

Як видно з табл. 2, 3 усереднення вхідних даних дає змогу зменшити похибку визначення $\omega(a)$.

Той факт, що при різних видах розподілів точність визначення $\omega(a)$ є різною, свідчить про необхідність попереднього калібрування приладу для кожного виду розподілу.

Висновки

Спираючись на результати, одержані в статті, можемо стверджувати, що метод регуляризації Тихонова є ефективним для визначення розподілу розмірів частинок та дає ліпші результати, ніж метод, запропонований в [3]. Статистичне усереднення початкових результатів дає змогу досягнути потрібної точності вимірювання $\omega(a)$.

1. <http://www.uni-weimar.de/Bauing/aufber/Literatur/Stark-Mueller-Durban03.pdf>. 2. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – Москва: Мир, 1986. 3. Голдак А.Я., Шаповалов Г.О. Модель процесу вимірювання розмірів порошкоподібних матеріалів // Вимірювальна техніка та метрологія. – Львів. – 2006. – Вип. 66. 4. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Численные методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1990. 5. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М. 1979. 6. Сизиков В.С. Устойчивые методы обработки результатов измерений. – СПб, 1999. 7. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М., 1989.

УДК 548.0:535.511

Б.В.Тибінка, І.П.Островський, А.С.Андрущак
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра телекомунікацій

АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЗАЛОМЛЕННЯ ПЛОСКОПАРАЛЕЛЬНИХ ПЛАСТИН ОПТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНО-ПОВОРОТНИМ МЕТОДОМ

© Тибінка Б.В., Островський І.П., Андрущак А.С., 2006

B.V. Tybinka, I.P. Ostrovskiy, A.S. Andrushchak

AUTOMATIZATION OF REFRACTIVE INDEX MEASUREMENT OF PARALLEL-SIDED PLATES FROM OPTICAL MATERIALS BY INTERFEROMETRIC TURNING METHOD

© Tybinka B.V., Ostrovskiy I.P., Andrushchak A.S., 2006

Створена автоматизована установка для вимірювання показників заломлення оптичних матеріалів інтерферометрично-поворотним методом. Установка апробована на прикладі одновісного кристалу LiNbO_3 . Внаслідок проведених вимірювань одержані такі параметри: $n_o=2.2865\pm0.0007$, $n_e = 2,2034\pm0,0007$ (для довжини світлової хвилі $\lambda=0,6328$ мкм), які добре узгоджуються з літературними даними.

Automatizatonal equipment for refractive indices measurement of optical materials by interferometric-turning method was designed. The equipment is approbated on example of uniaxial crystal LiNbO_3 . As a result of measurements the following parameters were obtained: $n_o=2.2865\pm0.0007$, $n_e = 2,2034\pm0,0007$ (for wavelength $\lambda=0,6328$ μm), which are in good agreement with literature data.

Вступ

Показник заломлення – це один із основних параметрів оптичних матеріалів, знання якого необхідне для вирішення низки фізичних задач як фундаментального, так і прикладного значення.

Одним із способів, що забезпечує неруйнівний контроль цього параметра є інтерферометрично-поворотний метод [1–6]. Його перевага порівняно з еліпсометричним [7], імерсійним [8] та методом призми [9], полягає ще й в тому, чи вимірний плоскопаралельний зразок із досліджуваного матеріалу можна використовувати безпосередньо для подальших експериментів чи майбутніх практичних застосувань. Суть інтерферометрично-поворотного методу полягає у тому, що зразок у вигляді плоскопаралельної пластини товщиною d із оптичного матеріалу обертають в одному із плечей інтерферометра Майкельсона до встановлення нульового положення зразка, вимірюючи при цьому кут повороту зразка φ та величину зсуву інтерференційної картини, яка визначається в порядках інтерференційних максимумів K . На основі вимірних величин K і φ визначають показник заломлення n . У практичній реалізації цей метод був запропонований в [1], пізніше вдосконалений нами в [2,3], а нині поширено використовується [4–6] в наукових дослідженнях, що зумовлює його перспективність та актуальність.

Однак у всіх попередніх роботах є деякі недоліки. Зокрема в роботі [1] були проведені лише пробні дослідження, а точність визначення показника заломлення була низька. У теоретичних роботах [2,3] автори не враховували експериментальні особливості встановлення нульового положення зразка (положення, при якому промінь лазера падає на поверхню зразка перпендикулярно), що вносить істотну похибку у визначення кута повороту, а відповідно і показника заломлення матеріалу. Застосування наближеної оцінки нульового положення зразка в [6] зменшує точність визначення показника та ускладнює його вимірювання.

Метою роботи було створення автоматизованої установки, що забезпечує проведення швидкого експрес-аналізу плоскопаралельних зразків із оптичних матеріалів за показниками заломлення та підвищує точність їх вимірювання.

Методика експерименту

Інтерферометрична установка для вимірювання абсолютних показників заломлення оптичних матеріалів (див. рис. 1) базується на ідеї нашого патенту [3] і складається з інтерферометра Майкельсона (лазер, два дзеркала, розділююча призма), механізму обертання зразка (механізм обертання з великим коефіцієнтом передачі, кроковий двигун і пристрій фіксації зразка) та оптичної схеми реєстрації (поляризатора, лінзи, фотоприймача, модуля керування і персонального комп'ютера).

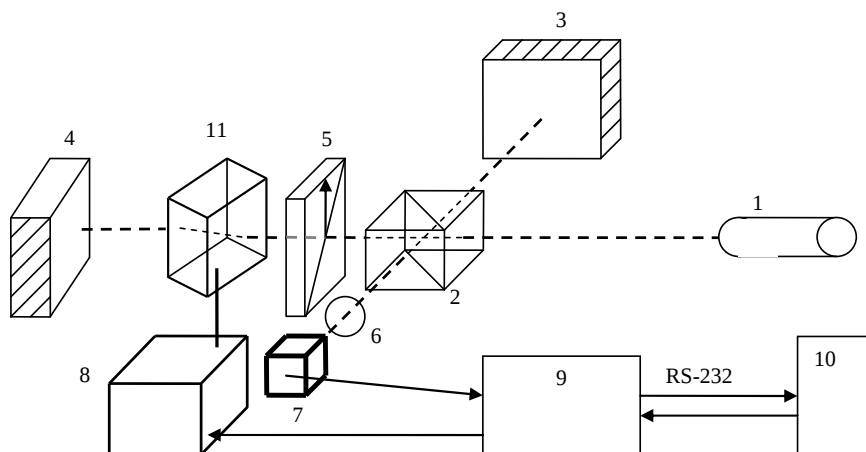


Рис.1. Схема автоматизованої установки для вимірювання показника заломлення оптичних матеріалів інтерферометрично-поворотним методом: 1 – He-Ne лазер; 2 – розділююча призма; 3, 4 – дзеркала; 5 – поляризатор; 6 – лінза; 7 – фотоприймач; 8 – механізм обертання; 9 – модуль керування; 10 – персональний комп'ютер; 11 – досліджуваний зразок

У вимірювальному плечі інтерферометра Майкельсона поміщають досліджуваний зразок у вигляді плоскопаралельної пластини із оптичного матеріалу. Світловий промінь He-Ne лазера 1 розщеплюється на два в напівпрозорій розділюючій призмі 2. Промінь у плечі еталона відбивається

від дзеркала 3; промінь у вимірювальному плечі проходить через поляризатор 5 та зразок 11, відбивається від дзеркала 4 і знову проходить через зразок по тому самому шляху, незалежно від кутового його положення, що обумовлено плоскопаралельністю самого зразка. Обидва промені зустрічаються у напівпрозорій розділюючій призмі 2, формуючи інтерференційну картину, яка лінзою 6 фокусується на фотоприймачі 7.

При повороті зразка від нульового положення до деякого кута φ спостерігається зміщення інтерференційних максимумів, зумовлене зміною оптичного ходу променя у зразку. Розроблена комп'ютерна програма керування запускає кроковий двигун, який через передавальний механізм обертає зразок товщиною d на кут φ , а також здійснює реєстрацію зміщення інтерференційних максимумів K на фотоприймачі. Показник заломлення n визначають за формулою [2, 3]

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

де λ – довжина хвилі лазерного променя.

Типові результати вимірювань кристала ніобату літію показані на рис. 2.

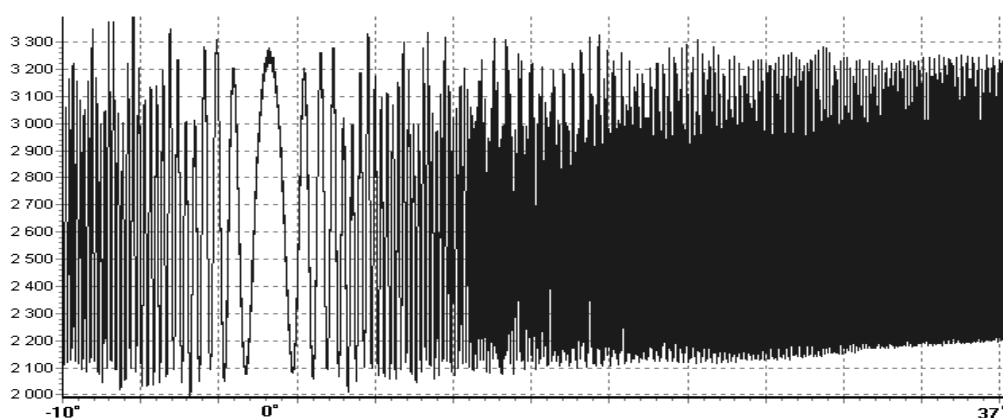


Рис. 2. Результати вимірювань кристала ніобату літію в діапазоні кута повороту φ від -10° до 37°

Під час подібних вимірювань виникає проблема визначення нульового положення зразка, що має істотне значення при знаходженні реальної похибки вимірювання кута обертання. Пошук «0» є досить складною задачею, оскільки поблизу нульового положення зразка спостерігаються дуже широкі інтерференційні екстремуми (рис.2), кутове положення якого можна встановити лише з невеликою точністю. У зв'язку з цим автори, наприклад [6], визначали «0» шляхом наближених розрахунків.

Нами запропоновано програмний спосіб вирішення цієї проблеми. Принцип застосування цього способу можна зрозуміти з рис. 3, на якому зображена типова послідовність інтерференційних максимумів (модельна крива).

Точки T_0 , T_1 , T_2 вибирають довільно, причому T_0 знаходиться поблизу потенційного нульового положення зразка. Знаючи λ , d , кутову величину φ_1 і кількість інтерференційних максимумів K_1 , можна порахувати n за допомогою формули (1). Також можна порахувати n , взявши λ , d , $\varphi_1 + d\varphi$ і $K_1 + dK$. Якщо точка T_0 буде вказана правильно, то показники заломлення в обох випадках будуть однакові. Застосовано алгоритм пошуку «0», який підбирає φ_1 так, щоб результати збігалися.

Внаслідок згаданих вище вдосконалень програма обробки результатів на теоретичній кривій забезпечує абсолютну похибку визначення показника заломлення n порядку 10^{-7} . Експериментально за допомогою вищенаведеного програмного способу нульове положення зразка можна встановити з точністю 0.004 градуса, що визначає похибку вимірювання кута повороту зразка $\delta\varphi = 0.004^\circ$, оскільки реальна похибка встановлення кутового положення зразка в нашому експерименті становила 0.0008° .

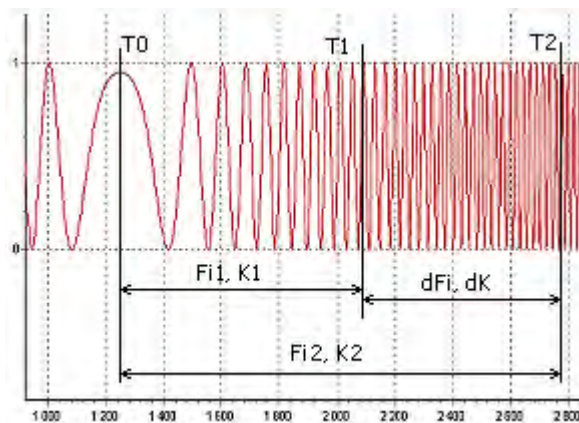


Рис. 3. Ілюстрація програмного способу встановлення
нульового положення зразка

Апробація методу

Апробацію методу здійснювали на прикладі одноосного кристала LiNbO_3 . На одержаних зрізах кристалів при пропусканні світла з поляризацією, паралельною до осі обертання проводили вимірювання незвичайного показника заломлення n_e , а при використанні світла з поляризацією, перпендикулярною до осі обертання – вимірювання звичайного показника заломлення n_o . При цьому кристал встановлювали так, щоб головна оптична вісь була паралельною до осі обертання.

Для попередньої обробки вимірюного сигналу (рис.2) була застосована його фільтрація. Напряга на виході фотодіода, окрім корисного сигналу, містить завади і постійну складову, яка міняється залежно від кута повороту досліджуваного зразка. Ці фактори значно ускладнюють точне визначення порядку інтерференції K за експериментальними кривими (див. рис.2). Тому застосовують два фільтри. Низькочастотний фільтр усуває завади, що забезпечує підвищення точності підрахунку кількості максимумів K (загальна кількість максимумів може досягати 10 тис. і тому застосовується винятково автоматичний підрахунок кількості максимумів). Високочастотний фільтр усуває постійну складову з вхідного сигналу. Це дає змогу значно спростити і формалізувати алгоритм підрахунку максимумів, що своєю чергою зменшує імовірність виникнення помилки під час підрахунків K .

Для фільтрації використовують цифрові фільтри першого порядку, еквівалентом яких є інтегруюча і диференціююча ланки з додатковими модифікаціями:

1. Оскільки корисний сигнал являє собою синусоїдальний сигнал змінної частоти, мінімальна і максимальна частоти можуть відрізнитися в тисячі разів. У нашому випадку використання звичайних фільтрів призведе до часткової або повної втрати корисної інформації. Тому застосовано фільтри зі змінною частотою зрізу. Закон зміни частоти зрізу фільтрів визначається користувачем програми вказуванням λ , d , φ_0 і n . Параметри φ_0 і n задаються приблизно. Критерієм правильного визначення цих параметрів є відсутність значної зміни амплітуди корисного сигналу у вихідному сигналі.

2. Як відомо такі фільтри завжди змінюють фазу синусоїдального сигналу. У нашому випадку це призведе до помітного збільшення похибки визначення показника заломлення. Тому фільтрацію здійснюють в два етапи. Спочатку відліки беруться, починаючи від першого X_0 до останнього X_n . Потім у зворотному порядку, починаючи з X_n до X_0 . Тобто, фільтрація відбувається два рази. Внаслідок першого проходу фаза сигналу міняється на 45° в один бік. Внаслідок другого проходу фаза міняється на 45° в інший бік. Сумарний зсув фази залишається дорівнювати 0.

Похибка визначення показника заломлення δn для зразка фіксованої товщини залежить від кута обертання, асимптотично зменшуючись при збільшенні кута. Тому вимірювання n потрібно проводити при максимально можливих кутах обертання $\varphi = 50^\circ \div 87^\circ$, для яких значення похибки визначення показника заломлення становить $\delta n = 0,0007$. Отже, забезпечується в декілька разів вища точність вимірювань, ніж на аналогічній установці в [6].

Внаслідок проведених вимірювань одержані такі результати: $n_o=2.2865\pm0.0007$, $n_e = 2.2034\pm0.0007$. Для порівняння у таблиці наведені літературні дані вимірювання показника заломлення кристалів LiNbO_3 різними методами.

Показники заломлення кристала LiNbO_3

Т, К	λ , мкм	n	Величина	Кристал	Посилання
293	0,6328	n_e	2,1890	надлишок Li	[10]
293	0,6328	n_o	2,2878	надлишок Li	[10]
293	0,63282	n_e	2,2024	Li/Nb=0.946	[10]
293	0,63282	n_o	2,2865	Li/Nb=0.946	[10]
298	0,6328	n_e	2,2028	–	[11]
298	0,6328	n_o	2,2866	–	[11]

Як видно з таблиці, показник заломлення кристала дуже залежить від стехіометрії. Зокрема зміщення стехіометрії кристала в бік зростання Nb приводить до істотного зростання величини незвичайного показника заломлення n_e , а також до незначного зменшення величини n_o . Одержані нами результати свідчать про те, що досліджувані кристали мали надлишок Nb.

Висновки

Проведена автоматизація вимірювання показника заломлення оптичних матеріалів на створеній на основі інтерферометра Майкельсона експериментальній установці, яка полягає у 1) створенні програми керування вимірюваннями, що забезпечує покрокове обертання та реєстрацію кутового положення зразка, а також запис зміщення інтерференційних максимумів на фотоприймачі; 2) створенні програми оброблення результатів вимірювань, яка об'єднує фільтрацію одержаних експериментальних даних та алгоритм пошуку нульового положення зразка. За рахунок цього вдалося підвищити точність вимірювань. Апробацію установки здійснювали на модельному одноосному кристалі LiNbO_3 . Одержані такі результати: $n_o=2.2865\pm0.0007$, $n_e=2.2034\pm0.0007$. Це добре узгоджується з літературними даними і свідчить про можливість достатньо точного вимірювання на створеній установці показників заломлення для плоскопаралельних зразків із оптичних матеріалів.

Робота виконана за підтримки Українського науково-технологічного центру (проект № 3222).

1. Schlarb U. and Betzler K. // *Phys. Rev.* – 1994. – В 50. – Р.751–757. 2. Андрущак А.С., Мыцук Б.Г. // *Измерительная техника.* – 1992. –Т. 5. –С. 33–34. 3. Андрущак А.С. Патент РФ №2102700 от 30.07.91.– Бюл изобр.– №2. 4. Nicholls J. F. H., Henderson B., and Chai B. H. T. // *Appl. Opt.* – 1997. – V.36. – P.8587–8594. 5. Maruyama H., Inoue S., Mitsuyama T., Ohmi M. and Haruna M. // *Appl. Opt.* – 2002. – V.41. – P.1315–1322. 6. Gillen G.D. and Guha S. // *Appl. Opt.* – 2004. – V.43. – P. 2054–2057. 7. Adamson P. // *Opt. Laser Technol.* – 2002 – V.34. – P. 561–568. 8. Романюк М.О. *Кристаллооптика.*– Київ: ІЗМН, 1997. – 432с. 9. Daimon M. and Masumura A. // *Appl. Opt.* – 2002. – V. 41. – P. 5275–5281. 10. Nikogosyan D.N. *Properties of optical and laser-related materials. A handbook.* – John Wiley & Sons, Chichester-New York-Weinheim-Brisbane-Singapore-Toronto, 1997. – 594 p. 11. *Properties of Lithium Niobate, EMIS Data Reviews Series.* – No. 5. – INSPEC. – London, 1989.