

УДК 535.5: 537.226: 546.882

PACS number(s): 78.20 Am, 78.20 Ci

КРИСТАЛООПТИЧНИЙ СЕНСОР ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ

В. Стадник, М. Романюк, М. Тузяк, В. Курляк, Р. Брезвін

*Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Кирила і Мефодія, 8, 79005 Львів, Україна
e-mail: vasylstadnyk@ukr.net*

Запропоновано новий кристалооптичний метод вимірювання одновісних тисків, що ґрунтується на явищі інверсії знаку двоприменезаломлення. Як кристал-сенсор запропоновано використовувати кристал фторберилату амонію $(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$. У цьому методі вимірювання тисків застосовують температурно-спектрально-баричну діаграму ізотропного стану цього кристала. Оцінено чутливість, точність і наведено переваги вимірювання тисків з допомогою цього сенсора.

Ключові слова: інверсія знаку двоприменезаломлення, кристал, одновісний тиск.

Відомі різні методи вимірювання тиску, що ґрунтуються на п'єзооптиці, п'єзоелектриці, ефекті Холла й інших фізичних ефектах [1–3]. Більшість з них ґрунтуються на використанні складних електронних реєструвальних систем, потребують високої стабільності джерела живлення і приймачів, гальванічного зв'язку передавача з приймачем.

Оптичні методи вимірювання тиску мають низку переваг перед іншими, оскільки дають змогу впливати на шумові чинники, порівняно конструктивно простий зв'язок з електронними системами реєстрації і управління, дистанційність реєстрації.

Відомий метод, що спирається на п'єзооптичному ефекті – залежності зміни показника заломлення n_i від величини механічного напруження, прикладеного до кристала [4]. Зміна n_i чи двоприменезаломлення Δn_i двох променів, які розповсюджуються у цьому напрямку і мають різну поляризацію, вимірюють безпосередньо відповідними компенсаторами (кварцевий клин Берека або Сенармона) або за зміною інтенсивності світла, що потрапило через схрещені ніколи і встановлений між ними п'єзопередавач.

У статті запропоновано такий метод вимірювання тиску, в якому за рахунок використання п'єзооптичного елемента з нового кристала розшириться діапазон вимірюваних тисків у широкому інтервалі температур, а також надійне відтворення точки, за якої тиск дорівнює нулю. У цьому методі як п'єзооптичний елемент використано кристал з інверсією знаку двоприменезаломлення (ІЗД).

В області прозорості кристалів трапляються випадки, коли криві спектральної залежності $n(\lambda)$ для різних поляризацій світла перетинаються в одній

точці і тоді простежено підвищення симетрії оптичної індикатриси кристала, не передбачене принципом Неймана. Одновісні кристали стають оптично ізотропними, двовісні – одновісними (рис. 1) [5]. У випадку одновісного кристала така зміна може бути виявлена за моментом зникнення коноскопічної фігури, у двовісних кристалів вона простежена як коноскопічна фігура одновісного кристала і, крім того, тут візуально можна визначити, в якій області температур знаходимось – вище, чи нижче від точки ІЗД, яка відповідає рівності заломлення для двох поляризацій світла.

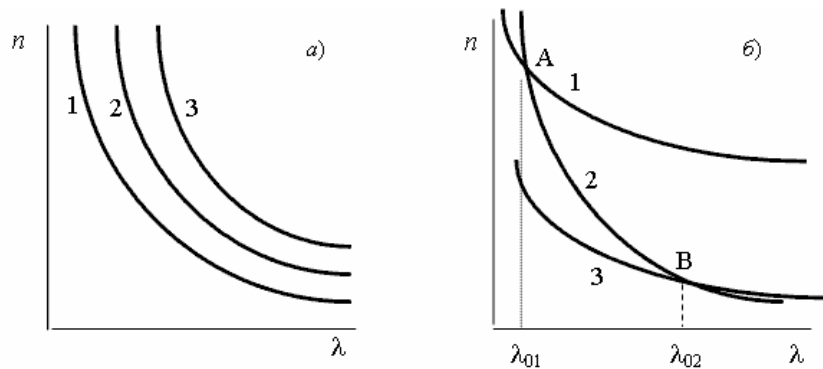


Рис. 1. Характерні дисперсійні залежності показників заломлення n_i : а – типовий випадок для двовісного кристала; б – для кристала з ІЗД

Якщо описувати дисперсію $n(\lambda)$ формулою Зельмейєра

$$n_i^2 = 1 + \frac{A_i \hat{r}_{0i}^2 \ddot{\Upsilon}}{\hat{r}^2 - \ddot{\Upsilon}_{0i}^2} + \frac{\ddot{\Upsilon}}{B_i \hat{r}^2}, \quad (1)$$

де A_i – ефективний параметр, пов'язаний з силою, зарядом і масою УФ осцилятора; λ_{0i} – довжина хвилі, що відповідає “центру ваги” смуги поглинання; B_i – аналог A_i для ГЧ осцилятора, то для точки ІЗД отримуємо:

$$\Delta n_j = \frac{1}{n_i + n_k} \left(\frac{A_i \hat{r}_{0i}^2 \ddot{\Upsilon}}{\hat{r}^2 - \ddot{\Upsilon}_{0i}^2} - B_i \hat{r}^2 - \frac{A_k \ddot{\Upsilon}_{0k}^2 \ddot{\Upsilon}}{\hat{r}^2 - \ddot{\Upsilon}_{0k}^2} + \frac{\ddot{\Upsilon}}{B_k \hat{r}^2} \right) = 0 \quad (2)$$

звідки знаходимо довжину хвилі λ_0 , на якій простежено ІЗД:

$$\hat{r}_0^2 = \frac{1}{2} \left(\ddot{\Upsilon} \pm \sqrt{b^2 - 4c} \right) \quad (3)$$

(b і c – комбінації констант $A_i, B_i, A_k, B_k, \lambda_{0i}, \lambda_{0k}$).

На підставі (3) можна визначити умови, коли в кристалі простежено одна, декілька точок інверсії знаку Δn , або коли вони неможливі. Відповідна залежність може бути отримана також шляхом формального диференціювання неявної функції $\Delta n_i(\hat{r}\ddot{\Upsilon}) = n_j(\hat{r}\ddot{\Upsilon}) - n_k(\hat{r}\ddot{\Upsilon})$.

З рисунка видно, що при $\lambda < \lambda_{01}$: $n_2 > n_1 > n_3$; при $\lambda_{01} < \lambda < \lambda_{02}$: $n_1 > n_2 > n_3$ і при $\lambda > \lambda_{02}$: $n_1 > n_3 > n_2$. В точці А $n_1 = n_2$, і відповідно відбувається зміна знаку $\Delta n_3 = n_1 - n_2$ ($\Delta n_3 > 0$ при $\lambda < \lambda_{01}$ та $\Delta n_3 < 0$ при $\lambda > \lambda_{01}$), а в точці В – $n_2 = n_3$ і – зміна знаку $\Delta n_1 = n_2 - n_3$.

Під впливом тиску точки ІЗД зміщуються за спектром і ця залежність легко

може бути виявлена по формі коноскопічної фігури або за мінімумом фотоструму (оскільки тоді $\Delta n_i = 0$). У статті запропоновано використовувати баричну залежність точки ІЗД. Керуючись відомою залежністю спектрального положення точки ІЗД від тиску за фіксованої температури передавача, за формою коноскопічної фігури, характерної для зразка одновісного кристала, перпендикулярного до оптичної осі, і за мінімумом фотоструму відшукують σ_j .

Розглянемо головні чинники, що визначають баричне зміщення точки ІЗД кристала фторберилату амонію $(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$ (ФБА). Оскільки точка ІЗД виникає в Y-напрямку, то умова $\Delta n_y = 0$ при дії одновісних тисків реалізується при іншій довжині хвилі або у разі іншої температури. Величину цих змін запишемо так:

$$d\Delta n_y/d\sigma_m \cdot \Delta\sigma_m = [dn_x/d\sigma_m - dn_z/d\sigma_m] \cdot \sigma_m = [1/2(\pi_{3m} n_{30}^3 - \pi_{1m} n_{1m}^3)] \cdot \sigma_m = (\partial\Delta n/\partial\lambda) \cdot \Delta\lambda|_{\lambda_0+\Delta\lambda}. \quad (4)$$

Таке завдання легко розв'язати тоді, коли спектральне зміщення точки ІЗД найбільш просто і найбільш надійно можна знайти графічним методом на базі експериментальних залежностей $\partial\Delta n/\partial\lambda$ і $\partial\Delta n/\partial\sigma$ [6].

Для одновісного тиску вздовж осі X зміна двопронезаломлення:

$$dn_y/d\sigma_x = [1/2(\pi_{31} n_3^3 - \pi_{11} n_{11}^3)]. \quad (5)$$

Величина зміщень точок температурно-спектральної діаграми під впливом напруг σ_x буде, насамперед, визначатись п'єзооптичними константами π_{11} і π_{31} . Оскільки $\pi_{11}=6,6$ Бр, а $\pi_{31}=6,4$ Бр [7], то зміщення точок ІЗД під впливом σ_x в бік високих температур визначатиметься, зазвичай, змінами n_x .

Для одновісного тиску вздовж осі Z отримаємо:

$$d\Delta n_y/d\sigma_z = 1/2(n_3^3 \pi_{33} - n_1^3 \pi_{13}). \quad (6)$$

Оскільки $\pi_{13}=2,4$ Бр, а $\pi_{33}=1,4$ Бр, то зміщення ізотропної точки в бік високих температур під впливом одновісного тиску σ_z буде також, головню, визначатись більшими змінами показника заломлення n_x під впливом σ_z .

Температурні зміни п'єзоконстант π_{11} , π_{31} , π_{33} і π_{13} свідчать, що в ділянці ІЗД ~ 309 К коефіцієнти π_{11} і π_{31} , а також π_{13} і π_{33} наближаються до рівності між собою, що відповідає тому факту, що індуковані зміни $\delta\Delta n_y$ в межах точки ІЗД незначні, і оскільки $n_{x0} = n_{z0}$, то $\pi_{11} \sim \pi_{31}$ і $\pi_{13} \sim \pi_{33}$, що свідчить про підвищення симетрії тензора п'єзооптичних констант.

Відомі кристали, для яких $d\lambda_0/d\sigma \sim 4 \text{ \AA} / \text{атм}$ з робочою температурою вище і нижче кімнатної. Така чутливість зберігається стабільною в межах не менше 100 атм і відповідає спектральній області зміщення λ_0 в межах 300–1 000 нм.

Ми запропонували використовувати кристал $(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$, який має два температурні діапазони існування ІЗД: при 76 і 309 К.

Принцип реалізації оптичного методу вимірювання тиску у випадку кристала ФБА такий (рис. 2). Встановлюємо кристал між схрещеними поляризаторами в діагональне положення. Далі в таке ж положення встановлюємо компенсатор, наприклад, $\lambda/4$, задаємо температуру кристала в одній з точок його температурно-спектральної діаграми ІЗД (300...315 К) і з допомогою монохроматора (чи фільтра) визначаємо довжину хвилі, для якої коноскопічний вигляд буде мати форму систем концентричних кілець і темного хреста). У цьому методі вимірювання тисків застосовують температурно-спектрально-баричну діаграму кристала ФБА (рис. 3) [8].

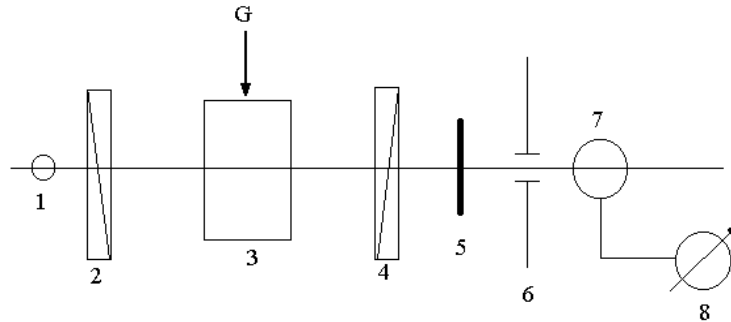


Рис. 2. Принципова схема кристалооптичного методу вимірювання тиску: 1 – лазерне джерело випромінювання; 2 – поляризатор; 3 – п'єзоелемент-кристал з інверсією знаку двоприменезаломлення; 4 – аналізатор; 5 – фільтр; 6 – екран; 7 – фотоприймач; 8 – реєструвальна система

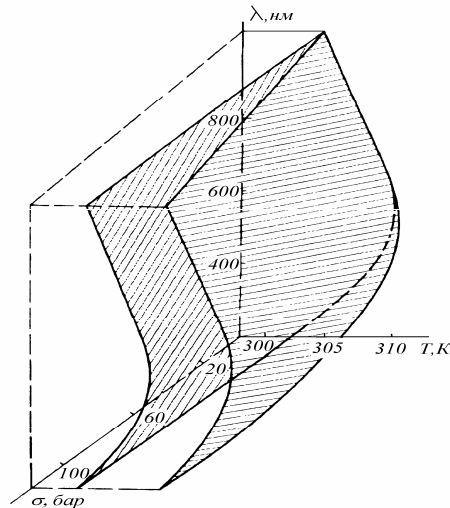


Рис. 3. Температурно-спектрально-барична діаграма ізотропного стану кристала $(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$

Фотострум у цьому випадку буде мінімальним, оскільки на фотокатод проєктують лише вузьку приосьову частину поля зору, яка виділяє центральну частину темного хреста. Це буде вихідне юстування установки. Навантажуємо кристал і, змінюючи довжину хвилі, відтворюємо таку ж картину в іншому кольорі. За відомою довжиною хвилі λ_0 знаходимо з графіка тиск σ_j .

Чутливість пропонованого методу визначимо так. Нехай фотореєструюча система дає змогу оцінити зміну інтенсивності порядку 0,1% ($I=0,001I_0$), тоді

$$\frac{\partial I}{\partial P} \cdot \Delta P = 0,001I_0 = I_0 \sin^2 2\alpha \cdot \sin \Delta \cdot 2\pi \cdot \frac{\partial}{\partial P} [d(n_1 - n_2)/\lambda] \cdot \Delta P. \quad (7)$$

Оскільки зразок виставлено у діагональне положення ($\alpha=45^\circ$), а під час уведення пластинки $\lambda/4$ в точці інверсії ($\Delta n=0$) сумарна різниця фаз $\Delta=90^\circ$, то

$$0,001I_0 = 2I_0 \cdot \pi \{ (\frac{\partial}{\partial P} \cdot (n_1 - n_2) \cdot d + d \frac{\partial}{\partial P} \cdot (n_1 - n_2)) + d \frac{\partial}{\partial P} \cdot (n_1 - n_2) \} \cdot \lambda - \frac{\partial \lambda_0}{\partial P} \cdot d \cdot (n_1 - n_2) / \lambda^2 \} = 2\pi \cdot (6 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \cdot 10^{-6}) / (6 \cdot 6 \cdot 10^{-10}) \cdot \Delta P = 0,1 \Delta P. \quad (8)$$

Тобто, $\Delta P = 0,01$ атм. Якщо при досить малочутливій приймальній системі $\Delta I \sim 0,01I_0$, то $\Delta P = 0,1$ атм. Відповідно до цього відносні похибки становитимуть порядку 0,1...0,01% для напружень близько 400 атм і зростуть у разі реєстрації слабших напружень.

Запропонований метод має такі переваги порівняно з відомими:

- більш стабільну чутливість на кривій $J \approx \sin^2 \Delta / 2$;
- неперіодичну (однозначну) залежність інтенсивності від тиску;
- немає необхідності “зшивання” лінійних ділянок півперіодів синусоїдів і використання рухомих частин оптичної схеми (введення- виведення фазової пластинки $\lambda/4$) і двох каналів з чутливими і нечутливими передавачами;
- оскільки виміри здійснюються за мінімумом фотоструму, а не за його абсолютним значенням, то немає необхідності стабілізації джерела і чутливості приймача.

1. Карнаух Б. М., Мыцык Б. Г., Остаюк В. В. А.С. 1649321. СССР. Оптический датчик акустического давления // Оpubл. в БИ., 1989. № 18.
2. Андрущак А. С., Мыцык Б. Г., Осыка Б. В. Оптический преобразователь давления и температуры // Положит. реш. ВНИИГПЭ №724898/ 10 от 4. 01. 1992.
3. Осыка Б. В., Мыцык Б. Г., Андрущак А. С. А.С. 1545121. СССР. Дифференциальный измеритель давления // Оpubл. в БИ. №7. 1990.
4. Удалов Н. П., Ширяев В. А. А.С. 939974. Пьезооптический измерительный преобразователь // Оpubл. в БИ., 1982. № 24.
5. Романюк М. О. Кристаллооптика. Київ: ІЗМД, 1997. 432 с.
6. Романюк М. О., Романюк М. М., Стадник В. Й. Про параметричні ефекти у кристалах з інверсією знака двозаломлення // Журнал фіз. досл. 1997. Т. 1. № 4. С. 1–3.
7. Romanjuk M. O., Stadnyk V. Y. The action of mechanical stress and other influences on birefringence inversion of LiKSO₄ and (NH₄)₂BeF₄ crystals // Ferroelectrics. 1997. Vol. 192. N 1–4. P. 235–241.
8. Stadnyk V. Y., Brezvin R. S., Romanjuk M. O. Optical method of pressure measurements using the birefringence inversion // Functional materials. 1997. Vol. 4. N 1. P. 97–99.

THE CRYSTALLOPTIC SENSOR OF PRESSURE MEASURING**V. Stadnyk, M. Romanyuk, M. Tuzyak, V. Kurlyak, R. Brezvin**

*Ivan Franko Lviv National University,
Kyrylo and Mefodij Str., 8, UA-79005 Lviv, Ukraine
e-mail: vasylstadnyk@ukr.net*

The new crystalloptic method of uniaxial pressure measuring which is based on birefringence sign inversion effect was proposed. It was proposed the usage of the fluroberyllate ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$ crystal as the crystal-sensor. The temperature-spectral-baric diagram of the isotropic state of $(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$ crystal is used for pressure measuring. The sensibility and accuracy of pressure measuring by the present sensor were estimated and the advantages were showed.

Key words: birefringence sign inversion, crystal, uniaxial pressure.

Стаття надійшла до редколегії 15.02.2008

Прийнята до друку 08.07.2008