

КОНТРОЛЬ І ДІАГНОСТИКА ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ В ПРИЛАДОБУДУВАННІ

УДК 535.15

**КОМПЛЕКСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ САПФІРОВИХ ОПТИЧНИХ ВІКОН
СУЧАСНИМИ НЕРУЙНІВНИМИ МЕТОДАМИ**

¹⁾Сердега Б.К., ¹⁾Матяш І.Є., ¹⁾Литвин П.М. ¹⁾Маслов В.П., ²⁾Кущовий С.М.

¹⁾Інститут фізики провідників ім. В.Є.Лашкарьова Національної Академії Наук України, м. Київ, Україна; ²⁾Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна

Сапфір є унікальним матеріалом, який широко використовується в сучасних приладах як для виробництва оптичних пристроїв, так і в мікроелектроніці. Тому вимірювання внутрішніх напружень та якості полірування поверхонь в деталях із сапфіру є актуальною проблемою в науковому приладобудуванні. Як відомо, на геометрію фронту розповсюдження випромінювання може впливати як якість полірування, так і внутрішні механічні напруження, пов'язані з вирощуванням кристалів сапфіру. Метою роботи було розроблення високочутливого методу неруйнівного контролю лазерних вікон із сапфіру та встановлення зв'язку між розподілом внутрішніх механічних напружень з наношорсткістю полірованих поверхонь. Були проведені комплексні дослідження: якості полірування методом атомно-силової мікроскопії та внутрішніх напружень – новим неруйнівним поляризаційно-модуляційним методом. Результати досліджень дозволили виявити розподіл внутрішніх механічних напружень в лазерних вікнах із сапфіру і вперше встановити пропорційну залежність між внутрішніми механічними напруженнями та наношорсткістю полірованих поверхонь.

***Ключові слова:** неруйнівні методи контролю, лазерні вікна, сапфір, поляризаційно-модуляційний метод, атомно-силова мікроскопія.*

Вступ. Постановка проблеми

Сапфір має високу стійкість до механічних, хімічних і температурних впливів, а також має високу прозорість в оптичному діапазоні від ультрафіолетового до інфрачервоного довжин хвиль випромінювання, що дозволяє виготовляти оптичні вікна, лінзи для оптичних приладів. Високі електроізолюючі властивості сапфіру дозволили також успішно використовувати його в мікроелектроніці як матеріал-підкладка для структур «кремній на сапфіра» (КНС), а в останній час – для виготовлення на цих підкладках світлодіодних випромінюючих структур. При вирощуванні зливків монокристалічного сапфіру у ньому можуть виникати дефекти у вигляді мікробульбашок, границь блоків та механічні напруження, які суттєво впливають на його властивості, тому розроблення високочутливих методів і приладів неруйнівного контролю якості сапфіру є актуальною проблемою в науковому приладобудуванні. Традиційний контроль здійснюють візуально на полярископії-поляриметрії ПКС-250, але технічні можливості цього найближчого аналога не дозволяють здійснювати високочутливий контроль якості монокристалів сапфіру.

Метою роботи було розроблення високочутливого методу неруйнівного

контролю лазерних вікон із сапфіру та встановлення зв'язку між розподілом внутрішніх механічних напружень з наношорсткістю полірованих поверхонь.

Постановка задачі

Поляризаційна модуляція є одним із декількох фізико-технічних прийомів експериментальної фізики, що входять до переліку методів модуляційної спектроскопії. Ці методи, що базуються на використанні модуляції тих чи інших фізичних величин (напруженості електричного та магнітного полів, деформації, температури, довжини хвилі випромінювання тощо), були у свій час детально досліджено та узагальнено в монографії [1]. Модуляційні методи поєднує одна і та ж сама функціональна риса, що полягає у фізичному диференціюванні відповідної функціональної характеристики того чи іншого явища. Потреба у такій процедурі продиктована необхідністю подолання труднощів, що виникають при аналізі слабо виражених особливостей досліджуваної характеристики, чи при наявності у ній постійної складової – «фона». Тому процедура диференціювання функціональних залежностей, що виконана на фізичному рівні, а не на етапі математичної обробки експериментальних результатів, є достовірним та додатковим, а деколи і новим високочутливим джерелом інформації про властивості досліджуваного об'єкта.

Однак така характеристика випромінювання як стан поляризації, має з точки зору диференціальної спектроскопії суттєву відмінність від інших способів модуляції. Вона полягає, перш за все, у тому, що поляризація, як просторова характеристика хвилі, виражається сукупністю значень – компонентами вектора Максвелла-Джонса або вектора Стокса. Таким чином, на відміну від модуляцій інших фізичних величин, що оперують з єдиним параметром, поляризаційна модуляція (ПМ) характеризується двомірним впливом на хвилю (рис.1). Ця, несуттєва на перший погляд, обставина значно ускладнює як техніку експерименту, так і інтерпретацію отриманих за допомогою ПМ результатів. Частково у цьому і полягає причина того, що в період всезагального розповсюдження диференційних методів, коли практично у всіх фізичних науково-дослідних лабораторіях розвивалися модуляційні методики з використанням різноманітних фізичних величин, ПМ залишалася поза увагою.

Модуляційно-поляризаційний метод [2] можна описати чотирикомпонентним вектором Стокса. Відомо, що стан поляризації світлової хвилі в загальному вигляді:

$$\begin{aligned} S &= [I, Q, U, V], \\ I &= E_{\parallel} E_{\parallel}^* + E_{\perp} E_{\perp}^*, \\ Q &= E_{\parallel} E_{\parallel}^* - E_{\perp} E_{\perp}^*, \\ U &= E_{\parallel} E_{\perp}^* + E_{\perp} E_{\parallel}^*, \\ V &= i(E_{\parallel} E_{\perp}^* - E_{\perp} E_{\parallel}^*), \end{aligned}$$

де I – загальна інтенсивність випромінювання;

Q – різниця випромінювань, лінійно поляризованих паралельно осям x і y ;
 U – різниця інтенсивностей випромінювань, поляризованих під кутами $\pm 45^\circ$ до осей x і y ;
 V – різниця інтенсивностей випромінювань з правою та лівою циркулярною поляризацією.

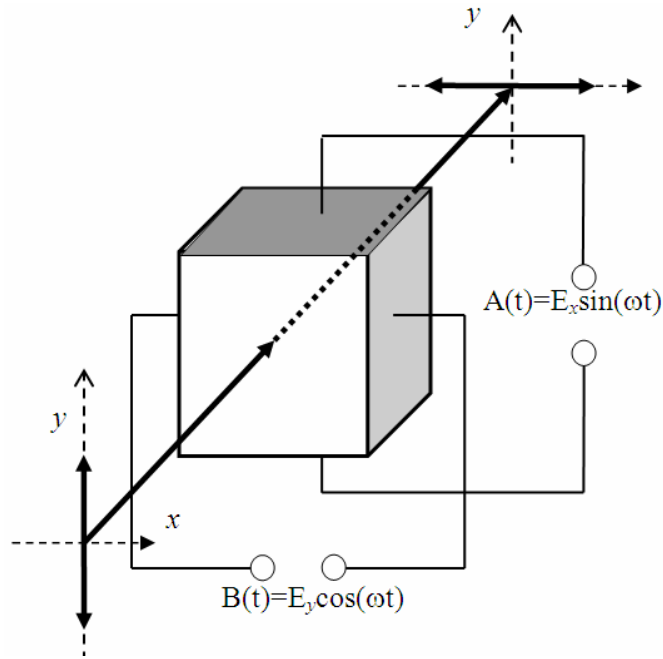


Рис. 1. Схематичне зображення модулятора поляризації, що функціонує на основі подвійного поперечного ефекту, та його функціонування в режимі півхвильової фазової пластинки [2]

Задачею даної роботи було використання модуляційно-поляризаційного методу для підвищення чутливості при вимірюванні внутрішніх механічних напружень в полірованих пластинах сапфіру, без врахування їх кристалографічної орієнтації.

Основна частина

Макет спроектованого нового пристрою містить напівпровідниковий лазер, фазові пластини, утримувач зразка, модулятор поляризації та фотоелектронний приймач, відрізняється тим, що одна фазова пластинка розволжена безпосередньо перед зразком, який контролюється, а друга після нього. Таке положення фазових пластин перетворює лінійно-поляризоване випромінювання лазера в циркулярну поляризацію, деталь зондується циркулярно поляризованим випромінюванням, для якого розташування кристалографічних вісей зразка не має значення. При цьому на ступінь перетворення стану поляризації впливають тільки дефекти структури зразка та механічні напруження в ньому. Після другого циркулярного поляризатора розташовано динамічний аналізатор інтенсивності, який складається з чверть- хвильової фазової пластинки, фотопружного модулятора стану поляризації, лінійного поляризатору та фотоприймача.

Сигнал, генерований фотодіодом на частоті модуляції, пропорційний інтенсивності реєструється селективним нановольтметром. Отже, розроблений пристрій дозволяє вимірювати механічні напруження та інші дефекти з високою чутливістю не залежно від їх орієнтації, на яку не впливає кристалографія об'єкту, що контролюється.

Структурна схема високочутливого пристрою контролю якості полірованих пластин сапфіру та інших кристалів, прозорих в оптичному діапазоні вимірювання, наведена на рис. 2.

Лазер 1 випромінює лінійно поляризований промінь, тип лазера обирається таким чином, що довжина хвилі λ відповідає прозорості деталей, що досліджуються. Це випромінювання проходить через лінійний поляризатор 2 та чверть хвильову фазову пластинку 3, які перетворюють випромінювання у циркулярне поляризоване, яке падає на зразок 4.

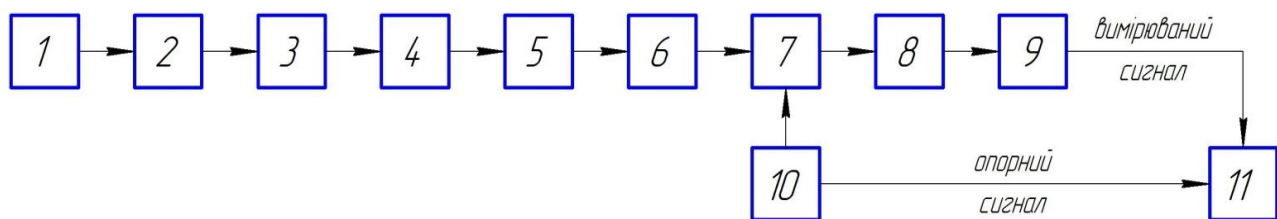


Рис. 2. Схема модуляційно-поляризаційного пристрою контролю якості полірованих пластин сапфіру та інших кристалів, прозорих в оптичному діапазоні вимірювання: 1 – напівпровідниковий гелієвий лазер; 2 – лінійний поляризатор; 3 – фазова пластинка $\lambda/4$; 4 – зразок; 5 – фазова пластинка $\lambda/4$; 6 – лінійний поляризатор; 7 – модулятор; 8 – поляризатор; 9 – фотоприймач; 10 – генератор модулятора; 11 – синхронно-фазовий детектор

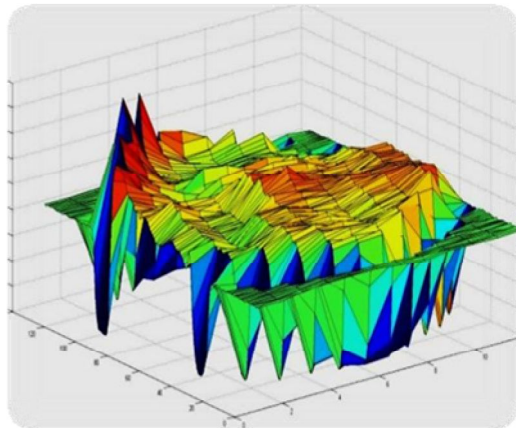
Дефекти в зразку перетворюють випромінювання, яке пройшло через зразок, на еліптично поляризоване. Другий циркулярний поляризатор, що складається з чверть хвильової фазової пластинки 5, та лінійного поляризатора 6 пропускає лише лінійну компоненту еліптично поляризованого випромінювання, інтенсивність якої пропорційна величині внутрішніх механічних напружень. Для підвищення чутливості приладу в оптичній схемі в якості динамічного аналізатора використано фотопружний модулятор поляризації 7 з лінійним поляризатором 8 позаду нього. Площина пропускання поляризатора 8 утворює кут 45° з осями модулятора 7, в цьому випадку фотодетектор 9 генерує сигнал пропорційний інтенсивності лінійної компоненти еліптично поляризованого випромінювання, який реєструється селективним нановольтметром 11 на подвійній частоті модуляції. Опорний сигнал на селективний вольтметр подається з генератора модулятора поляризації 10.

Для проведення операції контролю були обрані зразки лазерних вікон із сапфіру надані фірмою «Imprex HighTech GmbH» (Німеччина) у вигляді плоскопаралельних дисків діаметром 62 мм і товщиною 5 мм, які візуальними та відо-

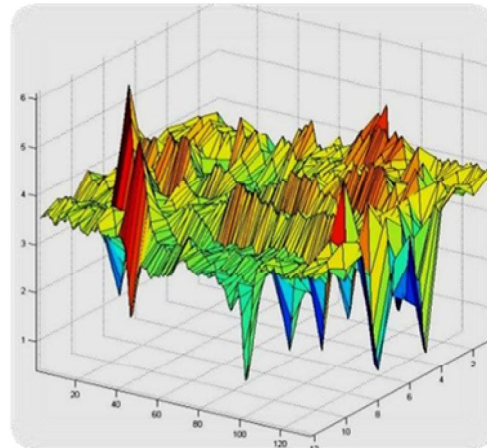
ними фотоелектричними методами були проконтрольовані і визначені як якісні. Але в лазерних системах ці вікна змінювали фронт лазерного випромінювання і були забраковані. Необхідно було визначити причину непридатності зразків. Зразки були установлені в спеціальний тримач. Тримач переміщався з допомогою крокового двигуна ШДР-711 з кроком 0,45 мм, що дозволило просканувати всю площину кожного зразка і отримати розподіл внутрішніх напруження в них у цифровому вигляді.

Результати досліджень та їх обговорення

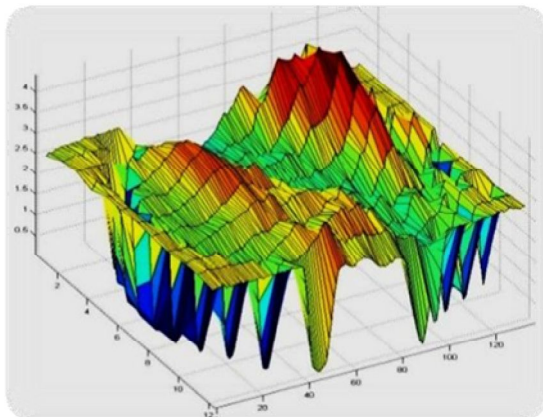
На рис. 3 приведено результати досліджень чотирьох зразків сапфірових вікон. Можна побачити, що зразки сапфіру мають неоднорідну внутрішню структуру розподілу мікронапружень, яку можна характеризувати як різницю між максимальними та мінімальними їх значеннями. Таким чином ці величини та їх розподіл може служити об'єктивною характеристикою якості зразка сапфіру, який контролювався.



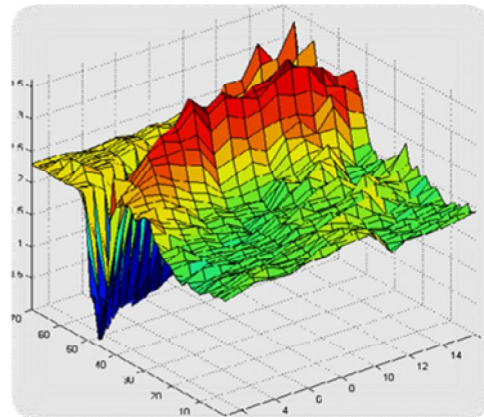
Sample №1



Sample №2



Sample №3



Sample №4

Рис.3. Розподіл внутрішніх напруження в лазерних вікнах із сапфіру

Результати проведених досліджень дозволили пояснити причину невідповідності досліджених зразків вимогам лазерних систем, а саме: на зміну геометрії фронту лазерного випромінювання, яке пройшло через дані вікна, впливає ве-

личина і нерівномірність розподілу внутрішніх мікронапружень по площині цих вікон.

Крім того, дотикові дослідження наношорсткості полірованих поверхонь зразків зондовим мікроскопом NanoScope IIIa Dimension 3000™ та обробка експериментальних результатів вимірювань (рис. 4) дозволила встановити емпіричну формулу, яка описує вперше виявлену залежність між наношорсткістю полірованих поверхонь та величиною внутрішніх напружень в цих зразках. Величина коефіцієнту A , вірогідно, пов'язана з залишковими механічними напруженнями, які виникли ще на стадії вирощування кристалів, а коефіцієнту B – з фізичними властивостями сапфіру.

$$Ra(\text{нм}) = A \cdot \sigma_{\text{ср.вн.}} + B - \text{експериментальна формула,}$$

де $Ra(\text{нм})$ – наношорсткість полірованих поверхонь в нм;

A – коефіцієнт пропорційності, який для сапфіру визначений експериментально і дорівнює 2,51;

B – постійний коефіцієнт, визначений експериментально і для сапфіру становить 3,70;

$\sigma_{\text{ср.вн.}}$ – різниця між максимальним і мінімальним значенням величини внутрішніх мікронапружень.

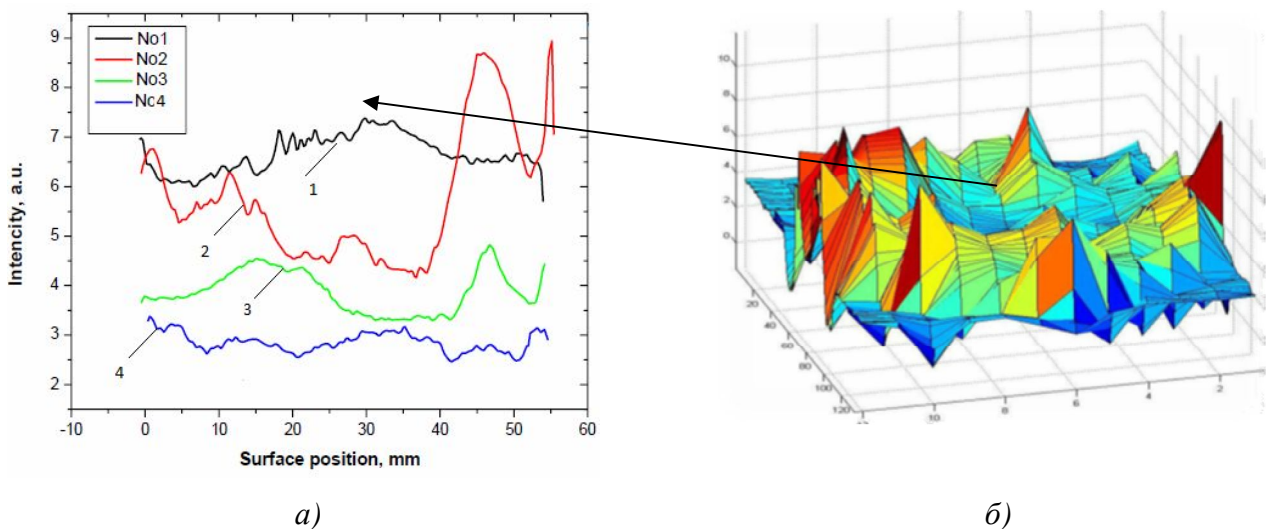


Рис. 4. Експериментальні результати вимірювань зондовим мікроскопом NanoScope IIIa Dimension 3000™ наношорсткості (а) при скануванні поверхонь зразків (б)

Висновки

Результати проведених комплексних досліджень дозволили:

1. Встановити причину невідповідності досліджених зразків вимогам лазерних систем, а саме: на зміну геометрії фронту лазерного випромінювання, яке пройшло через дані вікна, впливає величина і нерівномірність розподілу по площині цих вікон внутрішніх мікронапружень.

2. Вперше виявити пропорційну залежність між наношорсткістю полірованих поверхонь оптичних сапфірових вікон та величиною внутрішніх мікрона-

пружень в них.

3. Запропонувати перспективний модуляційно-поляризаційний пристрій для контролю внутрішніх мікронапружень в прецизійних деталях, які виготовлені не тільки з прозорих кристалів таких як сапфір, але також зі скла, склокераміки та оптичної прозорої кераміки.

Перспективи подальших наукових досліджень покладені на впровадження розробленого високочутливого методу в технологічний процес контролю матеріалів, прозорих в оптичному діапазоні випромінювання.

Література

1. Кардона М. Модуляционная спектроскопия; пер. с англ.– М: Мир, 1972. – 416 с.
2. Сардега Б.К. Модуляційна поляриметрия. – К.: Наукова книга, 2011. – 260 с.

*Надійшла до редакції
26 квітня 2012 року*

©Сердега Б. К., Матяш І. Є., Литвин П. М., Маслов В. П., Кущовий С. М., 2012