

09.5

Рефлектометрическое измерение температуры с использованием оптоволоконной структуры „одномод–многомод–одномод“

© А.Ю. Игуменов^{1,2}, И.В. Мельников^{1,3}, А.А. Афанасьев¹, С.С. Попова¹,
С.Н. Лукиных^{2,4}, И.А. Тамбасов^{5,6}

¹ Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия

² ООО „Т8“, Москва, Россия

³ Институт динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН, Москва, Россия

⁴ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

⁶ ООО „НПК “Спецтехнаука“, Красноярск, Россия

E-mail: igumenov.au@mipt.ru

Поступило в Редакцию 1 июня 2022 г.

В окончательной редакции 14 июля 2022 г.

Принято к публикации 14 июля 2022 г.

Установлена возможность использования волоконно-оптической структуры „одномод–многомод–одномод“ для удаленного измерения температуры с помощью оптического рефлектометра. Проведены эксперименты по измерению температуры с помощью структуры с длиной многомодового волокна 10 mm в диапазоне температур от 30 до 70°C на длинах волн 1310 и 1550 nm. Общая длина одномодовой оптоволоконной линии для рефлектометрических измерений составляла 20 km.

Ключевые слова: волоконная оптика, оптоволоконные датчики, рефлектометрия оптических волокон, многомодовая интерференция.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.17.53281.19267

Оптоволоконные структуры „одномод–многомод–одномод“ (singlemode–multimode–singlemode, SMS) имеют широкий спектр приложений в сенсорике. Эти структуры чувствительны к температуре, деформации, электромагнитному и химическому воздействию. Сенсорные свойства основаны на явлении самоотражения, которое можно наблюдать в волноводах, поддерживающих несколько мод [1–6]. Этот эффект открывает новый технологический путь для разработки фотонных интегральных устройств, основанных на эффектах многомодовой интерференции (multimode interference, MMI) [7,8]. Примерами таких устройств являются ответвители/делители N на N из различных материалов, асимметричные делители для контроля мощности, поляризационные светоделители и устройства на основе биополимерных волноводов. Что касается волоконно-оптической технологии, явление самоинтерференции изначально использовалось для оптимизации передачи по оптоволоконным линиям. Позже были предложены более гибкие функциональные оптические цельноволоконные устройства, такие как перестраиваемые волоконные линзы [9], полосовые фильтры [10], волоконные лазеры с многомодовым отрезком на конце одномодового волокна для подавления отражения [11–14], а также широкий спектр датчиков и перестраиваемых лазеров [15]. MMI-устройства на основе оптического волокна имеют широкий спектр сенсорных приложений, поскольку они чувствительны к показателю преломления, температуре, смещению и деформации. Эти физические переменные

напрямую определяют спектральную характеристику MMI-устройства. Существует также возможность измерения механических переменных, таких как вибрация и давление; электромагнитных переменных, таких как напряжение, электрический ток и магнитное поле; химических переменных, таких как относительная влажность и концентрация газа; оптических переменных, таких как длина волны [16].

Целью настоящей работы является исследование возможности использования SMS-структуры для удаленного измерения температуры с помощью оптического рефлектометра. Предлагаемый метод прост, экономичен в реализации, не требует сложной обработки экспериментальных результатов в отличие от распределенных температурных датчиков, основанных на фазово-чувствительной рефлектометрии [17,18] и волоконных брэгговских решетках [19,20].

В работе представлена стандартная структура, состоящая из одномодового волокна (singlemode fiber, SMF), содержащего участок многомодового волокна (multimode fiber), как схематично показано на рис. 1, *a*. Волокна сварены соосно, т.е. без целенаправленного введения бокового смещения. Использовано многомодовое волокно 50/125 μm OVC (Саранск) длиной 10 mm и одномодовое волокно G652D YOFC.

На рис. 1, *b* показана экспериментальная установка, используемая для измерения температуры с помощью волоконно-оптического датчика температуры, которая состоит из SMS-структуры, оптического волокна, ис-

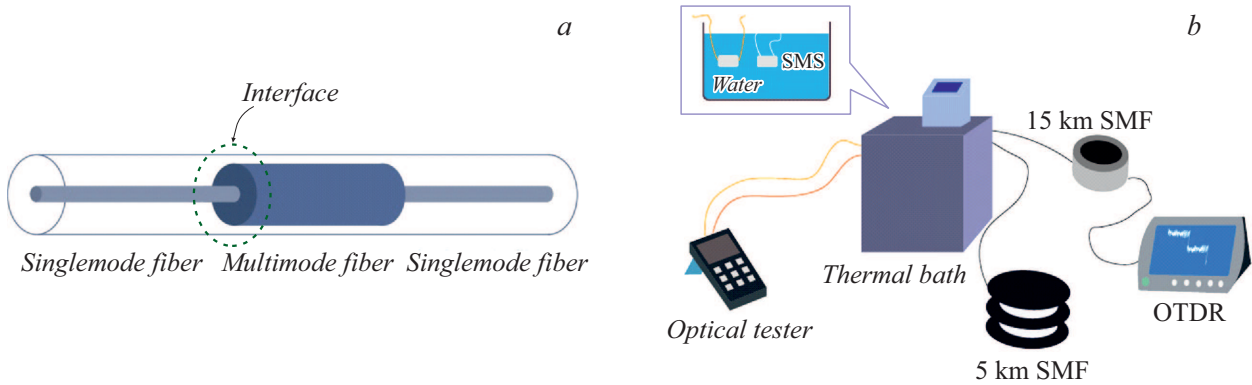


Рис. 1. Схема SMS-структуры (a) и схема экспериментальной установки для измерения температуры воды (b).

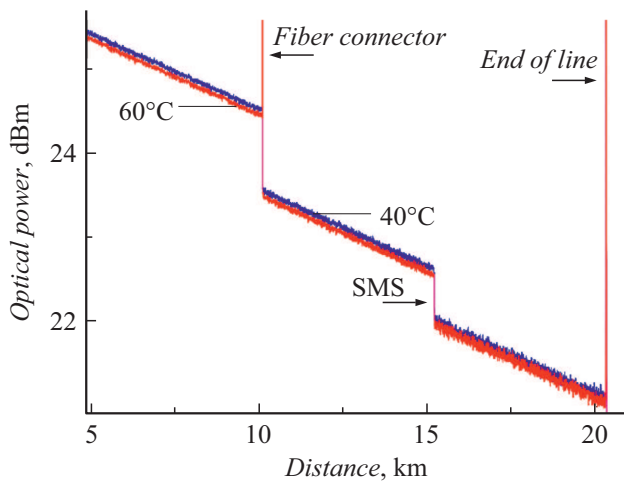


Рис. 2. Рефлектограмма линии 15 km SMF–SMS–5 km SMF. Длина волны 1550 nm, длительность импульса 20 ns.

точников излучения и измерителей оптической мощности, водяного термостата Witeg WCR-P12. В качестве измерительного устройства со встроенным источником излучения использован портативный OTDR (optical time domain reflectometer) Anritsu MT9085A, позволяющий измерять потери мощности на неоднородностях волоконно-оптической линии связи, расположенных на большом расстоянии. OTDR отображает оптическую мощность светового сигнала, возвращаемого обратным рассеянием в месте события в оптическом волокне, в зависимости от расстояния (рис. 2). Были использованы источники излучения с длинами волн 1310 и 1550 nm для измерения оптической мощности излучения, проходящего через SMS-структуры. В дополнение к OTDR применялся оптический тестер EXFO FOT 600 с теми же длинами волн. В экспериментах использовались две SMS-структуры одинаковой конструкции: одна была под-

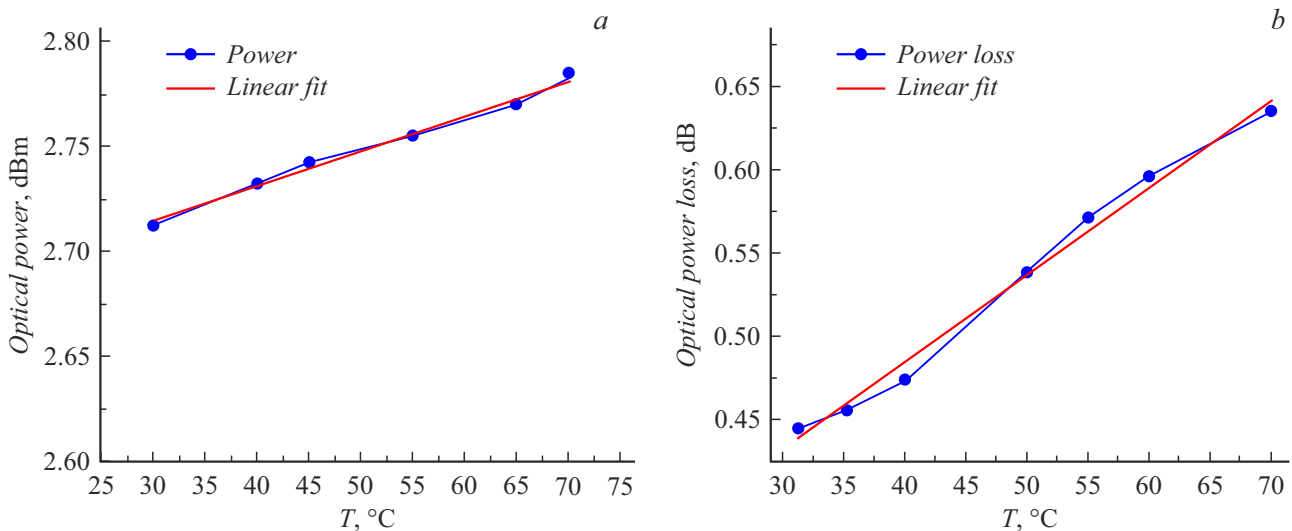


Рис. 3. a — зависимость оптической мощности от температуры термостата, длина волны 1550 nm, измерение оптическим тестером; b — зависимость потерь оптической мощности от температуры термостата, длина волны 1310 nm, измерение оптическим рефлектометром.

ключена к оптическому тестеру, вторая — к рефлектометру.

По результатам экспериментов определена зависимость между температурой воды и мощностью излучения, проходящего через волоконно-оптический датчик (рис. 3). Механизм изменения мощности излучения, проходящего через SMS-структуру, заключается в изменении длины отрезка многомодового волокна при его нагревании, что вызывает смещение максимумов и минимумов многомодовой интерференции. Соответственно изменяется мощность излучения, попадающего в апертуру одномодового волокна. Эти зависимости могут быть аппроксимированы линейными функциями с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.99$. Используя полученную математическую зависимость, можно определить температуру воды по измеренным потерям оптической мощности на структуре SMS в диапазоне температур от 30 до 70°C с относительной погрешностью не более 4.5%.

Предложен прототип волоконно-оптической детектирующей системы, основанной на SMS-структуре. Датчик имеет простую структуру, изготовлен из доступных компонентов, основан на простом принципе измерения, невосприимчив к электромагнитным и радиочастотным помехам и достоверно реагирует на измерение ключевых параметров среды в течение очень длительного промежутка времени. По результатам проведенных экспериментов можно определить взаимосвязь между температурой воды и выходным сигналом волоконно-оптического датчика температуры. Используя математическую зависимость, можно определить температуру воды, измеряя потери оптической мощности на SMS-структуре в диапазоне температур от 30 до 70°C. OTDR позволяет проводить удаленные измерения, когда SMS-структура помещена в длинную волоконно-оптическую линию.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H.F. Talbot, Lond. Edinb. Dubl. Phil. Mag. J. Sci., Ser. 3, **9**, 401 (1836). DOI: 10.1080/14786443608649032
- [2] Lord Rayleigh, Lond. Edinb. Dubl. Phil. Mag. J. Sci., Ser. 5, **11**, 196 (1881). DOI: 10.1080/14786448108626995
- [3] J.T. Winthrop, C.R. Worthington, J. Opt. Soc. Am., **55**, 373 (1965). DOI: 10.1364/JOSA.55.000373
- [4] W.D. Montgomery, J. Opt. Soc. Am., **57**, 772 (1967). DOI: 10.1364/JOSA.57.000772
- [5] M.V. Berry, S. Klein, J. Mod. Opt., **43**, 2139 (1996). DOI: 10.1080/09500349608232876
- [6] T. Saastamoinen, J. Tervo, P. Vahimaa, J. Turunen, J. Opt. Soc. Am. A, **21**, 1424 (2004). DOI: 10.1364/JOSAA.21.001424
- [7] L.B. Soldano, E.C.M. Pennings, J. Lightwave Technol., **13**, 615 (1995). DOI: 10.1109/50.372474
- [8] K. Okamoto, *Fundamentals of optical waveguides* (Academic Press, London, 2006).
- [9] W.S. Mohammed, A. Mehta, E.G. Johnson, J. Lightwave Technol., **22**, 469 (2004). DOI: 10.1109/JLT.2004.824379
- [10] W.S. Mohammed, P.W.E. Smith, X. Gu, Opt. Lett., **31**, 2547 (2006). DOI: 10.1364/OL.31.002547
- [11] K. Krupa, A. Tonello, B. Shalaby, A. Barthélémy, G. Millot, S. Wabnitz, V. Couderc, Nature Photon., **11**, 237 (2017). DOI: 10.1038/nphoton.2017.32
- [12] A.V. Kir'yanov, S.M. Klimentov, I.V. Mel'nikov, A.V. Shestakov, Opt. Commun., **282**, 4759 (2009). DOI: 10.1016/j.optcom.2009.08.062
- [13] A.A. Machnev, P.B. Novozhylov, A.A. Poimanov, I.V. Mel'nikov, Opt. Mater. Express, **3**, 1608 (2013). DOI: 10.1364/OME.3.001608
- [14] N.S. Balakleyskiy, A.A. Machnev, I.V. Mel'nikov, in *Nonlinear optics, OSA Technical Digest (online)* (Optica Publ. Group, 2017), paper NTu3A.6. DOI: 10.1364/NLO.2017.NTu3A.6
- [15] D.A. May-Arrijoja, J.E. Antonio-Lopez, J.J. Sánchez-Mondragón, P. LiKamWa, in *Advanced lasers*, ed. by O. Shulika, I. Sukhoivanov (Springer, Cham, 2015), p. 19. DOI: 10.1007/978-94-017-9481-7_2
- [16] J.R. Guzmán-Sepúlveda, R. Guzmán-Cabrera, A.A. Castillo-Guzmán, Sensors, **21**, 1862 (2021). DOI: 10.3390/s21051862
- [17] K. Harris, D. White, D. Melanson, C. Samson, T.M. Daley, Int. J. Greenhouse Gas Control, **50**, 248 (2016). DOI: 10.1016/j.ijggc.2016.04.016
- [18] S. Wang, X. Fan, Q. Liu, Z. He, Opt. Express, **23**, 33301 (2015). DOI: 10.1364/OE.23.033301
- [19] Q. Jiang, Y.-Sh. Kang, Optoelectron. Lett., **6**, 306 (2010). DOI: 10.1007/s11801-010-0011-x
- [20] H. Kang, D. Kim, M. Song, Proc. SPIE, **8439**, 84392C (2012). DOI: 10.1117/12.923271