

УДК 681.586.5

**Т.А. Аглиуллин¹, Д.В. Самигуллин², Л.А. Сахабутдинова³,
М.Р.Т.М. Каид¹, Б.И. Валеев¹**

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

²Казанский институт биохимии и биофизики

ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань, Россия

³Казанский инновационный университет им. В.Г. Тимирязова, Казань, Россия

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ СТЕКЛЯННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ–ПЕРО

Представлено теоретическое и экспериментальное исследование волоконно-оптического полностью стеклянного микротермометра на основе интерферометра Фабри–Перо. Интерферометр изготовлен путем нанесения боросиликатного стекла на сколотый торец стандартного телекоммуникационного одномодового оптического волокна с помощью микрофузницы. По результатам экспериментальных исследований спектральная чувствительность изготовленного интерферометра составила порядка 40 пм/°С. Представлена и верифицирована математическая модель интерферометра Фабри–Перо на основе метода матриц рассеяния и передачи, позволяющая вычислять спектральный отклик интерферометра с произвольными параметрами структуры.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик температуры, волоконный интерферометр Фабри–Перо, микротермометр.

**T.A. Agliullin¹, D.V. Samigullin², L.A. Sakhabutdinova³,
M.R.T.M. Qaid¹, B.I. Valeev¹**

¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russian Federation

²Kazan Institute of Biochemistry and Biophysics of the FRC Kazan Science Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russian Federation

³Kazan Innovative University named after V.G. Timiryasov, Kazan, Russian Federation

FIBER-OPTIC TEMPERATURE SENSOR BASED ON GLASS FABRY–PEROT INTERFEROMETER

The paper presents a theoretical and experimental study of a fiber-optic all-glass microthermometer based on a Fabry–Perot interferometer. The interferometer is fabricated by applying borosilicate glass to the cleaved end of a standard telecom single-mode optical fiber using a microforge.

According to the results of experimental studies, the spectral sensitivity of the fabricated interferometer was about 40 pm/°C. A mathematical model of the Fabry–Perot interferometer based on the method of scattering and transfer matrices is presented and verified, which makes it possible to calculate the spectral response of an interferometer with arbitrary structure parameters.

Keywords: fiber optic temperature sensor, Fabry–Perot fiber interferometer, microthermometer.

Введение

Высокоточное измерение температуры является важной задачей в различных областях науки и техники, в частности, в биомедицинских приложениях, химической и пищевой промышленности, мониторинге окружающей среды и иных сферах. Волоконно-оптические датчики температуры обладают рядом преимуществ перед электронными, такими как малые габариты и вес, коррозионная стойкость, отсутствие необходимости электропитания чувствительного элемента, устойчивость к электромагнитным помехам, возможность мультиплексирования датчиков и удаленного размещения регистрирующей аппаратуры.

Волоконно-оптические датчики температуры в настоящее время, как правило, строятся на основе волоконных брэгговских решеток [1] или длиннопериодных решеток [2], эффектов флуоресценции [3], рамановского рассеяния [4] или интерферометров [5, 6]. Разработке интерферометрических датчиков, в том числе датчиков температуры, уделяется значительное внимание ввиду высокой чувствительности датчиков этого класса и большого разнообразия их конструкций. Отдельный интерес представляют датчики с размещением чувствительного элемента на торце оптоволокна. Функционирование таких датчиков осуществляется за счет изменения оптического пути вследствие изменения показателя преломления материала интерферометра Фабри–Перо (ИФП) под действием температуры, а также за счет его теплового расширения (изменения длины интерферометра). Следует отметить, что сравнительно малая величина термооптического коэффициента и коэффициента теплового расширения кварцевого стекла, из которого изготавливается оптическое волокно, ограничивает чувствительность технических решений, использующих исключительно кварцевое стекло для формирования ИФП. Чувствительность таких элементов, как правило, не превышает ~ 14 пм/°C [7]. Для повышения чувствительности предлагается использование различных материалов с повышенным термооптическим коэффициентом и/или коэффициентом теплового расширения. Так, в работе [8] представлен ИФП в виде кремниевого цилиндра, изготовленного по технологии глубинного

реактивного ионно-плазменного травления и прикрепленного к торцу оптического волокна, обладающий чувствительностью порядка $85 \text{ пм}/^\circ\text{C}$. В [9] представлен ИФП, сформированный путем частичного заполнения полидиметилсилоксаном (ПДМС) участка из полого волокна, температурная чувствительность которого достигала $\sim 650 \text{ пм}/^\circ\text{C}$. Схожий подход был продемонстрирован в [10], где для формирования интерферометра в полом волокне использовался полимерный клей Norland Optical Adhesive 65 (NOA65), отверждаемый ультрафиолетовым облучением, в результате чего был получен ИФП с температурной чувствительностью $\sim 2,87 \text{ нм}/^\circ\text{C}$. Общими недостатками использования полимерных материалов являются необходимость их стабилизации и обеспечение биосовместимости в биомедицинских приложениях. Другим примером ИФП с повышенной температурной чувствительностью ($\sim 430 \text{ пм}/^\circ\text{C}$) является герметичная полость внутри оптического волокна, заполненная этанолом [11], однако такой датчик более сложен в изготовлении.

В работе предложен интерферометр Фабри–Перо с повышенной температурной чувствительностью, изготовленный путем нанесения боросиликатного стекла на торец стандартного телекоммуникационного одномодового оптоволоконного с помощью микрокузницы. В первом разделе статьи приведена математическая модель интерферометра Фабри-Перо, во втором разделе представлен способ изготовления микротермометра на основе оптоволоконного ИФП, в третьем разделе представлены результаты экспериментальных исследований, в заключительном разделе приведены выводы по работе.

1. Математическая модель интерферометра Фабри–Перо

Интерферометр Фабри–Перо в общем случае представляет собой два соосных параллельных и обращенных друг к другу зеркала, между которыми формируется резонансная стоячая оптическая волна. В данном случае зеркалами служат границы раздела двух оптически прозрачных сред. Модель ИФП [12, 13] можно представить в виде структуры, состоящей из трех различных однородных слоев, сквозь которые распространяется плоская монохроматическая оптическая волна. Разность показателей преломления сред вызывает частичное отражение волны на границах их разделов, формируя зеркала, что влечет за собой появление интерференции и резонанса. Коэффициент отражения излучения зависит от толщины формирующего интерферо-

метр слоя, диэлектрической и магнитной проницаемости сред, а также от длины волны падающего излучения. В результате прохождения широкополосного излучения через интерферометр Фабри–Перо его амплитуда периодически изменяется в зависимости от длины волны, что приводит к появлению выраженных максимумов и минимумов в спектре отражения ИФП.

Контролируя спектр отражения и положения максимумов интерферометра Фабри-Перо, возможно определять изменение показателя преломления (диэлектрической и магнитной проницаемости) слоев, составляющих ИФП, а также изменение длины интерферометра в результате внешнего воздействия.

Длина волоконно-оптического ИФП может быть как соизмерима с длиной волны излучения, так и много больше нее, диаметр оптоволокна не превышает нескольких десятков длины волны, а распространение света происходит вдоль сердцевины волокна, что оправдывает применение одномерной математической модели распространения плоской волны сквозь слоистую структуру (ИФП). Модель такой структуры представлена на рис. 1.

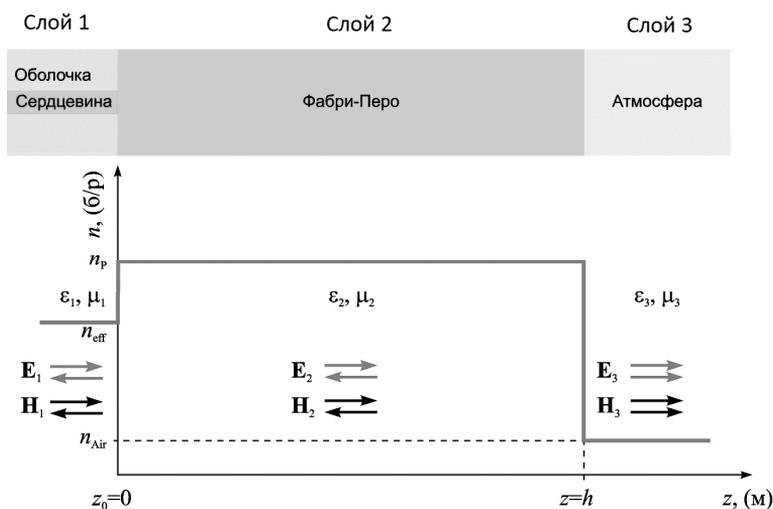


Рис. 1. Одномерная модель интерферометра Фабри–Перо (вверху), зависимость показателя преломления среды распространения света вдоль оси волокна (внизу)

Волоконно-оптический интерферометр Фабри–Перо открытого типа (см. рис. 1) состоит из трех слоев: оптическое волокно – «Слой 1», боросиликатное стекло – «Слой 2» и атмосфера – «Слой 3». Для

построения модели был применен математический аппарат матриц рассеяния и передачи [14]. Были построены матрица скачкообразного изменения параметров среды распространения (граница раздела между слоями 1 и 2), матрица рассеяния однородной среды внутреннего слоя ИФП (слой 2) и матрица скачкообразного изменения параметров среды распространения (граница раздела между слоями 2 и 3).

Матрица рассеяния сплошной среды внутреннего слоя резонатора (слой 2) является функцией длины волны излучения (λ), диэлектрической (ϵ) и магнитной (μ) проницаемости и толщины слоя (h):

$$\mathbf{S}_M^1(\lambda, \epsilon_2, \mu_2, h) = \begin{bmatrix} 0 & e^{-j \cdot h \cdot \gamma} \\ e^{-j \cdot h \cdot \gamma} & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где параметр γ определяется как:

$$\gamma = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{2 \operatorname{Re} \epsilon_2 \cdot \operatorname{Re} \mu_2} \left(\sqrt{\sqrt{1 - \left(\frac{\operatorname{Im} \epsilon_2}{\operatorname{Re} \epsilon_2} \right)^2} + 1} - j \sqrt{\sqrt{1 - \left(\frac{\operatorname{Im} \epsilon_2}{\operatorname{Re} \epsilon_2} \right)^2} - 1} \right). \quad (2)$$

Матрицы скачкообразного изменения параметров среды распространения являются функциями диэлектрической и магнитной проницаемости смежных слоев:

$$\mathbf{S}_J^{12} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{\epsilon_1 \mu_2} - \sqrt{\mu_1 \epsilon_2}}{\sqrt{\mu_1 \epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1 \mu_2}} & \frac{2 \cdot \sqrt[4]{\epsilon_1 \mu_1 \epsilon_2 \mu_2}}{\sqrt{\mu_1 \epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1 \mu_2}} \\ \frac{2 \cdot \sqrt[4]{\epsilon_1 \mu_1 \epsilon_2 \mu_2}}{\sqrt{\mu_1 \epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1 \mu_2}} & \frac{\sqrt{\epsilon_1 \mu_2} - \sqrt{\mu_1 \epsilon_2}}{\sqrt{\mu_1 \epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1 \mu_2}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_J^{23} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{\epsilon_2 \mu_3} - \sqrt{\mu_2 \epsilon_3}}{\sqrt{\mu_2 \epsilon_3} + \sqrt{\epsilon_2 \mu_3}} & \frac{2 \cdot \sqrt[4]{\epsilon_2 \mu_2 \epsilon_3 \mu_3}}{\sqrt{\mu_2 \epsilon_3} + \sqrt{\epsilon_2 \mu_3}} \\ \frac{2 \cdot \sqrt[4]{\epsilon_2 \mu_2 \epsilon_3 \mu_3}}{\sqrt{\mu_2 \epsilon_3} + \sqrt{\epsilon_2 \mu_3}} & \frac{\sqrt{\epsilon_2 \mu_3} - \sqrt{\mu_2 \epsilon_3}}{\sqrt{\mu_2 \epsilon_3} + \sqrt{\epsilon_2 \mu_3}} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

После определения матриц рассеяния каждого элемента ИФП формируются соответствующие им матрицы передачи:

$$\mathbf{T}_J^{12} = \frac{1}{(\mathbf{S}_J^{12})_{2,1}} \begin{pmatrix} -\|\mathbf{S}_J^{12}\| & (\mathbf{S}_J^{12})_{1,1} \\ -(\mathbf{S}_J^{12})_{2,2} & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{T}_J^{23} = \frac{1}{(\mathbf{S}_J^{23})_{2,1}} \begin{pmatrix} -\|\mathbf{S}_J^{23}\| & (\mathbf{S}_J^{23})_{1,1} \\ -(\mathbf{S}_J^{23})_{2,2} & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{T}_M^2(\lambda) = \frac{1}{(\mathbf{S}_M^2(\lambda))_{2,1}} \begin{pmatrix} -\|\mathbf{S}_M^2(\lambda)\| & (\mathbf{S}_M^2(\lambda))_{1,1} \\ -(\mathbf{S}_M^2(\lambda))_{2,2} & 1 \end{pmatrix}.$$

В результате данных преобразований становится возможным определить матрицу передачи всего интерферометра путем последовательного перемножения матриц передачи его элементов:

$$\mathbf{T}^{\text{FP}}(\lambda) = \mathbf{T}_J^{12} \times \mathbf{T}_M^2(\lambda) \times \mathbf{T}_J^{23}. \quad (5)$$

Матрица рассеяния $\mathbf{S}^{\text{FP}}(\lambda)$ интерферометра Фабри–Перо получается путем преобразования его матрицы передачи $\mathbf{T}^{\text{FP}}(\lambda)$:

$$\mathbf{S}^{\text{FP}}(\lambda) = \frac{1}{(\mathbf{T}^{\text{FP}}(\lambda))_{2,2}} \begin{pmatrix} (\mathbf{T}^{\text{FP}}(\lambda))_{1,2} & \|\mathbf{T}^{\text{FP}}(\lambda)\| \\ 1 & (\mathbf{T}^{\text{FP}}(\lambda))_{2,1} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Элемент $(\mathbf{S}^{\text{FP}}(\lambda))_{1,1}$ результирующей матрицы рассеяния, определяет зависимость коэффициента отражения от границы ($z = 0$) интерферометра Фабри–Перо для излучения, идущего в положительном направлении вдоль оси Oz (со стороны слоя 1); элемент $(\mathbf{S}^{\text{FP}}(\lambda))_{2,2}$ определяет зависимость коэффициента отражения от границы ($z = h$) для излучения, идущего в отрицательном направлении вдоль оси Oz (со стороны слоя 3); элемент $(\mathbf{S}^{\text{FP}}(\lambda))_{1,2}$ определяет зависимость коэффициента пропускания излучения, проходящего в положительном направлении оси Oz ; элемент $(\mathbf{S}^{\text{FP}}(\lambda))_{2,1}$ определяет зависимость коэффициента пропускания излучения, проходящего в отрицательном направлении оси Oz .

2. Изготовление микротермометра

Для изготовления интерферометра Фабри–Перо использовались боросиликатные капилляры WPI 1B15OF-4 [15]. С помощью пуллера Флеминга–Брауна Sutter Instrument P-97 (рис. 2, а) [16] из капилляра вытягивалась микропипетка с удлиненным кончиком, которая использовалась в качестве заготовки для наплавления датчика на оптоволокно. В пуллере имеется нагревательная камера, при помощи которой происходит локальный нагрев стеклянного капилляра. В это же самое время к концам заготовки через зажимы прикладывается усилие на растяжение, за счет этого заготовка плавится и вытягивается. В зависимости от температуры нагрева, скорости и силы растяжения можно формировать микропипетки с заданными характеристиками.

Микропипетку закрепляли на микрокузнице, собранной по конструкции Фонбрюна (рис. 2, б) [17], которая оборудована механическим микроманипулятором, позволяющим перемещать нить накаливания в рабочей зоне микроскопа. На нить накаливания подается напряжение с трансформатора, регулируя ток которого можно контролировать температуру спирали. При помощи механизма препаратоводителя кончик стеклянной заготовки можно быстро устанавливать в зоне нагрева нити накаливания. Все операции при изготовлении микроинструментов на микрокузнице производят нитью накаливания. Стеклянная заготовка при этом, как правило, остается неподвижной и должна постоянно находиться в поле зрения микроскопа.

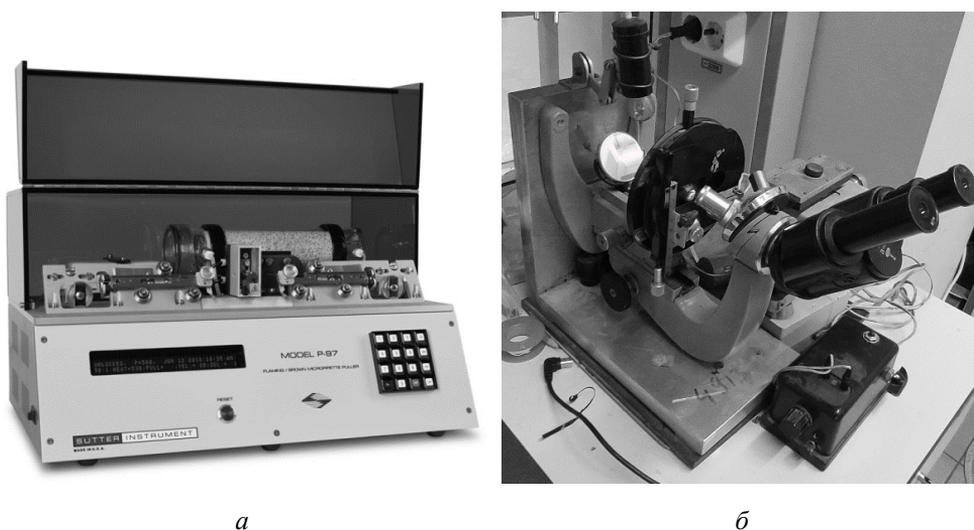


Рис. 2. Оборудование, используемое для изготовления боросиликатных интерферометров Фабри–Перо: пуллер Флеминга–Брауна Sutter Instrument P-97 [16] (а), микрокузница конструкции Фонбрюна (б)

На первом этапе на спирали формировалась капля из боросиликатного стекла за счет контакта заготовки с разогретой нитью накаливания. Затем вместо заготовки в препаратоводителе закрепляли стандартное телекоммуникационное одномодовое оптоволокно SMF-28 и формировали на торце интерферометр Фабри–Перо из боросиликатного стекла. Путем регулировки температуры и манипуляций спиралью с расплавленным стеклом возможно формировать интерферометры различной формы и геометрических размеров.

Таким образом были изготовлены два образца торцевых ИФП из боросиликатного стекла, которые представлены на рис. 3, отличающиеся друг от друга длиной интерферометра.

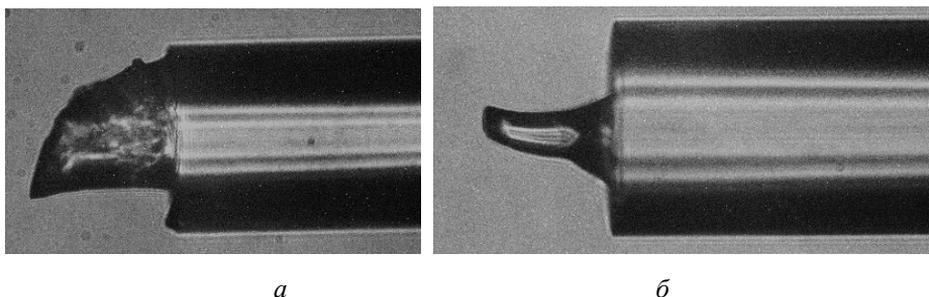


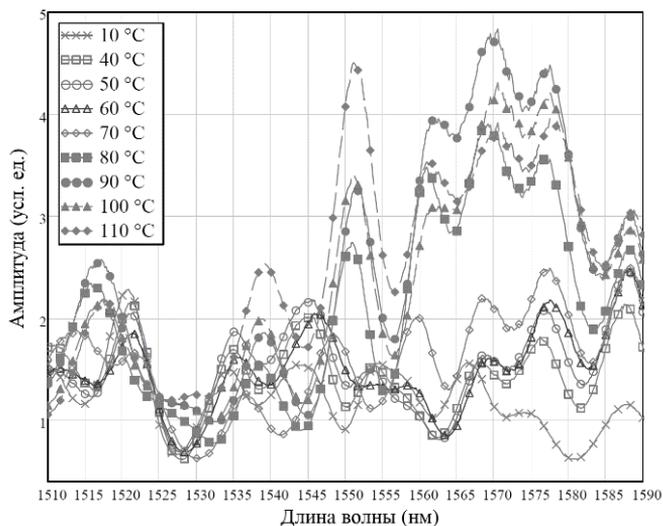
Рис. 3. Микрофотографии изготовленных образцов боросиликатного интерферометра Фабри–Перо: образец 1 (а), образец 2 (б)

3. Экспериментальное исследование микротермометра

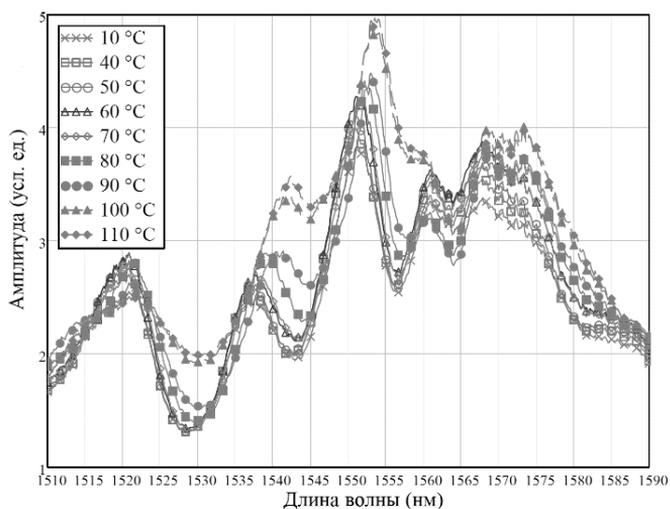
Экспериментальное исследование изготовленных образцов микротермометра проводилось с использованием сушильного шкафа СМ 50/250-250 ШС производства ООО «СПМ Климат», для регистрации спектрального отклика образцов использовался волоконно-оптический интеррогатор на основе спектрометра Ibsen I-MON-512, разработанный на кафедре РФМТ КНИТУ-КАИ [18].

В ходе эксперимента были получены спектральные отклики двух изготовленных образцов интерферометра Фабри–Перо при комнатной температуре (23 °С), а также при температурах от 40 до 110 °С с шагом 10 °С, что представлено на рис. 4. Необходимо отметить, что неравномерность амплитуд пиков отражения и пропускания обусловлена неидеальной однородностью материала интерферометра.

Для того чтобы оценить температурную чувствительность изготовленных образцов, были исследованы смещения пиков отражения в полученных спектрах. Так, у образца 1 исследовался пик вблизи 1537 нм, а у образца 2 – около 1540 нм. Результирующие зависимости длины волны пиков от температуры показаны на рис. 5. Таким образом, чувствительность смещения пика к температуре образца 1 составила порядка 42 пм/°С, а для образца 2 – порядка 37 пм/°С.



а



б

Рис. 4. Спектральные отклики изготовленных образцов интерферометра Фабри–Перо: образец 1 (а), образец 2 (б)

Другим важным параметром интерферометра Фабри–Перо, характеризующим его состояние, является свободный спектральный диапазон – интервал в длине волны между двумя последовательными пиками отражения (или пропускания) в его спектральном отклике. Графики зависимости свободного спектрального диапазона изготовленных образцов от температуры представлены на рис. 6.

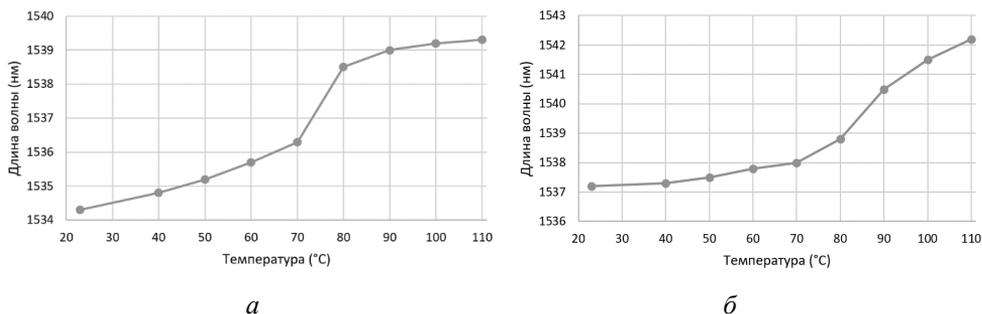


Рис. 5. Характеристики смещения пиков интерферометра Фабри–Перо от температуры: образец 1 (а), образец 2 (б)

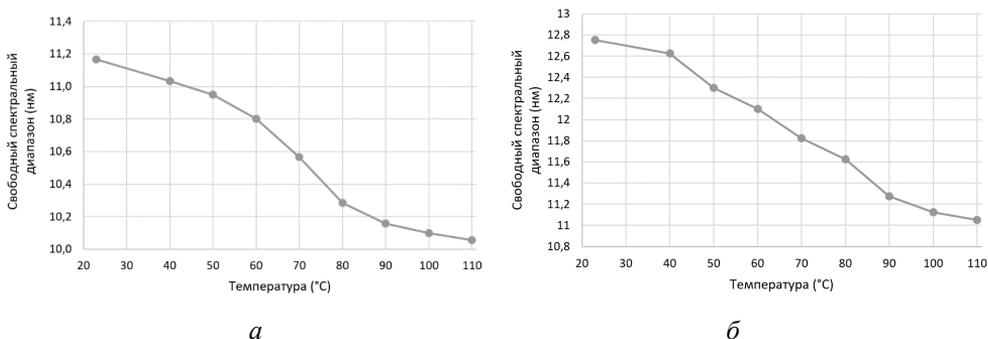


Рис. 6. Зависимости свободного спектрального диапазона интерферометров Фабри–Перо от температуры: образец 1 (а), образец 2 (б)

Как видно из рис. 6, свободный спектральный диапазон обоих образцов уменьшается с увеличением температуры, что обусловлено главным образом увеличением длины интерферометра вследствие теплового расширения материала. Причем свободный спектральный диапазон второго образца превышает таковой у первого образца, что объясняется меньшей изначальной длиной интерферометра.

Для верификации математической модели интерферометра Фабри–Перо, представленной в разделе 1, проведем моделирование спектрального отклика интерферометров, параметры которых соответствуют таковым у изготовленных образцов (таблица).

На рис. 7 представлены вычисленные спектральные отклики моделей обоих образцов интерферометра Фабри–Перо из боросиликатного стекла при температуре окружающей среды 23 °С.

Параметры моделирования исследованных образцов

Параметр	Образец 1	Образец 2
Длина интерферометра, мкм	70	62
Показатель преломления интерферометра	1,499	1,499
Показатель преломления оптического волокна	1,4587	1,4587
Показатель преломления окружающей среды	1	1
Термооптический коэффициент оптического волокна, K^{-1}	$8,6 \times 10^{-6}$	$8,6 \times 10^{-6}$
Термооптический коэффициент интерферометра, K^{-1}	$17,2 \times 10^{-6}$	$17,2 \times 10^{-6}$
Коэффициент теплового расширения интерферометра, K^{-1}	$6,3 \times 10^{-6}$	$6,3 \times 10^{-6}$

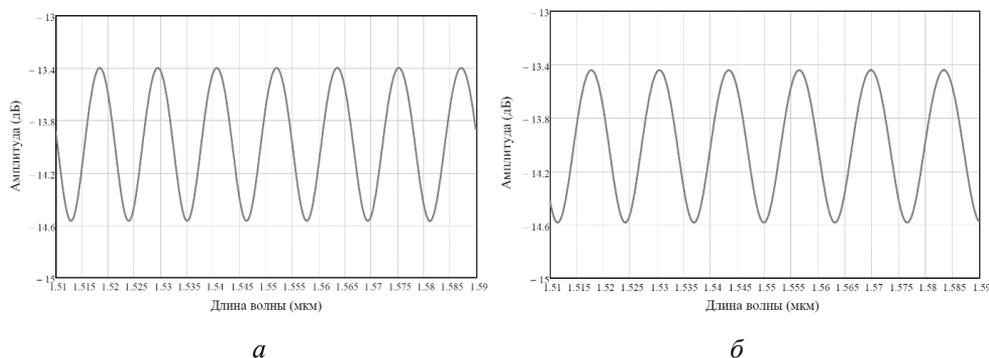


Рис. 7. Спектральные отклики отражения моделей интерферометров Фабри–Перо при температуре 23 °С: образец 1 (а), образец 2 (б)

Чувствительность смещения пика к температуре при моделировании интерферометра составила порядка 34 пм/°С, что согласуется с экспериментальными данными. Свободный спектральный диапазон образца 1 при температуре 23 °С составил 11,2 нм, а образца 2 – порядка 12,8 нм, что также соответствует экспериментальным данным.

Заключение

Предложенный волоконно-оптический интерферометр Фабри–Перо на основе боросиликатного стекла может быть использован в качестве датчика температуры. Процесс изготовления такого чувствительного элемента предполагает предварительное создание микропипетки из капилляра при помощи пуллера с последующим ее плавлением и нанесением боросиликатного стекла заготовки на торец одномодового оптического волокна. Результаты экспериментальных исследований двух изготовленных образцов интерферометра показали,

что оба образца имеют близкую температурную чувствительность спектральных откликов, которая значительно выше, чем чувствительность интерферометров на основе кварцевого стекла. Так, чувствительность смещения пика к температуре образца 1 составила порядка $42 \text{ пм}/^\circ\text{C}$, а для образца 2 – около $37 \text{ пм}/^\circ\text{C}$. Представлена математическая модель интерферометра на основе метода матриц рассеяния и передачи, позволяющая вычислять спектральные отклики интерферометров с любыми наперед заданными параметрами. Результаты моделирования согласуются с данными эксперимента и подтверждают корректность предложенной модели. К недостаткам представленного чувствительного элемента следует отнести сложность обеспечения повторяемости геометрических параметров интерферометра по существующей методике изготовления. На решение данной проблемы будут направлены дальнейшие исследования авторов. Также будут рассмотрены возможности применения других материалов для изготовления интерферометра с целью дальнейшего повышения температурной чувствительности. К достоинствам представленного интерферометра следует отнести биосовместимость, нечувствительность к влаге и электромагнитную нейтральность.

Благодарности

Изготовление датчиков проводилось при поддержке государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН.

Список литературы

1. Highly sensitive temperature sensor of fiber bragg grating on PbS-doped silica optical fiber / X. Pan, Y. Dong, J. Wen, Y. Huang, C. Deng, T. Wang // 26th International Conference on Optical Fiber Sensors, (OFS-26). Optica Publishing Group. – 2018. – Paper ThE1.
2. High-sensitivity temperature sensor based on long-period fiber grating / J. Ruan [et al.] // Optoelectronics Letters. – 2008. – Vol. 4, № 2. – P. 114–116.
3. Grattan K.T.V., Zhang Z.Y. Fiber optic fluorescence thermometry // Topics in Fluorescence Spectroscopy: Probe Design and Chemical Sensing / ed. J.R. Lakowicz. – Boston, MA: Springer US. – 1994. – P. 335–376.

4. Li J., Zhang M. Physics and applications of Raman distributed optical fiber sensing // *Light: Science & Applications*. – 2022. – Vol. 11, № 1. – P. 128.

5. Lee C.E., Taylor H.F. Fiber-optic Fabry–Perot temperature sensor using a low-coherence light source // *Journal of Lightwave Technology*. – 1991. – Vol. 9, № 1. – P. 129–134.

6. Interferometric fiber-optic temperature sensor with spiral polarization couplers / R. Cortés [et al.] // *Optics Communications*. – 1998. – Vol. 154, № 5. – P. 268–272.

7. High-temperature sensor based on Fabry–Perot interferometer in microfiber tip / Z. Chen [et al.] // *Sensors*. – 2018. – Vol. 18. – № 1. – P. 202.

8. Liu G., Han M., Hou W. High-resolution and fast-response fiber-optic temperature sensor using silicon Fabry–Pérot cavity // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23, № 6. – P. 7237–7247.

9. Highly sensitive PDMS-filled Fabry–Perot interferometer temperature sensor based on the Vernier effect / L. Hou [et al.] // *Applied Optics*. – 2019. – Vol. 58, № 18. – P. 4858–4865.

10. Ultrasensitive temperature sensor with cascaded fiber optic Fabry–Perot interferometers based on Vernier effect / J. Zhang [et al.] // *IEEE Photonics Journal*. – 2018. – Vol. 10, № 5. – P. 1–11.

11. Cao K., Liu Y., Qu S. Compact fiber biocompatible temperature sensor based on a hermetically-sealed liquid-filling structure // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25, № 24. – P. 29597–29604.

12. Applicability limits of the end face fiber-optic gas concentration sensor, based on Fabry-Perot interferometer / S.M.R.H. Hussein [et al.] // *Karbala International Journal of Modern Science*. – 2022. – Vol. 8, № 3. – P. 339–355.

13. Fano-type resonance structures based on combination of fiber Bragg grating with Fabry-Perot interferometer / A.Zh. Sakhabutdinov [et al.] // *Karbala International Journal of Modern Science*. – 2023. – Vol. 9, № 1.

14. Transfer-matrix approach to determining the linear response of all-fiber networks of cavity-QED systems / N. Németh [et al.] // *Physical Review Applied*. – 2020. – Vol. 13, № 6. – P. 064010.

15. Standard glass capillaries for laboratory research [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.wpiinc.com/var-1953-standard-glass-capillaries.html> (дата обращения: 28.07.2023).

16. Sutter instrument company – P-97 flaming/brown micropipette puller [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sutter.com/MICROPIPETTE/p-97.html> (дата обращения: 28.07.2023).
17. Фонбрюн П. Методы микроманипуляции: пер. с франц. – М.: Иностранная лит-ра, 1951. – 168 с.
18. Algorithm of FBG spectrum distortion correction for optical spectra analyzers with CCD elements / V. Anfinogentov [et al.] // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21, № 8. – P. 2817.

References

1. Pan X., Dong Y., Wen J., Huang Y., Deng C., Wang T. Highly sensitive temperature sensor of fiber bragg grating on PbS-doped silica optical fiber. *26th International Conference on Optical Fiber Sensors, (OFS-26)*. Optica Publishing Group, 2018, Paper ThE1.
2. Ruan J. et al. High-sensitivity temperature sensor based on long-period fiber grating. *Optoelectronics Letters*, 2008, vol. 4, no. 2, pp. 114-116.
3. Grattan K.T.V., Zhang Z.Y. Fiber optic fluorescence thermometry. *Topics in Fluorescence Spectroscopy: Probe Design and Chemical Sensing*. Ed. J.R. Lakowicz. Boston, MA, Springer US, 1994, pp. 335-376.
4. Li J., Zhang M. Physics and applications of Raman distributed optical fiber sensing. *Light: Science & Applications*, 2022, vol. 11, no. 1, p. 128.
5. Lee C.E., Taylor H.F. Fiber-optic Fabry–Perot temperature sensor using a low-coherence light source. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, vol. 9, no. 1, pp. 129-134.
6. Cortés R. et al. Interferometric fiber-optic temperature sensor with spiral polarization couplers. *Optics Communications*, 1998, vol. 154, no. 5, pp. 268-272.
7. Chen Z. et al. High-temperature sensor based on Fabry–Perot interferometer in microfiber tip. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 1, p. 202.
8. Liu G., Han M., Hou W. High-resolution and fast-response fiber-optic temperature sensor using silicon Fabry–Pérot cavity. *Optics Express*, 2015, vol. 23, no. 6, pp. 7237-7247.
9. Hou L. et al. Highly sensitive PDMS-filled Fabry–Perot interferometer temperature sensor based on the Vernier effect. *Applied Optics*, 2019, vol. 58, no. 18, pp. 4858-4865.

10. Zhang J. et al. Ultrasensitive temperature sensor with cascaded fiber optic Fabry–Perot interferometers based on Vernier effect. *IEEE Photonics Journal*, 2018, vol. 10, no. 5, pp. 1-11.

11. Cao K., Liu Y., Qu S. Compact fiber biocompatible temperature sensor based on a hermetically-sealed liquid-filling structure. *Optics Express*, 2017, vol. 25, no. 24, pp. 29597-29604.

12. Hussein S.M.R.H. et al. 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, no. 3, pp. 339-355.

13. Sakhabutdinov A.Zh. et al. Fano-type resonance structures based on combination of fiber Bragg grating with Fabry-Perot interferometer. *Karbala International Journal of Modern Science*, 2023, vol. 9, no. 1.

14. Németh N. et al. Transfer-matrix approach to determining the linear response of all-fiber networks of cavity-QED systems. *Physical Review Applied*, 2020, vol. 13, no. 6, p. 064010.

15. Standard glass capillaries for laboratory research, available at: <https://www.wpiinc.com/var-1953-standard-glass-capillaries.html> (accessed 28 July 2023).

16. Sutter instrument company - P-97 flaming/brown micropipette puller, available at: <https://www.sutter.com/MICROPIPETTE/p-97.html> (accessed 28 July 2023).

17. Fonbriun P. *Metody mikromanipulatsii*. Moscow: Inostrannaia literatura, 1951, 168 p.

18. Anfinogentov V. et al. Algorithm of FBG spectrum distortion correction for optical spectra analyzers with CCD elements. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 8, p. 2817.

Сведения об авторах

About the authors

АГЛИУЛЛИН Т.А.

e-mail: *taagliullin@mail.ru*

Кандидат технических наук, доцент кафедры радиопоники и микроволновых технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань.

AGLIULLIN T.A.

e-mail: *taagliullin@mail.ru*

Associate Professor of the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, Candidate of Technical Sciences, Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev – KAI, Kazan.

САМИГУЛЛИН Д.В.

e-mail: *samid75@mail.ru*

Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией биофизики синаптических процессов, Казанский институт биохимии и биофизики ФИЦ, Казанский научный центр РАН, Казань.

SAMIGULLIN D.V.

e-mail: *samid75@mail.ru*

Head of the Laboratory of Biophysics of Synaptic Processes, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Kazan Institute of Biochemistry and Biophysics, Federal Research Center Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan.

САХАБУТДИНОВА Л.А.

e-mail: *lyaisan.sahabutdinova@gmail.com*

Студент, Казанский инновационный университет им. В.Г. Тимирязова, Казань.

SAKHABUTDINOVA L.A.

e-mail: *lyaisan.sahabutdinova@gmail.com*

Student, Kazan Innovation University named after V.G. Timiryasova, Kazan.

КАИД М.Р.Т.М.

e-mail: *mkaid103@gmail.com*

Аспирант, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань.

KAID M.R.T.M.

e-mail: *mkaid103@gmail.com*

Postgraduate student, Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev – KAI, Kazan.

ВАЛЕЕВ Б.И.

e-mail: *kje.student@mail.ru*

Студент, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань.

VALEEV B.I.

e-mail: *kje.student@mail.ru*

Student, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 25.08.2023

Одобрена: 01.09.2023

Принята к публикации: 04.09.2023

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

Financing. The study was not sponsored.

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

Received: 25/08/2023

Approved: 01/09/2023

Accepted for publication: 04/09/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Волоконно-оптический датчик температуры на основе стеклянного интерферометра Фабри–Перо / Т.А. Аглиуллин, Д.В. Самигуллин, Л.А. Сахабутдинова, М.Р.Т.М. Каид, Б.И. Валеев // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 5. – С. 58–74.

Please cite this article in English as: Agliullin T.A., Samigullin D.V., Sakhabutdinova L.A., Qaid M.R.T.M., Valeev B.I. Fiber-optic temperature sensor based on glass Fabry–Perot interferometer // Applied photonics, 2023, no. 5, pp. 58-74.