

ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭТАНОЛА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ ДАТЧИКОМ РЕФРАКТОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА

А.П. Субботин

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Аннотация. Предложена структура волоконно-оптического датчика рефрактометрического типа для измерения концентрации этанола, основанная на использовании волоконной брэгговской решётки с π -сдвигом и двухчастотном методе зондирования. Датчик реализует параллельную схему измерений, что позволяет одновременно определять температуру и эффективный показатель преломления окружающей среды.

Ключевые слова: радиофотонный сенсор, волоконная брэгговская решётка, этанол.

Введение

Контроль концентрации этанола в различных средах (водные растворы, топливные смеси) является важной задачей в химической, пищевой и энергетической отраслях. Существующие методы, такие как газовая хроматография, отличаются высокой точностью, но требуют сложного оборудования и не подходят для непрерывного мониторинга. Волоконно-оптические датчики (ВОД) рефрактометрического типа (РТ) предлагают альтернативное решение, обладающее преимуществами компактности, возможности дистанционного измерения и высокой чувствительности [1].

Материалы и методы

Нами предложена параллельная структура ВОД РТ, основанная на использовании волоконной решётки брэгговской (ВРБ) с π -сдвигом и двухчастотном методе зондирования как её центрального лоренцевского контура пропускания, так и внешнего гауссова контура отражения. Обработка сигнала ведётся для огибающих на соответствующих промежуточных частотах для каждого из контуров. При этом формируется двухконтурная система измерений с «грубым» гауссовским и «точным» лоренцевским контурами. Структура ВОД РТ показана на рисунке 1.

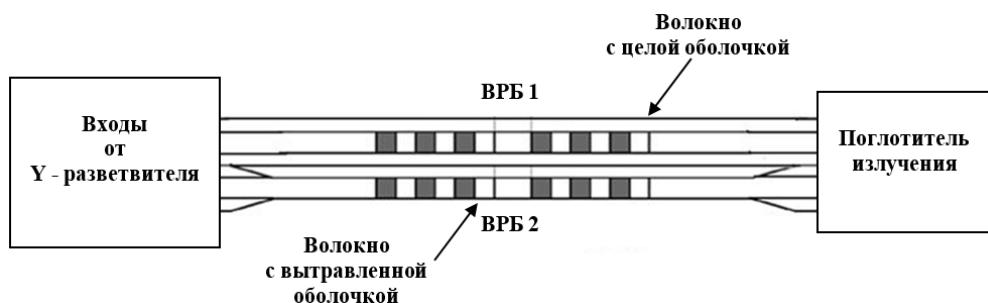


Рис. 1. ВОД РТ параллельной структуры

Центральные длины волн решёток ВРБ1 и ВРБ2 при одинаковой температуре отличаются в силу вытравливания в ВРБ2 оболочки волокна на определённую глубину. На уровне зондирования это выражается в необходимости использования двух источников двухчастотного излучения, настроенных соответственно на длины волн λ_1 и λ_2 , и решения уравнения раздельно для температуры и коэффициента преломления аналогично задаче для сдвоенных решёток.

В этом случае расстройкам, полученным при двухчастотном зондировании на каждой из длин волн, не ставится в соответствие какая-либо из физических параметров, а проводится дополнительная процедура вычислений по следующим алгоритмам.

Выходные сигналы U_{R1} и U_{R2} для огибающих на промежуточных частотах описываются следующими выражениями:

$$U_{R1} = \delta_{T1}(\lambda_1)T + \delta_{n_{eff}1}(\lambda_1)n_{eff}, \quad (1)$$

$$U_{R2} = \delta_{T2}(\lambda_2)T + \delta_{n_{eff}2}(\lambda_2)n_{eff}, \quad (2)$$

где $\delta_{T1}(\lambda_1)$, $\delta_{n_{eff}1}(\lambda_1)$, $\delta_{T2}(\lambda_2)$, $\delta_{n_{eff}2}(\lambda_2)$ – известные коэффициенты на измерительных характеристиках, соответствующие зависимостям расстройки решёток, предварительно настроенных на длины волн λ_1 и λ_2 по температуре и эффективному коэффициенту преломления.

Отсюда:

$$T = \frac{U_{R1}\delta_{n_{eff}2}(\lambda_2) - U_{R2}\delta_{n_{eff}1}(\lambda_1)}{\delta_{T1}(\lambda_1)\delta_{n_{eff}2}(\lambda_2) - \delta_{T2}(\lambda_2)\delta_{n_{eff}1}(\lambda_1)}, \quad (3)$$

$$n_{eff} = \frac{U_{R2}\delta_{T1}(\lambda_1) - U_{R1}\delta_{T2}(\lambda_2)}{\delta_{T1}(\lambda_1)\delta_{n_{eff}2}(\lambda_2) - \delta_{T2}(\lambda_2)\delta_{n_{eff}1}(\lambda_1)}. \quad (4)$$

Эти математические вычисления выполняются в программном блоке ВОД РТ и позволяют одновременно получить значения параметров температуры и эффективного коэффициента преломления в зоне расположения ВРБ1 и ВРБ2. Коэффициент преломления исследуемого материала (окружающей ВОД РТ среды) n_{amb} может быть определен по полученному n_{eff} и известных коэффициенте преломления сердцевины n_{co} и радиусе a_{cl} оболочки вытравленного волокна по процедуре, описанной в [2].

Моделирование ВОД РТ параллельной структуры проводилось в программных оболочках OptiGraiting и OptiSystem фирмы Optiwave.

Результаты

Результаты моделирования процесса измерений в ВОД РТ показаны на рисунке 2 и демонстрируют «красный» сдвиг центральной длины волны ВРБ относительно воздуха (air, $n = 1$) для метанола (methanol, $n = 1,326$), этанола (ethanol, $n = 1,359$) и изопропилового спирта (IPA, $n = 1,378$).

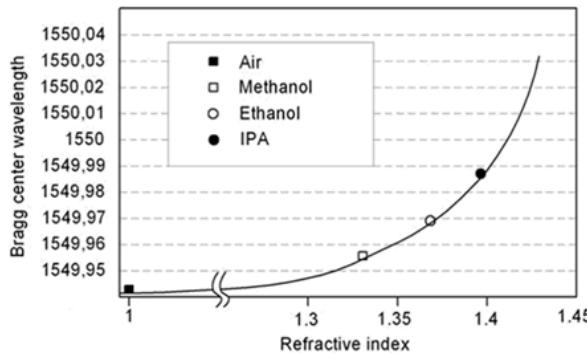


Рис. 2. Зависимость сдвига центральной длины волны ВРБ с π -сдвигом от показателя преломления вещества, окружающего ВОД РТ

При аппроксимации данной характеристики полученный отклик ВОД РТ составляет $\Delta\lambda/\Delta n = 0,6$ нм, что позволяет при нестабильности длины волны источника зондирующего излучения в сотни кГц (8×10^{-3} пм) говорить о детектировании изменений коэффициента преломления на уровне $1,3 \times 10^{-5}$.

Заключение

Разработана структура ВОД РТ для измерения концентрации этанола, основанная на использовании двух ВРБ (стандартной с травлением и с π -сдвигом) и двухчастотного метода зондирования.

Благодарность

Автор выражает благодарность за научное руководство профессору кафедры радиофотоники и микроволновых технологий Морозову О.Г.

Список литературы

1. Memon, S.F. A Review of Optical Fibre Ethanol Sensors: Current State and Future Prospects / S. F. Memon, R. Wang, B. Strunz et al. // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – P. 950.
2. Морозов, О.Г. Модуляционные методы измерений в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе волоконных решёток Брэгга с фазовым сдвигом / О.Г. Морозов, О.А. Степущенко, И.Р. Садыков // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2010. – Т. 3. – № 10. – С. 3-13.

MEASUREMENT OF ETHANOL CONCENTRATION BY A FIBER-OPTIC REFRACTOMETRIC SENSOR

A.P. Subbotin

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation

Abstract. A structure of a fiber-optic refractometric sensor for ethanol concentration measurement is proposed, based on a phase-shifted fiber Bragg grating (π -FBG) and a two-frequency probing method. The sensor implements a parallel measurement scheme, allowing simultaneous determination of temperature and effective refractive index of the environment.

Keywords: microwave photonics sensor, fiber Bragg gratings, ethanol.

Статья представлена в редакцию 26 декабря 2025 г.