

УДК 681.7

А. С. Васюра, к. т. н., проф.; С. М. Довгалець, к. т. н., доц.; І. П. Борцова**РЕФРАКТОМЕТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТЕМПЕРАТУРИ**

Проведено аналіз основних оптичних методів вимірювання температури. Запропоновано оптичний вимірювальний перетворювач температури, чутливі елементи якого виконано з діелектрика з від'ємним показником заломлення.

Ключові слова: оптичний метод, температура, перетворювач температури, хвилевід, від'ємний показник заломлення, чутливий елемент.

Вступ. Надійність і стабільність системи будь-якої складності залежить, насамперед від температури навколишнього середовища і від окремо взятих вузлів цієї системи. Тому контролювання температури є однією з найважливіших задач сучасної науки та техніки. Останнім часом за певних специфічних умов для вимірювання температури рідини чи газу активно використовуються вимірювальні перетворювачі на основі рефрактометрів [1]. Такі пристрої використовуються для вимірювання температури в рідинах та газах; у медичних установах: для контролю гіпертермічної терапії [2], при визначенні складу рідини, для локального прецизійного вимірювання температури різних об'єктів у спеціальних умовах [3], для аналізу мозкової і суглобної рідини, субретинальної та інших рідин ока; у фармацевтиці – для дослідження водяних розчинів різних лікарських препаратів; у лабораторіях санітарно-епідеміологічного контролю; у харчовій промисловості для аналізу продуктів і сировини, а також у багатьох інших галузях.

Аналіз попередніх досліджень. Дуже часто в складних специфічних умовах для вимірювання температури використовуються оптичні методи. Вибухо- і пожегобезпечність дозволяє розміщувати оптичні вимірювальні пристрої в таких місцях, де електроніка працювати не може.

Волоконно-оптичні вимірювальні перетворювачі бувають двох типів – з зовнішньою модуляцією та з внутрішньою. У першому випадку волокно тільки переносить оптичний сигнал. Інформаційними параметрами світлового сигналу може вибиратись інтенсивність, фаза, частота, поляризація, спектр та інші. Далі оптичне волокно переносить промодульований згідно впливу зовнішнього середовища сигнал до приймача. У деяких випадках вхідне волокно може виступати і у якості вихідного.

У другому випадку, оптичне волокно переносить світловий пучок, параметри якого підлягають впливу відповідно до змін параметрів середовища безпосередньо у волокні. Частковим випадком такого методу є контактний метод, який базується на розповсюдженні світла через оптичний хвилевід, який занурюється в рідину.

Проте існуючі методи і пристрої характеризуються складністю структури, недостатньою чутливістю, що обмежує коло їх застосування. Основним недоліком цих методів є висока похибка вимірювання.

Поява нових композитних матеріалів з від'ємним показником заломлення (ВПЗ) та дослідження їх незвичайних властивостей призвели до публікації великої кількості робіт, присвячених можливим шляхам їх використання [4, 5, 6]. Хвилеводи, побудовані на основі таких матеріалів, мають специфічний розподіл енергії та модового складу випромінювання. Ці унікальні властивості можуть бути застосовані як для перетворення інформації, так і для рефрактометричних вимірювань.

Метою роботи є розробка рефрактометричного перетворювача температури підвищеної точності і чутливості.

Матеріали та результати досліджень. На рис. 1 представлено структурну схему рефрактометричного перетворювача температури.

Пристрій містить послідовно розташовані та оптично з'єднані джерело немонохромного випромінювання, оптичний хвилевід та блок обробки. Причому вихід джерела немонохромного випромінювання пов'язаний з входом оптичного хвилеводу, вихід якого пов'язаний з входом блока обробки.

Рефрактометричний перетворювач температури працює наступним чином: джерело немонохромного випромінювання формує світловий промінь, який потрапляє на оптичний хвилевід, занурений у рідину.

Промінь поширюється в серцевині хвилеводу і потрапляє на вхід блока обробки, після чого дані з виходу блока обробки аналізуються і визначається температура рідини.

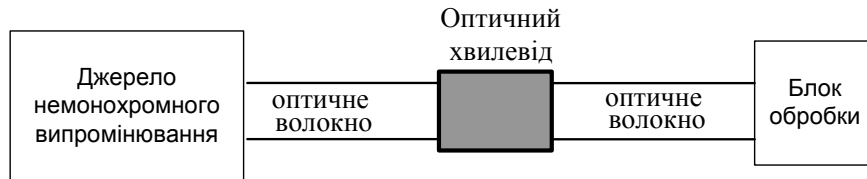


Рис. 1. Структурна схема рефрактометричного перетворювача температури

Розглянемо детальніше будову чутливого елемента. Він представляє собою діелектричний стрижень із серцевиною, що має показник заломлення n_1 і оболонкою з показником заломлення n_2 . Чутливий елемент повністю занурений у рідину з показником заломлення n_3 .

Така структура чутливого елемента була раніше опублікована в [7]. Серцевина цього хвилеводу виготовлена з матеріалу, що має від'ємний показник заломлення. Особливими властивостями матеріалів із від'ємним показником заломлення є: негативне заломлення, одночасно від'ємні електрична й магнітна проникності, антипаралельність групової та фазової швидкостей [8].

Характеристичне рівняння тришарового плаского хвилеводу має вигляд:

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

де $k_1^2 = k^2 n_1^2 - h^2$, h – стала розповсюдження, $n_1 = \sqrt{\epsilon_1 \mu_1}$ – показник заломлення серцевини, $k_2^2 = k^2 n_2^2 - h^2$, $n_2 = \sqrt{\epsilon_2 \mu_2 + i \alpha_2}$ – показник заломлення оболонки, α_2 – коефіцієнт згасання світла в оболонці, $k_3^2 = h^2 - k^2 n_3^2$, $n_3 = \sqrt{\epsilon_3 \mu_3}$ – показник заломлення зовнішнього середовища, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число вільного простору, λ – довжина хвилі, $2L$ – геометричні розміри серцевини, d – геометричні розміри оболонки.

Як було показано в [9], двошарові хвилеводи із ВПЗ серцевини мають особливий модовий склад. Незалежно від величини параметрів, модовий склад хвилеводів при рівній приведеній частоті буде однаковий.

Для дослідження модового складу запропонованої тришарової структури необхідно побудувати залежність приведеної частоти:

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

від нормованої сталої розповсюдження:

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

Під час побудови залежності параметр V змінюється за рахунок параметра n_3 – показника заломлення зовнішнього середовища. Відсічка другої моди відбувається при $V = V_2$ і $b = 0$:

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

де h_2 – стала розповсюдження, при якій відбувається відсічка другої моди.

Підставивши це значення сталої розповсюдження в характеристичне рівняння (3), отримане рівняння запишемо як:

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

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

Розв'язуючи це рівняння відносно змінної n_3 , при всіх інших заданих параметрах отримаємо таке значення ПЗ зовнішнього середовища, при якому у хвилеводі настає відсічка другої моди. За отриманим рішенням приведеної частоти, визначаємо значення $V_2 = 2,132$, яке незалежно від величини параметрів хвилеводу забезпечує відсічку другої моди.

Виходячи із отриманого значення приведеної частоти в момент відсічки другої моди й формули (7), встановлюється залежність між довжиною хвилі на якій буде забезпечуватись відсічка другої моди в цьому хвилеводі від ПЗ зовнішнього середовища $\lambda_2 = f(n_3)$:

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

Так як показник заломлення залежить від внутрішнього складу речовини, він також залежить від температури, тиску, концентрації, природи розчинника. Тому для систематизації отриманих результатів, приймається показник заломлення, знятий при температурі $20 \pm 0,3$ °C в спектрі натрію (598,3 нм). Отриманий в даних умовах показник заломлення має позначення n_{20} , і використовується в довідкових даних основних фізико-хімічних властивостей речовин.

При вимірюваннях в умовах іншої температури, вводять поправку на температуру по формулі

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

де n_3 – показник заломлення рідини при температурі, що вимірюється, n_{20} – стандартний показник заломлення, t – температура, при якій проводилось вимірювання [10].

З формули (9) виразимо t , матимемо:

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

Оскільки, як видно з формули (8), довжина хвилі залежить від показника заломлення, блоком обробки обчислюється ПЗ рідини за довжиною хвилі, а потім за формулою (10) знаходиться температура.

На рисунку 2 для наочності результатів представлена залежність довжини хвилі від температури води в посудині.

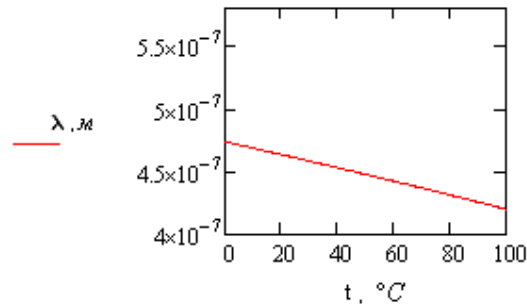


Рис. 2. Залежність довжини хвилі від температури води в посудині

Відомим є підхід для визначення температури рідини [11]. Методична похибка у випадку такого вимірювального перетворювача обчислюється за формулою:

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

де T – температура рідини, I – інтенсивність світлового потоку, λ – довжина хвилі, n – показник заломлення рідини.

Методична похибка запропонованого пристрою визначається:

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

де T – температура рідини, λ – довжина хвилі, n – показник заломлення речовини.

Як видно з формул (11, 12), запропонований підхід дозволяє усунути ту складову похибки, яка виникає внаслідок реєстрації інтенсивності світлового потоку.

Висновки. Запропоновано рефрактометричний перетворювач температури, чутливий елемент якого виготовлено з діелектрика з від'ємним показником заломлення.

За рахунок того, що вимірювання показника заломлення відбувається без реєстрації потужності, усувається та складову похибки, яка виникає внаслідок нестабільності джерела випромінювання. Таким чином, у результаті дослідження було підвищено точність та чутливість приладу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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. Королев, В. Т. Потапов // Лазерная медицина. – 2005. – № 3(9). – С. 53 – 54.
3. Волоконно-оптический зондовый термометр [Електронний ресурс]: Инновационное предприятие «НЦВО – Фотоника / Режим доступу: http://www.forc-photonics.ru/production/volokonnye_sensornyie_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. Боршова // 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 хвилеводів 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 Анатолій Степанович – к. т. н., професор кафедри автоматки та інформаційно-вимірювальної техніки.

Довгалець Сергій Михайлович – к. т. н., доцент кафедри автоматки та інформаційно-вимірювальної техніки.

Борцова Ірина Петрівна – студентка кафедри автоматки та інформаційно-вимірювальної техніки.

Вінницький національний технічний університет.