

УДК: 681.586.5

Волоконно-оптический рефрактометрический датчик

И.Р. Садыков, О.Г. Морозов, Т.С. Садеев, О.А. Степущенко, О.Е. Кокурина, Е.Ю. Арбузова

Аннотация

В работе представлены результаты математического и физического моделирования волоконно-оптического рефрактометрического датчика на основе ВРБ с фазовым π -сдвигом.

Ключевые слова

волоконная решетка Брэгга; π -сдвиг; рефрактометрия

Введение

Волоконно-оптические рефрактометрические методы определения составов жидкостей на основе волоконных решеток Брэгга (ВРБ) широко изучаются рядом исследовательских групп [1-2]. Однако, по причине использования дорогостоящей и крупногабаритной аппаратуры, эти разработки так и не нашли широкого применения. Решить указанные недостатки можно с помощью модуляционных методов зондирования ВРБ-датчиков на основе двухчастотного метода [3], реализованного в электрооптическом модуляторе Маха-Цендера [4]. Использование данных методов и средств позволит значительно уменьшить габаритные размеры прибора и найти такие области применения, как бортовой датчик оценки качества топлива или биотоплива автомобиля, а применение в качестве чувствительного элемента рефрактометрического датчика ВРБ с фазовым π -сдвигом увеличит разрешающую способность сенсора [5].

Цель исследования: исследовать волоконно-оптический рефрактометрический датчик на воздействие коэффициента преломления и температуры различных жидкостей

Математическое моделирование

Система уравнений рефрактометрического датчика на базе ВРБ с фазовым π -сдвигом имеет вид [6]:

$$\begin{cases} \lambda_{ВРБ1} = \lambda_{БН} \left(\alpha + \frac{1}{n_{эффН}} \cdot \frac{\partial n_{эффН}}{\partial T} \right) T \\ \lambda_{ВРБ2} = \lambda_{БВ} \left(\alpha + \frac{1}{n_{эффВ}} \cdot \frac{\partial n_{эффВ}}{\partial T} \right) T + 2n_{эффВ} \Lambda' \end{cases} \quad (1)$$

где $\lambda_B = 2n_{эфф}\Lambda$ - длина волны Брэгга, $n_{эффН}$ и $n_{эффВ}$ - эффективный показатель преломления основной моды невозмущенного и вытравленного волокна соответственно, $\alpha = \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{\partial \Lambda}{\partial T}$ - коэффициент теплового расширения кварцевого стекла, $\xi = \frac{\partial n_{эфф}}{\partial T}$ - термооптический коэффициент, ΔT - изменение температуры, $n_{ср}$ - изменение коэффициента преломления среды, окружающего датчик.

Коэффициент преломления окружающей среды определяется по значению эффективного показателя преломления вытравленного волокна и величине вытравленной сердцевины волокна:

$$n_{ср} = n_c \cdot \sqrt{1 - \frac{1 - n_{эффВ}^2 \cdot n_c^2}{\frac{U^2}{V^2}}}, \quad (2)$$

где n_c - коэффициент преломления сердцевины оптического волокна, U - параметр основной моды в сердцевине волокна, V - нормированная частота.

Моделирование рефрактометрического датчика проводилось на основе модифицированного метода приближения Гаусса [7]. Результат моделирования эффективного показателя преломления основной моды оптического волокна для случаев ВРБ с полностью вытравленной и частично вытравленной оболочкой для разных диаметров оболочки представлены на рисунке 1.

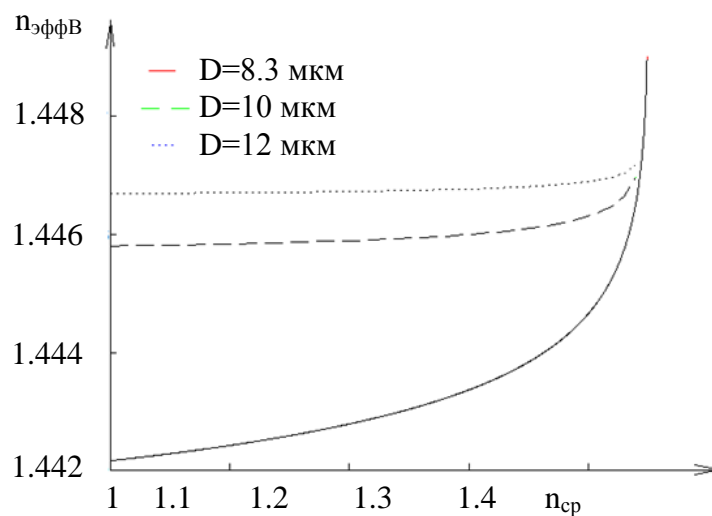


Рисунок 1. Зависимость изменения эффективного показателя преломления оптического волокна от изменения окружающего коэффициента преломления

Как видно из графика, в диапазоне изменения внешнего коэффициента преломления 1-1,3 наблюдается слабая, почти линейная зависимость эффективного показателя преломления. Причиной этому является возникновение многомодового режима, вызванного большой относительной разностью показателей преломления сердцевины и оболочки круглого волновода, а, следовательно, и высокого значения нормированной частоты V . Как известно, для поддержания одномодового режима в волокне необходимо выполнение условия [8]:

$$V \leq 2.405, \quad (3)$$

которое выполняется при приближении значения внешнего коэффициента преломления к значению показателя преломления оболочки оптического волновода. По этой причине на участке 1.3-1.45 наблюдается увеличение чувствительности к изменению внешнего коэффициента преломления.

Графики изменения эффективного показателя преломления для волокна с частично вытравленной оболочкой демонстрируют худшую чувствительность по сравнению с датчиком, у которого полностью вытравлена оболочка. По нашим расчетам и расчетам других авторов [9], ВРБ прекращает реагировать на изменение внешнего коэффициента преломления при достижении величины диаметра оболочки 20 мкм.

Результат моделирования сдвига центральной длины волны ВРБ от изменения внешнего коэффициента преломления показана на рисунке 2.

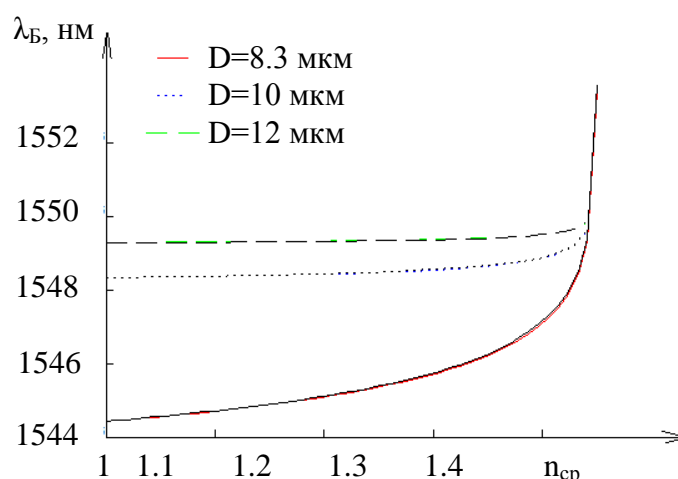


Рисунок 2. Зависимость сдвига центральной длины волны ВРБ от изменения коэффициента преломления среды, окружающей датчик

Результаты демонстрируют «красный» сдвиг центральной длины волны ВРБ в зависимости от изменения коэффициента преломления среды вокруг датчика. На основе

данных графиков можно сделать вывод о том, что полное травление оболочки в рефрактометрическом датчике является предпочтительным перед частично вытравленной по причине большей чувствительности на изменение внешнего коэффициента преломления.

График зависимости сдвига центральной длины волны Брэгга от изменения коэффициента преломления окружающей среды для различной температуры жидкости представлен на рисунке 3. Из графика видно, что сдвиг происходит в пределах полосы с шириной несколько нанометров. Данное обстоятельство предъявляет свое требование к системе зондирования рефрактометрического датчика, заключающееся в возможности перестройки источника излучения по длине волны.

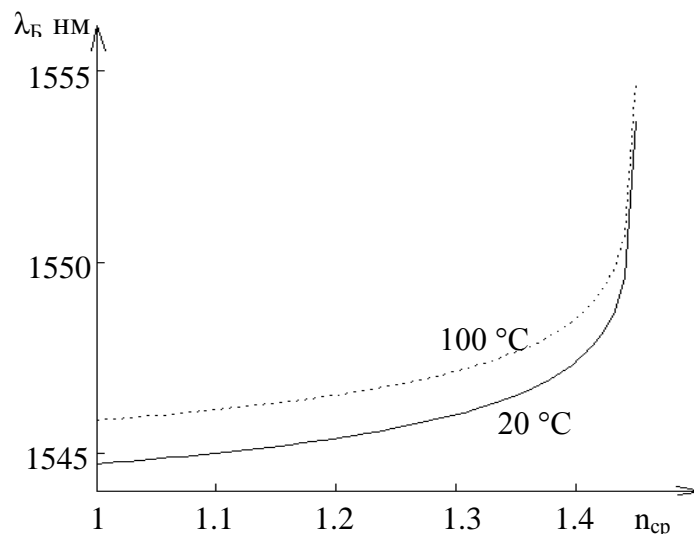


Рисунок 3. Зависимости сдвига центральной длины волны Брэгга от изменения коэффициента преломления окружающей среды для различных температур вещества

Моделирование волоконно-оптического рефрактометрического датчика на основе ВРБ с фазовым π -сдвигом для определения концентрации изопропилового спирта в воде проводилось по формуле (4) [10]:

$$n_{ср} = \sqrt{k \cdot n_{IPA}^2 + (1 - k) \cdot n_{вода}^2}, \quad (4)$$

где k - молярное отношение раствора изопропилового спирта, n_{IPA} - показатель преломления изопропилового спирта, $n_{вода}$ - показатель преломления воды. Результат моделирования представлен на рис. 4.

Зависимость, изображенная на рис. 4, является прямолинейной, наблюдается смещение центральной длины волны ВРБ с π -сдвигом в «красную» область по мере увеличения концентрации изопропилового спирта в растворе. При аппроксимации данной характеристики полученный отклик рефрактометрического датчика составляет $\Delta\lambda/\Delta n = 13,56$

нм, что, по предварительным оценкам, позволит говорить о детектировании изменений коэффициента преломления, при нестабильности длины волны источника зондирующего излучения в сотни кГц (8×10^{-3} нм), на уровне 6×10^{-7} .

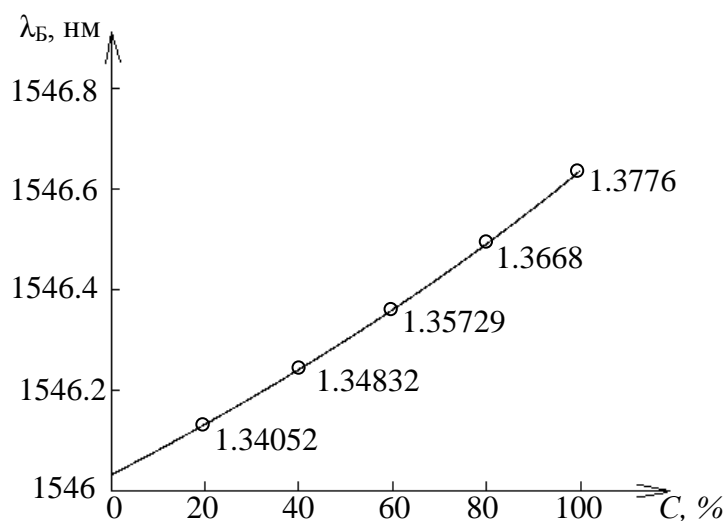


Рис. 4. Сдвиг центральной длины волны ВРБ с π -сдвигом в зависимости от изменения концентрации изопропилового спирта при постоянной температуре

Экспериментальная часть

Процесс травления ВРБ проводился в два этапа: процесс грубого травления в 40% растворе фторгидридной кислоты HF, затем плавное травление в 5% растворе HF. Промежуточный результат травления оптического волокна с диаметром оболочки 60 мкм представлен на рисунке 5,а.

Экспериментальная установка представлена на рисунке 5,б. Так как ВРБ с фазовым π -сдвигом отличается от обычной ВРБ только наличием полосы пропускания в спектре отражения, а принцип чувствительности остается неизменным, то в данном эксперименте была использована узкополосная ВРБ.

Особенностью ВРБ является его комплексный отклик на одновременное воздействие как коэффициента преломления жидкости, так и его температуры. Компенсация температурного воздействия в рефрактометрическом датчике основывалась на использовании двух ВРБ с π -сдвигом - вытравленной и невозмущенной - расположенных на одном волокне и находящихся в непосредственном контакте с анализируемым веществом [11]. Компенсация температурного воздействия происходит за счет вычитания из комплексного отклика вытравленной ВРБ, чувствительной к изменению температуры и коэффициента преломления, отклика от невозмущенной ВРБ, чувствительной только к температурному воздействию.

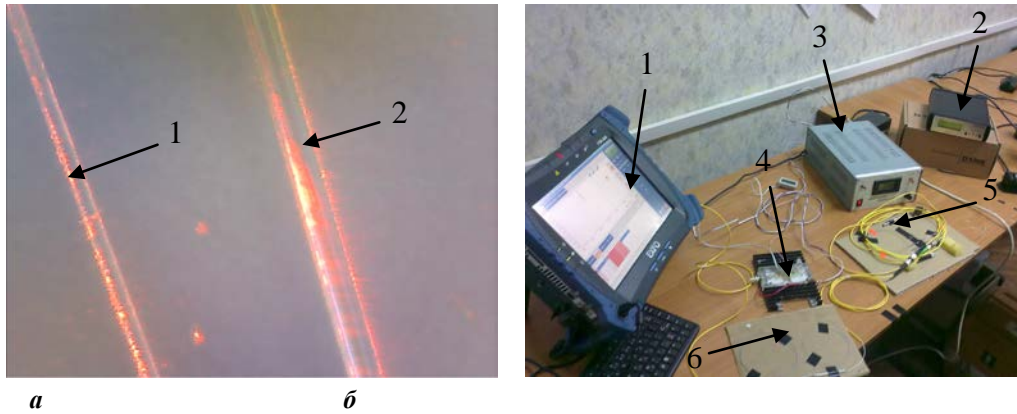


Рисунок 5. *a* - результат травления оптического волокна: 1 - вытравленное волокно, $d=60$ мкм, 2 - невозмущенное волокно, $d=125$ мкм;

б - экспериментальная установка по измерению коэффициента преломления и температуры жидкости. 1 - оптический анализатор спектра, 2 - источник оптического излучения, 3 - контроллер температуры в ванне с жидкостью, 4 - ванна с анализируемым веществом, 5 - циркулятор, 6 - ВРБ.

Результат численного эксперимента по измерению коэффициента преломления со скомпенсированным воздействием температуры для некоторых марок автомобильных бензинов и органических соединений представлен на рисунках 6 и 7. Измерение проводилось в лабораторных условиях с флуктуацией температуры не более 2-3 °С.

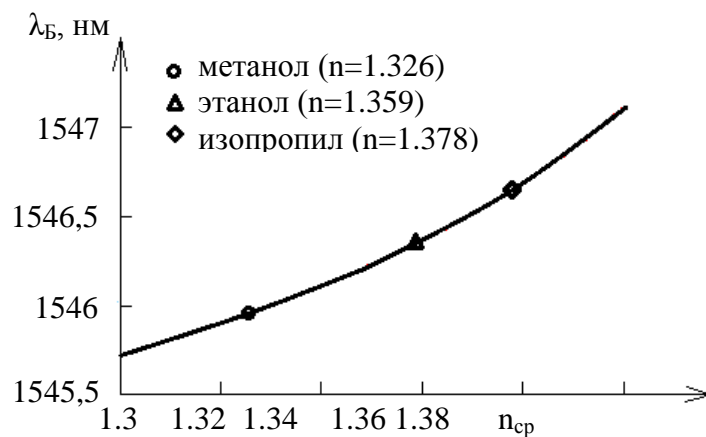


Рисунок 6. Зависимость сдвига центральной длины волны от изменения коэффициента преломления некоторых органических соединений

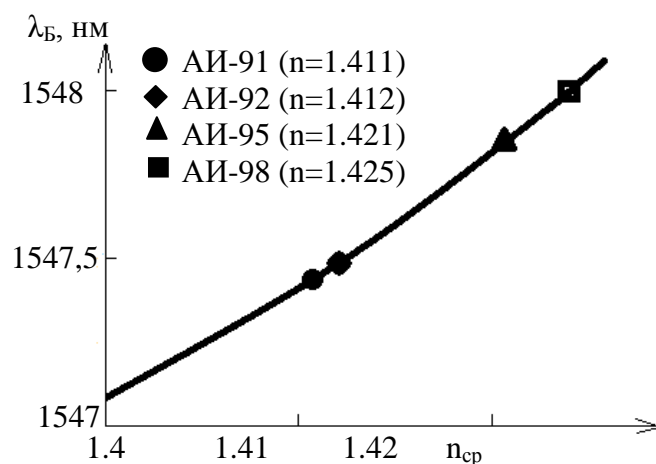


Рисунок 7. Зависимость сдвига центральной длины волны ВРБ от изменения коэффициента преломления некоторых марок автомобильных бензинов

Результаты демонстрируют «красный» сдвиг центральной длины волны ВРБ относительно метанола ($n=1.326$), этанола ($n=1.359$) и изопропилового спирта ($n=1.378$) и автомобильных бензинов АИ-91 ($n=1.411$), АИ-92 ($n=1.415$), АИ-95 ($n=1.421$) и АИ-98 ($n=1.425$).

Проведению эксперимента в полевых условиях будет соответствовать характеристика изменения температуры изображенная на рисунке 8. Измерение температуры проводилось невозмущенной ВРБ при 100% концентрации изопропилового спирта.

Полученная температурная зависимость имеет прямолинейный вид, наблюдается сдвиг центральной длины волны Брэгга в длинноволновую область при увеличении температуры вещества.

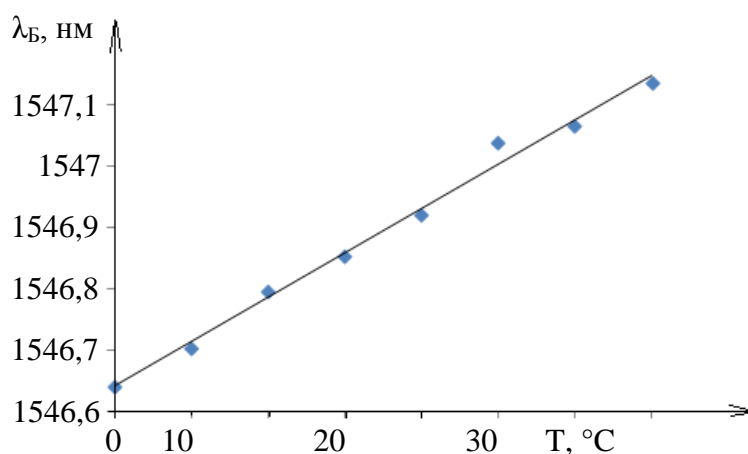


Рисунок 8. Зависимость сдвига центральной длины волны Брэгга от температуры

Для определения коэффициента преломления жидкости по двум откликам ВРБ необходимо решить систему уравнений относительно n_{cp} (1):

$$\begin{cases} T = \frac{\lambda_{ВРБ1}}{\lambda_{БН} \left(\alpha + \frac{1}{n_{эффН}} \cdot \frac{\partial n_{эффН}}{\partial T} \right)} \\ n_{эффВ} = \frac{\lambda_{ВРБ2}}{2\Lambda \left[\left(\alpha + \frac{1}{n_{эффВ}} \cdot \frac{\partial n_{эффВ}}{\partial T} \right) T + 1 \right]} \end{cases}, \quad (5)$$

Для определения концентрации изопропилового спирта необходимо решить уравнение (4) относительно величины концентрации раствора k . Решение уравнения имеет следующий вид:

$$k = \frac{n_{\text{вода}}^2 - n_{\text{ср}}^2}{n_{\text{вода}}^2 - n_{\text{IPA}}^2}, \quad (6)$$

Заключение

В данном исследовании было проведено математическое и физическое моделирование волоконно-оптического рефрактометрического датчика. Получены математические и экспериментальные зависимости сдвига центральной длины волны Брэгга от изменения коэффициента преломления вещества, окружающего датчик. Результаты проведенного научного исследования убедительно доказывают возможность создания рефрактометрического датчика на основе ВРБ с фазовым сдвигом π с высокими метрологическими характеристиками и низкой стоимостью.

Работа выполнена в рамках государственного задания на оказание услуг (выполнение работ) по организации научных исследований, выполняемых ФГБОУ ВПО «КНИТУ-КАИ» на кафедре телевидения и мультимедийных систем и в научно-исследовательском институте прикладной электродинамики, фотоники и живых систем (программа «Симметрия»).

Библиографический список

1. Huang, X.-F.. Design and characteristics of refractive index sensor based on thinned and microstructure fiber Bragg grating / X.-F. Huang et. al. // Applied Optics. - V. 47. - № 4. - 2008. - p. 504-511.
2. Coradin, F. K. Etched fiber Bragg gratings sensors for water-ethanol mixtures: a comparative study / F.K. Coradin, G.R.C. Possetti, R.C. Kamikawachi, M. Muller, J.L. Fabris // Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications. - V. 9. - № 2. - 2010. - p. 131-143.

3. Morozov, O. G. Methodology of symmetric double frequency reflectometry for selective fiber optic structures/ O. G. Morozov, O. G. Natanson, D. L. Aybatov et al. // Proceedings of SPIE. – 2008. – V. 7026. – P. 70260I.

4. Садеев Т.С. Спектральные характеристики фотонных фильтров микроволновых сигналов на основе амплитудных электрооптических модуляторов / Т.С. Садеев, О.Г. Морозов // Вестник МарГТУ. Серия радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2010. – Т.10 - №3. – С.22 – 30.

5. Морозов О.Г. Модуляционные методы измерений в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе волоконных решеток Брэгга с фазовым сдвигом / О. Г. Морозов, О.А. Степушенко, И.Р. Садыков // Вестник МарГТУ. Серия радиотехнические и инфокоммуникационные системы- 2010. - Т. 10 - №3. - с. 3-13.

6. A. Iadicicco. Structured Fiber Bragg Gratings for Sensing Applications / A. Iadicicco, A. Cusano, S. Campopiano, A. Cutolo, M. Giordano // 1st International Conference on Sensing Technology. - 2005.

7. Андреев В.А., Бурдин А.В. Многомодовые оптические волокна. Теория и приложения на высокоскоростных сетях связи. Монография. - М.: Радио и связь. -2004. -248 с.

8. А. Снайдер, Дж. Лав. Теория оптических волноводов. - М.: Радио и Связь. - 1987.- 213 с.

9. Luyckx, G. Strain Measurements of Composite Laminates with Embedded Fibre Bragg Gratings: Criticism and Opportunities for Research / G. Luyckx , E. Voet, N. Lammens, J. Degrieck // Sensors. - 2011. - V. 11. - p. 384-408.

10. Liang, W. Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors / W. Liang, Y. Huang, Y. Xu, R. K. Lee, A. Yariv // Applied physics letters. -V. 86. - 151122. -2005.

11. Pereira, D.A. Fiber Bragg grating sensing system for simultaneous measurement of salinity and temperature / D. Pereira, O. Frazao // Optical Engineering. - Vol. 43. - No. 2. - 2004.

Сведения об авторах

Садыков Искандер Рустемович, аспирант Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ,
тел.: 8(843)238-52-73, 8-960-041-95-74, e-mail: iskander_@list.ru

Морозов Олег Геннадьевич, заведующий кафедрой Телевидения и мультимедийных систем Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ, д.т.н., профессор, тел.: 8(843)238-52-73, e-mail: microoil@mail.ru

Садеев Тагир Султанович, доцент Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ, к.т.н, тел.: 8(843)238-52-73, e-mail: ktagiru@mail.ru

Степущенко Олег Александрович, Министерство внутренних дел по Республике Татарстан, заместитель министра. E-mail: soa_oleg@mail.ru

Кокурина Ольга Евгеньевна, магистрант Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ,
тел.: 8(843)238-52-73

Арбузова Евгения Юрьевна, магистрант Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ,
тел.: 8(843)238-52-73