформации усадки $\dot{\varepsilon}^f$. Предполагаем, что деформация усадки является функцией полученной дозы УФ-облучения $\varepsilon^f = F(D)$, $D = \int (W(t)/S) dt$, $W(t)$ – переменная мощность источника УФ; S – площадь воздействия светодиода.

Процесс деформации и отверждения описывается системой дифференциальных уравнений

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\sigma}/E + \sigma/\mu + (\partial F/\partial D)\dot{D}(t), \quad \dot{D}(t) = W(t)/S \quad (1)$$

где σ – нормальное напряжение в стержне; E – модуль упругости; μ – коэффициент вязкости.

В уравнениях (1) механические характеристики являются заданными функциями полученной дозы облучения, $E = E(D)$, $\mu = \mu(D)$. Доза облучения D определяется мощностью $W(t)$, а в итоге все неизвестные функции являются функциями времени. Управляя процессом полимеризации (при некоторых технических ограничениях – мощность излучения, скорость растяжения стержня и т. д.) можно реализовать различное напряженно-деформированное состояние стержня и его геометрию. Основными параметрами управления является скорость изменения полной деформации $\dot{\varepsilon} = \Psi(t)$ от времени, а также переменная мощность облучения $W(t)$.

Анализ режимов процесса отверждения при постоянном напряжении

На практике представляют интерес режимы управления процессом $\Psi(t)$ и $W(t)$, при которых деформация и отверждение стержня протекает при небольшом постоянном напряжении σ_1 , что позволяет получить тонкий и длинный датчик для измерения температуры в локальной области в труднодоступном месте. В противном случае рост напряжения может привести к преждевременному разрушению чувствительной части датчика. Условие постоянства напряжения имеет вид

$$\sigma_1/\mu(D) = \Psi(t) - (\partial F/\partial D)\dot{D}(t), \quad (2)$$

а наиболее простым вариантом управления процессом является выбор определенного режима скорости деформации при фиксированной мощности облучения.

Для его поиска необходимо конкретизировать зависимости деформации усадки, коэффициента вязкости и модуля упругости от полученной дозы облучения D . Примем эти зависимости в одинаковой нелинейной форме:

$$\varepsilon^f = F(D) = \varepsilon_1^f (1 - e^{-\gamma D}), \quad \mu = \mu(D) = \mu_1 (1 - e^{-\beta D}), \quad (3)$$

где ε_1^f – максимальная деформация усадки твердого материала; γ – коэффициент, характеризующий скорость изменения деформации усадки; μ_1 – коэффициент вязкости

твердой капли, β – коэффициент, характеризующий скорость изменения коэффициента вязкости.

Пусть мощность облучения постоянна: $\dot{D}(t) = \frac{W(t)}{S} = V_D$, тогда $D = V_D t$, а для выполнения условия (2) необходимо задать скорость полной деформации в виде

$$\Psi(t) = \sigma_1 / [\mu_1 (1 - e^{-\beta V_D t})] + \varepsilon_1^f \gamma V_D e^{-\gamma V_D t}, \quad (4)$$

На рисунке 6 показаны требуемые скорости деформирования стержня (4) при различных мощностях облучения: $V_D = 0,5$ (кривая 1); $1,0$ (кривая 2); $2,0$ (кривая 3). В расчете использовались следующие постоянные: $\sigma_1 / \mu_1 = 0,01$; $\beta = 0,5$; $\gamma = 0,5$; $\varepsilon_1^f = -0,1$.

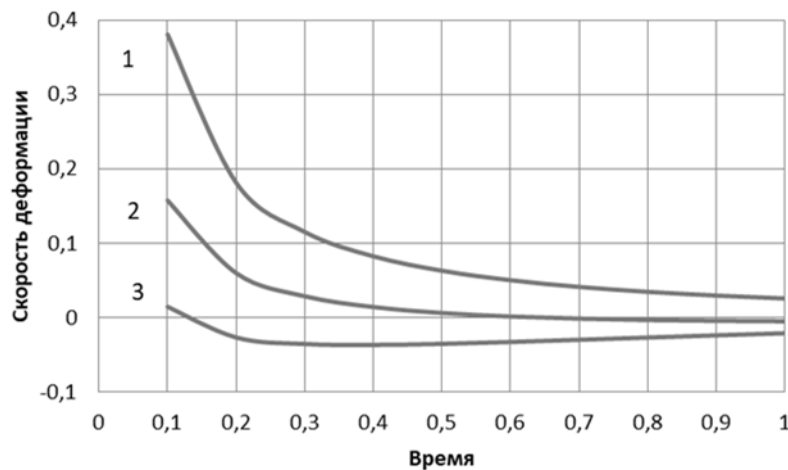


Рис. 6. Временная зависимость скорости деформации, требуемая для поддержания постоянного напряжения при 0,5 (кривая 1); 1,0 (кривая 2); 2,0 (кривая 3)

Из рисунка 6 следует, что при постоянной мощности излучения для поддержания фиксированного уровня напряжения скорость растяжения стержня должна уменьшаться с течением времени. Средний уровень скорости деформации тем меньше, чем больше мощность излучения. Таким образом, при меньших уровнях мощности облучения и выполнении требования (4) для сохранения постоянного напряжения, можно достичь более значительного уровня деформации (перемещения). Это важный для практики вывод, поскольку такой режим позволяет получить более длинный и тонкий цилиндр ("столбик").

Заключение

В результате исследования была разработана технология формирования температурного датчика, чувствительный элемент которого представляет собой торцевой интерферометр Фабри–Перо из полимерной УФ-отверждаемой, прозрачной для ближнего ИК-диапазона смолы. Испытания показали, что с ростом температуры происходит сдвиг начального спектра, которое можно объяснить изменением длины интерферометра и показателя преломления полимера. Также была определена чувствительность исследуемого датчика, которая составляет ~ 44 пм/°С и превышает чувствительность классических волоконно-оптических датчиков (~ 11 пм/°С), чувствительный элемент которых базируется на кварцевом стекле. Кроме того, была разработана одномерная модель деформации и отверждения оптического волокна, с помощью которой получены режимы процессов

отверждения, при которых напряжение не возрастает, что позволяет получить более длинный и тонкий "столбик" (датчик).

Список источников

1. Yang M., Peng J., Wang G., Dai J. Fiber Optic Sensors Based on Nano-Films. In *Fiber Optic Sensors // Smart Sensors, Measurement and Instrumentation*; Springer International Publishing: Cham, 2017. Vol. 21. P. 1–30. ISBN 978-3-319-42624-2. DOI: 10.1007/978-3-319-42625-9_1. EDN: YINRLW.
2. Chen Z., Xiong S., Gao S., Zhang H., Wan L., Huang X., Huang B., Feng Y., Liu W., Li Z. High-Temperature Sensor Based on Fabry-Perot Interferometer in Microfiber Tip // *Sensors*. 2018. Vol. 18. 202. DOI: 10.3390/s18010202.
3. Li J., Jia P., Fang G., Wang J., Qian J., Ren Q., Xiong J. Batch-Productible All-Silica Fiber-Optic Fabry-Perot Pressure Sensor for High-Temperature Applications up to 800 °C // *Sensors and Actuators A: Physical* 2022. Vol. 334. P. 113363. DOI: 10.1016/j.sna.2022.113363 EDN: KGXSGH.
4. Mohammed P. A., Wadsworth W. J. Long Free Standing Polymer Waveguides Fabricated Between Single-Mode Optical Fiber Cores // *J. Light wave Technol. JLT* 2015. Vol. 33. P. 4384–4389. DOI: 10.1109/JLT.2015.2471810. EDN: VFFPNZ.
5. Hussein S. M. R. H.; Sakhabutdinov A. Zh., Morozov O. G., Anfinogentov, V. I., Tunakova J. A.; Shagidullin A. R., Kuznetsov A. A., Lipatnikov K. A., Nasybullin A. R. Applicability Limits of the End Face Fiber-Optic Gas Concentration Sensor, Based on Fabry-Perot Interferometer // *Karbala International Journal of Modern Science*. 2022. Vol. 8. P. 339–355. DOI: 10.33640/2405-609X.3243. EDN: WVHXFE.
6. Хуссейн С. М., Каид М., Альхуссейн А. Н., Аглиуллин Т. А., Самигуллин Д. В., Валеев Б. И., Сахабутдинова Л. А. Цельностеклянный волоконно-оптический торцевой микротермометр // *International Research Journal*. 2023. №11 (137). С. 1–8. DOI: 10.23670/IRJ.2023.137.42. EDN: UDAMDG.
7. Liu Z., Zhao B., Zhang Y., Zhang Y., Sha Ch., Yang J., Yuan L. Optical fiber temperature sensor based on Fabry-Perot interferometer with photopolymer material // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2022. November. Vol. 347. P. 113894. DOI: 10.1016/j.sna.2022.113894. EDN: ARPILX.

References

1. Yang, M. *et al.* (2017), "Fiber optic sensors based on nano-films", *Smart Sensors, Measurement and Instrumentation*, pp. 1–30. doi:10.1007/978-3-319-42625-9_1.
2. Chen, Z. *et al.* (2018), "High-temperature sensor based on Fabry-Perot interferometer in micro-fiber tip", *Sensors*, 18(1), p. 202. doi:10.3390/s18010202.
3. Li, J. *et al.* (2022), "Batch-productible all-silica fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor for high-temperature applications up to 800 °C", *Sensors and Actuators A: Physical*, 334, p. 113363. doi:10.1016/j.sna.2022.113363.
4. Mohammed, P. A. and Wadsworth, W. J. (2015), "Long free-standing polymer waveguides fabricated between single-mode optical fiber cores", *Journal of Lightwave Technology*, 33(20), pp. 4384–4389. doi:10.1109/jlt.2015.2471810.
5. Hussein, S. M. R. H. *et al.* (2022), "Applicability limits of the end face fiber-optic gas concentration sensor, based on Fabry-Perot Interferometer", *Karbala International Journal of Modern Science*, 8(3), pp. 339–355. doi:10.33640/2405-609x.3243.
6. Hussein, S. M. *et al.* (2023), "All-glass fiber-optic end face microthermometer", *International Research Journal*, 11(137), pp. 1-8, doi: 10.23670/IRJ.2023.137.42.
7. Liu, Z. *et al.* (2022), "Optical fiber temperature sensor based on Fabry-Perot interferometer with photopolymer material", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 347, p.113894. doi:https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113894.

Информация об авторах:

М. А. Чеснокова – аспирант, инженер-исследователь "Молодежной лаборатории интегральной фотоники" Пермского государственного национального исследовательского университета (614068, Российская Федерация, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15);

Д. И. Нурмухаметов – аспирант, младший научный сотрудник, "Молодежной лаборатории интегральной фотоники" Пермского государственного национального исследовательского университета (614068, Российская Федерация, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15), ORCID: 0009-0000-5485-7286;

Р. С. Пономарев – кандидат физико-математических наук, заведующий молодежной лабораторией интегральной фотоники Пермского государственного национального исследовательского университета (614068, Российская Федерация, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15), Researcher ID: A-7105-2014, ORCID: 0000-0001-9729-628X, CoLab ID: R-3AABE-130F0-LP67Z;

Т. А. Терехина – специалист в области механики и математики, аналитик данных, эксперт ПАО Сбербанк (614016, Российская Федерация, г. Пермь, ул. Куйбышева, д. 66/1);

В. Н. Аптуков – доктор технических наук, профессор, начальник центра фундаментальной математики физико-математического института Пермского государственного национального исследовательского университета, почетный работник высшего профессионального образования РФ (614068, Россия, Пермский край, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15), Author ID: (РИНЦ) 11997, ORCID: 0000-0001-8048-3804.

Information about the authors:

M. A. Chesnokova – Postgraduate Student, Research Engineer at the Youth Laboratory of Integrated Photonics of Perm State National Research University (15 Bukireva Street, Perm, Russia, 614068);

D. I. Nurmukhametov – Postgraduate Student, Junior Research Assistant at the Youth Laboratory of Integrated Photonics of Perm State National Research University (15 Bukireva Street, Perm, Russia, 614068), ORCID: 0009-0000-5485-7286;

R. S. Ponomarev – Candidate of Science (Physic and Mathematic), Head of the Youth Laboratory of Integrated Photonics of Perm State National Research University (15 Bukireva Street, Perm, Russia, 614068), Researcher ID: A-7105-2014, ORCID: 0000-0001-9729-628X, CoLab ID: R-3AABE-130F0-LP67Z;

T. A. Terekhina – Specialist in Mechanics and Mathematics, Data Analyst, Expert, Sberbank PJSC (66/1 Kuibysheva Street, Perm, Russia, 614016);

V. N. Aptukov – Doctor of Science (Technical), Professor, Head of the Fundamental Mathematics Center at the Physics and Mathematics Institute of Perm State National Research University, Honorary Worker of Higher Professional Education (15 Bukireva Street, Perm, Russia, 614068), AuthorID: 11997, ORCID: 0000-0001-8048-3804.