

УДК 681.7

А. С. Васюра, к. т. н., проф.; С. М. Довгалец, к. т. н., доц.; И. П. Борщова**РЕФРАКТОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Проведен анализ основных оптических методов измерения температуры. Предложен оптический измерительный преобразователь температуры, чувствительные элементы которого выполнены из диэлектрика с отрицательным показателем преломления.

Ключевые слова: оптический метод, температура, преобразователь температуры, волновод, отрицательный показатель преломления, чувствительный элемент.

Введение. Надежность и стабильность системы любой сложности зависит, прежде всего от температуры окружающей среды и от отдельно взятых узлов данной системы. Поэтому контроль температуры является одной из важнейших задач современной науки и техники. В последнее время при определенных специфических условиях для измерения температуры жидкости или газа активно используются измерительные преобразователи на основе рефрактометров [1]. Такие устройства используются для измерения температуры в жидкостях и газах в медицинских учреждениях: для контроля гипертермической терапии [2], при определении состава жидкости, для локального прецизионного измерения температуры различных объектов в специальных условиях [3], для анализа мозговой и суставной жидкости, субретинальной и других жидкостей глаза; в фармацевтике – для исследования водных растворов различных лекарственных препаратов; в лабораториях санитарно-эпидемиологического контроля; в пищевой промышленности для анализа продуктов и сырья, а также во многих других отраслях.

Анализ предыдущих исследований. Очень часто в сложных специфических условиях для измерения температуры используются оптические методы. Взрыво- и пожаробезопасность позволяет размещать оптические измерительные устройства в таких местах, где электроника работать не может.

Волоконно-оптические измерительные преобразователи бывают двух типов – с внешней модуляцией и с внутренней. В первом случае волокно только переносит оптический сигнал. Информационными параметрами светового сигнала может выбираться интенсивность, фаза, частота, поляризация, спектр и другие. Далее оптическое волокно переносит промоделированный, согласно воздействию внешней среды, сигнал к приемнику. В некоторых случаях входное волокно может выступать и в качестве выходного.

Во втором случае, оптическое волокно переносит световой пучок, параметры которого подлежат влиянию в соответствии с изменениями параметров среды непосредственно в волокне. Частным случаем такого метода является контактный метод, основанный на распространении света через оптический волновод, который погружается в жидкость.

Однако существующие методы и устройства характеризуются сложностью структуры, недостаточной чувствительностью, что ограничивает их применение. Основным недостатком этих методов является высокая погрешность измерения.

Появление новых композитных материалов с отрицательным показателем преломления (ОПП) и исследование их необычных свойств привели к публикации большого количества работ, посвященных возможным путям их использования [4, 5, 6]. Волноводы, построенные на основе таких материалов, имеют специфическое распределение энергии и модового состава излучения. Эти уникальные свойства могут быть применены как для преобразования информации, так и для рефрактометрических измерений.

Целью работы является разработка рефрактометрического преобразователя температуры повышенной точности и чувствительности.

Материалы и результаты исследований. На рис. 1 представлена структурная схема рефрактометрического преобразователя температуры.

Устройство содержит последовательно расположенные и оптически соединенные источник некогерентного излучения, оптический волновод и блок обработки. Причем выход источника некогерентного излучения связан со входом оптического волновода, выход которого связан с входом блока обработки.

Рефрактометрический преобразователь температуры работает следующим образом: источник некогерентного излучения формирует световой луч, который попадает на оптический волновод, погруженный в жидкость.

Луч распространяется в сердцевине волновода, и попадает на вход блока обработки, после чего данные с выхода блока обработки анализируются и определяется температура жидкости.

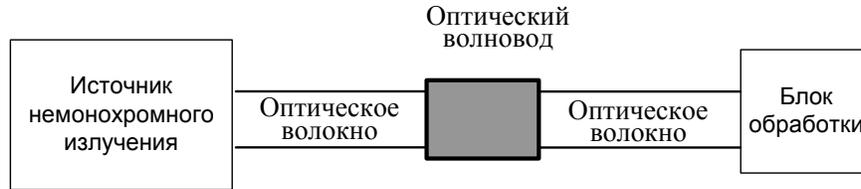


Рис. 1. Структурная схема рефрактометрического преобразователя температуры

Рассмотрим подробнее строение чувствительного элемента. Он представляет собой диэлектрический стержень с сердцевинной, имеющей показатель преломления n_1 и оболочкой с показателем преломления n_2 . Чувствительный элемент полностью погружен в жидкость с показателем преломления n_3 .

Такая структура чувствительного элемента была ранее опубликована в [7]. Сердцевина данного волновода изготовлена из материала, имеющего отрицательный показатель преломления. Особыми свойствами материалов с отрицательным показателем преломления являются: отрицательное преломление, одновременно отрицательные электрическая и магнитная проницаемости, антипараллельность групповой и фазовой скоростей [8].

Характеристическое уравнение трехслойного плоского волновода имеет вид:

$$\frac{m_3}{m_2} k_2 \tan(k_2 d) \pm \frac{m_3}{m_1} k_2 \tan^{\pm 1}(k_1 L) \pm k_3 \frac{k_1}{k_2} \frac{m_2}{m_1} \tan(k_2 d) \tan^{\pm 1}(k_1 L) - k_3 = 0, \quad (3)$$

где $k_1^2 = k^2 n_1^2 - h^2$, h – постоянная распространения, $n_1 = \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}$ – показатель преломления сердцевинной, $k_2^2 = k^2 n_2^2 - h^2$, $n_2 = \sqrt{\varepsilon_2 \mu_2 + i \alpha_2}$ – показатель преломления оболочки, α_2 – коэффициент затухания света в оболочке, $k_3^2 = h^2 - k^2 n_3^2$, $n_3 = \sqrt{\varepsilon_3 \mu_3}$ – показатель преломления внешней среды, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число свободного пространства, λ – длина волны, $2L$ – геометрические размеры сердцевинной, d – геометрические размеры оболочки.

Как было показано в [9], двухслойные волноводы с ОПП сердцевинной имеют особый модовый состав. Независимо от величины параметров, модовый состав волнопроводов при равной приведенной частоте будет одинаков.

Для исследования модового состава предложенной трехслойной структуры необходимо построить зависимость приведенной частоты:

$$V = 2kL \sqrt{n_1^2 - n_3^2}, \quad (4)$$

от нормированной постоянной распространения:

$$b = \frac{\frac{h}{k} - n_3}{n_1 - n_3} \quad (5)$$

При построении зависимости параметр V меняется за счет параметра n_3 – показателя преломления внешней среды. Отсечка второй моды происходит при $V = V_2$ и $b = 0$:

$$b = \frac{\frac{h}{k} - n_3}{n_1 - n_3} = 0 \Rightarrow h_2 = kn_3 \quad (6)$$

где h_2 – постоянная распространения, при которой происходит отсечка второй моды.

Подставив данное значение постоянной распространения в характеристическое уравнение (3), полученное уравнение запишем как:

$$\frac{m_3}{m_2} k_2 \tan(k_2 d) \pm \frac{m_3}{m_1} k_2 \tan^{\pm 1}(k_1 L) = 0, \quad (7)$$

где $k_1^2 = k^2 n_1^2 - k^2 n_3^2$, $k_2^2 = k^2 n_2^2 - k^2 n_3^2$.

Решая это уравнение относительно переменной n_3 , при всех остальных заданных параметрах получим следующее значение ПП внешней среды, при котором в волноводе наступает отсечка второй моды. По полученному решению приведенной частоты, определяем значение $V_2 = 2,132$, которое независимо от величины параметров волновода обеспечивает отсечку второй моды.

Исходя из полученного значения приведенной частоты в момент отсечки второй моды и формулы (7), устанавливается зависимость между длиной волны на которой будет обеспечиваться отсечка второй моды в этом волноводе от ПП внешней среды $\lambda_2 = f(n_3)$:

$$\lambda_2 = \frac{2\pi}{V_2} L \sqrt{n_1^2 - n_3^2} = 2,947 L \sqrt{n_1^2 - n_3^2} \quad (8)$$

Так как показатель преломления зависит от внутреннего состава вещества, он также зависит от температуры, давления, концентрации, природы растворителя. Поэтому для систематизации полученных результатов, принимается показатель преломления, снятый при температуре $20 \pm 0,3$ °С в спектре натрия (598,3 нм). Полученный в данных условиях показатель преломления имеет обозначение n_{20} , и используется в справочных данных основных физико-химических свойств веществ.

При измерениях в условиях другой температуры, вводят поправку на температуру по формуле

$$n_3 = n_{20} + 0.0002(20 - t), \quad (9)$$

где n_3 – показатель преломления жидкости при температуре, которая измеряется, n_{20} – стандартный показатель преломления, t – температура, при которой проводилось измерение [10].

Из формулы (9) выразим t , получим:

$$t = \frac{(n_3 - n_{20})}{0.0002} - 20 \quad (10)$$

Как видно из формулы (8), длина волны зависит от показателя преломления, блоком обработки вычисляется ПП жидкости по длине волны, а затем по формуле (10) определяется температура.

На рисунке 2 для наглядности результатов представлена зависимость длины волны от температуры воды в сосуде.

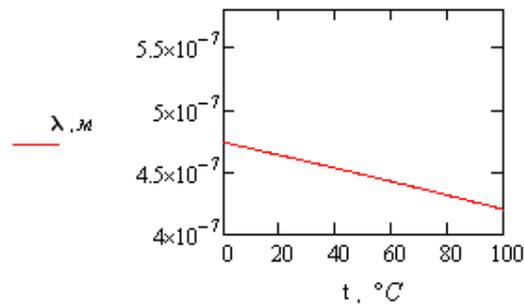


Рис. 2. Зависимость длины волны от температуры воды в сосуде

Известен подход для определения температуры жидкости [11]. Методическая погрешность в случае такого измерительного преобразователя вычисляется по формуле:

$$\Delta = \frac{\partial T}{\partial n} \frac{\partial n}{\partial I} + \frac{\partial T}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial I}, \quad (11)$$

где T – температура жидкости, I – интенсивность светового потока, λ – длина волны, n – показатель преломления жидкости.

Методическая погрешность предложенного устройства определяется:

$$\Delta' = \frac{\partial T}{\partial n} \frac{\partial n}{\partial \lambda}, \quad (12)$$

где T – температура жидкости, λ – длина волны, n – показатель преломления вещества.

Как видно из формул (11, 12), предложенный подход позволяет устранить ту составляющую погрешности, которая возникает вследствие регистрации интенсивности светового потока.

Выводы. Предложен рефрактометрический преобразователь температуры, чувствительный элемент которого изготовлен из диэлектрика с отрицательным показателем преломления.

За счет того, что измерение показателя преломления происходит без регистрации мощности, устраняется и составляющая погрешности, возникающая вследствие нестабильности источника излучения. Таким образом, в результате исследования были повышены точность и чувствительность прибора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pat. №3826978 USA, IPC G01N22/00 G01R27/04 Waveguide refractometr / Krawczewicz, Stanley T.; applicant. Exxon Production Research Co., Houston, Tex. – appl. no. 347525; apl. 04/03/1973; pub. 07/30/1974.
2. Егоров Ф. А. Волоконно-оптический термометр для контроля гипертермической терапии / Ф. А. Егоров, В. А. Королёв, В. Т. Потапов // Лазерная медицина. – 2005. – № 3(9). – С. 53 – 54.
3. Волоконно-оптический зондовый термометр [Электронный ресурс]: Инновационное предприятие «НЦВО – Фотоника / Режим доступа: http://www.forc-photonics.ru/ru/production/volokonnye_sensornye_sistemy/1/13.
4. Shelby R. A. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction / R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Shultz // Science. – 2001. – №292. – P. 77 – 78.
5. Соколов А. Н. Волоконно-оптические датчики и системы: принципы построения, возможности, перспективы / А. Н. Соколов, В. А. Яцеев // Lightwave Russian Edition. – 2006. – №4. – С. 44 – 46.
6. Peter Markos Structures with negative index of refraction / Peter Markos, C. M. Soukoulis // Physica status solidi, 2003. – № 197(3). – P. 595 – 604.
7. Оптичний вимірювальний перетворювач рівня рідини [Електронний ресурс] / С. М. Довгалець, П. А. Хомчук, І. П. Борщова // Наукові праці ВНТУ. – 2009. – №3. Режим доступу до журн.: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2009-3/2009-3.files/uk/009vykoll_ua.pdf.

8. Shadrivov I. V. Guided modes in negative-refractive-index waveguides / I. V. Shadrivov, A. A. Sukhorukov, Y. S. Kivshar // Physical Review E. – 2003. – Vol. 3, № 67. – P. 10 – 14.
9. Довгалець С. М. Рефрактометричні вимірювання з використанням оптичних хвильоводів із від'ємним показником заломлення / С. М. Довгалець, А. Ф. Хомчук, П. А. Хомчук // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2008. – № 1 (9). – С. 56 – 60.
10. Ляликов Ю. С. Физико-химические методы анализа / Ю. С. Ляликов – М., "Химия", 1973. – 536 с.
11. Габа В. М. Измерение температуры с использованием оптических датчиков на основе двулучепреломляющих кристаллов / В. М. Габа // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2009. – №1. – С. 45 – 52.

Васюра Анатолий Степанович – к. т. н., профессор кафедры автоматки и измерительной техники.

Довгалець Сергей Михайлович – к. т. н., доцент кафедры автоматки и измерительной техники.

Борцова Ирина Петровна – студентка кафедры автоматки и измерительной техники.
Винницкий национальный технический университет.