

Оптический журнал

Оптическое приборостроение и метрология
Optical instrument making and metrology

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-09-64-72

УДК 520.362, 535.417.22

Разработка и исследование волоконно-оптического датчика температуры на основе интерферометра Фабри–Перо, полученного методом сварки оптических волокон

Дмитрий Александрович Коннов¹✉, Ирина Дмитриевна Казачкова²,
Владислав Витальевич Савин³, Анна Ладимировна Волошина⁴,
Кирилл Александрович Коннов⁵, Михаил Юрьевич Плотников⁶,
Сергей Владимирович Варжель⁷

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

¹dakonnov@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-8256-973X>

²irin.kazachkova@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-3031-3625>

³vvsavin@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0003-0688-7565>

⁴avoloshina@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-7118-2193>

⁵kakonnov@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-8888-3527>

⁶mplotnikov@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0003-2506-0379>

⁷svvarzhel@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>

Аннотация

Предмет исследования. Волоконно-оптический датчик температуры на основе интерферометра Фабри–Перо, полученного методом сварки оптических волокон. **Цель работы.** Разработка и исследование датчика температуры на основе волоконно-оптического интерферометра Фабри–Перо, полученного методом дуговой сварки, и проведение его температурного исследования. **Метод.** Конструкция датчика температуры реализована на основе интерферометра Фабри–Перо, полученного методом сварки оптических волокон, отражающими зеркалами которого являются слои тонких пленок диоксида титана. Способ опроса интерферометра основан на применении вертикально-излучающего лазера, работающего в режиме импульсной генерации. Принцип регистрации сдвига фазы между излучением, отраженным от зеркал интерферометра при изменении температуры, базируется на вспомогательной модуляции длины волны излучения лазера за счет периодического изменения длительности импульсов. **Основные результаты.** В ходе температурного исследования разработанного датчика получены фазовые характеристики интерферометра Фабри–Перо в диапазоне температур от +20 до +380 °C. Зарегистрирован сдвиг рабочей точки при изменении температуры окружающей среды. По результатам эксперимента сделан вывод, что повышение температуры окружающей среды приводит к увеличению разности фаз между излучением, отраженным от первого и второго зеркал интерферометра. Показано, что фазовая чувствительность к изменению температуры составляет 0,96, 1,68 и 2,35 рад/°C при расстояниях между зеркалами в 5, 8 и 11 мм соответственно. **Практическая значимость.** Предложенный метод изготовления интерферометра Фабри–Перо создает широкие возможности для формирования резонаторов различной длины, а также позволяет исключить применение дополнительных материалов в его конструкции. Благодаря этому интерферометр имеет малые массогабаритные параметры, что дает возможность использовать его в широком спектре прикладных задач, в том числе в качестве чувствительного

элемента датчика температуры. Используемый в работе способ опроса датчика позволяет не применять дорогостоящие спектральные измерительные приборы (анализаторы оптического спектра, интерропаторы).

Ключевые слова: интерферометр Фабри–Перо, датчик температуры, фазовая чувствительность, сдвиг фазы, чувствительность интерферометра

Ссылка для цитирования: Коннов Д.А., Казачкова И.Д., Савин В.В., Волошина А.Л., Коннов К.А., Плотников М.Ю., Варжель С.В. Разработка и исследование волоконно-оптического датчика температуры на основе интерферометра Фабри–Перо, полученного методом сварки оптических волокон // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 9. С. 64–72. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-09-64-72>

Коды OCIS: 120.2230, 050.2230

Development and study of a fiber-optic temperature sensor based on a Fabry–Perot interferometer obtained by welding optical fibers

DMITRIY A. KONNOV^{1✉}, IRINA D. KAZACHKOVA², VLADISLAV V. SAVIN³, ANNA L. VOLOSHINA⁴, KIRILL A. KONNOV⁵, MICHAEL Y. PLOTNIKOV⁶, SERGEY V. VARZHEL⁷

ITMO University, St. Petersburg, Russia

¹dakonnov@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8256-973X>

²irin.kazachkova@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-3031-3625>

³vvsavin@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0688-7565>

⁴avoloshina@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7118-2193>

⁵kakonnov@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8888-3527>

⁶mplotnikov@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2506-0379>

⁷svvarzhel@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>

Abstract

Subject of study. Fiber-optic temperature sensor based on a Fabry–Perot interferometer obtained by welding optical fibers. **Aim of study.** Development and study of a temperature sensor based on a fiber-optic Fabry–Perot interferometer obtained by arc welding and its temperature study. **Method.** The design of the temperature sensor is implemented on the basis of a Fabry–Perot interferometer obtained by welding optical fibers, the reflecting mirrors of which are layers of thin films of titanium dioxide. The interferometer interrogation method is based on the use of a vertically emitting laser operating in the pulsed generation mode. The principle of registering the phase shift between the radiation reflected from the interferometer mirrors with a change in temperature is based on the auxiliary modulation of the laser radiation wavelength due to a periodic change in the pulse duration. **Main results.** During the temperature study of the developed sensor, the phase characteristics of the Fabry–Perot interferometer were obtained in the temperature range from +20 to +380 °C. A shift of the operating point was registered with a change in the ambient temperature. Based on the results of the experiment, it was concluded that an increase in the ambient temperature leads to an increase in the phase difference between the radiation reflected from the first and second mirrors of the interferometer. It is shown that the phase sensitivity to temperature change is 0.96, 1.68, and 2.35 rad/°C at distances between mirrors of 5, 8, and 11 mm respectively. **Practical significance.** The proposed fabrication method for the Fabry–Perot interferometer provides ample opportunities for the formation of a resonator with different lengths, and also makes it possible to exclude the use of additional materials in its design. Due to this, the interferometer has small weight and size parameters, which makes it possible to use it in a wide range of applications, including as a sensitive element of a temperature sensor. The sensor interrogation method used in the work makes it possible not to use expensive spectral measuring instruments (optical spectrum analyzers, interrogators).

Keywords: Fabry–Perot interferometer, temperature sensor, phase sensitivity, phase shift, interferometer sensitivity

For citation: Konnov D.A., Kazachkova I.D., Savin V.V., Voloshina A.L., Konnov K.A., Plotnikov M.Y., Varzhel S.V. Development and study of a fiber-optic temperature sensor based on a Fabry–Perot interferometer obtained by welding optical fibers [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 9. P. 64–72. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-09-64-72>

OCIS codes: 120.2230, 050.2230

ВВЕДЕНИЕ

Среди множества способов контроля состояния различных сред важное место занимают оптические методы измерения, которые позволяют получить обширную информацию об их физических параметрах. На данный момент активно развивается направление разработки и создания датчиков на основе оптического волокна (ОВ). Однако, как показала практика, волоконно-оптические (ВО) сенсоры, использующие явление интерференции, позволяют проводить наиболее точные измерения. Именно по этой причине в настоящей работе в качестве чувствительного элемента выбран ВО интерферометр Фабри–Перо (ИФП).

Отличительные особенности такого интерферометра сделали возможным как его применение в качестве резонатора лазеров, так и одним из основных спектральных приборов для исследования характеристик окружающей среды. В ИФП возникает явление интерференции, когда излучение проходит через рабочую среду, ограниченную двумя отражающими поверхностями. Каждый раз, когда излучение падает на одну из поверхностей, часть его проходит через нее, а оставшаяся часть отражается обратно.

В научной литературе формирование ВО ИФП представлено различными способами, например, с применением фемтосекундных лазеров, на основе ОВ со сложной пространственной структурой [1–4], с использованием сварного соединения [5–7, 8] и ОВ с высоким содержанием оксидов в сердцевине.

Например, в статье [9] предложен и продемонстрирован метод изготовления ультракоротких полностью ВО ИФП путем сварки стандартного одномодового волокна и другого образца с вогнутой поверхностью, сформированной импульсом СО₂-лазера.

Группой авторов [10] представлен высокотемпературный датчик на основе ИФП из сапфирового волокна. К торцу сапфирового волокна крепилась сапфировая пластина, служившая полостью ИФП. Датчик был заключен

в алюмооксидную керамическую трубчатую структуру с керамической гильзой для повышения структурной стабильности. Результаты эксперимента показали, что датчик имеет широкий диапазон измерения температуры от +25 до +1550 °C. Температурная чувствительность достигала 32,5 пм/°C при +1550 °C.

Также группой авторов [11] представлен метод сборки внутриволоконного датчика температуры на основе ИФП. В данном исследовании структура интерферометра изготавливалась методом химического травления. Во-первых, торец ОВ (*Corning, SMF-28*) диаметром кварцевой части 125 мкм и диаметром сердцевины 9 мкм, с которого снята оболочка, подготавливается скальвателем для волокон. Во-вторых, волокно вертикально погружается в 40% раствор HF и выдерживается в нем в течение 15 мин. После этого стравленное волокно помещают в дистиллированную воду на 3 мин, а затем — в устройство ультразвуковой очистки на 3 мин, где смываются остатки кислоты. В-третьих, протравленное волокно SMF-28, торец которого был сколот, помещают в аппарат для сварки и сужения. Следует отметить, что положениестыковки больше влияет на контраст интерферционной полосы, но меньше на чувствительность, так как она определяется термооптическим коэффициентом и коэффициентом температурного расширения кварца.

В статье авторов из Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН [12] сообщается о методе изготовления ВО ИФП в виде микрополости в сердцевине волокна. Метод формирования интерферометра заключается в соединении одномодового световода и специального композитного волокна с высоким содержанием оксида фосфора в сердцевине с помощью электрической дуги в сварочном аппарате.

В тексте патента «Волоконно-оптический интерференционный датчик температуры» [13] описан ИФП, в котором в качестве отражательных поверхностей выступает тонкая пленка диоксида титана.

В том числе нашим коллективом в более ранней работе был представлен способ формирования ВО ИФП в качестве чувствительного элемента датчика температуры [14]. В этой работе описывается резонатор Фабри–Перо, конструкция которого представляет собой ОВ SMF-28 с поэтапно напыленными на него диэлектрическими зеркалами (чередование слоев TiO_2 и Al_2O_3), закрепленное в кварцевом капилляре с применением высокотемпературного клея. Стоит заметить, что процесс изготовления подобной полости ИФП сложнее, чем представленный в настоящей работе: процесс не требует применения дополнительных элементов конструкции, что является значительным преимуществом перед предыдущей версией.

Анализ научных трудов позволяет сказать, что одними из проблем создания высокочувствительных элементов датчиков температуры являются сложность процесса изготовления, необходимость использования дорогостоящего оборудования, а также применение дополнительных материалов в конструкции. Предложенный в данной статье метод позволяет избежать подобных проблем и получить внутриволоконный чувствительный элемент для датчиков температуры.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка технологии изготовления температурного датчика на базе волоконного интерферометра Фабри–Перо, полученного методом дуговой сварки, и проведение его температурного исследования.

ПРИНЦИП РАБОТЫ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

Для изготовления ВО ИФП применялся метод дуговой сварки ОВ. Для создания зеркал интерферометра выбрана технология электронно-лучевого напыления материалов на полированный торец световода.

Основываясь на задаче проведения высокотемпературных измерений, материал для напыления зеркал подбирался исходя из температуры его плавления, коэффициента теплового расширения и области оптической прозрачности. По итогам проведенного исследования методов реализации отражающих поверхностей на торце волокна принято решение использовать диоксид титана TiO_2 .

Кроме того, стояла задача выбора волокна, которое бы также сохраняло свою работоспособность при повышенных температурах. Классические полимерные покрытия ОВ работают при температурах до +125 °C, но для применения в агрессивных условиях может потребоваться их стойкость к более высоким температурам. Для реализации ИФП выбрано ОВ (характеристики комплементарны SMF-28) с медным покрытием производства Научного центра волоконной оптики им. Дианова РАН. По данным, предоставленным производителем, такое ОВ выдерживает максимальную температуру до +600 °C.

Исходя из требуемых условий эксплуатации ВО ИФП и необходимого значения коэффициента отражения проведен расчет толщины напыляемого материала диэлектрического зеркала, которая составила 150 нм. На рис. 1а представлена принципиальная схема ВО ИФП.

Разрабатываемый ВО датчик температуры, схематическое изображение которого приведено на рис. 1б, представляет собой стандартное ОВ SMF-28 с покрытием из медного сплава, закрепленное с применением высокотемпературного клея в капилляр из высокочистого кварца с внутренним диаметром 125 мкм. На начальном этапе проводится осаждение зеркального покрытия (материал TiO_2) на предварительно подготовленный скол ОВ с применением вакуумного электронно-лучевого напыления. Наличие кварцевого капилляра необходимо для повышения механической прочности конструкции, однако для нормального функционирования является необязательным.

Для сборки ВО ИФП использовалась оптическая схема, которая состоит из анализатора оптического спектра, широкополосного источника излучения, У-ответвителя, сварочного аппарата *Fujikura FSM-45F* (рис. 1в).

В процессе сварки контролировался спектр отражения ВО ИФП. Путем подбора параметров установки ОВ и электрической дуги сварочного аппарата обеспечивался максимальный контраст интерференционной картины.

Методика сборки ИФП включает в себя следующие этапы: подготовка образца ОВ (химическое снятие медного покрытия) и полировка торцевого скола. Затем — напыление диэлектрического зеркала на поверхность торца волокна. Следующим шагом является сварка ОВ

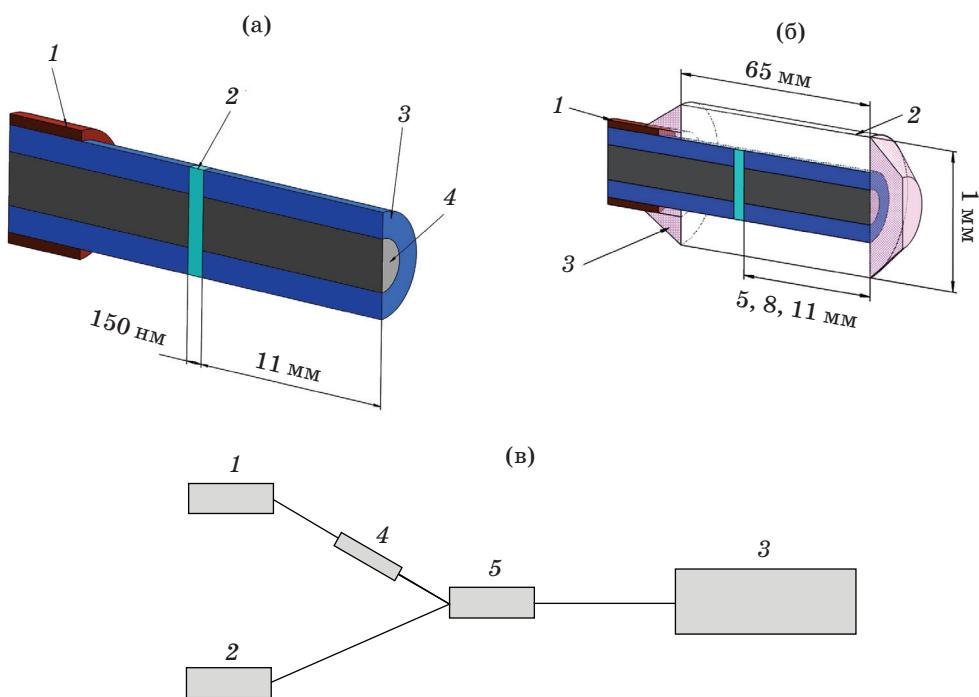


Рис. 1. Принцип сборки ВО ИФП. Принципиальная схема резонатора Фабри–Перо (а). 1 — медная оболочка, 2 — TiO_2 (коэффициент отражения первого зеркала $R_1 \approx 2\%$), 3 — сколотый торец ОВ (коэффициент отражения второго зеркала $R_2 \approx 3,5\%$), 4 — ОВ. Схематическое изображение ВО датчика температуры (б). 1 — медная оболочка, 2 — кварцевый капилляр, 3 — высокотемпературный клей. Оптическая схема, используемая при сборке ИФП (в). 1 — широкополосный источник излучения, 2 — анализатор оптического спектра, 3 — аппарат для сварки ОВ, 4 — оптический изолятар, 5 — Y-ответвитель

Fig. 1. Assembly principle of a fiber-optic Fabry–Perot interferometer. (a) Schematic diagram of the Fabry–Perot resonator. (1) Copper cladding, (2) TiO_2 (reflection coefficient of the first mirror $R_1 \approx 2\%$), (3) cleaved end of the optical fiber (reflection coefficient of the second mirror $R_2 \approx 3,5\%$), (4) optical fiber. (b) Schematic representation of a fiber-optic temperature sensor. (1) Copper sheath, (2) quartz capillary, (3) high temperature adhesive. (c) The optical scheme used in the assembly of the Fabry–Perot interferometer. (1) Broadband radiation source, (2) optical spectrum analyzer, (3) apparatus for splicing optical fibers, (4) optical isolator, (5) Y-coupler

Таблица 1. Условия при сварке образца ИФП

Table 1. Conditions for welding the Fabry–Perot interferometer sample

Параметр	Значение
Мощность дуги, отн. ед.	20
Длительность дугового воздействия, мс	140
Длительность очищающей дуги, мс	10
Зазор между торцами оптических волокон, мкм	10
Перекрытие торцов оптических волокон, мкм	3

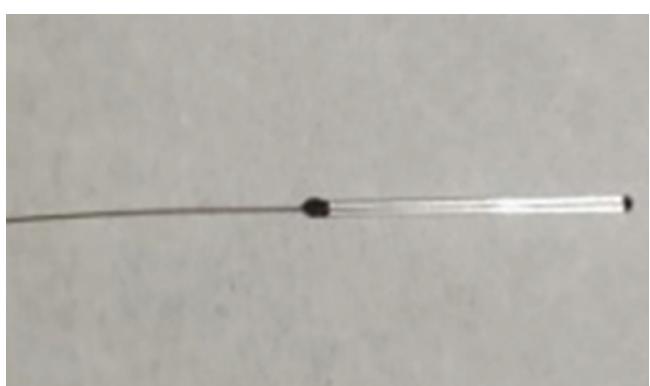


Рис. 2. Фотографическое изображение разработанного ВО датчика температуры

Fig. 2. Photographic image of the developed fiber-optic temperature sensor

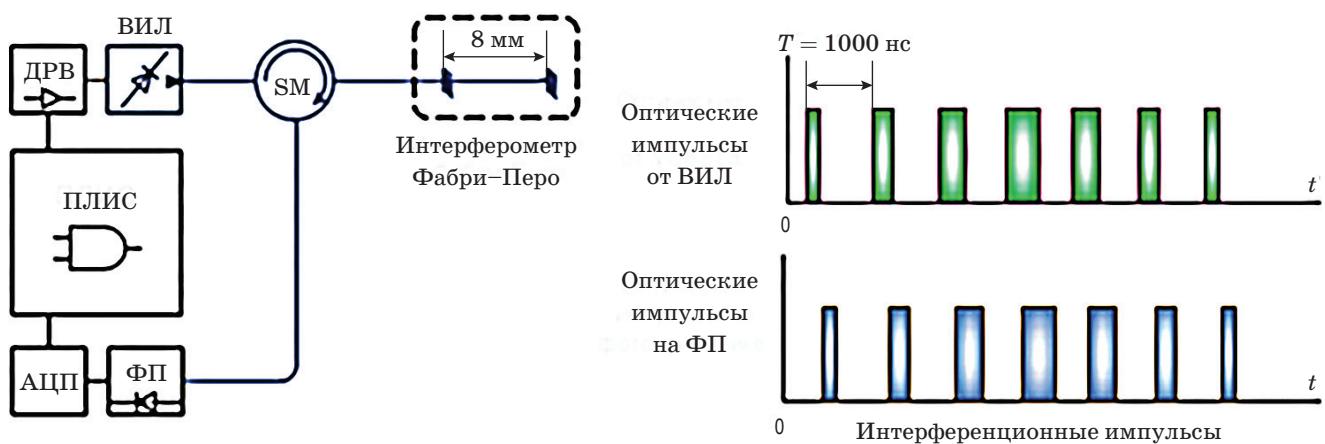


Рис. 3. Оптическая схема опроса интерферометра Фабри–Перо. ДРВ — драйвер управления, ПЛИС — программируемая логическая интегральная схема, АЦП — аналого-цифровой преобразователь, ФП — фотоприемник, SM — оптический циркулятор, ВИЛ — вертикально излучающий лазер

Fig. 3. Optical scheme for interrogation of the Fabry–Perot interferometer. ДРВ is control driver, ПЛИС is programmable logic integrated circuit, АЦП is analog-to-digital converter, ФП is photodetector, SM is optical circulator, ВИЛ is vertically emitting laser

со стороны диэлектрического зеркала с комплементарным ОВ. На последнем этапе производится скол подваренного световода для получения ИФП с расстояниями между зеркалами 5, 8 и 11 мм.

Выбранные условия для сварки образца ВО ИФП приведены в табл. 1.

На рис. 2 представлена фотография разработанного высокотемпературного датчика на основе волоконного резонатора Фабри–Перо.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В рамках работы проведены температурные испытания, получены зависимости сдвига рабочей точки интерферометра от температуры при различных расстояниях между зеркалами, рассчитана температурная чувствительность изготовленных элементов.

Температурные испытания проводились с применением перестраиваемого по длине волны вертикально-излучающего лазера (ВИЛ). Схема опроса экспериментального образца датчика температуры на основе ИФП приведена на рис. 3 [15].

Методика опроса интерферометра заключается в следующем: благодаря посыпаемым от ВИЛ оптическим импульсам переменной длительности, которые последовательно отражаются от каждого из зеркал, формируется интерференционная картина. Результаты

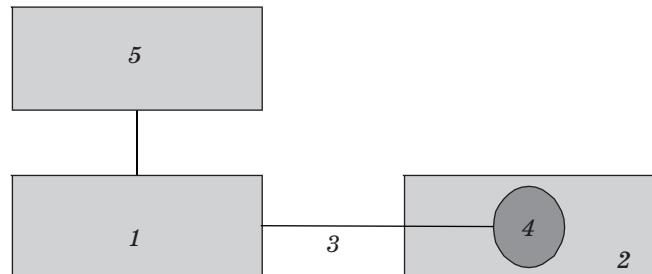


Рис. 4. Оптическая схема температурных испытаний. 1 — устройство импульсного опроса, 2 — высокотемпературная площадка, 3 — оптический патч-корд FC/APC-FC/APC, 4 — ВО ИФП, 5 — персональный компьютер

Fig. 4. Optical scheme of temperature tests. (1) Pulse polling device, (2) high-temperature area, (3) optical patch cord FC/APC-FC/APC, (4) fiber-optic Fabry–Perot interferometer, (5) personal computer

анализа сигналов, приходящих на фотоприемник, позволяют судить об изменении рабочей точки ИФП, что в свою очередь дает возможность рассчитать изменения температуры окружающей среды [15].

Лабораторные испытания полученных образцов ВО ИФП проводились на установке, схема которой представлена на рис. 4.

Установка включает в себя макет с источником оптического излучения и платой обработки сигналов с фотоприемником, осциллограф, тестируемый ИФП, нагревательную плиту, ноутбук.

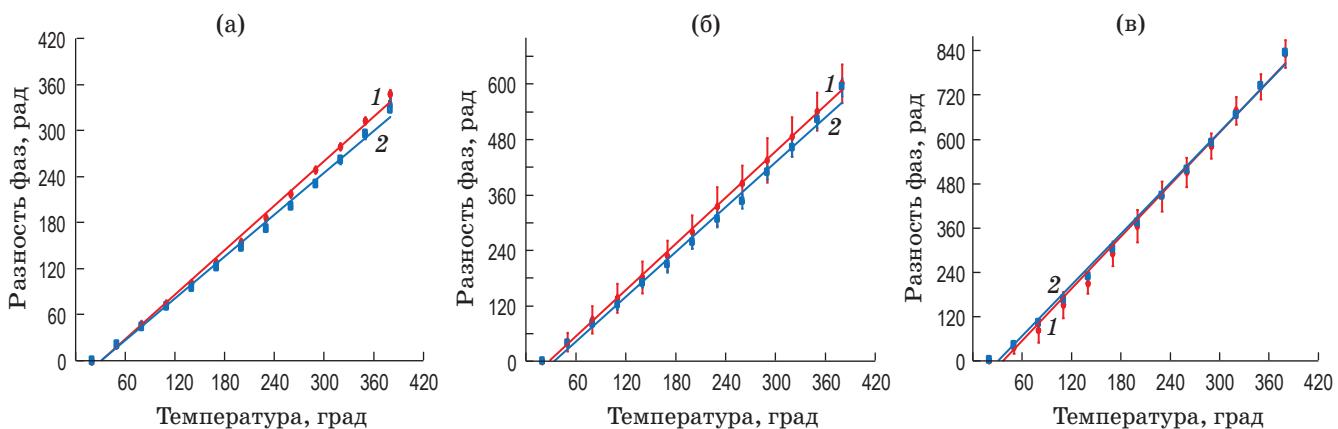


Рис. 5. Зависимости сдвига рабочей точки ВО ИФП (базы 5 мм — (а), 8 мм — (б), 11 мм — (в)) от температуры. 1 — цикл нагрева, 2 — цикл охлаждения

Fig. 5. Dependences of the shift of the operating point of the fiber-optic Fabry–Perot interferometer (bases (a) 5, (b) 8, (v) 11 mm) on temperature. (1) Heating cycle, (2) cooling cycle

Таблица 2. Температурная чувствительность образцов ИФП

Table 2. Temperature sensitivity of the Fabry–Perot interferometer samples

База ИФП, мм	Температурная чувствительность, рад/°С
5	0,96
8	1,68
11	2,35

Условия проведения температурного исследования

- диапазон изменения температуры от +20 до +380 °С с шагом изменения 30 °С,
- регистрация сдвига рабочей точки ИФП осуществляется как при нагревании исследуемого образца, так и при его охлаждении,
- определение зависимости изменения сдвига фаз между пучками отраженного излучения от температуры окружающей среды.

По результатам испытаний получены температурные зависимости сдвига рабочей точки образцов ВО ИФП с разными длинами резонатора (5, 8, 11 мм). На рис. 5 представлены графики зависимости разности фаз от температуры.

В результате температурных испытаний рассчитана чувствительность образцов ВО ИФП с разными расстояниями между зеркалами (табл. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформирована концепция конструкции датчика температуры на основе волоконного интерферометра Фабри–Перо, а также изготовлены макетные образцы волоконно-оптического датчика температуры. По результатам температурных испытаний образцы продемонстрировали работоспособность в диапазоне температур от +20 до +380 °С.

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что разработанный резонатор Фабри–Перо может успешно применяться как датчик температуры. Фазовая чувствительность разработанного датчика к температуре составила 0,96, 1,68, 2,35 рад/°С при расстояниях между зеркалами 5, 8 и 11 мм соответственно.

Дальнейшее развитие исследования связано с модернизацией конструкции интерферометра Фабри–Перо, модификацией алгоритма опроса датчика и проведением испытаний в более широком температурном диапазоне.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Villatoro J., Finazzi V., Coviello G., et al. Photonic crystal fiber enabled micro Fabry–Perot interferometer //

REFERENCES

1. Villatoro J., Finazzi V., Coviello G., et al. Photonic crystal fiber enabled micro Fabry–Perot interferometer //

- Opt. Lett. 2009. V. 34. № 16. P. 2441–2443. <https://doi.org/10.1364/OL.34.002441>
2. Ferreira M.S., Bierlich J., Kobelke J., et al. Towards the control of highly sensitive Fabry–Perot strain sensor based on hollow-core ring photonic crystal fiber // Opt. Exp. 2012. V. 20. № 20. P. 21946–21952. <https://doi.org/10.1364/OE.20.021946>
3. Favero F.C., Araujo L., Bouwmans G., et al. Spheroidal Fabry–Perot microcavities in optical fibers for high-sensitivity sensing // Opt. Exp. 2012. V. 20. № 7. P. 7112–7118. <https://doi.org/10.1364/OE.20.007112>
4. Wei T., Han Y.K., Tsai H.L., et al. Miniaturized fiber inline Fabry–Perot interferometer fabricated with a femtosecond laser // Opt. Lett. 2008. V. 33. № 6. P. 536–538. <https://doi.org/10.1364/OL.33.000536>
5. Duan D.W., Rao Y., Hou Y.-S., et al. Microbubble based fiber-optic Fabry–Perot interferometer formed by fusion splicing single-mode fibers for strain measurement // Appl. Opt. 2012. V. 51. № 8. P. 1033–1036. <https://doi.org/10.1364/AO.51.001033>
6. Machavaram V.R., Badcock R.A., Fernando G.F. Fabrication of intrinsic fiber Fabry–Perot sensors in silica fibres using hydrofluoric acid etching // Sens. Actuator A Phys. 2007. V. 138. № 1. P. 248–260. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.04.007>
7. Liu S., Wang Y., Liao C., et al. High-sensitivity strain sensor based on in-fiber improved Fabry–Perot interferometer // Opt. Lett. 2014. V. 39. № 7. P. 2121–2124. <https://doi.org/10.1364/OL.39.002121>
8. Egorova O.N., Semjonov S.L., Medvedkov O.I., et al. High-beam quality, high-efficiency laser based on fiber with heavily Yb^{3+} -doped phosphate core and silica cladding // Opt. Lett. 2015. V. 40. № 16. P. 3762–3765. <https://doi.org/10.1364/OL.40.003762>
9. Zhang Q., Fan Z., Zhang J., et al. Ultrashort all-fiber Fabry–Perot interferometer fabricated by a CO_2 laser // Appl. Opt. 2020. V. 59. № 28. P. 8959–8963. <https://doi.org/10.1364/AO.402999>
10. Wang B., Niu Y., Zheng S., et al. A high temperature sensor based on sapphire fiber Fabry–Perot interferometer // IEEE Photon. Technol. Lett. 2020. V. 32. № 2. P. 89–92. <https://doi.org/10.1109/LPT.2019.2957917>
11. Shangguan C., Dong M., Lu L. All-fiber temperature sensor based on Fabry–Perot interferometer // Appl. Optics and Photonics. Conf. Optical Sensing and Imaging Technology. Beijing, China. July 23–25, 2021.
12. Egorova O.N., Vasil'ev S.A., Likhachev I.G., et al. A Fabry–Perot interferometer formed in the core of a composite optical fiber heavily doped with phosphorus oxide // Quantum Elec. (Woodbury). 2019. V. 49. № 12. P. 1140–1144. <https://doi.org/10.1070/QEL17133>
13. Тертышник А.Д., Волков П.В., Горюнов А.В. и др. Волоконно-оптический интерференционный датчик температуры // Патент РФ № 2466366C1. Бюл. 2012. № 31.
14. Moor Я.Д., Коннов К.А., Плотников М.Ю. и др. Высокоточный волоконно-оптический датчик температуры на основе интерферометра Фабри–Перо с отражающими тонкопленочными многослойными структурами // Научно-техн. вест. информ. технол., механики и оптики. 2022. Т. 22. № 3. С. 442–449. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-3-442-449>
15. Плотников М.Ю. Волоконно-оптический гидрофон // Дисс. канд. техн. наук. Университет ИТМО, Санкт-Петербург. 2014. 155 c.
- Opt. Lett. 2009. V. 34. № 16. P. 2441–2443. <https://doi.org/10.1364/OL.34.002441>
2. Ferreira M.S., Bierlich J., Kobelke J., et al. Towards the control of highly sensitive Fabry–Perot strain sensor based on hollow-core ring photonic crystal fiber // Opt. Exp. 2012. V. 20. № 20. P. 21946–21952. <https://doi.org/10.1364/OE.20.021946>
3. Favero F.C., Araujo L., Bouwmans G., et al. Spheroidal Fabry–Perot microcavities in optical fibers for high-sensitivity sensing // Opt. Exp. 2012. V. 20. № 7. P. 7112–7118. <https://doi.org/10.1364/OE.20.007112>
4. Wei T., Han Y.K., Tsai H.L., et al. Miniaturized fiber inline Fabry–Perot interferometer fabricated with a femtosecond laser // Opt. Lett. 2008. V. 33. № 6. P. 536–538. <https://doi.org/10.1364/OL.33.000536>
5. Duan D.W., Rao Y., Hou Y.-S., et al. Microbubble based fiber-optic Fabry–Perot interferometer formed by fusion splicing single-mode fibers for strain measurement // Appl. Opt. 2012. V. 51. № 8. P. 1033–1036. <https://doi.org/10.1364/AO.51.001033>
6. Machavaram V.R., Badcock R.A., Fernando G.F. Fabrication of intrinsic fiber Fabry–Perot sensors in silica fibres using hydrofluoric acid etching // Sens. Actuator A Phys. 2007. V. 138. № 1. P. 248–260. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.04.007>
7. Liu S., Wang Y., Liao C., et al. High-sensitivity strain sensor based on in-fiber improved Fabry–Perot interferometer // Opt. Lett. 2014. V. 39. № 7. P. 2121–2124. <https://doi.org/10.1364/OL.39.002121>
8. Egorova O.N., Semjonov S.L., Medvedkov O.I., et al. High-beam quality, high-efficiency laser based on fiber with heavily Yb^{3+} -doped phosphate core and silica cladding // Opt. Lett. 2015. V. 40. № 16. P. 3762–3765. <https://doi.org/10.1364/OL.40.003762>
9. Zhang Q., Fan Z., Zhang J., et al. Ultrashort all-fiber Fabry–Perot interferometer fabricated by a CO_2 laser // Appl. Opt. 2020. V. 59. № 28. P. 8959–8963. <https://doi.org/10.1364/AO.402999>
10. Wang B., Niu Y., Zheng S., et al. A high temperature sensor based on sapphire fiber Fabry–Perot interferometer // IEEE Photon. Technol. Lett. 2020. V. 32. № 2. P. 89–92. <https://doi.org/10.1109/LPT.2019.2957917>
11. Shangguan C., Dong M., Lu L. All-fiber temperature sensor based on Fabry–Perot interferometer // Appl. Optics and Photonics. Conf. Optical Sensing and Imaging Technology. Beijing, China. July 23–25, 2021.
12. Egorova O.N., Vasil'ev S.A., Likhachev I.G., et al. A Fabry–Perot interferometer formed in the core of a composite optical fiber heavily doped with phosphorus oxide // Quantum Elec. (Woodbury). 2019. V. 49. № 12. P. 1140–1144. <https://doi.org/10.1070/QEL17133>
13. Тертышник А.Д., Volkov P.V., Goryunov A.V., et al. Fiber-optic interference temperature sensor // Patent RU № 2466366C1. 2012. Bul. № 31.
14. Moor Ia.D., Konnov K.A., Plotnikov M.Yu., et al. High-precision fiber-optic temperature sensor based on Fabry–Perot interferometer with reflective thin-film multilayer structures [in Russian] // Sci. Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt. 2022. V. 22. № 3. P. 442–449. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-3-442-449>
15. Plotnikov M.Yu. Fiber-optic hydrophone [in Russian] // Phd thesis. ITMO University, St. Petersburg. 2014. 155 p.

АВТОРЫ

Дмитрий Александрович Коннов — аспирант, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-8256-973X>; dakonnov@itmo.ru

Ирина Дмитриевна Казачкова — студент, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-3031-3625>; irin.kazachkova@gmail.com

Владислав Витальевич Савин — студент, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-0688-7565>; vvsavin@itmo.ru

Анна Ладимировна Волошина — студент, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 57997721200; <https://orcid.org/0000-0002-7118-2193>; avoloshina@itmo.ru

Кирилл Александрович Коннов — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 56032492300; <https://orcid.org/0000-0002-8888-3527>; kakonnov@itmo.ru

Михаил Юрьевич Плотников — кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 57193069973; <https://orcid.org/0000-0003-2506-0379>; mplotnikov@itmo.ru

Сергей Владимирович Варжель — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 55247304200; <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>; svvarzhel@itmo.ru

AUTHORS

Dmitriy A. Konnov — PhD Student, Engineer, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-8256-973X>; dakonnov@itmo.ru

Irina D. Kazachkova — Student, Engineer, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-3031-3625>; irin.kazachkova@gmail.com

Vladislav V. Savin — Student, Engineer, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-0688-7565>; vvsavin@itmo.ru

Anna L. Voloshina — Student, Engineer, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 57997721200; <https://orcid.org/0000-0002-7118-2193>; avoloshina@itmo.ru

Kirill A. Konnov — PhD (Physics and Mathematics), Head of laboratory, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 56032492300; <https://orcid.org/0000-0002-8888-3527>; kakonnov@itmo.ru

Michael Y. Plotnikov — PhD (Engineering), Head of laboratory, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 57193069973; <https://orcid.org/0000-0003-2506-0379>; mplotnikov@itmo.ru

Sergey V. Varzhel — PhD (Physics and Mathematics), Head of laboratory, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 55247304200; <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>; svvarzhel@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 01.02.2023

Одобрена после рецензирования 17.04.2023

Принята к печати 24.07.2023

The article was submitted to the editorial office 01.02.2023

Approved after review 17.04.2023

Accepted for publication 24.07.2023