

## ТЕХНОЛОГІЯ КОНТРОЛЮ ГЕОМЕТРІЇ ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ЗРАЗКІВ ІЗ КРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

© Вороняк Т.І., Юркевич О.В., Андрущак А.С., 2007

T.I. Voronyak, O.V. Yurkevych, A.S. Andrushchak

## CONTROL TECHNOLOGY OF OPTICAL SURFACES GEOMETRY FOR CRYSTAL MATERIAL SAMPLES

© Voronyak T.I., Yurkevych O.V., Andrushchak A.S., 2007

На основі інтерферометра Маха–Цендера запропоновано технологію контролю геометрії поверхонь та оптичної неоднорідності зразків із кристалічних матеріалів. Ця технологія дає змогу проводити якісний і кількісний контроль геометрії оптичної поверхні кристалічного зразка, визначати величину клиноподібності протилежних граней та характер спотворень по всій апертурі хвильового фронту лазерного променя, що пройшов через досліджуваний зразок.

Using Mach-Zehnder interferometer the technology for control of surface geometry and optical heterogeneity of crystal materials samples is proposed. This technology allows to carry out qualitative and quantitative control of optical surface geometry for crystal samples, to determine the value of opposite face wedging and wavefront aberration over the whole aperture for laser beam, which pass through the investigated sample.

### 1. Вступ

Прогрес сучасних електронних та оптоелектронних пристроїв і систем стимулює пошук, синтез та вдосконалення технологій отримання нових кристалічних матеріалів. Часто вже відомі матеріали потребують додаткових комплексних досліджень для вибору їхньої оптимальної орієнтації під час застосування і розв'язання конкретної задачі. Існує багато методик і технічних засобів для проведення комплексних досліджень акустичних, електричних, оптичних та інших характеристик кристалічних матеріалів [1]. Для реалізації кожної з відповідних методик досліджень виготовляються необхідні зразки із цих матеріалів [1,2]. Від якості цих зразків значною мірою залежить величина похибки і достовірність визначення коефіцієнтів, що характеризують величину того чи іншого ефекту в кристалі. Так, при комплексному дослідженні електрооптичних, п'єзооптичних та акустооптичних коефіцієнтів кристалічних матеріалів використовуються зразки кубічної форми з розміром ребра порядку 5÷10 мм. У цьому випадку під якістю зразка розуміють насамперед величину відхилення геометрії його поверхні від кубічної (або паралелепіпеда), а також величину неоднорідності оптичних характеристик вздовж напрямку поширення променя всією апертурою зразка. Це пояснюється тим, що клиноподібність протилежних граней, значне відхилення їхньої геометрії від площинності та наявність різноманітних локальних неоднорідностей (залишкові напруження, полідоменні області тощо) вносить значну похибку при визначенні вищезгаданих коефіцієнтів і призводить до розкиду їх значень за апертурою зразка. Тому всі перелічені вище особливості зразків необхідно контролювати та по можливості усувати, а у

протилежному випадку враховувати під час обробки результатів експериментальних досліджень. Для контролю саме такої якості зразків із кристалічних матеріалів пропонується вказана технологія, що ґрунтується на використанні інтерферометра Маха–Цендера.

## 2. Теоретичні відомості

Запропонована технологія ґрунтується на двох відомих положеннях.

*Перше положення.* Плоскопаралельна пластина не змінює напрямку поширення світлового променя, а при нахиленому падінні на її поверхню лише зсуває його [3]. Якщо досліджуваний зразок змінює напрям поширення світлового променя, що пройшов через нього, то це означає, що протилежні його грані є непаралельними, а сам він може розглядатися як комбінація (сума) плоскопаралельної пластини і заломлювальної призми (див. рис. 1, а).

Зміна напрямку поширення, тобто заломлення променя призмою показано на рис. 1, б. Заломлювальна призма з малим кутом заломлення  $\theta$  ( $\theta \leq 6^\circ$ ) називається оптичним клином [4]. Якщо кут падіння світлового променя на оптичний клин  $\varepsilon_1$  такий малий, що можна вважати  $\sin \varepsilon_1 \approx \varepsilon_1$ , то в такому випадку для знаходження кута відхилення світлового променя клином  $\gamma$  використовують відоме співвідношення [3]:

$$\gamma = (n - 1)\theta. \quad (1)$$

де  $n$  – показник заломлення матеріалу, з якого виготовлено клин. Знаючи кут відхилення  $\gamma$  та показник заломлення  $n$ , можна визначити величину кута заломлення  $\theta$  і величину клиноподібності (різновтовщинності) зразка  $\Delta d$  (див. рис. 1, а):

$$\begin{cases} \theta = \frac{\gamma}{(n-1)}; \\ \Delta d = l \cdot \text{tg} \theta, \end{cases} \quad (2)$$

де  $l$  – довжина зразка. Для визначення кута  $\gamma$  необхідно скористатись таким положенням.

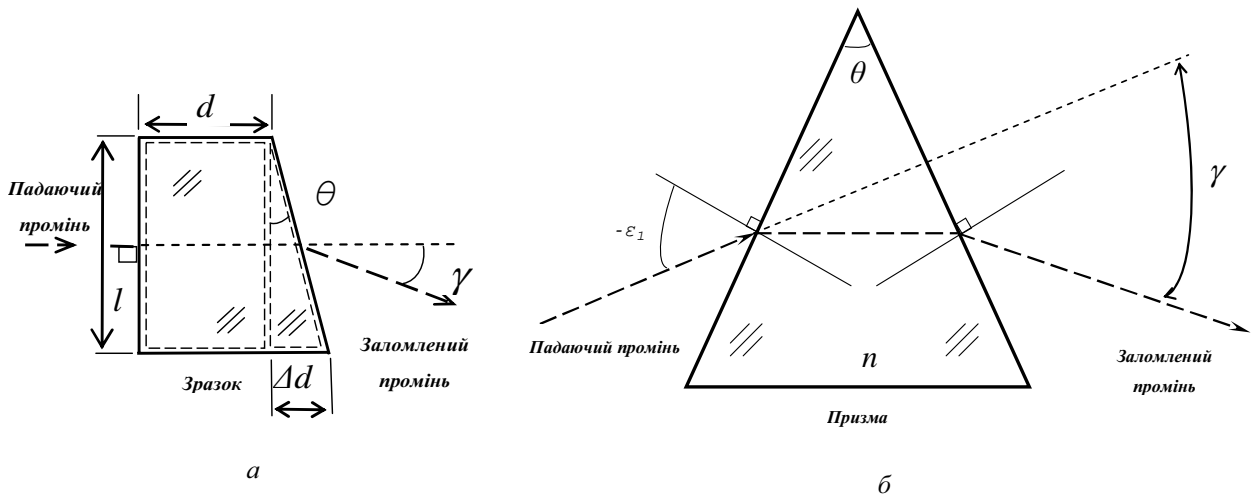


Рис.1. Заломлення світлового променя пластиною з непаралельними протилежними гранями (а) та призмою (б)

*Друге положення.* Під час інтерференції двох паралельних когерентних (лазерних) променів утворюється періодична картина лінійних світлих та темних смуг. Віддаль між двома сусідніми світлими або темними смугами  $\Lambda$ , тобто період інтерференційної картини визначається довжиною світлової хвилі  $\lambda$ , кутом сходження променів  $\alpha$  (див. рис. 2) та показником заломлення середовища  $n_c$ , в якому промені інтерферують. Ця залежність описується таким виразом [4]:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2n_c \sin \alpha}. \quad (3)$$

Таку картину можна спостерігати на непрозорому екрані в місці, де промені накладаються (див. рис. 2). Визначивши період інтерференційної картини  $\Lambda$  та знаючи  $\lambda$  і припустивши, що  $n_c = 1$  (для повітря), можна розрахувати кут  $\alpha$ :

$$\alpha = \arcsin \frac{\lambda}{2\Lambda}. \quad (4)$$

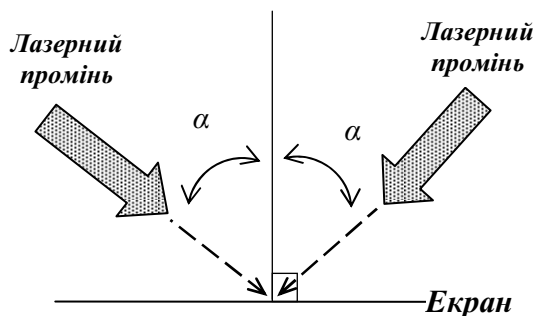


Рис. 2. Схема інтерференції непаралельних лазерних променів

Якщо досліджуваний зразок розмістити в одному з плечей інтерферометра (наприклад, інтерферометра Маха–Цендера – див. рис. 3), то заломлення лазерного променя зразком призведе до зміни густини і кута нахилу інтерференційних смуг. Визначивши період цієї інтерференційної картини у горизонтальному та вертикальному напрямках, можна за виразом (4) розрахувати і кути відхилення  $\gamma_{x,y}$  у відповідних напрямках. Тут необхідно врахувати, що, відповідно до рис.1 та рис.2, кут  $\gamma = 2\alpha$ , і для його розрахунку треба використовувати вираз:

$$\gamma_{x,y} = 2 \arcsin \frac{\lambda}{2\Lambda_{x,y}}. \quad (5)$$

де  $\Lambda_{x,y}$  – період інтерференційної картини вздовж горизонтального (індекс x) та вертикального (індекс y) напрямів. І відповідно, вирази для знаходження кута заломлення  $\theta$  та клиноподібності зразка набудуть вигляду:

$$\begin{cases} \theta_{x,y} = \frac{2}{(n-1)} \arcsin \frac{\lambda}{2\Lambda_{x,y}}; \\ \Delta d_{x,y} = l_{x,y} \cdot \operatorname{tg} \left[ \frac{2}{(n-1)} \arcsin \frac{\lambda}{2\Lambda_{x,y}} \right]. \end{cases} \quad (6)$$

### 3. Опис експериментальної установки

До складу експериментальної установки (див. рис. 3), за допомогою якої реалізується ця технологія, входять, крім інтерферометра Маха–Цендера (оптичні елементи 3,4,5,7), одномодовий лазер 1, розширювач лазерного променя 2 з просторовим фільтром, тримач досліджуваного зразка 6, поляризатор 11, екран для спостереження інтерференційної картини 8, відеокамера 9 та комп'ютер 10. Поляризатор 11 використовується в тому випадку, коли досліджується (контролюється) окремо геометрія кожної грані зразка. У такому випадку сам зразок б' ставлять на місце поворотного дзеркала 5, а поверхня зразка, що досліджується, слугує поворотним дзеркалом.

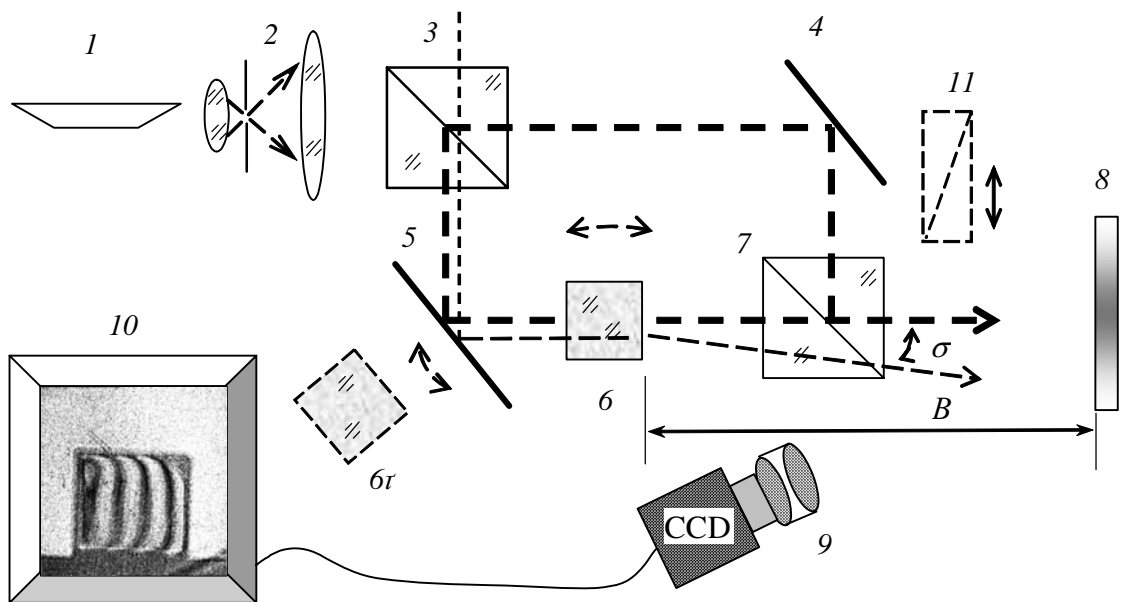


Рис. 3. Схема експериментальної установки: 1 – лазер; 2 – розширювач променя; 3,7 – світлоподільники; 4,5 – поворотні дзеркала; 6 або 6' – кристалічний зразок; 8 – екран; 9 – відеокамера; 10 – монітор комп'ютера, 11 – поляризатор;  $B$  – віддаль від зразка до екрана

Розширювач променя 2 формує паралельний пучок з діаметром, що перевищує розмір найбільшої грані зразка. Світлоподільник 3 ділить розширений пучок на два пучки однакової інтенсивності, а світлоподільник 7 ці два пучки “примушує” інтерферувати в площині екрана 8. Відеокамера 9 та комп'ютер 10 слугують для реєстрації інтерференційної картини і подальшого її оброблення.

#### 4. Методика контролю

Контроль зразка проводять у такій послідовності. Спочатку інтерферометр юстується так, щоб на екрані 8 спостерігалась лише одна інтерференційна смуга (світла або темна). Потім в одне з плечей інтерферометра ставиться зразок. Фазова модуляція частини світлового променя зразком призводить до зміни інтерференційної картини (див. рис. 4, а). Тобто на відносно однорідному фоні (широкій інтерференційній смузі) спостерігатиметься змінена інтерференційна картина. Ця зміна викликана неоднорідністю оптичних характеристик та непаралельністю протилежних граней досліджуваного зразка вздовж напрямку проходження світлового променя. Ця змінена картина реєструється, вимірюється величина періоду її смуг  $\Lambda_{x,y}$ . Потім, знаючи показник заломлення матеріалу зразка  $n$  та використавши вираз (6), визначають непаралельність протилежних граней чи клиноподібність зразка.

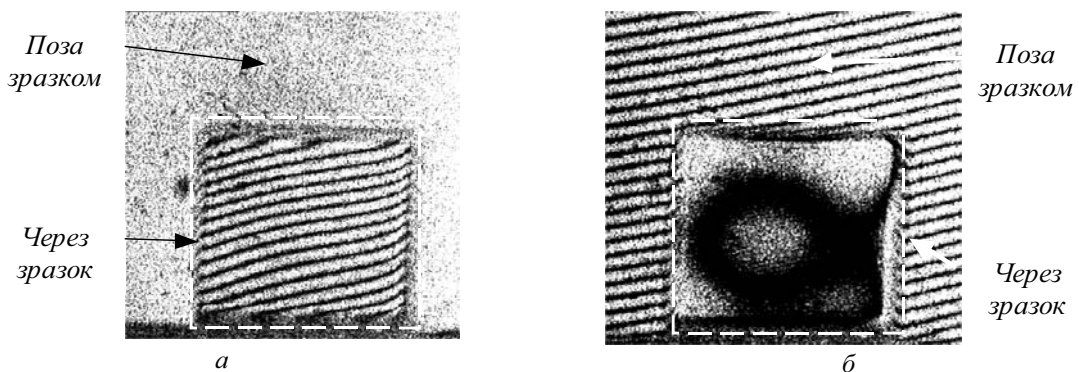


Рис. 4. Інтерференційна картина із встановленим досліджуваним зразком до (а) та після (б) переюстування інтерферометра

Для того, щоб оцінити неоднорідність оптичних характеристик по всій апертурі кристалічного зразка, необхідно переюстувати інтерферометр. Поворотом дзеркала 5 досягають того, щоб промінь, який пройшов через зразок, знов поширювався паралельно опорному, тобто добиваються максимального періоду інтерференційної картини для цього променя. При цьому змінюватиметься густина та нахил смуг фону, і в результаті картина фону стане майже такою ж, як і для променя, який пройшов через зразок, до переюстування (див. рис. 4, б). Останню картину можна використовувати і для визначення клиновидності зразка, але для цього вже вимірювати період смуг фону. Тобто, для визначення кількісних характеристик клиновидності та неоднорідність оптичних характеристик за всією апертурою зразка достатньо реєструвати і обробляти лише інтерференційну картину після переюстування. Обробити інтерференційну картину означає визначити на ній величину періоду смуг або порахувати їхню кількість на певній ділянці (наприклад, за апертурою зразка – виділено білим пунктирним квадратом на рис.4).

Окремо необхідно зупинитись на випадку, коли клиноподібність зразка є дуже великою, і в результаті смуги інтерференційної картини будуть настільки густими, що фотоприймач відеокамери не зможе їх розділити (рис. 5). Тоді на зареєстрованій картині визначають відстань  $A$  – величину зміщення на екрані променя, що пройшов через кристал, а також вимірюють відстань  $B$  від зразка до екрана (див. рис. 3).

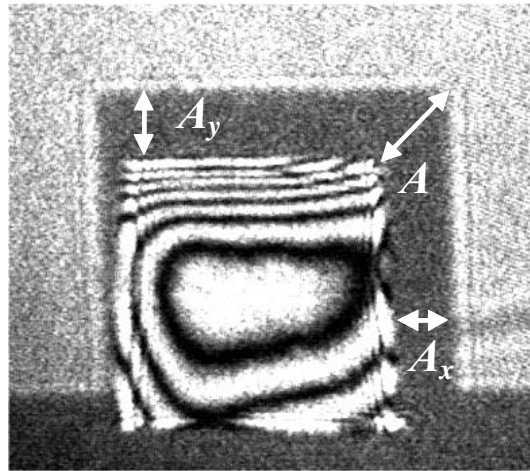


Рис. 5. Інтерференційна картина для зразка з великою клиноподібністю

У такому випадку кут відхилення променя зразком визначається за виразом:

$$\gamma_{x,y} = \arctg \frac{A_{x,y}}{B},$$

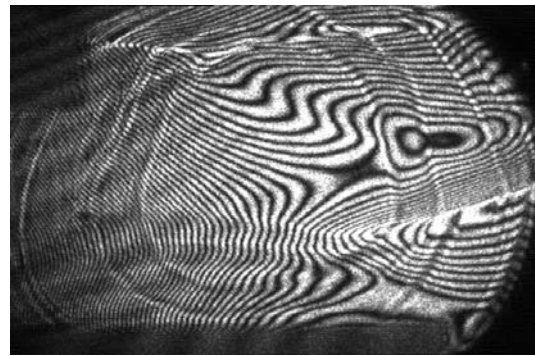
а замість виразів (6) використовують вирази:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{x,y} = \frac{1}{(n-1)} \arctg \frac{A_{x,y}}{B}; \\ \Delta d_{x,y} = l_{x,y} \cdot \operatorname{tg} \left[ \frac{1}{(n-1)} \arctg \frac{A_{x,y}}{B} \right]. \end{array} \right. \quad (7)$$

Нагадаємо, що інтерференційні картини на рис. 4, б та рис. 5 відповідають спотворенням фазового фронту променя, що пройшов через зразок, тобто ці спотворення викликані як відхиленням геометрії обох протилежних граней від площини, так і неоднорідностями в середині зразка. Якщо виникає потреба у контролі геометрії кожної з граней зразка окремо, то цю грань, як було вказано вище, ставлять замість поворотного дзеркала 5 (див. рис. 3). Тоді для розшифровки інтерференційної картини використовують ті самі вирази, що і для розшифровки картин у випадку контролю геометрії поверхні за допомогою пробного скла [5].

## 5. Результати експериментальних досліджень

Запропонована технологія і описана експериментальна установка використовувались для попередньої оцінки неоднорідностей оптичних характеристик кристалічних пластин з діаметром до  $\varnothing=50$  мм, а також для контролю геометрії поверхні та відбору вже підготовлених до комплексного дослідження зразків з розмірами граней від  $5\times 5$  до  $12\times 12$  мм<sup>2</sup>. Неоднорідності оптичних характеристик кристалічних пластин, що вирізалися з монокристалічних заготовок (буль), оцінювали з метою вибору ділянок, з яких потім вирізалися зразки для досліджень. На рис.6 наведено приклад інтерференційних картин для монокристалічних пластин  $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$  (рис. 6, а) та виготовлених з них зразків (рис. 6, б), що були вирощені та виготовлені на НВП «Карат». Це є приклад неякісних (відбракованих) кристалічних зразків. На рис. 7. (а також на рис.4) наведено інтерференційні картини та результати їхнього оброблення для зразків із  $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$  прямого та  $X/45^\circ$  зрізів, що були підготовлені та використовувались для комплексного дослідження їхніх оптичних характеристик.



а



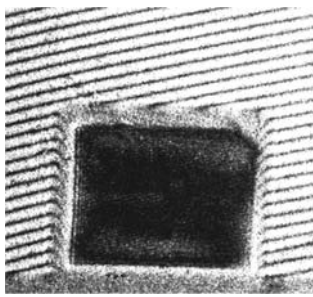
б

Рис. 6. Інтерференційні картини неякісних монокристалічних пластин із кристалів  $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$  (а) та зразків, вирізаних з цих пластин (б)

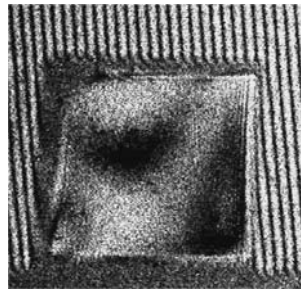
### Висновки

Описано технологію, яка дає змогу проводити якісний та кількісний контроль геометрії оптичної поверхні кристалічного зразка, визначати величину клиноподібності протилежних граней та характер спотворень хвильового фронту лазерного променя, який пройшов через зразок. Було знайдено робочі співвідношення для розрахунку кута заломлення та величини клиноподібності для випадків незначної та великої непаралельності протилежних граней досліджуваного зразка.

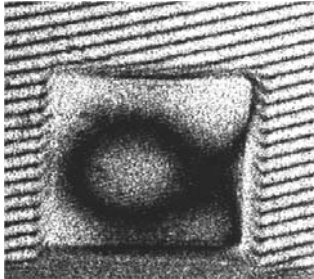
За допомогою створеної експериментальної установки було проведено попереднє оцінювання неоднорідностей оптичних характеристик вирощених на НВП «Карат» кристалів  $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$  та оцінено з високою точністю ( $\sim 0,2$  мкм) величину клиновидності виготовлених з них кристалічних зразків прямого та  $X/45^\circ$  зрізів.



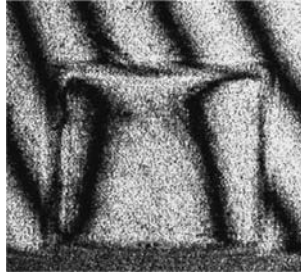
Просвітлення  
вздовж осі X:  
 $\theta_y = 27''$ ,  
 $\theta_z = 2'34''$ ,  $\Delta d_y = 1,6$   
мкм,  $\Delta d_z = 8,1$  мкм



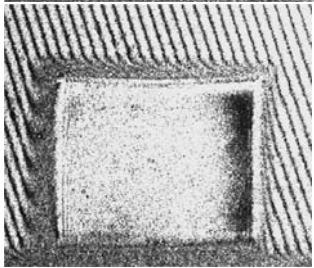
Просвітлення вздовж  
осі X:  
 $\theta_4 = 3'46''$ ,  
 $\theta_4 = 11''$ ,  
 $\Delta d_4 = 10,5$  мкм,  
 $\Delta d_4 = 0,7$  мкм



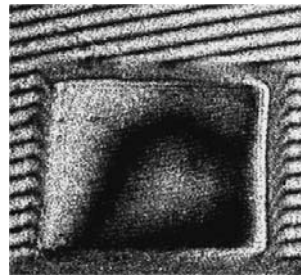
Просвітлення  
вздовж осі Y:  
 $\theta_z = 37''$ ,  $\theta_x = 2'53''$ ,  
 $\Delta d_z = 1,9$  мкм,  
 $\Delta d_x = 8,9$  мкм



Просвітлення вздовж  
напрямку  $\bar{4}$ :  
 $\theta_4 = 23''$ ,  
 $\theta_1 = 16''$ ,  
 $\Delta d_4 = 1,2$  мкм,  $\Delta d_1 = 0,8$   
мкм



Просвітлення  
вздовж осі Z:  
 $\theta_y = 2'53''$ ,  
 $\theta_x = 1'8''$ ,  
 $\Delta d_y = 10,0$  мкм,  
 $\Delta d_x = 3,5$  мкм



Просвітлення вздовж  
напрямку 4:  
 $\theta_4 = 22''$ ,  
 $\theta_1 = 2'27''$ ,  
 $\Delta d_4 = 1,3$  мкм,  
 $\Delta d_1 = 6,8$  мкм

a

b

Рис. 7. Інтерференційні картини та результат їхнього оброблення  
для двох зразків із кристалів  $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ :  
a – зразок прямого зрізу; б – зразок  $X/45^\circ$  зрізу

Ця технологія не вимагає дорогого оптичного обладнання і може бути використана для оцінки оптичних характеристик кристалічних матеріалів безпосередньо в ростових лабораторіях, а також для точного визначення непаралельності виготовлених кристалічних зразків у науково-дослідних лабораторіях чи на виробництві, де займаються експериментальними дослідженнями та впровадженням вирощених матеріалів.

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

1. Нарасимхамурти Т. Фотоупругие и электрооптические свойства кристаллов. – М.: Мир, 1984. – 624 с. 2. Сонин А.С., Василевская С.А. Электрооптические кристаллы. – М.: Атомиздат, 1971. – 328 с. 3. Гвоздева Н.П., Коркина К.И. Теория оптических систем и оптические измерения. – М.: Машиностроение, 1981. – 384 с. 4. Прикладная оптика / Под ред. Н.П. Закашова. – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с. 5. Справочник конструктора оптико-механических приборов / Под ред. В.А. Панова. – Л.: Машиностроение, 1983. – 742 с.