

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-442-449

УДК 535.08

Высокоточный волоконно-оптический датчик температуры на основе интерферометра Фабри–Перо с отражающими тонкопленочными многослойными структурами

Янина Дмитриевна Моор¹✉, Кирилл Александрович Коннов²,
 Михаил Юрьевич Плотников³, Антон Валерьевич Волков⁴,
 Сергей Владимирович Варжель⁵, Дмитрий Александрович Коннов⁶,
 Владимир Евгеньевич Стригалев⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ yanoti@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-1624-2659>

² kirillkonnov1991@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8888-3527>

³ plotnikov-michael@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2506-0379>

⁴ avvolkov9223@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7988-5854>

⁵ Vsv187@gmail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>

⁶ dakonnov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8256-973X>

⁷ vstrglv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>

Аннотация

Предмет исследования. Предложен вариант реализации волоконно-оптического датчика температуры на основе интерферометра Фабри–Перо и схема опроса экспериментального образца датчика. Предложенное решение позволяет не применять дорогостоящие спектральные измерительные устройства (анализатор спектра, интеррогатор). Определены область свободной дисперсии и фазовая чувствительность разработанного интерферометра Фабри–Перо в диапазоне температур от 20 °С до 590 °С. Рассчитана точность измерения температуры окружающей среды. Выполнена оценка долговременной стабильности измерительной установки при комнатной температуре. Зарегистрирован сдвиг фазы интерферометра Фабри–Перо при изменении температуры. **Метод.** Конструкция интерферометра Фабри–Перо реализована с применением отражающих тонкопленочных многослойных структур, полученных путем поэтапного электронно-лучевого напыления в вакууме на полированные торцевые сколы оптического волокна. Метод опроса интерферометра основан на применении вертикально-излучающего лазера оптического диапазона (VCSEL), работающего в импульсном режиме. Принцип регистрации сдвига фазы интерферометра при изменении температуры использован для выполнения вспомогательной модуляции излучения лазера по длине волны за счет периодического изменения длительности оптических импульсов. Вспомогательная модуляция позволяет получить в сигнале интерферометра дополнительные гармонические составляющие, которые применяются при гомодинной демодуляции и восстановлении сигнала сдвига фазы интерферометра, пропорционального изменению оптической разности хода лучей между зеркалами интерферометра. **Основные результаты.** Конструкция высокотемпературного датчика реализована на основе интерферометра Фабри–Перо, отражающие зеркала которого представляют собой пять чередующихся слоев тонких пленок диоксида титана и оксида алюминия. По результатам температурного эксперимента сделан вывод, что увеличение температуры окружающей среды приводит к уменьшению области свободной дисперсии интерферометра Фабри–Перо. Полученные результаты соответствуют теоретическим данным. Показано, что фазовая чувствительность интерферометра к изменению температуры составляет 0,94 рад/К. Точность измерений температуры по уровню 3σ равна 0,017 К. **Практическая значимость.** Результаты исследования могут иметь важное значение при создании систем мониторинга температур свыше 300 °С. Применение подобного интерферометра позволит проводить высокоточные относительные измерения температуры.

Ключевые слова

интерферометр Фабри–Перо, высокотемпературный датчик, область свободной дисперсии, фазовая чувствительность, сигнал сдвига фазы, чувствительность интерферометра

© Моор Я.Д., Коннов К.А., Плотников М.Ю., Волков А.В., Варжель С.В., Коннов Д.А., Стригалев В.Е., 2022

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Приоритет 2030».

Ссылка для цитирования: Моор Я.Д., Коннов К.А., Плотников М.Ю., Волков А.В., Варжель С.В., Коннов Д.А., Стригалева В.Е. Высокоточный волоконно-оптический датчик температуры на основе интерферометра Фабри–Перо с отражающими тонкопленочными многослойными структурами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 442–449. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-442-449

High-precision fiber-optic temperature sensor based on Fabry-Perot interferometer with reflective thin-film multilayer structures

Ianina D. Moor¹✉, Kirill A. Konnov², Michael Yu. Plotnikov³, Anton V. Volkov⁴, Sergey V. Varzhel⁵, Dmitriy A. Konnov⁶, Vladimir E. Strigalev⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ yanoti@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-1624-2659>

² kirillkonnov1991@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8888-3527>

³ plotnikov-michael@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2506-0379>

⁴ avvolkov9223@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7988-5854>

⁵ Vsv187@gmail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>

⁶ dakonnov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8256-973X>

⁷ vstrglv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>

Annotation

An embodiment of a fiber-optic temperature sensor based on a Fabry-Perot interferometer and a scheme for interrogating an experimental sample of the sensor are proposed. The proposed solution makes it possible not to use expensive spectral measuring devices (spectrum analyzer, interrogator). The region of free dispersion and the phase sensitivity of the developed Fabry-Perot interferometer were determined in the temperature range from 20 °C to 590 °C. The accuracy of measuring the ambient temperature is calculated. The long-term stability of the measuring setup at room temperature has been evaluated. The phase shift of the Fabry-Perot interferometer with temperature change was registered. The design of the Fabry-Perot interferometer is implemented using reflective thin-film multilayer structures obtained by stage-by-stage electron-beam deposition in vacuum on polished end cleavages of an optical fiber. The interferometer interrogation method is based on the use of a vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) operating in a pulsed mode. The principle of registering the phase shift of the interferometer with a change in temperature is based on the use of auxiliary modulation of laser radiation along the wavelength due to modulation (periodic change) of the duration of optical pulses. Auxiliary modulation makes it possible to obtain additional harmonic components in the interferometer signal, which are further used in homodyne demodulation to restore the interferometer phase shift signal proportional to the change in the optical path difference between the interferometer mirrors. The design of the high-temperature sensor is based on a Fabry-Perot interferometer the reflecting mirrors of which are five alternating layers of thin films of TiO₂ and Al₂O₃. Based on the results of the temperature experiment, it was concluded that an increase in the ambient temperature leads to a decrease in the free dispersion region of the Fabry-Perot interferometer. The conclusion made is consistent with the theoretical data. According to the results of the experiment, it is shown that the phase sensitivity of the interferometer to temperature changes is 0.94 rad/K. The accuracy of temperature measurements at the 3σ level was 0.017 K. The results of the study may be of great importance in creating systems for monitoring temperatures above 300 °C. The use of such an interferometer makes it possible to carry out high-precision relative temperature measurements.

Keywords

Fabry-Perot interferometer, high temperature sensor, free spectral range, phase sensitivity, phase drift signal, interferometer sensitivity

Acknowledgements

The work is financially supported by Priority 2030 program.

For citation: Moor I.D., Konnov K.A., Plotnikov M.Yu., Volkov A.V., Varzhel S.V., Konnov D.A., Strigalev V.E. High-precision fiber-optic temperature sensor based on Fabry-Perot interferometer with reflective thin-film multilayer structures. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 442–449 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-442-449

Введение

В настоящее время во многих отраслях техники и промышленности существует тенденция перехода на волоконно-оптические датчики, которые обладают рядом преимуществ. Такие датчики устойчивы к электромагнитным помехам, имеют малый размер и вес, позволяют работать во взрывоопасных средах, могут производить опрос данных удаленных объектов и имеют высокую чувствительность. Эта тенденция актуальна и для области температурных измерений.

Например, в качестве одного из вариантов волоконно-оптического датчика температуры выступают волоконные решетки Брэгга. Известно, что у решеток первого типа имеется температурное ограничение, предел их измерения составляет 300 °C [1]. Решетки второго типа могут работать при температурах до 900 °C [2] и даже до 1200 °C [3], но имеют сложности в процессе записи и обладают низкой механической прочностью. Формирование датчика температур свыше 300 °C возможно на основе чувствительного элемента в виде интерферометра Фабри–Перо (ИФП), который приме-

няется в волоконно-оптической измерительной технике в качестве датчика различных физических величин [4–8]. В волоконно-оптическом ИФП интерференция образуется за счет использования пары отражающих зеркал, а размер чувствительного элемента формируемого датчика сопоставим с диаметром оптического волокна. В литературе описаны различные способы создания волоконно-оптического ИФП, наиболее интересными являются разработки с использованием сварного соединения [9–12] и волокна с высоким содержанием оксидов металлов в сердцевине [13].

В настоящей работе реализация конструкции волоконно-оптического ИФП базируется на методе напыления многослойного диэлектрического слоя из диоксида титана (TiO_2) и оксида алюминия (Al_2O_3) на поверхность отполированного скола оптического волокна. Отметим, что данная методика описана во многих научных работах с подтверждением измеренных температурных параметров на практике. Например, в работе [14] показан расчет параметров ИФП с многослойными диэлектрическими зеркалами из TiO_2 . В патенте [15] представлены два одинаковых ИФП, отражательные зеркала которых сформированы с применением TiO_2 в отрезке одномодового оптического волокна. В работе [16] присутствуют числовые значения при измерении долговременной стабильности ИФП. В работе [17] авторы оценили отражательную способность выбранных диэлектрических тонких пленок для формирования полости ИФП. Были выполнены оценка и сравнение спектральных коэффициентов отражения и пропускания диэлектрических пленок из TiO_2 и Al_2O_3 толщиной от 30 нм до 220 нм. Пленки из TiO_2 признаны наиболее перспективными по отражательной способности для формирования ИФП. Чтобы проверить и пояснить результаты моделирования, пленки из TiO_2 толщиной 80 нм были нанесены на кончик одномодового оптического волокна путем осаждения атомного слоя. Толщина, структура и химические свойства пленок известны. Изучена способность выбранных пленок изменять отражательную способность полости Фабри–Перо, обеспечивать защиту волокон от агрессивных сред и создавать многорезонаторные интерферометрические датчики на основе ИФП.

Активное использование TiO_2 в научных работах показывает всю значимость данного химического элемента при создании отражательных зеркал волоконного ИФП для измерения высоких температур. Однако в большинстве научных работ не рассмотрен вопрос чувствительности измерений ИФП в связи с тем, что представленная система опроса интерферометра имеет высокую стоимость и малую скорость работы.

В [18] продемонстрирован волоконно-оптический высокотемпературный датчик на основе ИФП, диэлектрические зеркала которого сформированы из материалов $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ толщиной 283, 1396, 283 нм соответственно. Чувствительность ИФП при изменении температуры окружающей среды от 25 °С до 750 °С составила $5.4 \cdot 10^{-3}$ нм/°С, что в пересчете в радианы – около 68 мкрад/°С (при использованной длине волны $\lambda = 500$ нм). Данный результат существенно меньше значения чувствительности, полученной в настоящей работе.

Цель работы — разработка компактного волоконно-оптического датчика на основе ИФП, обладающего высокой температурной чувствительностью и работающего при температурах свыше 300 °С. Датчик не требует подведения электропитания к чувствительному элементу и работоспособен в условиях агрессивной окружающей среды и имеет малые массогабаритные параметры. Применение представленной схемы опроса ИФП позволит исключить использование дорогостоящих спектральных измерительных устройств (анализатора спектра, интеррогатора) и провести опрос датчика на большой частоте.

Принцип работы и изготовление чувствительного элемента

Выбор материалов. По результатам теоретического анализа, литературного обзора и математического моделирования различных материалов и их толщин для формирования диэлектрических зеркал на торце волокна было решено использовать пленки из Al_2O_3 и TiO_2 .

Для увеличения механической прочности волоконно-оптического датчика температуры использованы оптические волокна с металлическим покрытием, которые обладают большим сопротивлением усталости по сравнению с негерметичными и стандартными волокнами с полимерным покрытием. Волокна с металлическим покрытием используются в широком спектральном диапазоне и способны сохранять оптические и механические свойства в температурном диапазоне от минус 196 °С до плюс 600 °С¹. В качестве основы ИФП выбрано одномодовое оптическое волокно в медной оболочке (Cu) производства ООО «Инновационное предприятие «НЦВО–Фотоника».

Численное моделирование и сборка интерферометра Фабри–Перо. С учетом подобранных материалов и желаемого коэффициента отражения рассчитаны толщины напыляемых слоев и их необходимое количество. В работе представлена конструкция диэлектрической структуры (рис. 1), и показан рассчитанный спектр отражения диэлектрического зеркала в среде Essential Macleod (рис. 2) для указанных (рис. 1) толщин напыляемых оксидов.

Сформирован волоконно-оптический ИФП (рис. 3), который реализован на основе одномодового оптического волокна (диаметр кварцевой оболочки 125 мкм), двух диэлектрических зеркал, кварцевого капилляра и высокотемпературного клея. Диэлектрические зеркала получены путем поэтапного электронно-лучевого напыления в вакууме тонких пленок TiO_2 и Al_2O_3 (пять слоев) на полированные торцевые сколы оптического волокна. Предполагалось получить коэффициент отражения зеркал в соответствии с расчетом около 40 % на длине волны 1550 нм, однако, из-за сложности точного контроля процесса напыления диэлектрических слоев зеркала, фактический коэффициент отражения соста-

¹ Официальный сайт инновационного предприятия «НЦВО–Фотоника» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://forc-photonics.ru/ru/fibers_and_cables/Cu_coated_fibers/1/36/ (дата обращения: 25.03.2022).

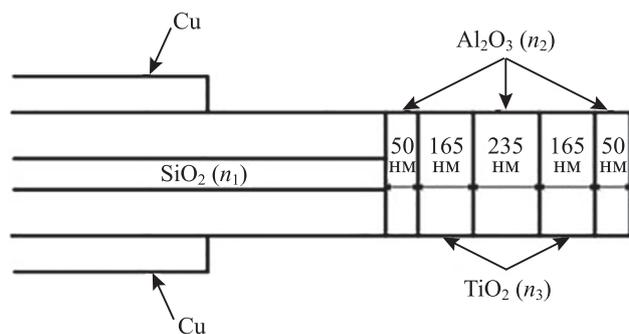


Рис. 1. Схематическое изображение многослойного диэлектрического зеркала.

Показатели преломления: n_1 — сердцевины оптического волокна (SiO_2), n_2 — Al_2O_3 и n_3 — TiO_2

Fig. 1. Schematic representation of a multilayer dielectric mirror.

Refractive indices: n_1 is cores of optical fiber (SiO_2), n_2 is Al_2O_3 , and n_3 is of TiO_2

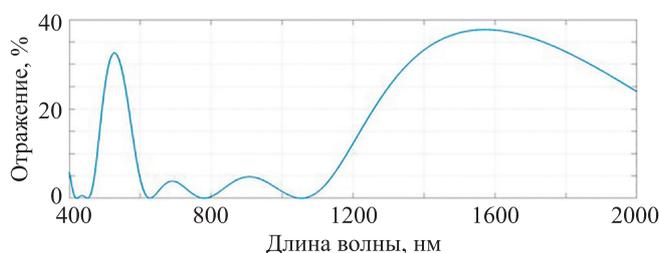


Рис. 2. Рассчитанный спектр отражения диэлектрического зеркала

Fig. 2. Calculated reflectance spectrum of a dielectric mirror

вил примерно 20 % (рис. 3). Расчетное значение области свободной дисперсии (FSR) ИФП в среде Essential Macleod при температуре $t = 20^\circ\text{C}$ и базе ИФП $l = 8$ мм составило 0,1034 нм. Экспериментальное значение FSR ИФП — 0,0959 нм.

Результаты эксперимента

В рамках работы выполнено два типа температурных исследований. Первый тип эксперимента направлен на определение области свободной дисперсии,

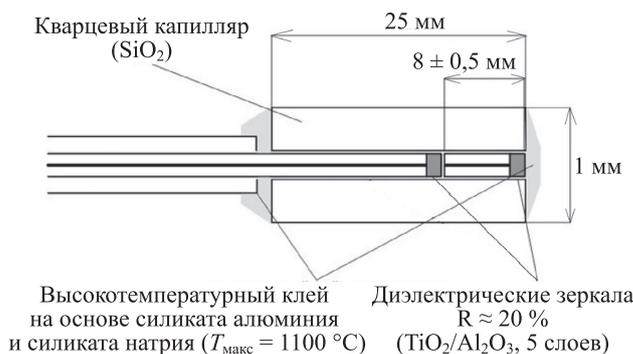


Рис. 3. Схематическое изображение интерферометра Фабри-Перо

Fig. 3. Schematic representation of the Fabry-Perot interferometer

второй — на определение величины фазовой чувствительности датчика к температуре в диапазоне от 20°C до 590°C .

Определение области свободной дисперсии волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо. Для регистрации спектральных характеристик волоконно-оптического ИФП проведены лабораторные испытания с использованием установки, которая состоит из: оптического анализатора спектра (Yokogawa AQ6370C), широкополосного источника излучения (Thorlabs S5FC1005S), Y-ответвителя (50/50), волоконно-оптического ИФП, ноутбука. Для определения работоспособности сформированного датчика проведено три температурных цикла «нагрев/охлаждение» в диапазоне температур от 20°C до 590°C с шагом 30°C . На основе полученных данных вычислена область свободной дисперсии ИФП путем усреднения трех измерений спектра отражения в диапазоне от 1559 нм до 1569 нм. Ширина диапазона регистрации спектров отражения интерферометра выбрана в соответствии с равномерностью участка спектра широкополосного источника излучения. На основе полученных данных построена зависимость области свободной дисперсии волоконно-оптического ИФП от температуры. Результаты нагрева и охлаждения представлены на рис. 4.

Расчет области свободной дисперсии определим по формуле

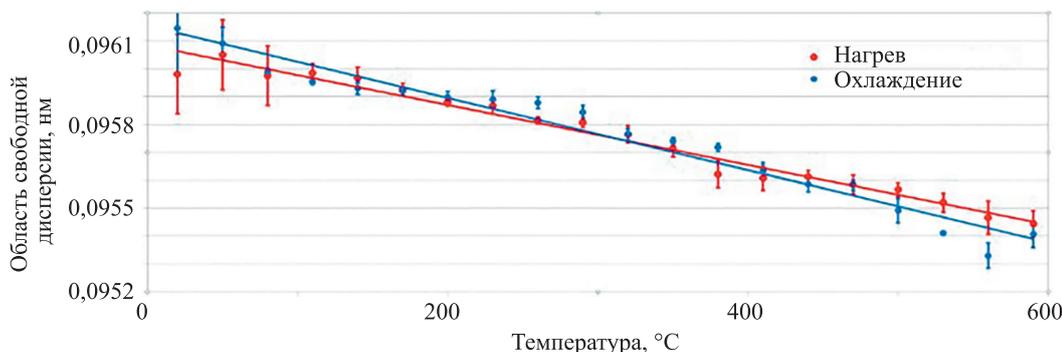


Рис. 4. Графики зависимости области свободной дисперсии от температуры при охлаждении и нагреве

Fig. 4. Graphs of the dependence of the free dispersion area vs. temperature during cooling and heating

$$FSR = \frac{c}{2ln_{eff}}, \quad (1)$$

где c — скорость света в вакууме; l — толщина ИФП; n_{eff} — эффективный показатель преломления волноводной моды.

На основании полученных зависимостей (1) можно сделать вывод, что увеличение температуры окружающей среды приводит к уменьшению области свободной дисперсии ИФП, что соответствует теоретическим данным. Следовательно, данный образец можно использовать для регистрации температуры окружающей среды.

Определение фазовой чувствительности волоконно-оптического интерферометра Фабри–Перо к температуре. Для получения сигнала сдвига фазы ИФП в зависимости от температуры использован метод опроса с применением частотно-импульсной модуляции вертикально-излучающего лазера (VCSEL) [19–21]. Под фазой интерферометра понимается разность фаз между оптическими лучами, отраженными от зеркал ИФП. Разность фаз, приобретаемая за двойной проход оптического излучения между зеркалами, пропорциональна удвоенной длине оптического пути. Под сдвигом фаз понимается сдвиг разности фаз, который может привести к изменению показателя преломления среды и/или расстояния между зеркалами под действием температуры.

Принцип регистрации сдвига фазы интерферометра под действием температуры основан на использовании вспомогательной модуляции VCSEL по длине волны за счет периодического изменения длительности оптических импульсов (рис. 5, *a*). Вспомогательная модуляция VCSEL позволяет получить в интерференционном сигнале интерферометра дополнительные гармонические составляющие, которые далее используются в алгоритме гомодинной демодуляции для восстановления сиг-

нала сдвига фазы интерферометра, пропорционального изменению оптической разности хода лучей между зеркалами интерферометра. Схема проведения измерений приведена на рис. 5, *b*.

ИФП опрошен с помощью оптических импульсов переменной длительности 200–350 нс, посылаемых от VCSEL с частотой 1 МГц. В представленной схеме оптические импульсы последовательно отражаются от зеркал ИФП и перекрываются по времени, формируя интерференционные импульсы переменной длительности, попадающие на фотоприемник через оптический циркулятор. При этом сдвиг длины волны VCSEL прямо пропорционален изменению длительности оптических импульсов в пределах изменения длительности, используемого в данном эксперименте [19, 20]. Таким образом, может быть сформирован вспомогательный фазовый сигнал с интерферометра, пропорциональный оптической разности хода лучей между зеркалами ИФП в соответствии со следующим выражением:

$$\varphi(t) = \frac{2\pi n\Delta L}{\lambda^2} \Delta\lambda(t),$$

где $n\Delta L$ — оптическая разность хода; λ — центральная длина волны источника оптического излучения; $\Delta\lambda(t)$ — заданный закон изменения длины волны источника оптического излучения, определяемый характером изменения длительности оптических импульсов.

Для опроса ИФП предложено использовать периодический закон изменения длины волны оптических импульсов вида:

$$\Delta\lambda(t) = \Delta\lambda_{\max} \cos(2\pi f_m t),$$

где f_m — частота модуляции (50 кГц); $\Delta\lambda_{\max}$ — максимальная амплитуда изменения длины волны VCSEL.

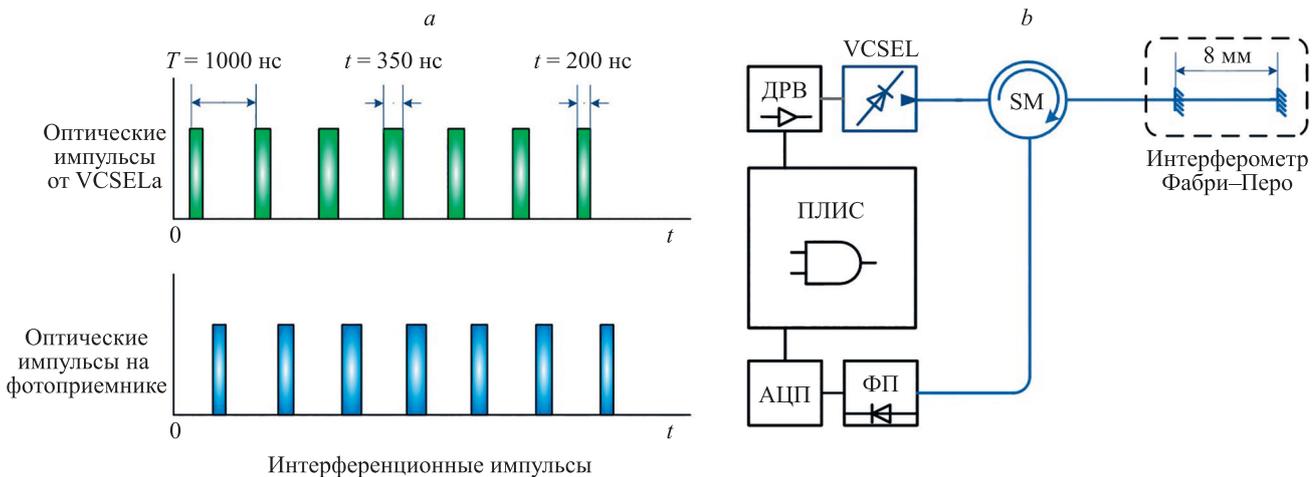


Рис. 5. Порядок опроса датчика температуры на основе волоконно-оптического интерферометра Фабри–Перо (*a*) и схема проведения эксперимента (*b*).

ДРВ — драйвер (источник питания), ПЛИС — программируемая логическая интегральная схема, АЦП — аналогово-цифровой преобразователь, ФП — фотоприемник, SM — циркулятор на одномодовом оптическом волокне

Fig. 5. The procedure for polling a temperature sensor based on a fiber-optic Fabry-Perot interferometer (*a*) and the scheme of the experiment (*b*).

ДРВ is a driver (power source); ПЛИС is a programmable logic integrated circuit; АЦП is an analog-to-digital converter; ФП is photoelectric detector; SM is circulator on a single-mode optical fiber

Подобная вспомогательная модуляция VCSEL позволяет получить в интерференционном сигнале ИФП дополнительные гармонические составляющие, которые будут использованы в алгоритме гомодинной демодуляции [21–23] для восстановления сигнала сдвига фазы интерферометра.

При использовании выбранного режима модуляции VCSEL (2), (3) на фотоприемнике (при условии двулучевой интерференции) будет формироваться интерференционный сигнал, в котором присутствует сдвиг фазы, обусловленный тепловыми воздействиями. Сигнал сдвига фазы способен точно отслеживать изменения температуры, но не привязан к ее абсолютным значениям, так как показывает некоторое относительное изменение разности фаз в интерферометре относительно момента включения схемы.

Теоретический расчет фазовой чувствительности ИФП к температуре (приращение сдвига фаз при изменении температуры на один градус) можно произвести по формуле [24]:

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta T} = \frac{4\pi}{\lambda} \left(n \frac{dL}{dT} + L \frac{dn}{dT} \right), \quad (4)$$

где $\lambda = 1550$ нм — длина волны источника оптического излучения; $n = 1,45$ — показатель преломления оптического волокна; $L = 0,008$ м — длина интерферометра; $dL/dT = L \cdot k$, где $k = 0,55 \cdot 10^{-6}$ 1/К — температурный коэффициент линейного теплового расширения оптического волокна, $dn/dT = 1,09 \cdot 10^{-5}$ 1/К — термооптический коэффициент оптического волокна [25]. В результате теоретического расчета по формуле (4) получим значение фазовой чувствительности интерферометра равное 0,76 рад/К.

Полученный в ходе эксперимента сигнал сдвига фазы интерферометра представлен на рис. 6. ИФП предварительно нагревался в печи до температуры 590 °С, после чего печь выключалась. Сигнал (рис. 6) демонстрирует процесс остывания интерферометра от температуры 530 °С до 110 °С.

Результаты, полученные в ходе данного эксперимента (рис. 6), позволили оценить реальную фазовую чувствительность ИФП к изменению температуры. Функциональное устройство используемой печи не позволило осуществить запись значений температуры в файлы данных, поэтому для расчета чувствительности интерферометра использованы крайние значения температуры — при выключении нагрева и непосредственно в конце записи. Они фиксировались вручную. В результате отношение разности значений сдвига фаз к разности температур позволило оценить чувствительность интерферометра в 0,94 рад/К. Таким образом, практические результаты оценки фазовой чувствительности ИФП оказались близки к расчетным значениям.

Среднеквадратичный уровень собственных шумов системы, измеренный в отсутствие температурного воздействия по выборке длительностью 10 с без усредне-

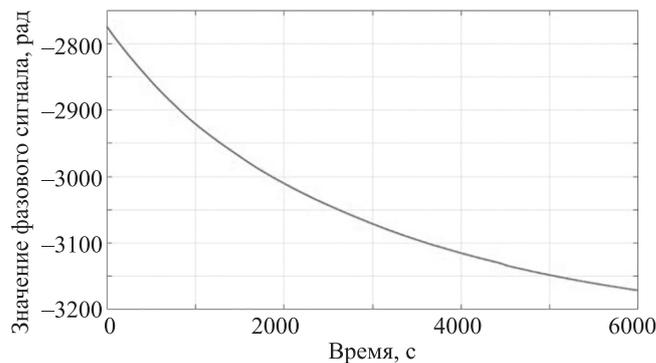


Рис. 6. Сигнал сдвига фазы интерферометра при его остывании от 530 °С до 110 °С

Fig. 6. Interferometer phase shift signal during its cooling from 530 °С down to 110 °С

ния, составил 0,0054 рад. Таким образом, минимально обнаружимое изменение температуры по уровню 3σ равно 0,017 К.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о возможности применения разработанного ИФП для регистрации малых изменений температуры.

Заключение

В работе предложена методика формирования волоконно-оптического интерферометра Фабри–Перо и собрана его рабочая конструкция. Проведено математическое моделирование спектров отражения зеркал интерферометра и спектра отражения разработанного интерферометра. Расчет спектров отражения произведен в среде Essential Macleod.

По результатам температурных испытаний сформированный интерферометр Фабри–Перо оказался работоспособным для определения изменения температуры до 590 °С. В работе представлены результаты температурных испытаний разработанного датчика, получены спектральные характеристики образца интерферометра при температурах от 20 °С до 590 °С. По результатам эксперимента сделан вывод, что увеличение температуры окружающей среды приводит к уменьшению области свободной дисперсии интерферометра Фабри–Перо, что соответствует теоретическим данным.

Эксперимент, направленный на определение фазовой чувствительности, показал, что исследованный волоконно-оптический интерферометр Фабри–Перо может использоваться как чувствительный датчик температуры. Фазовая чувствительность интерферометра к температуре, согласно расчетным данным, составила 0,76 рад/К, согласно практическим данным — 0,94 рад/К. Практические результаты оценки фазовой чувствительности интерферометра Фабри–Перо оказались близки к расчетным значениям. Согласно оценке точности измерений минимально обнаружимое изменение температуры по уровню 3σ составило 0,017 К для сигнала сдвига фазы.

Литература

References

- Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings*. San Diego, CA: Academic Press, 1999. 478 p.
- Мешковский И.К., Варжель С.В., Беликин М.Н., Куликов А.В., Брунов В.С. Термический отжиг решеток Брэгга при изготовлении волоконно-оптических фазовых интерферометрических датчиков // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 5. С. 91–93.
- Liao C.R., Wang D.N. Review of femtosecond laser fabricated fiber Bragg gratings for high temperature sensing // *Photonic Sensors*. 2013. V. 3. N 2. P. 97–101. <https://doi.org/10.1007/s13320-012-0060-9>
- Минкин А.М., Созонов Н.С., Фадеев К.М., Шевцов Д.И. Миниатюрный волоконно-оптический датчик давления на основе интерферометра Фабри–Перо // II Всероссийская конференции «Оптическая рефлектометрия – 2018»: сборник тезисов докладов. 2018. С. 86–89.
- Pratt D.J. Optical wavelength sensor: Patent PCT WO1995020144A1. 1995.
- Egorova O.N., Vasil'ev S.A., Likhachev I.G., Sverchkov S.E., Galagan B.I., Denker B.I., Semjonov S.L., Pustovoi V.I. A Fabry–Perot interferometer formed in the core of a composite optical fibre heavily doped with phosphorus oxide // *Quantum Electronics*. 2019. V. 49. N 12. P. 1140–1144. <https://doi.org/10.1070/QEL17133>
- Huang C., Xie W., Lee D., Qi C., Yang M., Wang M., Tang J. Optical fiber humidity sensor with porous TiO₂/SiO₂/TiO₂ coatings on fiber tip // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2015. V. 27. N 14. P. 1495–1498. <https://doi.org/10.1109/LPT.2015.2426726>
- Агафонова Д.С. Волоконно-оптический датчик температуры. Патент RU155334U1. Бюл. 2015. № 28.
- Egorova O.N., Semjonov S.L., Velmiskin V.V., Yatsenko Yu.P., Sverchkov S.E., Galagan B.I., Denker B.I., Dianov E.M. Phosphate-core silica-clad Er/Yb-doped optical fiber and cladding pumped laser // *Optics Express*. 2014. V. 22. N 7. P. 7632–7637. <https://doi.org/10.1364/OE.22.007632>
- Duan D.W., Rao Y., Hou Y.-S., Zhu T. Microbubble based fiber-optic Fabry–Perot interferometer formed by fusion splicing single-mode fibers for strain measurement // *Applied Optics*. 2012. V. 51. N 8. P. 1033–1036. <https://doi.org/10.1364/AO.51.001033>
- Machavaram V.R., Badcock R.A., Fernando G.F. Fabrication of intrinsic fibre Fabry–Perot sensors in silica fibres using hydrofluoric acid etching // *Sensors and Actuators, A: Physical*. 2007. V. 138. P. 248–260. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.04.007>
- Liu S., Wang Y., Liao C., Wang G., Li Z., Wang Q., Zhou J., Yang K., Zhong X., Zhao J., Tang J. High-sensitivity strain sensor based on in-fiber improved Fabry–Perot interferometer // *Optics Letters*. 2014. V. 39. N 7. P. 2121–2124. <https://doi.org/10.1364/OL.39.002121>
- Ma Z., Pang F., Liu H., Chen Z., Wang T. Air microcavity formed in sapphire-derived fiber for high temperature sensing // *Proc. of the 26th International Conference on Optical Fiber Sensors*. 2018. P. WF48. <https://doi.org/10.1364/OFS.2018.WF48>
- Терентьев В.С., Симонов В.А. Метод моделирования асимметричного зеркала для дифракционного отражательного интерферометра в одномодовом волокне // *Прикладная фотоника*. 2017. Т. 4. № 2. С. 107–120.
- Тертышник А.Д., Волков П.В., Горюнов А.В., Лукьянов А.Ю. Волоконно-оптический интерференционный датчик температуры. Патент RU2466366C1. Бюл. 2012. № 31.
- Bennett J.M., Pelletier E., Albrand G., Borgogno J.P., Lazarides B., Carniglia C.K., Schmell R.A., Allen T.H., Tuttle-Hart T., Guenther K.H., Saxer A. Comparison of the properties of titanium dioxide films prepared by various techniques // *Applied Optics*. 1989. V. 28. N 16. P. 3303–3317. <https://doi.org/10.1364/AO.28.003303>
- Hirsch M., Majchrowicz D., Wierzbna P., Weber M., Bechelany M., Jędrzejewska-Szczerska M. Low-coherence interferometric fiber-optic sensors with potential applications as biosensors // *Sensors*. 2017. V. 17. N 2. P. 261. <https://doi.org/10.3390/s17020261>
- Lee D., Yang M., Huang C., Dai J. Optical fiber high-temperature sensor based on dielectric films extrinsic Fabry–Pérot cavity // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2014. V. 26. N 21. P. 2107–2110. <https://doi.org/10.1109/LPT.2014.2346622>
- Киреев А.Ю., Алейник А.С., Плотников М.Ю., Мехренгин М.В. Способ частотно-импульсной модуляции полупроводникового лазерного источника оптического излучения для опроса оптических интерферометрических датчиков. Патент RU2646420C1. Бюл. 2018. № 7.
- Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings*. San Diego, CA, Academic Press, 1999, 478 p.
- Meshkovsky I.K., Varzhel S.V., Belikin M.N., Kulikov A.V., Brunov V.S. Thermal annealing of Bragg grating on manufacturing of fiber-optic phase sensor. *Journal of Instrument Engineering*, 2013, vol. 56, no. 5, pp. 91–93. (in Russian)
- Liao C.R., Wang D.N. Review of femtosecond laser fabricated fiber Bragg gratings for high temperature sensing. *Photonic Sensors*, 2013, vol. 3, no. 2, pp. 97–101. <https://doi.org/10.1007/s13320-012-0060-9>
- Minkin A.M., Sozonov N.S., Fadeev K.M., Shevtsov D.I. Miniature fiber-optic pressure sensor based on the Fabry–Pérot interferometer. *Proc. of the 2nd All-Russian Conference «Optical Reflexometry-2018»*, 2018, pp. 86–89. (in Russian)
- Pratt D.J. Optical wavelength sensor. *Patent PCT WO1995020144A1*, 1995.
- Egorova O.N., Vasil'ev S.A., Likhachev I.G., Sverchkov S.E., Galagan B.I., Denker B.I., Semjonov S.L., Pustovoi V.I. A Fabry–Perot interferometer formed in the core of a composite optical fibre heavily doped with phosphorus oxide. *Quantum Electronics*, 2019, vol. 49, no. 12, pp. 1140–1144. <https://doi.org/10.1070/QEL17133>
- Huang C., Xie W., Lee D., Qi C., Yang M., Wang M., Tang J. Optical fiber humidity sensor with porous TiO₂/SiO₂/TiO₂ coatings on fiber tip. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, vol. 27, no. 14, pp. 1495–1498. <https://doi.org/10.1109/LPT.2015.2426726>
- Agafonova D.S. Fiber optical temperature sensor. *Patent RU155334U1*, 2015. (in Russian)
- Egorova O.N., Semjonov S.L., Velmiskin V.V., Yatsenko Yu.P., Sverchkov S.E., Galagan B.I., Denker B.I., Dianov E.M. Phosphate-core silica-clad Er/Yb-doped optical fiber and cladding pumped laser. *Optics Express*, 2014, vol. 22, no. 7, pp. 7632–7637. <https://doi.org/10.1364/OE.22.007632>
- Duan D.W., Rao Y., Hou Y.-S., Zhu T. Microbubble based fiber-optic Fabry–Perot interferometer formed by fusion splicing single-mode fibers for strain measurement. *Applied Optics*, 2012, vol. 51, no. 8, pp. 1033–1036. <https://doi.org/10.1364/AO.51.001033>
- Machavaram V.R., Badcock R.A., Fernando G.F. Fabrication of intrinsic fibre Fabry–Perot sensors in silica fibres using hydrofluoric acid etching. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2007, vol. 138, pp. 248–260. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.04.007>
- Liu S., Wang Y., Liao C., Wang G., Li Z., Wang Q., Zhou J., Yang K., Zhong X., Zhao J., Tang J. High-sensitivity strain sensor based on in-fiber improved Fabry–Perot interferometer. *Optics Letters*, 2014, vol. 39, no. 7, pp. 2121–2124. <https://doi.org/10.1364/OL.39.002121>
- Ma Z., Pang F., Liu H., Chen Z., Wang T. Air microcavity formed in sapphire-derived fiber for high temperature sensing. *Proc. of the 26th International Conference on Optical Fiber Sensors*, 2018, pp. WF48. <https://doi.org/10.1364/OFS.2018.WF48>
- Terent'ev V.S., Simonov V.A. High-finesse multiple-beam reflection interferometer based on dielectric diffraction structure in a single-mode fiber. *Applied Photonics*, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 107–120. (in Russian)
- Tertyshnik A.D., Volkov P.V., Gorjunov A.V., Luk'janov A.J. Fibre-optic interference temperature sensor. Patent RU2466366C1, 2012. (in Russian)
- Bennett J.M., Pelletier E., Albrand G., Borgogno J.P., Lazarides B., Carniglia C.K., Schmell R.A., Allen T.H., Tuttle-Hart T., Guenther K.H., Saxer A. Comparison of the properties of titanium dioxide films prepared by various techniques. *Applied Optics*, 1989, vol. 28, no. 16, pp. 3303–3317. <https://doi.org/10.1364/AO.28.003303>
- Hirsch M., Majchrowicz D., Wierzbna P., Weber M., Bechelany M., Jędrzejewska-Szczerska M. Low-coherence interferometric fiber-optic sensors with potential applications as biosensors. *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 261. <https://doi.org/10.3390/s17020261>
- Lee D., Yang M., Huang C., Dai J. Optical fiber high-temperature sensor based on dielectric films extrinsic Fabry–Pérot cavity. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, vol. 26, no. 21, pp. 2107–2110. <https://doi.org/10.1109/LPT.2014.2346622>
- Kireenkov A.Y., Alejnik A.S., Plotnikov M.Y., Mekhregin M.V. Method of frequency-pulse modulation of a semiconductor laser source of optical radiation for optical interferometric sensors. *Patent RU2646420C1*, 2018. (in Russian)
- Kireenkov A.Iu. *Fiber-optic interferometric methods for constructing the measuring systems based on a surface-emitting laser*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. St. Petersburg, NIU ITMO, 2017, 155 p. (in Russian)

20. Киреевков А.Ю. Волоконно-оптические интерферометрические методы для построения измерительных систем на основе поверхностно-излучающего лазера: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.11.01 / НИУ ИТМО. СПб., 2017. 155 с.
21. Ефимов М.Е. Метод и аппаратура для регистрации акустической эмиссии и деформаций композитного графит-эпоксидного материала на основе анализа амплитудно-фазовых характеристик сигнала волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо: диссертация на соискание ученой степени. кандидата технических наук: 05.11.01 / НИУ ИТМО. СПб., 2018. 147 с.
22. Plotnikov M.Y., Volkov A.V. Adaptive phase noise cancellation technique for fiber-optic interferometric sensors // *Journal of Lightwave Technology*. 2021. V. 39. N 14. P. 4853–4860. <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3075781>
23. Volkov A.V., Plotnikov M.Y., Mekhregin M.V., Miroshnichenko G.P., Aleynik A.S. Phase modulation depth evaluation and correction technique for the PGC demodulation scheme in fiber-optic interferometric sensors // *IEEE Sensors Journal*. 2017. V. 17. N 13. P. 4143–4150. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2017.2704287>
24. Lee C.E., Atkins R.A., Taylor H.F. Performance of a fiber-optic temperature sensor from -200 to 1050°C // *Optics Letters*. 1988. V. 13. N 11. P. 1038–1040. <https://doi.org/10.1364/OL.13.001038>
25. Gao H., Jiang Y., Cui Y., Zhang L., Jia J., Jiang L. Investigation on the thermo-optic coefficient of silica fiber within a wide temperature range // *Journal of Lightwave Technology*. 2018. V. 36. N 24. P. 5881–5886. <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2875941>
21. Efimov M.E. *Method and equipment for the recording acoustic emission and deformations of a composite graphite-epoxy material based on the analysis of the amplitude-phase characteristics of the signal from a fiber-optic Fabry-Pérot interferometer*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. St. Petersburg, NIU ITMO, 2018, 147 p. (in Russian)
22. Plotnikov M.Y., Volkov A.V. Adaptive phase noise cancellation technique for fiber-optic interferometric sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, vol. 39, no. 14, pp. 4853–4860. <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3075781>
23. Volkov A.V., Plotnikov M.Y., Mekhregin M.V., Miroshnichenko G.P., Aleynik A.S. Phase modulation depth evaluation and correction technique for the PGC demodulation scheme in fiber-optic interferometric sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2017, vol. 17, no. 13, pp. 4143–4150. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2017.2704287>
24. Lee C.E., Atkins R.A., Taylor H.F. Performance of a fiber-optic temperature sensor from -200 to 1050°C // *Optics Letters*, 1988, vol. 13, no. 11, pp. 1038–1040. <https://doi.org/10.1364/OL.13.001038>
25. Gao H., Jiang Y., Cui Y., Zhang L., Jia J., Jiang L. Investigation on the thermo-optic coefficient of silica fiber within a wide temperature range. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, vol. 36, no. 24, pp. 5881–5886. <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2875941>

Авторы

Моор Янина Дмитриевна — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57214998978](https://orcid.org/0000-0002-1624-2659), <https://orcid.org/0000-0002-1624-2659>, yanoti@yandex.ru

Коннов Кирилл Александрович — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 56032492300](https://orcid.org/0000-0002-8888-3527), <https://orcid.org/0000-0002-8888-3527>, kirillkonnov1991@gmail.com

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

Волков Антон Валерьевич — кандидат технических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57194565170](https://orcid.org/0000-0002-7988-5854), <https://orcid.org/0000-0002-7988-5854>, avvolkov9223@gmail.com

Варжель Сергей Владимирович — кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 55247304200](https://orcid.org/0000-0002-3120-8109), <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>, Vsv187@gmail.ru

Коннов Дмитрий Александрович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 6603225596](https://orcid.org/0000-0002-8256-973X), <https://orcid.org/0000-0002-8256-973X>, dakonnov@itmo.ru

Стригалева Владимир Евгеньевич — кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 6603225596](https://orcid.org/0000-0002-7151-9235), <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>, vstrglv@mail.ru

Authors

Ianina D. Moor — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57214998978](https://orcid.org/0000-0002-1624-2659), <https://orcid.org/0000-0002-1624-2659>, yanoti@yandex.ru

Kirill A. Konnov — PhD (Physics & Mathematics), Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 56032492300](https://orcid.org/0000-0002-8888-3527), <https://orcid.org/0000-0002-8888-3527>, kirillkonnov1991@gmail.com

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

Anton V. Volkov — PhD, Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57194565170](https://orcid.org/0000-0002-7988-5854), <https://orcid.org/0000-0002-7988-5854>, avvolkov9223@gmail.com

Sergey V. Varzhel — PhD, Associate Professor, Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 55247304200](https://orcid.org/0000-0002-3120-8109), <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>, Vsv187@gmail.ru

Dmitriy A. Konnov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 6603225596](https://orcid.org/0000-0002-8256-973X), <https://orcid.org/0000-0002-8256-973X>, dakonnov@itmo.ru

Vladimir E. Strigalev — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 6603225596](https://orcid.org/0000-0002-7151-9235), <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>, vstrglv@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.02.2022
 Одобрена после рецензирования 02.04.2022
 Принята к печати 19.05.2022

Received 17.02.2022
 Approved after reviewing 02.04.2022
 Accepted 19.05.2022



Работа доступна по лицензии
 Creative Commons
 «Attribution-NonCommercial»