

# МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

УДК 535.321:681.787

Н.А. Андрущак, О.І. Сиротинський  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра телекомунікацій

## ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНА УСТАНОВКА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ ПЛОСКОПАРАЛЕЛЬНИХ ПЛАСТИН В ДІАПАЗОНАХ ММ-СУБММ ДОВЖИН ХВИЛЬ. АПРОБАЦІЯ НА ПРИКЛАДІ ОПТИЧНОГО СКЛА І КРИСТАЛІВ КВАРЦУ, САПФІРУ ТА ЕВЛІТИНУ

© Андрущак Н.А., Сиротинський О.І., 2009

N.A. Andrushchak, O.I. Syrotynskiy

## THE INTERFEROMETER DEVICE FOR PLANE-PARALLEL PLATES REFRACTION INDEX ESTIMATION AT MM TO SUB-MM WAVELENGTH. TESTING THE EXAMPLES OF OPTICAL GLASS AND FOR QUARTZ, SAPPHIRE, EVLITIN CRYSTALS.

© Andrushchak N.A., Syrotynskiy O.I., 2009

На основі запатентованого нами інтерферометрично-поворотного методу був створений та описаний принцип роботи експериментальної установки для визначення показника заломлення плоскопаралельних пластин із ізотропних чи анізотропних матеріалів в діапазонах міліметрових-субміліметрових (мм-субмм) довжин хвиль. Проаналізовано процес вимірювання зсуву інтерференційної картини на основі розробленого програмного забезпечення, наведено необхідні робочі співвідношення та оцінено експериментальну похибку визначення показника заломлення. Апробацію роботи установки на частоті джерела випромінювання  $f=33\text{ГГц}$  та відповідний розрахунок значень показників заломлення було здійснено на прикладі плоскопаралельних зразків із оптичного скла ( $n=1.53$ ), кристалів кварцу ( $n=2.12$ ), сапфіру ( $n=3.18$ ) та евлітину ( $n=2.02$ ).

Based on patented by us interferometer-turning method the experimental set-up for refractive index measurement of parallel plates from isotropic and anisotropic materials in ranges millimeter-submillimeter (mm-submm) wave length have been created and described. The process of interference fringe shift measurement that based on created software has been analyzed, necessary working correlations have been given and experimental accuracy of refractive indexes measurement has been appraised. The set-up approbation for electromagnetic source  $f=33\text{GHz}$  frequency and necessary calculation of refractive indexes for parallel plate samples of optical glass ( $n=1.53$ ) and crystalline quartz ( $n=2.12$ ), sapphire ( $n=3.18$ ) and evlitine ( $n=2.02$ ) have been done.

### Вступ

Сьогодні галузь зв'язку динамічно розвивається [1, 2], надаючи нові послуги з передачі цифрових даних, телефонії, мобільного зв'язку тощо. Поряд із системами передачі інформації, які використовують металевий чи оптичний кабель, за останні десятиліття велику популярність здобув

радіо- та мобільний зв'язок. Для цього використовуються його переваги: можна організувати передачу даних між різними об'єктами, що знаходяться у важкодоступних місцях – у космосі, на землі чи на морі, наприклад, із космічними станціями, дослідницькими лабораторіями в Антарктиді, кораблями, що перебувають у відкритому плаванні.

Приймод радіо- чи телепередач також відбувається за допомогою радіозв'язку. Слід зазначити, що системи телекомунікацій розвиваються в бік вищих частот, що має на меті підвищити швидкість обміну даними та пропонувати нові види сервісу. Для отримання максимально ефективного результату потрібно забезпечити якомога кращі умови поширення радіохвиль у височастотному діапазоні. Для цього використовуються різні типи антен, в тому числі плоскі та лінзові антени з різними діаграмами направлення [3–5, 9]. До розробників антен ставляться вимоги щодо покращання їх показників за рахунок уточнення параметрів існуючих матеріалів чи пошуку нових матеріалів для виробництва відповідних антен. При цьому створюються нові матеріали, для яких необхідно визначити певні параметри, зокрема показник заломлення. Часом це буває доволі складно, особливо в діапазонах міліметрових-субміліметрових довжин хвиль.

У [6] було запропоновано інтерферометрично-поворотний метод, на основі якого можна проводити вимірювання показника заломлення матеріалів в діапазонах міліметрових-субміліметрових довжин хвиль, виведено основні робочі формули, теоретично оцінено похибку визначення показника заломлення.

У цій роботі проведено автоматизацію створеної інтерферометричної установки для відповідних вимірювань показників заломлення в діапазонах мм-субмм довжин хвиль, в якій нове конструктивне виконання та розроблене програмне забезпечення дало змогу спростити процес вимірювання і максимально здешевити апаратну частину установки.

### Опис роботи установки

На рис. 1 зображено схему установки на основі інтерферометра Маха-Цендера для визначення інтерферометрично-поворотним методом показника заломлення ізотропних та анізотропних матеріалів в діапазонах міліметрових та субміліметрових довжин хвиль.

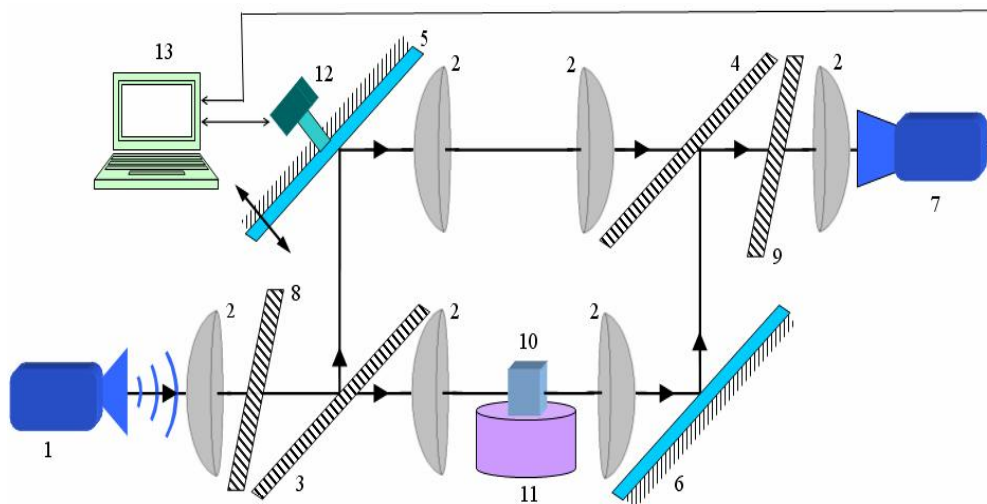


Рис. 1. Експериментальна установка для вимірювання показника заломлення ізотропних та анізотропних матеріалів в діапазоні мм-субмм довжин хвиль інтерферометрично-поворотним методом

Запропонована інтерферометрична установка містить джерело електромагнітного випромінювання: діод Ганна 1, фокуруючі лінзи 2 для зменшення розбіжності електромагнітної хвилі, перший 3 та другий 4 ґраткові розділювачі променя для розділення електромагнітного випромінювання на два

промені, рухомий дзеркальний відбивач променя з можливістю механічного переміщення 5 та нерухомий дзеркальний відбивач променя 6, приймач випромінювання 7, поляризатор 8 і аналізатор 9, досліджуваний плоскопаралельний зразок 10, що розміщений на кутомірному поворотному пристрої 11, кроковий двигун 12, що керується за допомогою блока керування та індикації 13.

Наявність джерела електромагнітних хвиль із постійною довжиною хвилі випромінювання 1 (діод Ганна) дає змогу забезпечити необхідну довжину хвилі випромінювання в міліметровому чи субміліметровому діапазоні довжин хвиль, доволі високу його стабільність [8] та простоту реалізації вимірювального пристрою. Можливість використання нерухомого дзеркального відбивача 6 спрощує синхронізацію пристрою, зменшує апаратну реалізацію та підвищує точність вимірювання. Наявність рухомого дзеркального відбивача 5 з можливістю механічного переміщення є необхідною для визначення різниці ходу променя по мінімуму інтерференційної картини та подальшого розрахунку показника заломлення.

Кутомірний пристрій 11, що розташований в одному з плечей інтерферометра між двома лінзами 2, дає змогу зафіксувати вимірювальний зразок і виміряти кут повороту, який необхідний для визначення показника заломлення. Кроковий двигун 12 призначений для переміщення рухомого дзеркального відбивача 5 і не потребує значної кількості апаратних засобів для його управління. Програмований блок керування і індикації 13 складається з АЦП, вхід якого з'єднаний з виходом приймача електромагнітного випромінювання 7, схеми керування кроковим двигуном 12 та розробленого програмного забезпечення. Блок 13 забезпечує фізичний і логічний зв'язок між елементами пристрою та адаптацію до зміни вхідних даних під час вимірювання, контролює зміну положення рухомих елементів пристрою та спрощує процес вимірювання показника заломлення досліджуваного матеріалу.

Вимірювання проводиться в такий спосіб. Зразок 10 встановлюють на кутомірному поворотному пристрої 11 в одному із плечей інтерферометра Маха-Цендера. Рухомий дзеркальний відбивач 5 переміщається в такий спосіб, щоб на приймачі спостерігався мінімум інтерференційної картини. Повертання зразка 10 веде до зсуву інтерференційної картини, тобто до зміни сигналу на приймачі. Відбивач 5 за допомогою крокового двигуна 12, який керується блоком керування та індикації 13, повертає інтерференційну картину до мінімуму. Значення сигналу на приймачі також фіксується блоком 13. Знята експериментальна залежність інтенсивності сигналу від положення рухомого дзеркала апроксимується за методом найменших квадратів з використанням полінома третього степеня. Це дає можливість точніше визначити величину зсуву інтерференційної картини і розраховувати значення показника заломлення, використовуючи формулу для вимірювання показника заломлення.

### **Необхідні робочі співвідношення**

Для розрахунку абсолютного показника заломлення потрібно визначити залежність зсуву інтерференційної картини від кута повороту зразка під час його повертання від нульового положення до деякого кута  $\varphi$ . Нульове положення – це таке положення зразка, за якого промінь від джерела електромагнітного випромінювання падає на поверхню зразка перпендикулярно. У [6] було виведено робочі співвідношення, які дають можливість обчислити показник заломлення досліджуваного зразка під час його повороту на деякий визначений кут.

Коли експериментальна залежність інтенсивності сигналу від переміщення рухомого дзеркала знята та апроксимована (див. рис. 2), величина зсуву інтерференційної картини під час повертання зразка від нульового положення на деякий кут  $\varphi$  може бути знайдена з цього рисунка.

На рис. 2 зображено експериментальну залежність зсуву інтерференційної картини, отриманої на прикладі досліджуваного зразка із оптичного скла під час його повороту від нульового положення до наперед визначеного кута повороту. Відзначимо, що ця залежність була отримана в середовищі комп'ютерної програми CommPort Data, яку було розроблено для можливості контролю

та керування правильним ходом виконання експерименту, а також для отримання графічних та розрахункових результатів на основі виведених нами робочих формул. Так показник заломлення може бути обчислений за такою формулою [7]:

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

де  $d$  – товщина досліджуваного зразка;  $\varphi$  – кут повороту;  $\lambda$  – довжина хвилі джерела випромінювання;  $K$  – величина зсуву інтерференційної картини.

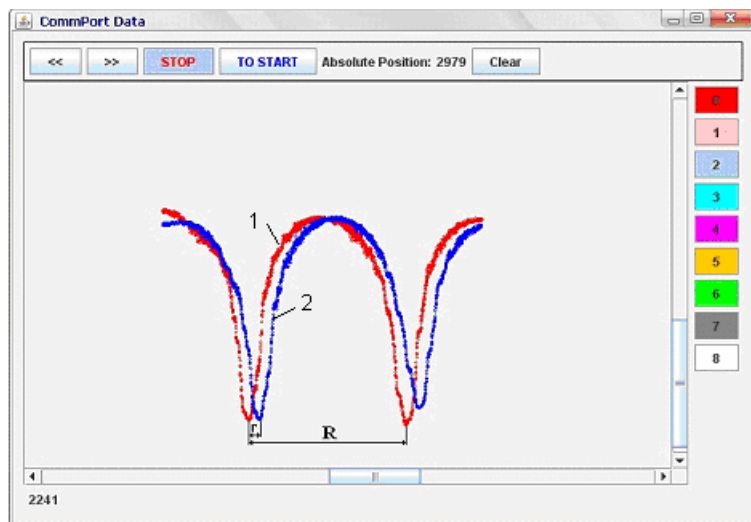


Рис. 2. Експериментальні залежності зсуву інтерференційної картини на прикладі оптичного скла для зразка в нульовому положенні (крива 1) та під час його повороту на кут  $30^\circ$  (крива 2)

Величина зсуву інтерференційної картини може бути знайдена безпосередньо з графіків апроксимованих залежностей (рис. 2). Для цього спочатку визначають положення хоча б двох мінімумів інтерференційної картини і відповідно відстань  $R$  між ними в нульовому положенні, враховуючи криву 1. Після цього зразок повертають на деякий фіксований кут і проводять процедуру вимірювання знову. Отримують подібну апроксимовану криву відображення інтерференційної картини (крива 2), кожен з мінімумів якої зсунутий на деяку відстань  $r$  від нульового положення. Тоді зсув інтерференційної картини може бути обчислений як

$$K = \frac{r}{R}. \quad (2)$$

Підставляючи (2) в (1), можна розрахувати шукане значення показника заломлення.

Теоретично розрахована точність визначення показника заломлення цим методом, згідно з [7], становить  $6.8 \cdot 10^{-3}$ . Для нашої установки за наявного обладнання та відповідного програмного забезпечення експериментальна похибка визначення показника заломлення становила  $2 \cdot 10^{-2}$ .

### Результати експериментальних вимірювань

Ми провели ряд експериментів на плоскопаралельних зразках з різних матеріалів.

На рис. 3 і 4 показано графічні експериментальні залежності, зняті на створеній установці для різного роду досліджуваних зразків. На цих графічних залежностях відображені криві інтерференційних картин для випадку нульового положення (ліва крива) і для випадку, коли зразок повернутий на деякий кут  $\varphi$  (права крива) (в дужках вказано цей кут та відповідну товщину

досліджуваного зразка). Зазначимо, що усі вимірювання були проведені на частоті джерела електромагнітного випромінювання, що дорівнювала  $f=33$  ГГц.

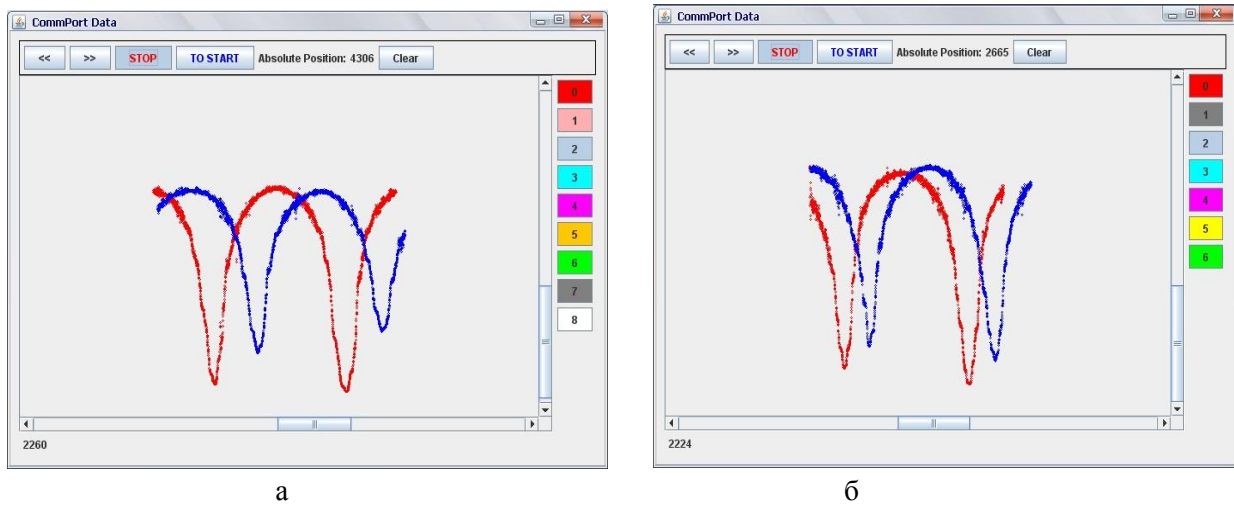


Рис. 3. Експериментальні залежності зсуву інтерференційної картини для (а) оптичного скла ( $\varphi=0^\circ$  – ліва крива та  $\varphi=60^\circ$  – права крива,  $d=15.12$  мм) та (б) кристалів кварцу ( $\varphi=0^\circ$  – ліва крива та  $\varphi=50^\circ$  – права крива,  $d= 21.37$  мм)

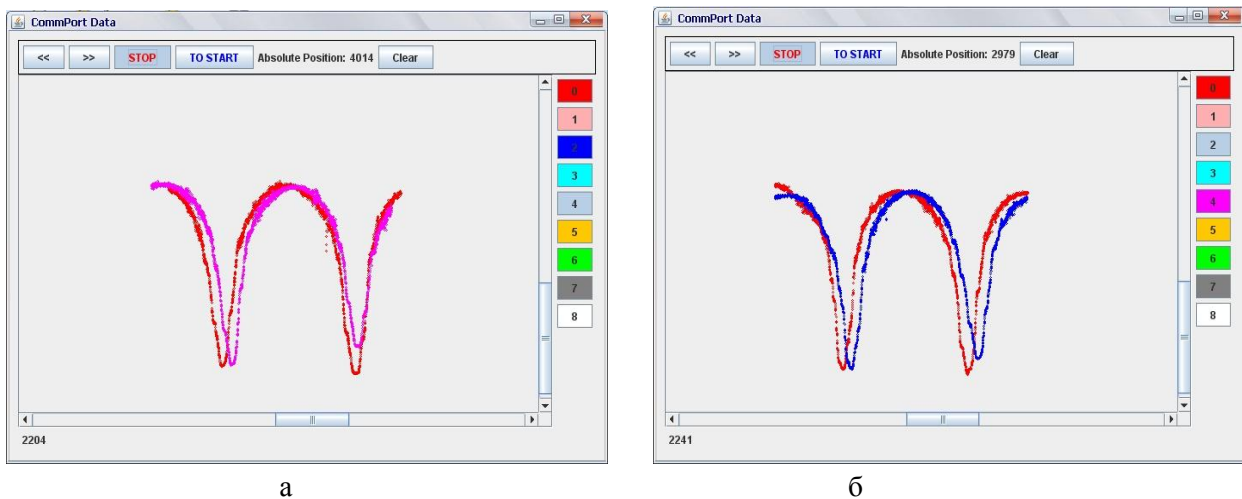


Рис. 4. Експериментальні залежності зсуву інтерференційної картини для кристалів (а) сапфіру ( $\varphi=0^\circ$  – ліва крива та  $\varphi=45^\circ$  – права крива,  $d=8.16$  мм) та (б) евлітину ( $\varphi=0^\circ$  – ліва крива та  $\varphi=50^\circ$  – права крива,  $d=11.21$  мм)

З цих графічних залежностей були знайдені значення величин  $r$  та  $R$  і за формулами (1) і (2) були розраховані значення показників заломлення для досліджених матеріалів, наведені в таблиці. Для порівняння у таблиці також наведені показники заломлення цих самих матеріалів, відомих з літератури, що свідчить про задовільну точність проведених експериментів на створеній установці.

Таблиця 1

**Розраховані значення показників заломлення на створеній експериментальній установці та їх порівняння з літературними даними**

Частота, ГГц	Оптичне скло	Кварц $\text{SiO}_2$	Сапфір $\text{Al}_2\text{O}_3$	Евлітин $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$	Джерело
33	1.53	2.12	3.11	2.02	Наші дані
300	1.6	2.15	3.15	-	[10]

## Висновки

На основі запатентованого нами інтерферометрично-поворотного методу було створено експериментальну установку для вимірювання показників заломлення нових чи вже існуючих матеріалів в діапазонах міліметрових-субміліметрових довжин хвиль.

Для автоматизації процесу вимірювання було розроблено необхідне програмне забезпечення, яке дає змогу керувати роботою пристрою і безпосередньо відображати результати вимірювань та необхідних розрахунків на екрані монітора комп'ютера. Проаналізовано експериментальну похибку визначення показника заломлення за наявного обладнання та розробленого програмного забезпечення, яка становила на частоті джерела випромінювання  $f=33$  ГГц  $2 \cdot 10^{-2}$ .

Було проведено апробацію роботи установки на виготовлених зразках із різних матеріалів, отримано необхідні експериментальні результати та визначено їх показники заломлення на частоті джерела випромінювання  $f=33$  ГГц, які становили для оптичного скла  $n=1.53$ , кристалів кварцу  $n=2.12$ , сапфіру  $n=3.18$  та евлітину  $n=2.02$ . Отримані експериментальні значення показників заломлення добре узгоджуються із літературними даними.

1. Довгий С.О. // *Наука та наукознавство*. – 2000. – № 3. – С. 38–41.
2. Довгий С.О., Савченко О.Я., Воробієнко П.П. // *Сучасні телекомунікації*. – К.: Укр. вид. центр, 2002. – 520 с.
3. Шифрін Я.С. // *Вісник ХНУ*. – 2000. – № 756. – С. 11–17.
4. Пат. 40962 А Україна, МКИ 7 H01Q13/02. / Г.В. Єрмаков. – 15.08.2001; Бюл. № 7.
5. Виноградова М.Б. // *Теория волн*. – М.: Наука, 1990. – 432 с.
6. Андрущак Н.А., Сиротинський О.І. // *Моделювання та інформаційні технології*. – 2007. – № 42. – С. 97–102.
7. Пат. № 35224 Україна, МПК G01N 22/00. / А.С. Андрущак, О.І. Сиротинський, Н.А. Андрущак, Є.М. Яцишин. – 10.09.2008, Бюл. № 17.
8. Yoshinori Suzuki, Futoshi Kuroki, Tsukasa Yoneyama // *Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics)*. – 2007. – Vol. 78, No 5. – С. 40–48.
9. Яцишин Є.М. // *Матеріали 4-ї Міжнар. конф.* – 9–12 вересня, 2003. – Т. 1. – С. 427–432.
10. Kozlov G.V., Volkov A.A. // *Topics in Applied Physics ed. G. Gruner (Springer-Verlag)*. – 1998. – 74. – С. 51–109.