

УДК 548.0:535.511

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАНЬ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНО- ПОВОРОТНИМ МЕТОДОМ

Н. Андрущак¹, І. Карбовник², Я. Бобицький¹,
А. Андрущак¹, О. Кушнір²

¹ Національний університет "Львівська політехніка"
вул. С. Бандери, 12, 79013 Львів, Україна

² Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. ген. Тарнавського, 107, 79017 Львів, Україна
anat@polynet.lviv.ua

Описано модернізовану установку для прецизійного визначення показників заломлення матеріалів оптоелектроніки. Розглянуто схеми високоточного позиціонування досліджуваного зразка та автоматизованої реєстрації інтерференційної картини. Запропоновано спосіб усунення систематичної похибки вимірювань, пов'язаної з можливою непаралельністю зразків. Наведено результати тестових вимірювань.

Ключові слова: показник заломлення, інтерферометрично-поворотний метод, автоматизація експерименту, вимірювальна техніка.

Показник заломлення є однією з основних характеристик матеріалів сучасної оптоелектроніки. Це визначає актуальність розв'язування задачі прецизійного визначення показника заломлення за неруйнівними методами. Відомо, що описаний у літературі інтерферометрично-поворотний метод [1–3] має низку переваг над іншими способами, зокрема, імерсійним методом [4] і методом призми [5]. Основна з них – це можливість експрес-контролю конкретних зразків матеріалу, які надалі можна досліджувати на інший предмет або використовувати в практичних цілях.

Наша мета підвищення точності інтерферометрично-поворотного методу шляхом урахування непаралельності досліджуваних зразків, а також впровадження в експериментальну схему елементів сучасної електроніки та адаптації алгоритмів керування процесом вимірювань.

Розглянемо загальну схему експериментальної установки для визначення показника заломлення (рис. 1). Зразок досліджуваного матеріалу поміщено у вимірювальному плечі інтерферометра. Промінь лазера I (довжина хвилі $\lambda = 633$ нм) розщеплюють у напівпрозорій подільній призмі 2: промінь у плечі еталона відбивається від дзеркала 3, а промінь у вимірювальному плечі проходить крізь поляризатор 5 і зразок II , відбивається від дзеркала 4 і знову проходить крізь

зразок тим же шляхом. Обидва промені, зрештою, інтерферують у подільній призмі, формуючи інтерференційну картину, сфокусовану на фотоприймач 7.

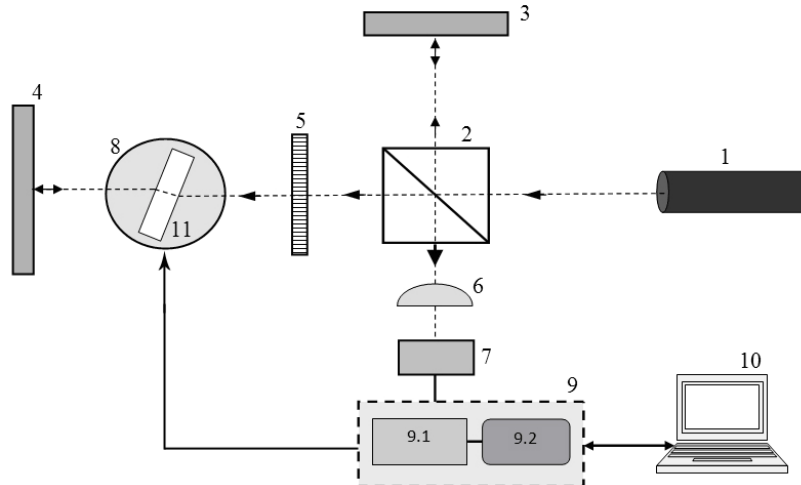


Рис. 1. Модифікована установка для автоматизованого вимірювання показника заломлення в оптичному діапазоні спектра за інтерферометрично-поворотним методом: 1 – лазер; 2 – подільна призма; 3, 4 – дзеркала; 5 – поляризатор; 6 – лінза; 7 – фотоприймач; 8 – механізм повертання зразка; 9 – модуль автоматизації, у складі якого є аналого-цифровий перетворювач (9.1) і блок керування кроковим двигуном (9.2); 10 – персональний комп'ютер; 11 – досліджуваний зразок

Методика вимірювань за схемою рис. 1 полягає в тому, що зразок з паралельними гранями повертають на певний кут φ від початкового нульового положення ($\varphi = 0$). Тоді відбувається зсув інтерференційних максимумів унаслідок зміни оптичної різниці ходу променя в зразку. Якщо товщина зразка дорівнює d , довжина хвилі лазерного світла – λ , а кількість максимумів, на які змістилася інтерференційна картина, – K , то показник заломлення зразка n можна визначити за формулою [1, 3]

$$n = \frac{\sin^2 \varphi + [1 - \cos \varphi - K\lambda/(2d)]^2}{2[1 - \cos \varphi - K\lambda/(2d)]}. \quad (1)$$

Якщо показник заломлення середовища, у якому перебуває досліджуваний зразок, дорівнює n_c , то можна одержати дещо інше робоче співвідношення [6]:

$$n = \frac{n_c^2 \sin^2 \varphi + [n_c(1 - \cos \varphi) - K\lambda/(2d)]^2}{2[n_c(1 - \cos \varphi) - K\lambda/(2d)]}. \quad (2)$$

Таке врахування показника заломлення середовища підвищує точність відповідних вимірювань (див. аналіз [6]).

З формул (1) і (2) видно, що точність визначення показника заломлення безпосередньо залежить від точності задавання кута повороту зразка φ . Тому

одним з першочергових завдань у вдосконаленні методу було створення прецизійної комп'ютеризованої системи кутового переміщення. Для цього обрано біполярний кроковий двигун гібридного типу 17HD6403-02 (виробник – фірма Moons Industries). Цей двигун може працювати в трьох режимах: повнокроковому, півкроковому та мікрокроковому. В останньому режимі двигун забезпечує мінімальне кутове переміщення $\delta\varphi = 1,8^\circ/16$.

Для реалізації мікрокрокового режиму було застосовано дві інтегральні схеми драйверів Allegro Microsystems A3955, кожна з яких забезпечує широтно-імпульсну модуляцію струму в одній з обмоток двигуна. Напруга живлення двигуна становить до 50 В, а максимальний струм в обмотці – 1,5 А. Для керування драйверами використано шість цифрових ліній паралельного інтерфейсу Centronix [7].

Для реєстрації інтерференційної картини та подальшого автоматизованого підрахунку кількості максимумів K застосовано фотодіод ФД-7К, увімкнений у фотодіодному режимі. Сигнал з виходу схеми фотодетектора подають на вхід 12-розрядного аналого-цифрового перетворювача (АЦП) Vupr-Brown. АЦП має вбудований послідовний інтерфейс SPI, використаний для з'єднання АЦП з регістром керування паралельного порту персонального комп'ютера (тут задіяно три лінії регістру керування інтерфейсу Centronix).

Принципову електричну схему модулів автоматизації 9.1 і 9.2, показаних на рис. 1, детально зображено на рис. 2.

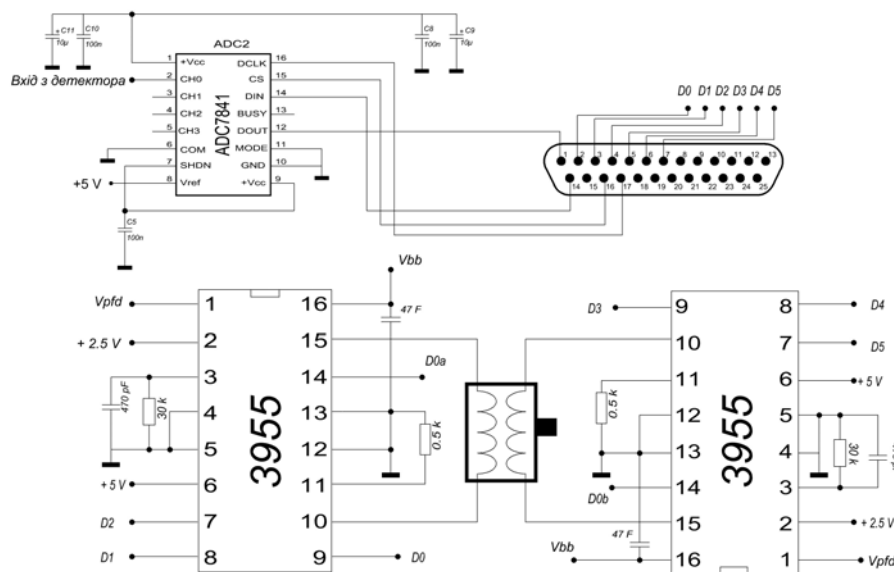


Рис. 2. Принципова схема модуля блока керування кроковим двигуном та модуля АЦП

Для живлення схеми на рис. 2 використовують регульовану в межах 12–24 В напругу живлення крокового двигуна V_{bb} , стабілізовану напругу живлення мікро-

схем 5 В (її одночасно використовують як опорну напругу для АЦП) і стабілізовану опорну напругу 2,5 В, яку використовують цифро-аналогові перетворювачі, вбудовані в мікросхеми А3955.

Позиціонування зразка та автоматизований запис значень кута повороту і відповідних інтенсивностей сигналу на фотодетекторі виконують за допомогою спеціально розробленого нами програмного забезпечення. Зазначимо, що в таких вимірюваннях завжди з'являється проблема точного визначення нульового положення зразка, яке суттєво вносить до реальної похибку вимірювання кута повертання. Пошук цього положення – це досить складна задача, оскільки поблизу нульового положення зразка зазвичай спостерігають широкий інтерференційний максимум, а стандартна точність визначення кутового положення цього максимуму низька. З огляду на це автори [8], наприклад, визначали положення нуля лише шляхом наближених розрахунків.

Ми запропонували суто оптичний метод пошуку нульового положення, описаний у [9, 10], а також програмний спосіб вирішення цієї проблеми. Принцип застосування останнього способу можна зрозуміти з рис. 3, на якому зображено типову послідовність інтерференційних максимумів (модельну криву). Точки T_0 , T_1 , T_2 обирають довільно, причому T_0 повинна перебувати поблизу потенційного нульового положення зразка. Знаючи параметри λ і d , кутову величину φ_1 і кількість інтерференційних максимумів K_1 , можна розрахувати n за допомогою формул (1) або (2). З іншого боку, показник заломлення n можна також розрахувати, узявши λ , d , $\varphi_2 = \varphi_1 + \delta\varphi$ і $K_2 = K_1 + \delta K_1$. Якщо точку T_0 визначено правильно, то показники заломлення в обох випадках однакові. Отже, тут можна застосувати алгоритм пошуку точки T_0 , згідно з яким величину φ_1 обирають так, щоб результати двох розрахунків збіглися.

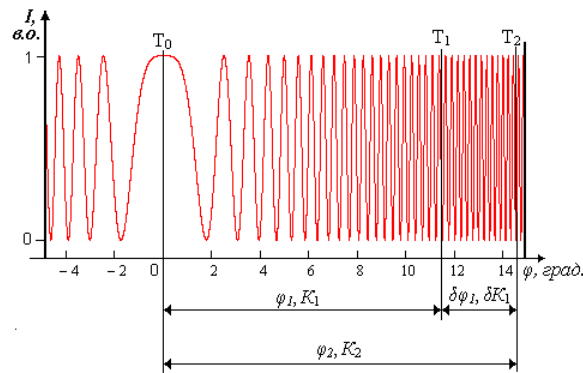


Рис. 3. Ілюстрація програмного способу знаходження нульового положення зразка

Точність вимірювань за інтерферометрично-поворотним методом також суттєво залежить від технології виготовлення зразків, найперше від реального ступеня паралельності його досліджуваних граней, крізь які проходить лазерний промінь. Зрозуміло, що кардинальним виходом з цієї ситуації було б виготовлення зразків з надзвичайно високою паралельністю. Однак для зниження практичної

вартості експериментальних досліджень ми пропонуємо аналітично враховувати непаралельність досліджуваних граней зразка, а не забезпечувати їхню максимальну паралельність.

Виведемо відповідне співвідношення, яке враховує непаралельність вхідної та вихідної граней досліджуваного зразка. Нехай зразок з кутом клиноподібності протилежних робочих граней $\alpha \neq 0$ поміщено в одне з плечей інтерферометра, у якому лазерний пучок перпендикулярний до вхідної грані ($\varphi = 0$). Згідно з виразами, наведеними в [1, 3], внесена різниця ходу тоді $\Delta = nd$ (рис. 4).

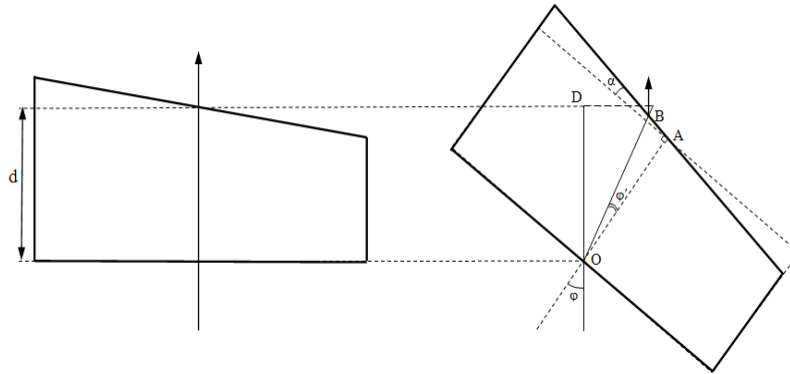


Рис. 4. Оптична різниця ходу, внесена внаслідок повороту досліджуваного зразка за годинниковою стрілкою на кут φ

Можна довести, що після повороту зразка за годинниковою стрілкою на кут φ оптична різниця ходу променя Δ_1 зміниться порівняно з нульовим положенням зразка на $\delta\Delta_1 = \Delta_1 - \Delta$:

$$\frac{\delta\Delta_1}{2} = \frac{nd}{\cos\varphi'} + \frac{nd \operatorname{tg}\varphi' \sin\alpha}{\cos(\alpha + \varphi')} + d - d \left[\frac{1}{\cos\varphi'} + \frac{\operatorname{tg}\varphi' \sin\alpha}{\cos(\alpha + \varphi')} \right] \cos(\varphi - \varphi') - nd, \quad (3)$$

де φ' – кут заломлення світла в зразку. Аналогічно можна одержати, що після повороту зразка проти годинникової стрілки зміна різниці ходу Δ_1 становитиме $\delta\Delta_2 = \Delta_2 - \Delta$:

$$\frac{\delta\Delta_2}{2} = \frac{nd}{\cos\varphi'} - \frac{nd \operatorname{tg}\varphi' \sin\alpha}{\cos(\alpha + \varphi')} + d - d \left[\frac{1}{\cos\varphi'} - \frac{\operatorname{tg}\varphi' \sin\alpha}{\cos(\alpha + \varphi')} \right] \cos(\varphi - \varphi') - nd. \quad (4)$$

Для простоти обчислень тут прийемо, що зразок перебуває в повітрі, а для показника заломлення повітря наближено взято одиничне значення.

Різницю ходу в термінах порядку K зсуву інтерференційної картини можна визначити за формулою $\delta\Delta = K\lambda$. Ураховуючи закон Снеліуса ($\sin\varphi/\sin\varphi' = n$) і стандартне тригонометричне співвідношення для $\cos(\varphi - \varphi')$, із формули (3) одержимо спрощену формулу для розрахунку K_1 після повороту зразка за годинниковою стрілкою:

$$K_1 = \frac{2d}{\lambda} \left[\frac{(\sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} - \cos\varphi)\sqrt{n^2 - \sin^2\varphi}}{\sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} - \operatorname{tg}\alpha \sin\varphi} + 1 - n \right]. \quad (5)$$

Так само на підставі формули (4) можна знайти зсув інтерференційної картини K_2 після повороту зразка проти годинникової стрілки:

$$K_2 = \frac{2d}{\lambda} \left[\frac{(\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi} - \cos \varphi)(\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi} - 2 \operatorname{tg} \alpha \sin \varphi)}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi} - \operatorname{tg} \alpha \sin \varphi} + 1 - n \right]. \quad (6)$$

Віднявши почленно формули (3), (4) і виконавши належні спрощення, ми отримуємо остаточне робоче співвідношення, яке можна використовувати для розрахунку показника заломлення n зразка з кутом клина α :

$$n = \sqrt{\left(\frac{2 \cos \varphi - A}{2 - A/(\operatorname{tg} \alpha \sin \varphi)} \right)^2 + \sin^2 \varphi}. \quad (7)$$

Тут $A = \frac{(K_1 - K_2)\lambda}{2d}$ (де $K_1 > K_2$), а величини K_1 і K_2 знаходять експериментально,

повертаючи зразок на кут φ , відповідно, за і проти годинникової стрілки. Нарешті, клиноподібність зразка α також можна вважати величиною, відомою з експерименту.

Описану модернізовану схему вимірювань апробовано на приладі дослідження показників заломлення кристалів ніобату літію LiNbO_3 . Зокрема, уточнено показники заломлення для звичайного та незвичайного променів у цих кристалів за температури 293 К. Вони становлять 2,2868 і 2,2032, відповідно. Похибка визначення показника заломлення в обох випадках не перевищує 0,03 %. Одержані значення узгоджуються з літературними даними, відомими для кристалів LiNbO_3 за умов кімнатної температури.

Отже, запропоновано та обговорено низку теоретичних і практичних кроків, зроблених з метою модернізації та підвищення точності інтерферометрично-поворотного методу вимірювання показників заломлення матеріалів, які використовують в оптоелектроніці. Зокрема, підвищено точність позиціонування досліджуваного зразка в схемі інтерферометра завдяки використанню мікрокрокового режиму обертання гібридного крокового двигуна. Додатково поліпшено та вдосконалено схему реєстрації інтерференційної картини та розглянуто суто програмний спосіб визначення нульового положення зразка. Запропоновано також аналітичний метод усунення систематичної похибки визначення показника заломлення, пов'язаної з непаралельністю досліджуваних зразків, виведено відповідне робоче співвідношення, яке враховує реальну клиноподібність зразків. Цей метод дає змогу суттєво знизити вимоги до виготовлення, підготовки та обробки досліджуваних зразків через відповідне послаблення вимог до точності дотримання паралельності їхніх граней.

1. Андрущак А. С., Мыцык Б. Г. Измерение показателей преломления изотропных и кристаллических материалов интерферометрическим методом // Измерительная техника. 1992. № 5. С. 33–34.
2. Schlarb U., Betzler K. Influence of the detect structure on the refractive indices of undoped and Mg-doped lithium niobate // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 50. P. 751–757.
3. Пат. 2102700 Российская Федерация G 01 B 9/02, G 01 N 21/45. Двухлучевой интерферометр для измерения показателя преломления изотропных и

- анизотропных материалов / Андрущак А. С.; заявитель и патентообладатель: Андрущак А. С. – №5006682/28; заявл. 30.07.91; опубл. 20.01.98, Бюл. №2.
4. Романюк М. О. Кристалооптика. К.: ІЗМН, 1997. 432 с.
 5. Daimon M., Masumura A. High-accuracy measurements of the refractive index and its temperature coefficient of calcium fluoride in a wide wavelength range from 138 to 2326 nm // *Appl. Opt.* 2002. Vol. 41. P. 5275–5281.
 6. Пат. №39155 Україна, МПК G 01 N 21/01. Інтерферометрично-поворотний спосіб вимірювання показника заломлення оптичних матеріалів / Андрущак А. С., Сиротинський О. І., Андрущак Н. А., Яцишин Є. М.; заявник та патентовласник: Національний університет “Львівська політехніка”. №u200810203; заявл. 08.08.2008; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 3.
 7. Sorokin A. V. Instrument-to-PC Interfacing Using an Enhanced Parallel Port // *Instrum. Exper. Techn.* 2002. Vol. 45. P. 87–91.
 8. Gillen G. D., Guha S. Refractive-index measurements of zinc germanium diphosphide at 300 and 77 K by use of a modified Michelson interferometer // *Appl. Opt.* 2004. Vol. 43. P. 2054–2057.
 9. Andrushchak A. S., Tybinka B. V., Ostrovskij I. P. et al. Automated interferometric technique for express analysis of the refractive indices in isotropic and anisotropic optical materials // *Opt. Lasers Eng.* 2008. Vol. 46. P. 162–167.
 10. Пат. №17929 Україна, МПК G 01 N 21/01. Спосіб визначення показника заломлення оптичних матеріалів / Андрущак А. С., Островський І. П., Тибінка Б. В.; заявник та патентовласник: Національний університет “Львівська політехніка”. №u200604643; заявл. 08.04.2006; опубл. 16.10.2006, Бюл. №10.

IMPROVED MEASUREMENT OF REFRACTIVE INDEX BY MEANS OF INTERFEROMETRIC-ROTATIONAL TECHNIQUE

N. Andrushchak¹, I. Karbovnyk², Ya. Bobitski¹, A. Andrushchak¹

¹ Lviv Polytechnic National University

S. Bandera Str., 12, UA-79013 Lviv, Ukraine

² Ivan Franko National University of Lviv

Gen. Tarnavsky Str., 107, UA-79017 Lviv, Ukraine

anat@polynet.lviv.ua

We present and discuss a modernized technique and the corresponding setup built in order to precisely determine refractive indices of materials for optoelectronics. High-precision sample positioning and accurate automated detection of interference fringe shifts are analyzed in detail. A technique that allows eliminating systematic errors caused by non-parallel sample faces is suggested. Test experimental results are reported.

Key words: refractive index, interferometric-rotational technique, automatization of experiment, measuring technology.

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЙ
ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННО-ПОВОРОТНЫМ
МЕТОДОМ**

**Н. Андрущак¹, И. Карбовнык², Я. Бобицкий¹,
А. Андрущак¹, О. Кушнир²**

¹ *Национальный университет “Львовская политехника”
ул. С. Бандеры, 12, 79013 Львов, Украина*

² *Львовский национальный университет имени Ивана Франко
ул. ген. Тарнавского, 107, 79017 Львов, Украина
anat@polynet.lviv.ua*

Описана модернизированная установка для прецизионного определения показателей преломления материалов оптоэлектроники. Рассмотрены схемы высокоточного позиционирования исследуемого образца и автоматизированной регистрации интерференционной картины. Предложен способ устранения систематической погрешности измерений, связанной с возможной непараллельностью образцов. Приведены результаты тестовых измерений.

Ключевые слова: показатель преломления, интерференционно-поворотный метод, автоматизация эксперимента, измерительная техника.

Стаття надійшла до редколегії 25.02.2010

Прийнята до друку 21.04.2010