

МЕТОД ДЕТЕКТИРОВАНИЯ НАНОМЕТРОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛИНЫ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СЕНСОРАХ С ПОМОЩЬЮ СЛЕДЯЩЕГО ТАНДЕМНОГО НИЗКОКОГЕРЕНТНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

© 2023 г. П. В. Волков^{а,*}, А. В. Горюнов^а, А. Ю. Лукьянов^а,
Д. А. Семиков^а, А. Д. Тертышник^а

^аИнститут физики микроструктур РАН
Россия, 603950, Нижний Новгород, ГСП-105

*e-mail: volkov@ipmras.ru

Поступила в редакцию 08.11.2022 г.

После доработки 20.12.2022 г.

Принята к публикации 24.01.2023 г.

Предложен метод детектирования изменений длины оптического резонатора, предназначенный для волоконно-оптических сенсоров, построенных по схеме интерферометра Фабри–Перо. Показана возможность детектирования колебаний длины резонатора на субнанометровом уровне в полосе частот 1.5–300 кГц. Чувствительность составила 0.3 нм по среднеквадратичному отклонению. Предложенная схема позволяет надежно выделять высокочастотные колебания на фоне медленных дрейфов длины сенсора, вызванных температурными колебаниями или деформациями.

DOI: 10.31857/S0032816223040067, EDN: SUMVEN

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается бурное развитие волоконно-оптических сенсоров различных конструкций. Большое распространение получили сенсоры, в которых чувствительным элементом является волоконный резонатор Фабри–Перо [1–3]. При внешнем воздействии в таких сенсорах изменяется оптическая длина резонатора, которая регистрируется различными методами. Широко распространенным методом регистрации является контроль положения минимумов и максимумов в спектре отраженного или прошедшего света [4–6]. В этом случае максимальная частота регистрируемых процессов ограничивается частотой опроса используемого спектрометра и редко превышает десятки килогерц.

Регистрация высокочастотных процессов возможна с помощью интерференционных методик [7–9]. В этом случае изменение длины резонатора приводит к изменению интенсивности света на выходе устройства. Основной проблемой такого подхода является настройка рабочей точки резонатора Фабри–Перо в положение максимальной чувствительности и ее удержание в этом состоянии. Основными причинами, приводящими к смещению рабочей точки и искажениям регистрируемого сигнала, являются дрейф оптической длины резонатора и дрейф длины волны источника света. Существуют различные методы борьбы с данным эффектом: подстройка длины

волны лазера [10], методы гомодинной демодуляции [11, 12] и различные методы низкокогерентной интерферометрии [13–15]. Методы низкокогерентной интерферометрии перспективны, так как позволяют вынести измеряемый объект из системы регистрации и измерять характеристики удаленных объектов, соединенных с системой регистрации оптическим волокном.

В данной работе описан метод детектирования малых колебаний с помощью следящего низкокогерентного интерферометра. Метод обладает высокой чувствительностью и широкой полосой приема, подходящей, в том числе, для регистрации акустических колебаний.

Измерительная схема представлена на рис. 1. На ней изображены последовательно соединенные с помощью оптического волокна опорный интерферометр (Int) и резонатор Фабри–Перо (FP), который является чувствительным элементом сенсора. Задача состоит в детектировании быстрых отклонений оптической длины резонатора от исходной длины D .

На фотоприемнике PD формируется сигнал, интенсивность I которого определяется автокорреляционной функцией γ широкополосного источника и разностями хода Δ_1 и $2D$, создаваемыми в опорном интерферометре и в измеряемом резонаторе Фабри–Перо соответственно:

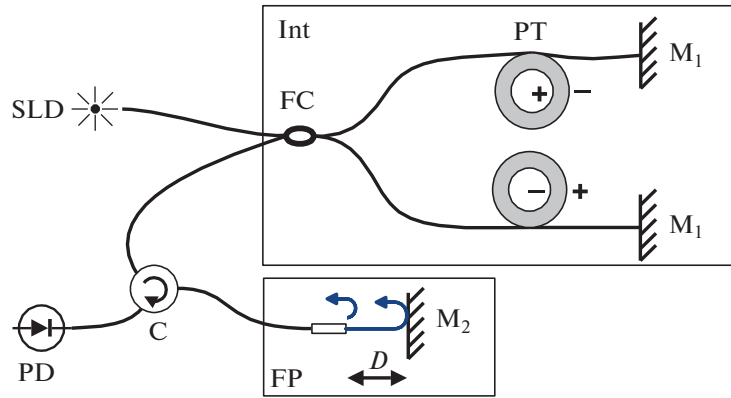


Рис. 1. Схема детектирования: SLD – широкополосный источник света; FC – светоделиватель 50 : 50; Int – опорный интерферометр; PT – пьезокерамические катушки с намотанным волокном; M_1 , M_2 – зеркала; C – оптический циркулятор; FP – резонатор Фабри–Перо; PD – фотоприемник; D – оптическая длина чувствительного элемента сенсора.

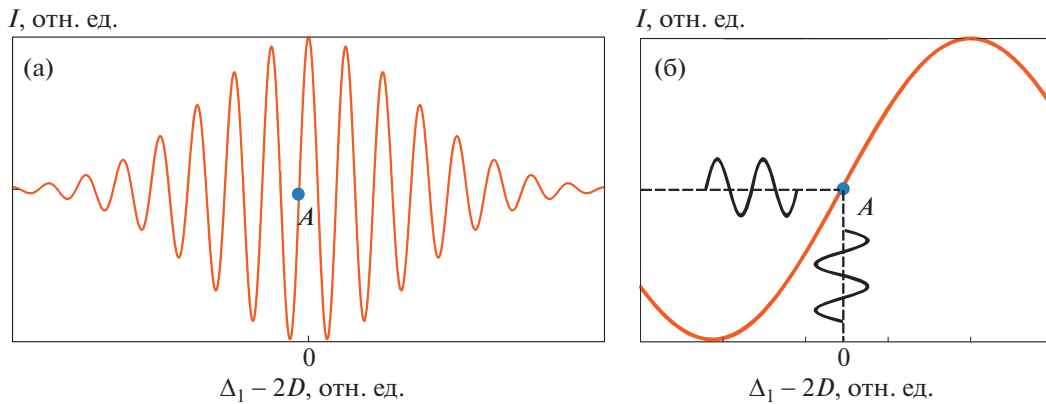


Рис. 2. Интерференционный сигнал: а – его центральная часть; б – увеличенный фрагмент. A – оптимальное положение рабочей точки.

$$I(\Delta_1, D) = I_0(1 + a\gamma(\Delta_1) + b\gamma(2D) + c\gamma(\Delta_1 + 2D) + c\gamma(\Delta_1 - 2D)), \quad (1)$$

где константы a , b и c определяются коэффициентами отражения зеркал интерферометров.

Из формулы (1) следует, что в окрестности $\Delta_1 \approx 2D$ интерференционный сигнал будет иметь вид, приведенный на рис. 2а. Как правило, температурные и деформационные дрейфы имеют характерные частоты ниже 1 кГц, в то время как частоты полезных сигналов в задачах акустоэмиссионной диагностики заметно выше 1 кГц. Поэтому оптическую длину резонатора можно представить в следующем виде:

$$D(t) = D_{low}(t) + D_{high}(t), \quad (2)$$

где $D_{low}(t)$ и $D_{high}(t)$ – низкочастотная и высокочастотная составляющие соответственно.

Если разность хода $\Delta_1(t)$ опорного интерферометра в процессе измерений подстраивать таким образом, чтобы выполнялось условие

$$k(\Delta_1(t) - 2D_{low}(t)) = (\pi/2) \pm \pi n, \quad (3)$$

где n – целое число, то малые высокочастотные колебания длины $D_{high}(t)$ будут приводить к соответствующим колебаниям интенсивности $I(\Delta_1, D)$ на выходе схемы (рис. 2б).

Для постоянного выполнения условия (3) необходимо сформировать сигнал для системы подстройки опорного интерферометра. Введем дополнительную модуляцию разности длин плеч в опорный интерферометр на частоте ω с малой амплитудой B и ошибку системы подстройки $\Delta_{err}(t)$ от оптимальной разности хода Δ_1^* , удовлетворяющей условию (3). Тогда с учетом выражения (3) интерференционный сигнал на выходе примет вид:

$$\begin{aligned} \tilde{I}(t) &= A \cos[k(\Delta_1^* + \Delta_{err}(t) - 2D_{low}(t) - \\ &\quad - 2D_{high}(t) + B \cos(\omega t))] = \\ &= A \cos[k(\Delta_{err}(t) - 2D_{high}(t) + B \cos(\omega t)) + \pi/2], \end{aligned} \quad (4)$$

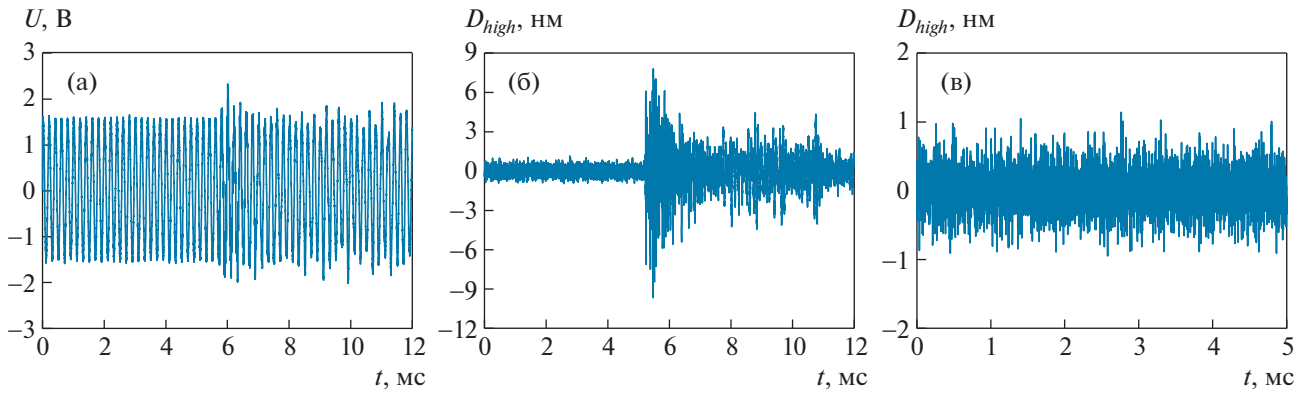


Рис. 3. Сигнал щелчка: **а** – регистрируемый фотоприемником; **б** – после ВЧ-фильтрации и нормировки на амплитуду модуляции; **в** – шумовая дорожка.

где A – константа, определяемая коэффициентами отражения зеркал интерферометров. Учитывая, что $|D_{high}(t)| \ll \lambda$ и $|B| \ll \lambda$, где λ – длина волны света, и используя разложение Якоби–Ангера и известную асимптотику функций Бесселя при малых значениях аргумента $J_i(x) \approx (x/2)^i / \Gamma(i+1)$, запишем выражение для интенсивности с точностью до членов второго порядка малости следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{I}(t) \approx & -A \sin(k\Delta_{err}(t)) ([1 - (kB/2)^2 \cos(2\omega t) + \dots] + \\ & + kD_{high}(t)[2kB \cos \omega t + \dots]) - \quad (5) \\ & - A \cos(k\Delta_{err}(t)) ([kB \cos \omega t + \dots] + 2kD_{high}(t)[1 + \dots]). \end{aligned}$$

Из формулы (5) видно, что амплитуда второй гармоники модуляции $2A(kB/2)^2 \sin(k\Delta_{err}(t))$ может быть использована в качестве управляющего сигнала подстройки опорного интерферометра, поскольку при $\Delta_{err} = 0$ она обращается в ноль. Если рабочая точка находится в оптимальном положении, то регистрируемый оптический сигнал на выходе схемы, согласно формуле (5), будет иметь вид

$$\tilde{I}(t, \Delta_{err} = 0) = -A(kB \cos \omega t + 2kD_{high}(t)). \quad (6)$$

Поскольку частота опорной модуляции известна, ее достаточно легко убрать с помощью полосовой фильтрации, при этом в формуле (6) остается только часть, пропорциональная внешнему воздействию. Поскольку амплитуда вспомогательной модуляции известна и постоянна, ее можно использовать в качестве калибровочного сигнала, позволяющего пересчитать колебания интенсивности оптического сигнала в колебания длины сенсора.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В демонстрационном эксперименте в качестве модели сенсора использовался зазор между торцом оптоволокна и закрепленным металличе-

ским зеркалом [16]. Подстройка рабочей точки интерферометра и модуляция разности фаз проводились с помощью пьезокерамических катушек, на которые было намотано по 8 м оптоволокна. Катушки были установлены в плечах интерферометра Майкельсона. Модуляция опорного интерферометра осуществлялась с частотой 5 кГц и амплитудой $\lambda/80$. Детектировались короткие щелчки по креплению зеркала.

На рис. 3а представлен регистрируемый фотоприемником сигнал, в котором присутствуют опорная модуляция и полезный сигнал. Полезный сигнал, представленный на рис. 3б, получен из полного сигнала с помощью цифрового режекторного фильтра с центральной частотой подавления 5 кГц. Абсолютные значения изменения длины резонатора Фабри–Перо были получены нормировкой на амплитуду сигнала модуляции. На рис. 3в приведен крупно участок шумовой дорожки. Ширина полосы приема составляла 300 кГц и ограничивалась сверху исключительно полосой усилителя фотоприемника. Чувствительность составила 0.3 нм по среднеквадратичному отклонению (рис. 3в) в полосе частот 1.5–300 кГц.

В результате медленных дрейфов сенсора и опорного интерферометра, а также воздействия на них низкочастотных вибраций положение рабочей точки смещается из центра линейного участка передаточной функции. Подстройка рабочей точки и удержание ее в оптимальном положении осуществлялись в непрерывном режиме с помощью цепи обратной связи, сигнал которой формировался по амплитуде и фазе второй гармоники модуляции. В спектре полного сигнала, представленного на рис. 4, отсутствуют колебания в диапазоне 0–1.5 кГц, которые подавляет отрицательная обратная связь. Кроме того, в спектре отсутствует вторая гармоника модуляции, что свидетельствует о том, что рабочая точка находится на линейном участке.

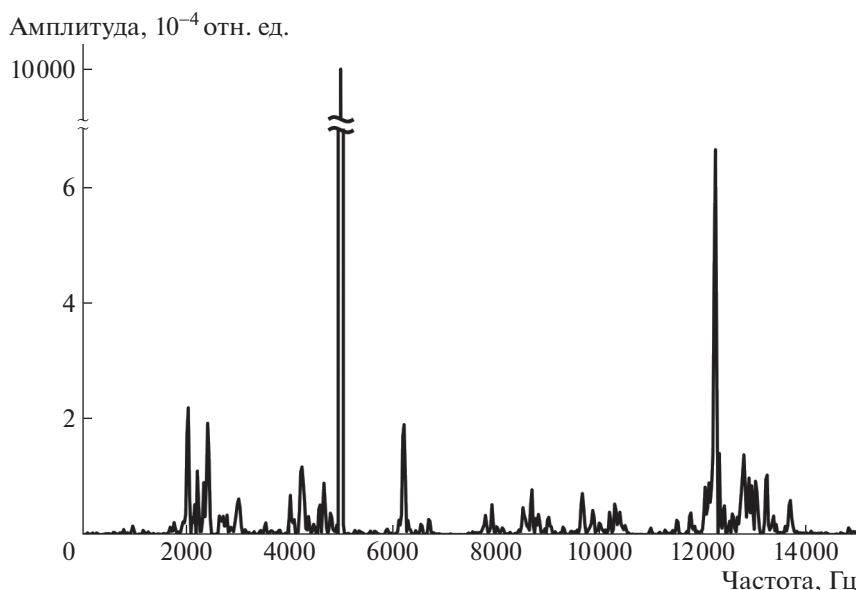


Рис. 4. Спектр регистрируемого фотоприемником сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен метод детектирования изменений длины оптического резонатора, предназначенный для волоконно-оптических сенсоров на основе интерферометра Фабри–Перо. Показана возможность детектирования колебаний длины резонатора на субнанометровом уровне в полосе частот 1.5–300 кГц. Схема позволяет надежно выделить высокочастотные колебания на фоне медленных дрейфов длины сенсора, вызванных деформациями или изменениями температуры, и имеет линейную характеристику. Предложенный подход может быть использован в различных задачах, в частности, для виброакустической диагностики, а также контроля других быстропротекающих процессов. Схема не чувствительна к изменениям интенсивности в результате изгибов оптического волокна и изменениям потерь на разъемах, поскольку полезный сигнал нормируется на амплитуду модуляции. Это позволяет получать абсолютные значения изменения длины резонатора Фабри–Перо. К достоинствам схемы следует отнести относительно низкую стоимость, а также возможность увеличения числа измерительных каналов. Данная схема может быть применена для опроса сенсоров на основе оптических интерферометров различных типов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики микроструктур Российской академии наук (тема № 0030-2021-0023). Использовалось оборудование центра коллективного пользования “Физика и технология микро- и наноструктур” Ин-

ститута физики микроструктур Российской академии наук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang Z., Liao C., Tang J., Bai Z., Guo K., Hou M., He J., Wang Y., Liu S., Zhang F., Wang Y. // *J. Light Technol.* 2017. V. 35. № 18. P. 4067. <https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2710210>
2. Ma J., Jin W., Xuan H., Wang C., Ho H.L. // *Opt. Lett.* 2014. V. 39. № 16. P. 4769. <https://doi.org/10.1364/OL.39.004769>
3. Liu Q., Jing Z., Liu Y., Li A., Xia Z., Peng W. // *Opt. Express.* 2019. V. 27. № 26. P. 38191. <https://doi.org/10.1364/OE.381197>
4. Yu H., Luo Z., Zheng Y., Ma J., Li Z., Jiang X. // *J. Light Technol.* 2019. V. 37. № 10. P. 2261. <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2901845>
5. Tosi D. // *J. Light Technol.* 2016. V. 34. № 15. P. 3622. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2575041>
6. Yang Y., Wang Y., and Chen K. // *Opt. Express.* 2021. V. 29. № 5. P. 6768. <https://doi.org/10.1364/OE.415750>
7. Digonnet M.J.F., Akkaya O.C., Kino G.S., Solgaard O. // *Imaging Applied Optics Technical Digest.* 2012. Stu3F. 1. <https://doi.org/10.1364/SENSORS.2012.Stu3F.1>
8. Zhou C., Letcher S.V., Shukla A. // *The J. Acoust. Soc. Am.* 1995. V. 98. № 2. P. 1042. <https://doi.org/10.1121/1.413669>
9. Akkaya O.C., Akkaya O., Digonnet M.J.F., Kino G.S., Solgaard O. // *J. Microelectromechanical Syst.* 2012. V. 21. № 6. P. 1347. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2012.2196494>
10. Kilic O., Digonnet M., Kino G., Solgaard O. // *Meas. Sci. Technol.* 2007. V. 18. № 10. P. 3049. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/10/S01>

11. *Dandridge A., Tveten A., Giallorenzi T.* // IEEE J. Quantum Electron. 1982. V. 18. № 10. P. 1647.
12. *Wang L., Zhang M., Mao X., Liao Y.* // Interferometry XIII: Techniques and Analysis. 2006. V. 62921E. <https://doi.org/10.1117/12.678455>
13. *Chen K., Yu Z., Gong Z., Yu Q.* // Opt. Lett. 2018. V. 43. № 20. P. 5038. <https://doi.org/10.1364/OL.43.005038>
14. *Volkov P., Semikov D., Goryunov A., Luk'yanov A., Tertyshnik A., Vopilkin E., Krayev S.* // Sensors Actuators A: Phys. 2020. V. 316. P. 112385. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112385>
15. *Volkov P., Goryunov A., Luk'yanov A., Tertyshnik A., Baidakova N., Luk'yanov I.* // Optik. 2013. V. 124. № 15. P. 1982. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2012.06.043>
16. *Volkov P., Lukyanov A., Goryunov A., Semikov D., Vopilkin E., Kraev S., Okhapkin A., Tertyshnik A., Arkhipova E.* // Sensors. 2021. V. 21. № 21. P. 7343. <https://doi.org/10.3390/s21217343>