

УДК 681.7.013

РЕФРАКТОМЕТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМИ ОПТИЧНИХ ХВИЛЕВОДІВ ІЗ ВІД'ЄМНИМ ПОКАЗНИКОМ ЗАЛОМЛЕННЯ

Довгалець С.М. к.т.н., доц., Хомчук А.Ф. ст.викл., Хомчук П.А. студ.

Вінницький національний технічний університет

21021 м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95

E-mail: dovgalets@aim.vstu.vinnica.ua

Предлагается использование плоского симметричного волновода с отрицательным показателем преломления сердцевины в качестве чувствительного элемента рефрактометрического оптического волноводного измерительного преобразователя. Принцип действия преобразователя основан на зависимости спектра пропускания волновода от показателя преломления внешней среды, что позволяет повысить точность измерения.

Ключевые слова: рефрактометрический оптический волноводный измерительный преобразователь, отрицательный показатель преломления, частотная модуляция.

Slab symmetric waveguide with negative refractive index is considered as a sensor of refractometric optical waveguide measuring transducer. Transducer is based on external environment refractive index on waveguide transition spectrum dependency. That improves measurements' accuracy.

Key words: refractometric optical waveguide measuring transducer, negative index of refraction, frequency modulation.

Вступ. Удосконалення технологій виготовлення оптичних хвильоводів, а також поява нових композитних матеріалів призвели до широкого використання елементів хвильоводної оптики у вимірюванні різного роду неелектричних фізичних величин. Так, для проведення рефрактометричних вимірювань в газах і рідинах використовуються вимірювальні перетворювачі (ВП) на основі оптичних волокон. У таких ВП світло від монохромного джерела випромінювання 1 (рис. 1), через оптичне волокно 2, підводиться до чутливого елемента 3, який знаходиться у безпосередньому контакті із зовнішнім середовищем. Залежно від його показника заломлення (ПЗ) n_1 світловий сигнал модулюється і поступає в лінію зв'язку 4, після якої реєструється приймачем 5.

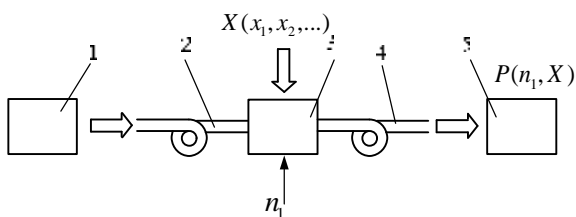


Рисунок – 1 Рефрактометричний вимірювальний перетворювач

Найбільш точними є ВП, чутливий елемент яких модулює фазу світлового сигналу, але вони є і найбільш дорогими. ВП на основі поляризації світла мають значну залежність від температури. На даний момент найбільш поширеними є ВП, в яких модулюється інтенсивність світлового сигналу [1].

Контактні датчики такого типу використовують чутливий елемент оптичного хвильоводу, світлопропускання якого залежить від показника заломлення зовнішнього середовища.

Для підвищення чутливості вимірювань у таких ВП використовують хвильоводи кінцевого перетину,

хвильоводи змінного радіусу, послідовне з'єднання кількох хвильоводів із різним модовим складом випромінювання і т.і. [2-4]. Проте, всі вони мають високу похибку за рахунок нестабільності параметрів випромінювача 1 і фотоприймача 5, а також інших неінформативних параметрів (вектор X на рис. 1).

Для підвищення точності необхідно перейти до іншої величини, що характеризує світловий потік, який проходить через ВП. Однією з таких величин є довжина хвилі. Класичні діелектричні хвильоводні структури не дозволяють виконати такий перехід. Вирішити проблему дозволяє використання нових композитних матеріалів, поширення світла в яких має ряд відмітних особливостей.

Аналіз попередніх досліджень. У 1968 році було теоретично досліджено гіпотетичний матеріал із дійсною від'ємною діелектричною і магнітною проникностями [5]. Однією з особливостей таких матеріалів є від'ємний показник заломлення (ВПЗ). Але тільки в останні роки було теоретично і експериментально [6,7] доведено можливість створення різних типів матеріалів із такими властивостями. За цей час з'явилася безліч робіт, присвячених дослідженню цих матеріалів і обговоренню ідей їх використання [8-10]. В [11] було показано, що хвильоводи, побудовані на основі таких матеріалів, мають специфічний розподіл енергії і модовий склад випромінювання.

Мета роботи. Підвищення точності рефрактометричного оптичного хвильоводного ВП за рахунок використання чутливого елемента хвильоводу з від'ємним показником заломлення.

Матеріал і результати дослідження. Чутливим елементом такого ВП є плоский симетричний хвильовід із ВПЗ сердцевини (рис. 2). Серцевина 2 з діелектричною ϵ_2 і магнітною μ_2 проникностями, оточена оболонкою 1, параметри якої відповідно ϵ_1 і μ_1 , причому сердцевина виготовлена з матеріалу з

ВПЗ ($\epsilon_2 < 0$ і $m_2 < 0$), а оболонка є звичайним діелектриком ($\epsilon_1 > 0$ і $m_1 > 0$).

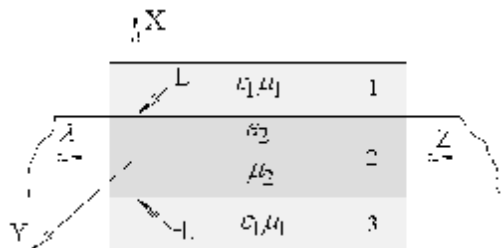


Рисунок 2 – Симетричний плоский хвилевід - чутливий елемент рефрактометричного оптичного хвилеводного ВП

Поперечний розмір серцевини хвилеводу дорівнює $2L$, тоді як оболонка вважається за необмежену у напрямі вісі X . У напрямках осей Y і Z необмежені як серцевина, так й оболонка. Оптичний сигнал довжиною хвилі розповсюджується за рахунок повного внутрішнього відбивання вздовж вісі Z .

Математичною моделлю такого хвилеводу є характеристичне рівняння [11]:

$$\frac{m_1}{m_2} k_2 \tanh^{\pm 1}(k_2 L) + k_1 = 0, \quad (1)$$

де

$$k_1^2 = h^2 - k^2 \epsilon_1 m_1, \quad (2)$$

$$k_2^2 = h^2 - k^2 \epsilon_2 m_2, \quad (3)$$

$k = \frac{2p}{l}$ - хвильове число;

h - стала розповсюдження,

а \pm відповідає парним і непарним модам відповідно.

Хвилеводи з ВПЗ серцевини володіють рядом відмітних від класичних хвилеводів особливостей, що добре видно із залежності нормованої сталої розповсюдження

$$b = \frac{\frac{h}{k} - \sqrt{\epsilon_1 m_1}}{\sqrt{\epsilon_2 m_2} - \sqrt{\epsilon_1 m_1}} \quad (4)$$

від приведенної частоти

$$V = 2kL\sqrt{\epsilon_2 m_2 - \epsilon_1 m_1}, \quad (5)$$

наданої на рис. 3. До цих особливостей відноситься: відсічка першої моди, область відсутності випромінювання між першою і другою модами, роздвоєння мод вищих порядків в області їх відсічки.

Ефект відсутності випромінювання між першою і другою модою гарантує наявність критичних частот, у діапазоні яких буде знаходитись зона непропускання хвилеводом випромінювання.

Цей ефект використовується для вимірювання показника заломлення зовнішнього середовища. Так, при подачі на вхід хвилеводу немонохромного випромінювання, на його виході, в області приведених частот $V_1 < V < V_2$, де V_1 - відповідає лівій межі зони непропускання, а V_2 - правій, випромінювання буде відсутнє.

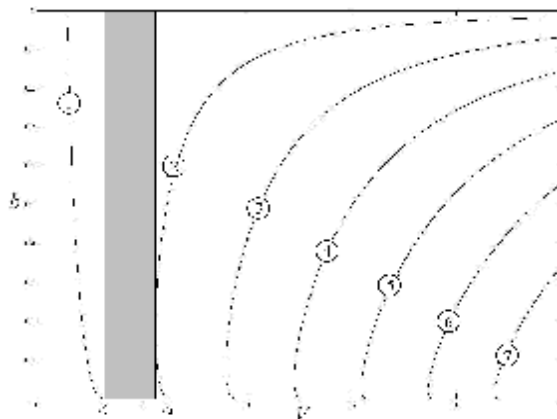


Рисунок 3 – Залежність нормованої сталої розповсюдження від приведенної частоти в плоскому симетричному хвилеводі з ВПЗ серцевини (сірим кольором позначено зону непропускання)

Критичним приведеним частотам, виходячи з (5), відповідають критичні довжини хвиль I_1 і I_2 . Оскільки довжина хвилі обернено пропорційна приведеній частоті, то зона непропускання хвилеводом випромінювання буде знаходитись в діапазоні довжин хвиль $I_2 < l < I_1$. При сталих параметрах серцевини хвилеводу, залежність критичних довжин хвиль від показника заломлення зовнішнього середовища матиме вигляд:

$$I_1 = \frac{4pL}{V_1} \sqrt{\epsilon_2 m_2 - n_1^2}, \quad (6)$$

$$I_2 = \frac{4pL}{V_2} \sqrt{\epsilon_2 m_2 - n_1^2}, \quad (7)$$

$$n_1 = \sqrt{\epsilon_1 m_1}. \quad (8)$$

Як видно з рисунка 3, на лівій межі зони непропускання нормована стала розповсюдження дорівнює 0:

$$b = \frac{\frac{h}{k} - \sqrt{\epsilon_1 m_1}}{\sqrt{\epsilon_2 m_2} - \sqrt{\epsilon_1 m_1}} = 0 \Rightarrow h_1 = k\sqrt{\epsilon_1 m_1}, \quad (9)$$

де h_1 - стала розповсюдження на першій критичній частоті.

Підставивши h_1 у (2) і в (3), а потім у (1), запишеться рівняння:

$$k_1^2 = k^2 \epsilon_1 m_1 - k^2 \epsilon_1 m_1 = 0,$$

$$k_2^2 = k^2 \epsilon_1 m_1 - k^2 \epsilon_2 m_2 = k^2 (\epsilon_1 m_1 - \epsilon_2 m_2),$$

$$\frac{m_1}{m_2} k \sqrt{\epsilon_1 m_1 - \epsilon_2 m_2} \tanh^{\pm 1}(kL\sqrt{\epsilon_1 m_1 - \epsilon_2 m_2}) = 0, \quad (10)$$

розв'язок якого відносно добутку $\epsilon_1 m_1$, дає значення показника заломлення зовнішнього середовища, за якого приведена частота дорівнює V_1 . Оскільки оболонка є діелектриком, то $m_1 = 1$, і рівняння (10) розв'язується лише відносно ϵ_1 . Дане рівняння має нескінчену кількість коренів, перший з них відповідає відсічці першої моди, а всі наступні - є умовами припинення роздвоєння в модах вищих порядків.

Підставивши перший корінь в (5), отримаємо $V_1 = p$. Відсічка першої моди в класичному діелектричному плоскому хвилеводі відбувається також при значенні приведеної частоти, рівної p [12]. Але, як видно з рис. 3, в хвилеводі з ВПЗ серцевини перша мода існує тільки при $0 < V < p$, тоді як у класичному випадку при $V > p$.

У класичному плоскому діелектричному хвилеводі умови появи всіх мод кратно числу p , у разі хвилеводу з ВПЗ серцевини, як видно з рис. 3, моди з'являються раніше. Для того, щоб визначити значення другої критичної частоти, як було запропоновано в [9], необхідно знайти мінімум оберненої до залежності нормованою сталою розповсюдження від приведеної частоти функції. Тоді, прийнявши $m_1 = 1$, виходячи з (1), такою оберненою функцією буде

$$e_1 = \frac{1}{k} \sqrt{h^2 - \left(\frac{m_1}{m_2} k_2 \tanh^{\pm 1}(k_2 L)\right)^2} \quad (11)$$

Продиференціювавши дану функцію за e_1 , можна записати рівняння:

$$\left(\frac{m_1}{m_2}\right)^2 \tanh^{\pm 1}(k_2 L) \times \left(\tanh^{\pm 1}(k_2 L) - L k_2 (\tanh^{\pm 2}(k_2 L) - 1)\right) - 1 = 0 \quad (12)$$

розв'язаннями якого є значення сталої розповсюдження, що відповідають моментам появи мод порядку вище першого. Причому перший корінь відповідає другій моді. Підставивши його значення в (1), і розв'язавши це рівняння відносно параметрів зовнішнього середовища, з (5) обчислюється приведена критична частота $V_2 = 5.656$. Отже плоский симетричний хвилевід з ВПЗ серцевини не проводить випромінювання в діапазоні приведених частот:

$$p < V < 5.656 \quad (13)$$

Після підстановки отриманих значень приведеної частоти в (6) і в (7) відповідно, рівняння перетворення запропонованого ВП набувають вигляду:

$$I_1 = 2L \sqrt{e_2 m_2 - n_1^2} \quad (14)$$

$$I_2 = 2,22L \sqrt{e_2 m_2 - n_1^2} \quad (15)$$

Структура такого ВП не відрізняється від приведеної на рисунку 1. Але на відміну від амплітудних датчиків, як 1 (рис. 1) використовується не монохромний випромінювач світла, а як приймач 5 пристрій що розкладає світло в спектр (призма, дисперсійні ґратки, тощо). Розклавши випромінювання в спектр, приймач фіксує його інтенсивність на кожній отриманій довжині хвилі. Як такий приймач може також використовуватись світлочутлива матриця. Проте, на відміну від амплітудних датчиків, фіксується не величина інтенсивності, а її наявність або відсутність. Таким чином, I_1 і I_2 визначаються як граничні значення довжин хвиль між областями присутності і областю відсутності випромінювання. Далі, використовуючи (14) і (15), розраховується ПЗ зовнішнього середовища.

Висновки. Запропонований метод вимірювання ПЗ, як і описані вище методи, є опосередкованим. Але, замість вимірювання величини інтенсивності світла, у даному методі вимірюється довжина хвилі, за рахунок чого виключається похибка, що вноситься фотоприймачем. Так само, в даному методі відсутня похибка, що вноситься нестабільністю параметрів монохромного джерела світла. Замість цього, точність визначення показника заломлення залежить тільки від точності визначення критичних довжин хвиль. Це дає можливість за умов рівності решти параметрів підвищити точність вимірювання ПЗ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Волоконно-оптические датчики/Т. Окуси, К. Окамото, М. Оцу, Х. Исихара, К. Кюма, К. Хататэ/ Под ред. Т. Окуси: Пер. с япон.— Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990.—256 с.
 2. Argha Banerjee Fiber optic sensing of liquid refractive index // Sensors and Actuators B: Chemical. - 2007. – Vol. 123. – PP. 594-605.
 3. Wang Q., Farrell G. All-fiber multimode-interference-based refractometer sensor: proposal and design// OPTICS LETTERS, February 1, - 2006. – Vol. 31, No. 3. – PP. 317-319.
 4. Patent WO 96/14568 A1, IPCG01N 21/43, 30/74. Optical fiber waist refractometer// Buttry D. A., Vogelmann T.C. – 82071-3355(US); apl. 02.11.94; pub. 17.05.96.
 5. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными ϵ и μ /УФН, - 1967, -Т. 92, вып.3. - С. 517 – 526.
 6. Markos P., Soukoulis C.M. Transmission studies of left-handed materials/Physical Review B 65, 033401, 2002.
 7. Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., Schultz S. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity// Phys. Rev. Lett. Vol. 84, No. 18, pp. 4184-4187, 2000.
 8. Alu A., Engheta N. Guided modes in a waveguide filled with a pair of single-negative, double-negative, and/or double-positive layers// IEEE Transactions on Microwave theory and techniques, vol. 52, no. 1. Pp.199-210, 2004.
 9. Довгалець С.М., Присяжнюк В.В, Хомчук П.А. Модуляція випромінювання в оптичних хвилеводах з від'ємним показником заломлення// Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, - 2005. – №2. – С. 12-18.
 10. Довгалець С.М., Присяжнюк В.В, Хомчук П.А. Вимірювання показника заломлення та мутності з використанням хвилеводів з від'ємним показником заломлення // Оптико-електронні інформаційно-вимірювальні технології, - 2007. – №1(13). – С.185-189.
 11. Shadrivov I.V., Sukhorukov A.A., Kivshar Y.S. Guided modes in negative-refractive-index waveguides// Phys. Rev. E 67, 057602, 2003.
 12. Снайдер А., Лав Дж. Тория оптических волноводов/ Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
- Стаття надійшла 26.09.2007р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф. Родькин Д.Й.