



УКРАЇНА

(19) UA (11) 35224 (13) U
(51) МПК (2006)
G01N 22/00МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під
відповідальність
власника
патенту**(54) ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНО-ПОВОРОТНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ ІЗОТРОПНИХ ТА АНІЗОТРОПНИХ МАТЕРІАЛІВ В ДІАПАЗОНАХ МІЛІМЕТРОВИХ ТА САНТИМЕТРОВИХ ДОВЖИН ХВИЛЬ**

1

2

(21) u200804095

(22) 01.04.2008

(24) 10.09.2008

(46) 10.09.2008, Бюл. № 17, 2008 р.

(72) АНДРУЩАК АНАТОЛІЙ СТЕПАНОВИЧ, UA,
СИРОТИНСЬКИЙ ОЛЕГ ІВАНОВИЧ, UA, АНДРУЩАК
НАЗАРІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ, UA, ЯЩИШИН
ЄВГЕН МИХАЙЛОВИЧ, UA(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА
ПОЛІТЕХНІКА", UA

(57) Інтерферометрично-поворотний пристрій для вимірювання показника заломлення ізотропних та анізотропних матеріалів в діапазонах міліметрових та сантиметрових довжин хвиль, що містить послідовно розміщені джерело електромагнітного випромінювання, фокусуючу лінзу, поляризатор випромінювання, перший ґратковий роздільник променя, який разом із дзеркальними відбивачами променя, один з яких встановлений з можливістю механічного переміщення, та другим ґратковим

роздільником променя утворюють інтерферометр Маха-Цендера, на виході якого по ходу променя встановлений аналізатор, фокусуюча лінза та приймач електромагнітного випромінювання, з'єднаний з блоком керування і індикації, який **відрізняється** тим, що джерело електромагнітного випромінювання вибрано із постійною довжиною хвилі випромінювання в діапазоні міліметрових або сантиметрових довжин хвиль, для зменшення розбіжності електромагнітної хвилі додатково в кожне плече інтерферометра встановлено по дві фокусуючі лінзи, а між двома лінзами в одному із плечей інтерферометра встановлений вимірювальний плоскопаралельний зразок на кутомірному поворотному пристрої, причому другий дзеркальний відбивач встановлений нерухомо, а рухомий дзеркальний відбивач з можливістю прямолінійного механічного переміщення оснащений кроковим двигуном, причому кроковий двигун з'єднаний з блоком керування та індикації.

Корисна модель належить до матеріалознавства, а саме до пристроїв, які визначають фізичні параметри матеріалів.

Відомий пристрій визначення показника заломлення ізотропних та анізотропних матеріалів [А.С. Андрушак. Двухлучевой интерферометр для измерения показателя преломления изотропных и анизотропных материалов. Патент РФ №2102700, 1998. - Бюл изобр. №2], який містить джерело монохроматичного поляризованого випромінювання, напівпрозоре дзеркало, площина падіння світла на яке для виключення деполяризації випромінювання лазера паралельна чи перпендикулярна площині поляризації випромінювання лазера (ППВЛ), оптичний модулятор, наприклад електрооптичний кристалічний модулятор, оптична вісь якого складає кут 45° з ППВЛ, поляризатор, схрещений чи паралельний ППВЛ, досліджуваній зразок у вигляді плоскопаралельної пластини з досліджуваного матеріалу, що встановлений на кутомірному рухомому пристрої, два відбиваючих

дзеркала, розташований на виході інтерферометра фотопомножувач зі щільною на вході, вузькополосний підсилювач і реєструючий пристрій, причому вузькополосний підсилювач зв'язаний з виходом фотопомножувача, а вхід реєструючого пристрою підключений до виходу вузькополосного підсилювача.

Однак, цей пристрій побудований на базі інтерферометра Майкельсона та призначений лише для вимірювання в оптичному діапазоні довжин хвиль, тому він може вимірювати показник заломлення лише для оптично прозорих матеріалів, що значно зменшує його можливості.

Найближчим до запропонованого пристрою є пристрій для вимірювання показника заломлення (чи головних компонент тензора діелектричної проникливості) матеріалів в діапазоні субміліметрових довжин хвиль [Волков А.А., Гончаров Ю.Г., Козлов Г.В., Лебедев С.П., Мальцев В.И. Субмиллиметровый спектрометр «Эпсилон» на основе ламп обратной волны // Электронная

(13) U

(11) 35224

(19) UA

техника, Сер.1. - 1984. - Т.П. - С.38-41], який містить послідовно розміщені джерело електромагнітних хвиль на основі лампи зворотної хвилі із перестроюваною довжиною хвилі випромінювання, фокусуючу лінзу, поляризатор випромінювання, перший ґратковий роздільник променя, який разом із дзеркальними відбивачами променя, кожен з яких встановлений з можливістю механічного переміщення, та другим ґратковим роздільником променя утворюють інтерферометр Маха-Цендера, на виході якого по ходу променя встановлений аналізатор, фокусуюча лінза та приймач електромагнітного випромінювання, з'єднаний з блоком керування та індикації.

Однак, застосування даного пристрою, який базується на основі лампи зворотної хвилі, вимагає громіздкої апаратної і програмної частини установки, ускладнює процес вимірювання та дає порівняно низьку точність вимірювання показника заломлення. Крім того, складність реалізації, необхідність використання великої кількості додаткових пристроїв при вимірюванні, їх синхронізація та подальше тестування потребують великих як часових, так і матеріальних затрат.

В основу корисної моделі поставлено завдання створення інтерферометрично-поворотного пристрою для вимірювання показника заломлення ізоотропних та анізоотропних матеріалів в діапазонах міліметрових та сантиметрових довжин хвиль, в якому нове конструктивне виконання дозволило б забезпечити спрощення процесу вимірювання і за рахунок цього підвищення точності визначення показника заломлення та максимального здешевлення апаратної частини самого пристрою.

Поставлене завдання вирішується тим, що в інтерферометрично-поворотному пристрої для вимірювання показника заломлення ізоотропних та анізоотропних матеріалів в діапазонах міліметрових та сантиметрових довжин хвиль, який містить послідовно розміщені джерело електромагнітного випромінювання, фокусуючу лінзу, поляризатор випромінювання, перший ґратковий роздільник променя, який разом із дзеркальними відбивачами променя, один з яких встановлений з можливістю механічного переміщення, та другим ґратковим роздільником променя утворюють інтерферометр Маха-Цендера, на виході якого по ходу променя встановлений аналізатор, фокусуюча лінза та приймач електромагнітного випромінювання, з'єднаний з блоком керування та індикації, згідно з корисною моделлю, джерело електромагнітного випромінювання вибрано із постійною довжиною хвилі випромінювання (наприклад, діод Ганна), для зменшення розбіжності електромагнітної хвилі додатково в кожне плече інтерферометра встановлено по дві фокусуючі лінзи, а між двома лінзами в одному із плечей інтерферометра встановлений вимірювальний плоскопаралельний зразок на кутомірному поворотному пристрої, причому другий дзеркальний відбивач встановлений нерухомо, а рухомий дзеркальний відбивач з можливістю прямолінійного механічного переміщення оснащений кроковим двигуном, при-

чому кроковий двигун з'єднаний з програмованим блоком керування і індикації.

Наявність джерела електромагнітних хвиль із постійною довжиною хвилі випромінювання (наприклад, діод Ганна), дозволяє забезпечити необхідну довжину хвилі випромінювання в сантиметровому чи міліметровому діапазонах довжин хвиль, досить високу його стабільність та простоту реалізації вимірювального пристрою. Кутомірний пристрій, що розташований в одному з плечей інтерферометра між двома лінзами, дозволяє зафіксувати вимірювальний зразок та визначати кут повороту, який необхідний для подальшого визначення показника заломлення. Можливість використання нерухомого дзеркального відбивача спрощує синхронізацію пристрою, зменшує апаратну реалізацію та підвищує точність вимірювання. Наявність рухомого дзеркального відбивача з можливістю механічного переміщення є необхідною для визначення різниці ходу променя по мінімуму інтерференційної картини та подальшого розрахунку показника заломлення за виведеною формулою.

На Фіг. зображена схема пристрою для визначення показника заломлення ізоотропних та анізоотропних матеріалів в діапазоні міліметрових та сантиметрових довжин хвиль на основі інтерферометра Маха-Цендера.

Запропонований інтерферометрично-поворотний пристрій для вимірювання показника заломлення ізоотропних та анізоотропних матеріалів в діапазонах міліметрових та сантиметрових довжин хвиль містить джерело електромагнітного випромінювання, напр. діод Ганна 1, фокусуючі лінзи 2, перший 3 та другий 4 ґраткові роздільники променя для розділення електромагнітного випромінювання на два променя, рухомий дзеркальний відбивач променя з можливістю механічного переміщення 5 та нерухомий дзеркальний відбивач променя 6, приймач випромінювання 7, поляризатор 8 і аналізатор 9, досліджуваній плоскопаралельний зразок 10, що розміщений на кутомірному поворотному пристрої 11, кроковий двигун 12, що керується за допомогою блоку керування і індикації 13. Кутомірний пристрій 11, що розташований в одному з плечей інтерферометра між двома лінзами 2, дозволяє зафіксувати вимірювальний зразок і виміряти кут повороту, який необхідний для подальшого визначення показника заломлення. Кроковий двигун 12 призначений для переміщення рухомого дзеркального відбивача 5, простий в керуванні і не потребує значної кількості апаратних засобів для забезпечення переміщення. Програмований блок керування і індикації 13 складається з АЦП, вхід якого з'єднаний з виходом приймача електромагнітного випромінювання 7, схеми керування кроковим двигуном, яка безпосередньо приєднана до крокового двигуна 12, та розробленого програмного забезпечення. Блок 13 забезпечує фізичний і логічний зв'язок між елементами пристрою та адаптацію до зміни вхідних даних при вимірюванні, контролює зміну положення рухомих елементів пристрою та спрощує про-

цес вимірювання показника заломлення досліджуваного матеріалу.

Вимірювання проводиться наступним чином. Зразок 10 встановлюють на кутомірному поворотному пристрої 11 в одному із плечей інтерферометра Маха-Цендера. Рухомий дзеркальний відбивач 5 переміщується таким чином, 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 за допомогою блоку 13. Знята експериментальна залежність інтенсивності сигналу від положення рухомого дзеркала апроксимується по методу найменших квадратів з використанням полінома третьої степені. Це дає можливість точніше визначати величину зсуву інтерференційної картини і розраховувати значення показника заломлення, використовуючи формулу для вимірювання показника заломлення.

Для розрахунку абсолютного показника заломлення потрібно визначити і залежність зсуву інтерференційної картини від кута повороту зразка при його повертанні від нульового положення до деякого кута φ , де нульове положення - це таке положення зразка, при якому промінь від джерела електромагнітного випромінювання падає на поверхню зразка перпендикулярно. Виведемо робочі співвідношення, які дозволяють обчислити показник заломлення досліджуваного зразка 10, при повороті даного зразка на кутомірному поворотному пристрої 11 на деякий наперед визначений кут.

При внесенні зразка в одне із плечей інтерферометра, перпендикулярно до пучка електромагнітного випромінювання, величина внесеної різниці ходу (аналогічно оптичному шляху для лазерного випромінювання) становить $\Delta = n \cdot d$, де d - товщина досліджуваного зразка, n - показник заломлення зразка.

При повороті зразка на кут φ різниця ходу променя, аналогічно як і для оптичних вимірювань в [Мищенко Ю.В. Метод измерения показателя преломления стеклянных пластин // Измерительная техника. - 1990. - №8. - С.39-41; Андрущак А.С., Мыцык Б.Г. Измерение показателей преломления изотропных и кристаллических материалов интерферометрическим методом // Измерительная техника.-1992. -№5.-С.33-34], зміниться порівняно з нульовим положенням зразка на величину $\delta\Delta$, яка рівна:

$$\delta\Delta = nd/\cos\varphi' + d \cdot d\cos(\varphi - \varphi')/\cos\varphi' \cdot n \cdot d, (1)$$

де φ' - кут заломлення для досліджуваного зразка. Тут прийнято, що зразок знаходиться в повітрі, для якого $n_c = 1$.

Вимірюючи зміну різниці ходу в порядках K зсуву інтерференційної картини за формулою $\delta\Delta = K \cdot \lambda$, де λ - довжині хвилі джерела електромагнітного випромінювання та врахувавши закон Снелліуса $\sin(\varphi)/\sin(\varphi') = n$ і відоме тригонометричне співвідношення $\cos(\varphi - \varphi')$

$\varphi') = \cos(\varphi) \cdot \cos(\varphi') - \sin(\varphi) \cdot \sin(\varphi')$, можемо отримати формулу для підрахунку K :

$$K = \frac{d}{\lambda} \left(1 - \cos\varphi - n + \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} \right). (2)$$

Звідки можна знайти робочу формулу для безпосереднього розрахунку величини n , аналогічно як і в [Андрущак А.С., Мыцык Б.Г. Измерение показателей преломления изотропных и кристаллических материалов интерферометрическим методом // Измерительная техника. -1992.- №5. - С.33-34] для оптичних вимірювань:

$$n = \frac{\sin^2\varphi + (1 - \cos\varphi - K\lambda/d)^2}{2(1 - \cos\varphi - K\lambda/d)}. (3)$$

Формула для визначення показника заломлення (3) справедлива як для ізотропних, так і для будь-яких анізотропних, в тому числі кристалічних матеріалів. Для одновісних кристалічних матеріалів зразок вирізають та встановлюють так, щоб оптична вісь була паралельна до вертикальної осі повертання. Тоді при вертикальній поляризації падаючої електромагнітної хвилі вимірюють незвичайний показник заломлення n_e зразка, а при горизонтальній - звичайний n_o .

У випадку двовісних кристалів вимірювання трьох головних показників заломлення n_1, n_2 , та n_3 можна провести двома різними способами.

1). Використовуємо два різних зразки, вирізаних перпендикулярно до будь-яких двох осей оптичної індикатрис, і проводимо три вимірювання, коли три осі оптичної індикатрис по чергово встановлюємо паралельно до розміщених вертикально поляризації випромінювання та осі повертання зразка;

2). Використовуємо лише один зразок (з точки зору економії цінного кристалічного матеріалу), який вирізаний перпендикулярно до однієї з осей оптичної індикатрис (наприклад осі 3). Тоді n_1 і n_2 вимірюємо першим способом, а для визначення n_3 проводимо вимірювання з випромінюванням, поляризованим перпендикулярно до осі повертання в одній з двох геометрій, котрі використовувались для визначення n_1 і n_2 , наприклад n_2 . В цьому випадку в рівняннях (1) і (2) для кута $\varphi = 0$ показник заломлення $n = n_1$, а для $\varphi \neq 0$ замість n_1 необхідно використати таке значення показника заломлення:

$$n_{ef} = [n_1^{-2} \cos^2\varphi' + n_3^{-2} \sin^2\varphi']^{1/2}. (4)$$

Тоді рівняння (1) набуває такого вигляду:

$$\delta\Delta = n_{ef}d/\cos\varphi' + d \cdot d\cos(\varphi - \varphi')/\cos\varphi' \cdot n_1 \cdot d, (5)$$

з якого після підстановки (4) і ряду математичних перетворень можна вивести співвідношення для безпосереднього розрахунку значення n_3 :

$$n_3 = \frac{n_1 \sin\varphi}{\sqrt{n_1^2 - (n_1 - 1 + \cos\varphi + K\lambda/d)^2}}. (6)$$

Останній метод проведення вимірювання, згідно формули (6), є єдино можливим методом визначення показника заломлення тонких плоско-паралельних пластин із анізотропних матеріалів у випадку поляризації випромінювання, перпендикулярного до площини пластини, для якого інші методи є непридатними. Такі вимірювання є особли-

во необхідними при проектування плоских антен із анізотропних матеріалів.

Оцінка похибки вимірювання n . Беручи до уваги похибки визначення кута обертання $\delta\varphi$, порядку інтерференції δK , товщини пластинки δd та нестабільність джерела електромагнітного випромінювання $\delta\lambda$, похибку визначення показника заломлення δn можна розрахувати за такою формулою:

$$\delta n = \left\{ \left(\frac{\partial n}{\partial \varphi} \cdot \delta\varphi \right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial K} \cdot \delta K \right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial d} \cdot \delta d \right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial \lambda} \cdot \delta\lambda \right)^2 \right\}^{1/2}. \quad (7)$$

Після необхідних розрахунків і математичних спрощень зможемо отримати наступне співвідношення, аналогічно, як і для оптичних вимірювань:

$$\delta n_3 = \left\{ \left[\frac{n_3(\chi - 1 + \cos \varphi + n_1) \sin \varphi}{n_1(\chi - 1 + \cos \varphi + 2n_1)} \cdot \delta n_1 \right]^2 + \left[n_3 \operatorname{ctg} \varphi - \frac{n_3(\chi - 1 + \cos \varphi + n_1) \sin \varphi}{n_1^2 - (\chi - 1 + \cos \varphi + n_1)^2} \right] (\delta \varphi)^2 + \left[\frac{n_3(\chi - 1 + \cos \varphi + n_1) \chi}{n_1^2 - (\chi - 1 + \cos \varphi + n_1)^2} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (11)$$

Оцінена похибка вимірювань при експериментально можливих умовах проведення експерименту. Так абсолютна похибка визначення товщини пластинки при $d=10\text{мм}$ може становити $\delta=1\text{мкм}$ [Коломийцов Ю.И. Интерферометрии. - Л.: Машиностроение, 1976]. Реальна нестабільність довжини хвилі випромінювання діода Гана можна забезпечити $\delta\lambda=10^{-9}\text{мм}$ [Yoshinori Suzuki, Futoshi Kuroki, Tsukasa Yoneyama // Frequency stabilization of NRD waveguide gunn oscillator at 60 GHz. Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics).- 2007.- V.78, No.5- С.40-48]. Похибка визначення порядку інтерференції реально може становити $\delta K=0.007$ [Мищенко Ю.В. Метод измерения показателя преломления стеклянных пластин // Измерительная техника. - 1990.- №8.- С.39-41], а кута

$$\delta n = \left\{ \left[\frac{(1 - \chi - n) \sin \varphi}{1 - \cos \varphi - \chi} \cdot \delta \varphi \right]^2 + \left[\frac{n - (1 - \cos \varphi - \chi)}{1 - \cos \varphi - \chi} (\delta \chi)^2 \right] \right\}^{1/2}, \quad (8)$$

де

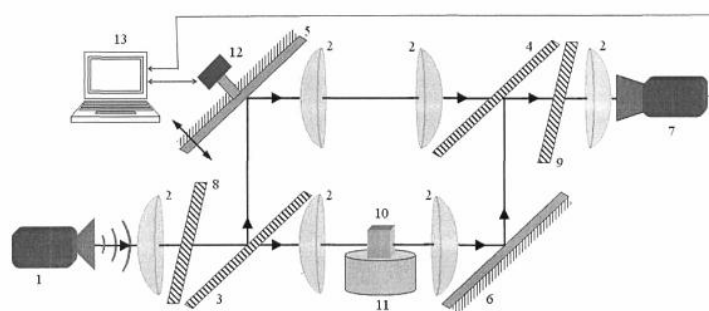
$$\chi = K\lambda / d, \quad \delta \chi = \left\{ \left(\frac{\lambda}{d} \cdot \delta K \right)^2 + \left(\frac{K\lambda}{d^2} \cdot \delta d \right)^2 + \left(\frac{K}{d} \cdot \delta \lambda \right)^2 \right\}^{1/2}. \quad (9)$$

Для випадку поляризації хвиль, перпендикулярної до площини плоскопаралельної пластини, похибку визначення показника заломлення можна обчислити за наступною формулою:

$$\delta n_3 = \left\{ \left(\frac{\partial n_3}{\partial n_1} \cdot \delta n_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial n_3}{\partial \varphi} \cdot \delta \varphi \right)^2 + \left(\frac{\partial n_3}{\partial K} \cdot \delta K \right)^2 + \left(\frac{\partial n_3}{\partial d} \cdot \delta d \right)^2 + \left(\frac{\partial n_3}{\partial \lambda} \cdot \delta \lambda \right)^2 \right\}^{1/2}. \quad (10)$$

Знайшовши всі необхідні похідні із (6), спростивши їх і підставивши отримані результати в (10) можемо отримати:

обертання - $\delta\varphi=1.4 \cdot 10^{-5}$ рад [Тибінка Б.В., Островський І.П., Андрущак А.С. Автоматизація процесу вимірювання показників заломлення плоско паралельних пластин із оптичних матеріалів інтерферометрично-поворотним методом // Вісник НУ "Львівська політехніка" ЕЛЕКТРОНІКА.- 2006.- №558.- С.128-132]. Тоді для довільно взятих значень $n_1=2.0$, $n_3=2.1$ і $\varphi=75^\circ$, що є близькими до реальних, розрахована точність визначення показника заломлення $n=n_1$ матеріалу за співвідношенням (8) становить $4.9 \cdot 10^{-3}$, а для випадку поляризації хвиль, перпендикулярної до площини плоскопаралельної пластини, похибка визначення показника заломлення n_3 за співвідношенням (11) становить $3.9 \cdot 10^{-3}$.



Фіг.