

## Пружнооптичні властивості кристалів фторберилату амонію

Б. Мицик<sup>1</sup>, Б. Горон<sup>2</sup>, Н. Дем'янишин<sup>1</sup>,  
В. Стадник<sup>2</sup>, П. Щепанський<sup>2</sup>, Я. Кость<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Фізико-механічний інститут НАН України,  
вул. Наукова, 5, 79060 Львів, Україна

<sup>2</sup> Львівський національний університет ім. І. Франка,  
вул. Драгоманова, 19, 79005 Львів, Україна  
e-mail: bohdanhoron@lnu.edu.ua

Інтерферометричним методом визначено усі незалежні п'єзооптичні  $\pi_{im}$  коефіцієнти кристалів фторберилату амонію  $(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$ . На основі  $\pi_{im}$  та коефіцієнтів пружної жорсткості  $C_{mk}$  розраховано усі незалежні пружнооптичні коефіцієнти  $p_{ik}$ . Виявлено, що деякі коефіцієнти  $\pi_{im}$  мають нетипово великі значення ( $\sim 10\text{--}13$  Бр). Встановлено, що всі найбільші значення п'єзооптичного та пружнооптичного ефектів відповідають головним коефіцієнтам  $\pi_{11}$ ,  $\pi_{23}$ ,  $\pi_{33}$  та  $p_{11}$ ,  $p_{22}$  і  $p_{23}$ . Це дозволяє віднести фторберилат амонію до кращих акустооптичних матеріалів для ультрафіолетової області спектру, оскільки нижня межа спектру пропускання ФБА знаходиться у глибокій УФ області  $\sim 250$  нм.

**Ключові слова:** кристал, фторберилат амонію, п'єзооптичний ефект, пружнооптичний ефект, одновісний тиск, півхвильове напруження, п'єзооптичні коефіцієнти, пружнооптичні коефіцієнти, показник заломлення.

### 1. Вступ

Для встановлення пружнооптичної та акустооптичної ефективності матеріалу необхідно визначити усі компоненти  $p_{ik}$  тензора пружнооптичних коефіцієнтів (ПрОК), тобто заповнити матрицю ПрОК. На основі матриці ПрОК слід побудувати вказівні поверхні (ВП) пружнооптичного ефекту (ПрОЕ) [1–4].

Визначення ПрОК  $p_{ik}$  (індекси  $i$  і  $k$  позначають напрямки поляризації світла і деформації відповідно) є важкою задачею. За складних геометрій експерименту вирази для  $p_{\text{ef}}$  формуються, зазвичай, громіздкою сумою коефіцієнтів  $p_{ik}$  [5–7]. Тому важко визначити й абсолютні значення  $p_{ik}$ , особливо тоді, коли індекси  $i$ ,  $k$  мають значення 4, 5, 6. Відповідно, для визначення усіх значень коефіцієнтів  $p_{ik}$  і їх знаків методом

Діксона–Коуена необхідно додатково використати інтерферометричний метод [8, 9], а методами Бергмана–Фуеса [10] та Петерсона [11] можна знайти лише відношення  $p_{12}/p_{11}$  або складні комбінації коефіцієнтів  $p_{ik}$  типу  $(p_{11} + p_{12} + 2p_{44})/(p_{11} + p_{12} - 2p_{44})$  для кубічних кристалів. Для кристалів нижчої симетрії подібні вирази не записано. Дифракційний метод Нарасімхамурті [9, 12] придатний лише для знаходження комбінацій ПрОК типу  $(p_{33}n_3^3)/(p_{13}n_1^3)$  в тригональних кристалах (класи симетрії  $\bar{3}$ ,  $32$ ,  $3m$ ), а методом розсіювання Брілюена можна визначити коефіцієнти  $p_{ik}$  кубічних кристалів [13, 14] або лише головні компоненти матриці  $p_{ik}$  ( $i, n = 1, 2, 3$ ) в кристалах нижчої симетрії [15].

В останні роки для заповнень матриць ПрОК  $p_{ik}$  використовують інтерферометричні методи [6, 7, 16–18]. А саме, з допомогою інтерферометрії знаходять усі компоненти тензора ПОК  $\pi_{im}$  (індекси  $i, m$  вказують напрямки поляризації світла та дії одновісного тиску відповідно), а усі компоненти тензора ПрОК  $p_{ik}$  розраховують на основі відомого тензорного виразу

$$p_{ik} = \pi_{im} C_{mk}, \quad (1)$$

де  $C_{mk}$  — коефіцієнти пружності.

В даній роботі інтерферометричним методом досліджено фотопружність ромбічних кристалів (клас симетрії  $mmm$ ) фторберилату амонію  $(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$  (ФБА), який відносять до кристалічної групи  $A_2\text{BX}_4$ . Інтерес до цієї групи зумовлений тим, що деякі представники групи мають великі п'єзо- і пружнооптичні коефіцієнти. Наприклад, найбільшими ПОК кристалу сульфату амонію [18] є коефіцієнти  $\pi_{11}$ ,  $\pi_{12}$  та  $\pi_{44}$ , які мають значення 11.0, 6.5 та 8.5 Бр відповідно (1 Бр = 1 Brewster =  $10^{-12}$  м<sup>2</sup>/Н). Для порівняння: найбільші ПОК модельного акустооптичного (АО) кристалу  $\text{LiNbO}_3$  мають значення  $\pi_{13} = 0.78$  та  $\pi_{44} = 2.25$  Бр [20], а ще один представник групи  $A_2\text{BX}_4$ , кристал  $\text{K}_2\text{ZnCl}_4$ , має зміни показників заломлення  $n_i$ , що відповідає величині ПОК  $\pi_{im} \sim 10$  Бр [20].

## 2. Методика експерименту та зразки для дослідження

Для дослідження ПОК використана експериментальна установка на основі однопрохідного інтерферометра Маха–Цендера [21]. Якщо за дії одновісного тиску на зразок, розміщений в одному з плечей інтерферометра, зміна оптичного шляху досягає  $\delta\Delta k = \lambda/2$  ( $\lambda = 632.8$  нм — довжина світлової хвилі), то вираз для визначення ПОК  $\pi_{im}$  має вигляд [18, 22]:

$$\pi_{im} = -\frac{\lambda}{n_i^3 \sigma_{im}^o + 2S_{km} \frac{n_i - 1}{n_i^3}}, \quad (2)$$

де  $n_i$  — показник заломлення,  $S_{km}$  — коефіцієнт пружної податливості,  $\sigma_{im}^o = \sigma_{im} d_k$  — керуюче напруження,  $\pi_{im}$  — півхвильове напруження,  $d_k$  — товщина зразка в напрямку поширення променя. Геометрія експерименту відповідає індексам  $i, k$  та  $m$ , які вказують напрямки поляризації і поширення світла та напрямок дії одновісного тиску відповідно.

Вираз 2 справедливий для зразка прямих зрізів, коли грані зразка є перпендикулярними до кристалофізичних осей  $X, Y, Z$  (осей оптичної індикатриси). Відповідні ПОК  $\pi_{im}$  ( $i, m = 1, 2, 3$ ) називають головними ПОК. Для визначення ПОК  $\pi_{44}, \pi_{55}$  і  $\pi_{66}$  слід використовувати зразки  $X/45^\circ$ -,  $Y/45^\circ$ - та  $Z/45^\circ$ -зрізів. Формули для визначення цих ПОК записано в [19, 22]. Наприклад, для умов експерименту  $k = \bar{4}$  (напрямок поширення світла),  $i = 4, m = 4$  отримано вираз:

$$\pi_{22} + \pi_{23} + \pi_{32} + \pi_{33} + 2\pi_{44} = -\frac{4\lambda}{n_4^3 \sigma_{44}^o} + 2(S_{22} + 2S_{23} + S_{33} - S_{44}) \frac{n_4 - 1}{n_4^3}, \quad (3)$$

де  $\sigma_{44}^o = \sigma_{44} d_{\bar{4}}$  — керуюче напруження,  $\sigma_{44}$  — півхвильове напруження,  $d_{\bar{4}}$  — товщина зразка в напрямку  $k = \bar{4}$ .

Для симетричних умов експерименту ( $k = 4, i = \bar{4}, m = \bar{4}$ ) в [22] тримано вираз, тотожний виразу 4 із заміною  $\sigma_{44}^o$  на  $\sigma_{\bar{4}\bar{4}}^o$ , тобто маємо дві геометрії експерименту для визначення коефіцієнта  $\pi_{44}$ .

На цьому зразку можна визначити також суму ПОК  $\pi_{12} + \pi_{13}$ . Для цього використовуємо умови експерименту  $k = \bar{4}, i = 1, m = 4$ , для яких:

$$\pi_{12} + \pi_{13} = -\frac{2\lambda}{n_1^3 \sigma_{14}^o} + (S_{22} + 2S_{23} + S_{33} - S_{44}) \frac{n_1 - 1}{n_1^3}, \quad (4)$$

де  $\sigma_{14}^o = \sigma_{14} d_{\bar{4}}$  — керуюче напруження,  $\sigma_{14}$  — півхвильове напруження.

Зауважимо, що порівнюючи суму ПОК, що входить в (4), із такою ж сумою незалежних ПОК, визначених на зразку прямих зрізів, можемо доводити достовірність цих ПОК і п'єзооптичну ідентичність досліджених зразків.

Аналогічні вирази можна записати для визначення ПОК  $\pi_{55}$  та суми  $\pi_{21} + \pi_{23}$  на зразку  $Y/45^\circ$ -зрізу, а також для ПОК  $\pi_{66}$  і суми  $\pi_{31} + \pi_{32}$  на зразку  $Z/45^\circ$ -зрізу. Для цього слід скористатися методом перетину оптичної індикатриси прямою, яка відповідає напрямку поляризації світла за дії на індикатрису головних  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  чи зсувних  $\sigma_4, \sigma_5, \sigma_6$  компонент тензора механічних напружень. Метод детально описаний, наприклад, в роботі [27]. Значно простіше можна записати аналоги виразів 4 і 5 для зразків  $Y/45^\circ$ - та  $Z/45^\circ$ -зрізів, використовуючи метод циклічної перестановки індексів. Якщо зробити циклічну перестановку індексів:  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1, 4 \rightarrow 5, \bar{4} \rightarrow \bar{5}$ , то можна знайти умови експерименту для визначення ПОК  $\pi_{55}$ :  $k = \bar{5}, i = 5, m = 5$ . А застосувавши цю ж перестановку індексів до виразу 4, отримаємо вираз для визначення ПОК  $\pi_{55}$ :

$$\pi_{11} + \pi_{13} + \pi_{31} + \pi_{33} + 2\pi_{55} = -\frac{4\lambda}{n_5^3 \sigma_{55}^o} + 2(S_{11} + 2S_{13} + S_{33} - S_{55}) \frac{n_5 - 1}{n_5^3}. \quad (5)$$

Для дослідження виготовлено зразки у вигляді кубиків із розмірами  $\sim 6 \times 6 \times 6$  мм та високою паралельністю оптичних граней: відхилення товщини зразків по усій площі таких граней не перевищує 1–2 мкм. В цьому випадку відсутня похибка визначення  $\pi_{im}$ , зумовлена мікроклиновидністю оптичних граней зразків.

### 3. Результати вивчення ПОЕ та їх аналіз

Необхідні для розрахунку ПОК  $\pi_{im}$  та ПрОК  $p_{ik}$  коефіцієнти пружної податливості  $S_{km}$  та коефіцієнти пружної жорсткості  $C_{mk}$  запозичені з роботи [24]. Пружні

константи кристалів  $(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$  визначено також в роботі [25], однак збіжність результатів, тобто рівність значень коефіцієнтів  $\pi_{11}, \pi_{22}, \pi_{33}$ , отриманих із різних геометрій експерименту, чи рівність сум ПОК типу  $\pi_{11} + \pi_{12}$  з такими ж сумами незалежних ПОК  $\pi_{11}$  і  $\pi_{12}$  і т.п. є найкращою при використанні пружних коефіцієнтів із [24].

Показники заломлення, необхідні для розрахунку ПОК  $\pi_{im}$ , визначено в даній роботі імерсійним методом Обреїмова (для  $\lambda = 632.8$  нм):  $n_1 = 1.4001, n_2 = 1.3931, n_3 = 1.3997$ . Значення показників заломлення вздовж напрямків 4, 5, 6 визначено на основі відомих виразів

$$n_4 = n_{\bar{4}} = \sqrt{2}/\sqrt{a_2 + a_3}, n_5 = n_{\bar{5}} = \sqrt{2}/\sqrt{a_1 + a_3}, n_6 = n_{\bar{6}} = \sqrt{2}/\sqrt{a_1 + a_2}, \quad (6)$$

де  $a_i = 1/n_i^2$  ( $i = 1, 2, 3$ ) — головні поляризаційні константи. Підставляючи в (6) вказані вище значення  $n_1, n_2$  та  $n_3$ , знаходимо:  $n_4 = 1.3964, n_5 = 1.3999, n_6 = 1.3966$ .

В таблиці 1 подано умови експерименту та експериментально визначені відповідні керуючі напруження  $\sigma_{im}^o = \sigma_{im} d_k(\sigma_{im} - \text{півхвильове напруження})$ , які використані для розрахунку ПОК  $\pi_{im}$ .

Табл. 1: Керуючі напруження  $\sigma_{im}^o$  та п'єзооптичні  $\pi_{im}$  пружнооптичні коефіцієнти  $p_{in}$  кристалів фторберилату амонію кристалів  $(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$  ( $\lambda = 632.8$  нм,  $T = 20^\circ\text{C}$ ).

№ п/п	Умови експерименту			$\sigma_{im}^o$ , кг/см	$\pi_{im}, \sim \text{Бр}$
	$m$	$k$	$i$		
Зразок прямих зрізів					
1	1	2	1	$\sigma_{11}^o = 20$	$\pi_{11} = 7.97 \pm 1.19(15\%)$
2			3	$\sigma_{31}^o = 74$	$\pi_{31} = -0.61 \pm 0.37(61\%)$
3	1	3	1	$\sigma_{11}^o = 16$	$\pi_{11} = 9.74 \pm 1.49(15\%)$
4			2	$\sigma_{21}^o = 30$	$\pi_{21} = 3.01 \pm 0.83(28\%)$
5	2	1	2	$\sigma_{22}^o = 26$	$\pi_{22} = 5.40 \pm 0.94(17\%)$
6			3	$\sigma_{32}^o = 41$	$\pi_{32} = 1.95 \pm 0.60(31\%)$
7	2	3	2	$\sigma_{22}^o = 24$	$\pi_{22} = 5.59 \pm 1.02(18\%)$
8			1	$\sigma_{12}^o = 31$	$\pi_{12} = 3.21 \pm 0.79(25\%)$
9	3	1	3	$\sigma_{33}^o = 12.5$	$\pi_{33} = 13.87 \pm 1.90(14\%)$
10			2	$\sigma_{23}^o = 15.5$	$\pi_{23} = 10.46 \pm 1.56(15\%)$
11	3	2	3	$\sigma_{33}^o = 13.5$	$\pi_{33} = 13.06 \pm 1.76(13\%)$
12			1	$\sigma_{13}^o = 33.5$	$\pi_{13} = 2.65 \pm 0.74(28\%)$
Зразок X/45°-зрізу					
13	4	$\bar{4}$	4	$\sigma_{44}^o = 21$	$^*\pi_{44} = 2.08 \pm 2.66(128\%)$
14			1	$\sigma_{14}^o = 41$	$\pi_{12} + \pi_{13} = 6.93 \pm 1.48(21\%)$
Зразок Y/45°-зрізу					
15	5	$\bar{5}$	5	$\sigma_{55}^o = 21.5$	$\pi_{55} = 4.75 \pm 2.66(56\%)$
16			2	$\sigma_{25}^o = 30$	$\pi_{21} + \pi_{23} = 10.97 \pm 1.83(17\%)$
Зразок Z/45°-зрізу					
17	6	$\bar{6}$	6	$\sigma_{66}^o = 29$	$\pi_{66} = -4.58 \pm 2.17(47\%)$
18			3	$\sigma_{36}^o = 37.5$	$\pi_{31} + \pi_{32} = 1.91 \pm 1.62(85\%)$

Примітка: зірочкою (\*) вказано малий ПОК, менший, від похибки його визначення.

Табл. 2: Пружнооптичні коефіцієнти  $p_{in}$  кристалів фторберилату амонію кристалів  $(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$  ( $\lambda = 632.8$  нм,  $T = 20^\circ\text{C}$ ).

$p_{11}$	$0.44 \pm 0.06$	$p_{31}$	$0.22 \pm 0.03$
$p_{12}$	$0.31 \pm 0.04$	$p_{32}$	$0.25 \pm 0.04$
$p_{13}$	$0.24 \pm 0.03$	$p_{33}$	$0.35 \pm 0.05$
$p_{21}$	$0.37 \pm 0.04$	$*p_{44}$	$0.020 \pm 0.026$
$p_{22}$	$0.40 \pm 0.05$	$p_{55}$	$0.048 \pm 0.027$
$p_{23}$	$0.38 \pm 0.04$	$p_{66}$	$-0.036 \pm 0.017$

Примітка: зірочкою (\*) вказано малий ПрОК, менший, від похибки його визначення.

Аналіз результатів, поданих в табл. 1 і 2 зведемо до наступних коментарів.

1. Кожен із коефіцієнтів  $\pi_{11}$ ,  $\pi_{22}$  та  $\pi_{33}$  визначено із двох незалежних геометрій експерименту. Середньоарифметичні значення цих ПОК складають (в од. Бр):

$$\pi_{11} = 8.86 \pm 1.34, \pi_{22} = 5.50 \pm 0.98, \pi_{33} = 13.47 \pm 1.83. \quad (7)$$

Кожен із результатів для зразків  $X/45^\circ$ -,  $Y/45^\circ$ - та  $Z/45^\circ$ -зрізів також отримано із двох геометрій експерименту: прямих і симетричних. Наприклад, для визначення керуючого напруження  $\sigma_{44}^o$  використано умови  $m = 4, k = \bar{4}, i = 4$ , а для симетричних умов експерименту ( $m = \bar{4}, k = 4, i = \bar{4}$ ) визначено керуюче напруження  $\sigma_{44}^o$ . У табл. 1 (рядок 13) внесено середньоарифметичне значення керуючого напруження  $\sigma_{44}^o$ . Це ж стосується усіх інших керуючих напружень, внесених в рядки 14–18 табл. 1. Отже, головні ПОК  $\pi_{11}$ ,  $\pi_{22}$ ,  $\pi_{33}$  та поворотно-зсувні ПОК (цей термін введено в [23])  $\pi_{44}$ ,  $\pi_{55}$ ,  $\pi_{66}$  визначено із двох геометрій експерименту, що є одним із критерієм достовірності їх значень.

2. Достовірність вивчення ПОЕ в кристалах ФБА можна підтвердити також на основі визначених експериментально сум коефіцієнтів  $\pi_{im}$ . Наприклад, сума ПОК  $\pi_{12} + \pi_{13}$  визначена на основі керуючого напруження  $\sigma_{14}^o$ , складає  $6.93 \pm 1.48$  Бр, а значення цієї суми, складеної із ПОК  $\pi_{12}$  і  $\pi_{13}$ , визначених на зразку прямих зрізів, становить  $5.86 \pm 1.08$  Бр. Тобто, в межах похибки експерименту вказані суми ПОК є рівними, що підтверджує достовірність цих ПОК і доводить п'єзооптичну ідентичність зразків, вирізаних із різних частин кристалічної булі чи із різних буль.
3. Ще дві суми ПОК  $\pi_{im}$  отримані на основі геометрій експерименту, коли кут між вектором  $i$  поляризації світла та вектором  $m$  дії одновісного тиску складає  $45^\circ$ . Для поляризації світла  $i = 1$  отримали експериментальне значення керуючого механічного напруження  $\sigma_{16}^o = 24$  кг/см, а для поляризації світла  $i = 2$  отримали  $\sigma_{26}^o = 28$  кг/см. Підставивши вказані значення  $\sigma_{16}^o$  та  $\sigma_{26}^o$  у вирази (4) та (5) відповідно, отримаємо  $\pi_{11} + \pi_{12} = 10.27 \pm 1.99$  Бр,  $\pi_{21} + \pi_{22} = 7.75 \pm 1.74$  Бр. Якщо такі суми скласти на основі незалежних ПОК (див. табл. 1), то дістанемо суми  $\pi_{11} + \pi_{12} = 12.07 \pm 1.56$  Бр і  $\pi_{21} + \pi_{22} = 8.51 \pm 1.28$  Бр, які в межах похибок їх визначення збігаються із відповідними сумами, вказаними вище. Це додатково підтверджує достовірність вивчення ПОЕ в кристалах ФБА.

4. Похибки головних ПОК  $\pi_{im}$  визначено як середньоквадратичні значення похибок доданків, що входять у формулу 2. При цьому похибка першого доданка формується типовою похибкою (10%) визначення керуючого напруження  $\sigma_{im}^o$ , а похибка пружних коефіцієнтів бралася як 5%, оскільки розкид значень пружних коефіцієнтів для ряду кристалів за різними джерелами складає  $\sim 2\text{--}5\%$ . Із табл. 1 бачимо, що відносні похибки визначення головних ПОК  $\pi_{im}$  лежать переважно в межах 13–18%. Для ПОК  $\pi_{44}$ ,  $\pi_{55}$ ,  $\pi_{66}$  абсолютні і відносні похибки є набагато більші, ніж відповідні похибки головних ПОК  $\pi_{im}$ . Це зумовлено тим, що у вирази для розрахунку таких ПОК входять складні суми  $\pi_{im}$  та коефіцієнтів  $S_{km}$ , похибки яких додаються.
5. Кристал ФБА має три особливо великі коефіцієнти  $\pi_{im}$  ( $\pi_{11}$ ,  $\pi_{23}$  та  $\pi_{33}$ ), а за найбільшим значенням ПОЕ (13.47 Бр) він суттєво перевищує найбільшу величину ПОЕ в інших кристалах групи  $A_2BX_4$  ( $(NH_4)_2SO_4$  [19] та  $K_2ZnCl_4$  [20]).
6. На основі всіх компонент  $\pi_{im}$  тензора ПОК розраховано усі пружнооптичні коефіцієнти  $p_{ik}$  кристалів  $(NH_4)_2BeF_4$  (табл. 2). Бачимо, що найбільшими є коефіцієнти  $p_{11}$  та  $p_{22}$ . Кристали ФБА можуть бути придатними для АО пристроїв модуляції світла в УФ області спектру (нижня межа спектру пропускання ФБА лежить у глибокій УФ області  $\sim 250$  нм [27]).

## 4. Висновки

Інтерферометричним методом визначено усі компоненти  $\pi_{im}$  тензора ПОК кристалів ФБА. Встановлено, що за величиною найбільших ПОК (8.86–13.47 Бр) ці кристали слід віднести до найкращих фотопружних матеріалів. Пружнооптичні коефіцієнти  $p_{ik}$  розраховані на основі тензорного виразу  $p_{ik} = \pi_{im}C_{mk}$ . Виявилось, що усі найбільші значення ПОЕ відповідають головним ПОК  $\pi_{11}$ ,  $\pi_{23}$ ,  $\pi_{33}$ . Лише одне велике значення ПОЕ (7.4 Бр) відповідає максимуму поперечного ПОЕ  $\pi_{im}^{(i)}$ , вздовж напрямку, який складає кут  $44.7^\circ$  із віссю  $X_1$ . Найбільші значення ПрОЕ знаходяться на головних осях вказівних поверхонь ПрОЕ і відповідають головним коефіцієнтам  $p_{11}$ ,  $p_{22}$  і  $p_{23}$ . Лише одне велике значення ефекту ( $p_{ik}^{(i)} = 0.42$ ) відповідає поперечному ПрОЕ і лежить в площині  $X_1, X_2$  під кутом  $44.7^\circ$  до осі  $X_1$ . Це дозволяє віднести фторберилат амонію до кращих акустооптичних матеріалів для ультрафіолетової області спектру, оскільки нижня межа спектру пропускання ФБА знаходиться у глибокій УФ області  $\sim 250$  нм.

Стаття виконана в рамках проекту Національного фонду досліджень України 2020.02/0211 «Експериментально-теоретичне вивчення і прогнозування фотопружних властивостей кристалічних матеріалів для пристроїв керування електромагнітним випромінюванням».

- 
1. Demyanyshyn N. M. Anisotropy of piezo-optic and elasto-optic effects in langasite family crystals / N. M. Demyanyshyn, Yu. Suhak, B. G. Mytsyk, O. A. Buryu,

- Yu. Ya. Maksishko, D. Sugak, H. Fritze // *Opt. Mat.* – 2021. – Vol. 119. – P. 111284/1–7. doi: 10.1016/j.optmat.2021.111284.
2. Dixon R. W. A new technique for measuring magnitudes of photoelastic tensors and its application to lithium niobate / R. W. Dixon, M. G. Cohen // *Appl. Phys. Lett.* – 1966. – Vol. 8. – P. 205–207. doi: 10.1063/1.1754556.
  3. Dixon R. W. Photoelastic properties of selected materials and their relevance for applications to acoustic light modulators and scanners / R. W. Dixon // *J. Appl. Phys.* – 1967. – Vol. 38. – P. 5149–5153. doi: 10.1063/1.1709293.
  4. Uchida N. Acoustooptic deflection materials and techniques / N. Uchida, N. Niizeki // *Proc. IEEE.* – 1973. – Vol. 61. – P. 1073–1092. doi: 10.1109/PROC.1973.9212.
  5. Pinnow D. A. Guide lines for the selection of acoustooptic materials / D. A. Pinnow // *IEEE J. Quantum Electr.* – 1970. – QE6. – P. 223–238. doi: 10.1109/JQE.1970.1076441.
  6. Martynyuk-Lototska I. Acousto-optic interaction in  $\alpha$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> crystals / I. Martynyuk-Lototska, O. Mys, T. Dudok, V. Adamiv, Ye. Smirnov, R. Vlokh // *Appl. Opt.* – 2008. – Vol. 47. – P. 3446–3454. doi: 10.1364/AO.47.003446.
  7. Krupych O. Photoelastic properties of NaBi(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystals / O. Krupych, M. Kushnirevych, O. Mys, R. Vlokh // *Appl. Opt.* – 2015. – Vol. 54. – P. 5016–5023. doi: 10.1364/AO.54.005016.
  8. Coquin G. A. Physical properties of lead molybdate relevant to acousto-optic device applications / G. A. Coquin, D. A. Pinnow, A. W. Warner // *J. Appl. Phys.* – 1971. – Vol. 42. – P. 2162–2168. doi: 10.1063/1.1660520.
  9. Narasimhamurty T. S. Photoelastic and electrooptic properties of crystals. New York: Springer, 1981. 544 p.
  10. Bergmann L. Der ultraschall und seine anwendung in wissenschaft und technik. Zürich, 1954. 759 p.
  11. Pettersen H. E. New ultrasonic technique for the determination of the ratios of strain-optical constants / H. E. Pettersen // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1970. – Vol. 48. – P. 1093–1097. doi: 10.1121/1.1912248.
  12. Narasimhamurty T. S. Ultrasonic methods of determining elasto-optic constants of uniaxial and biaxial crystals / T. S. Narasimhamurty // *Acta Crystallogr.* – 1961. – Vol. 14. – P. 1176–1179. doi: 10.1107/S0365110X61003417.
  13. Yamada M. Brillouin scattering in GaP / M. Yamada, K. Wasa, C. Hamaguchi // *Jap. J. Appl. Phys.* – 1976. – Vol. 15. – P. 1107–1111. doi: 10.1143/JJAP.15.1107.
  14. Azuhata T. Brillouin scattering study of ZnO / T. Azuhata, M. Takesada, T. Yagi, A. Shikanai, S. F. Chichibu, K. Torii, A. Nakamura, T. Sota, G. Cantwell, D. B. Eason, C. W. Litton // *J. Appl. Phys.* – 2003. – Vol. 94. – P. 968–972. doi: 10.1063/1.1586466.
  15. Trzaskowska A. Elastic and elasto-optical properties of Rb<sub>1-x</sub>(NH<sub>4</sub>)<sub>x</sub>H<sub>2</sub>AsO<sub>4</sub> mixed crystals studied by Brillouin spectroscopy / A. Trzaskowska, S. Mielcarek, B. Mroz, Z. Trybula // *Cryst. Res. Technol.* – 2010. – Vol. 45. – P. 48–52. doi: 10.1002/crat.200900357.
  16. Mytsyk B. G. Comprehensive studies of piezo-optical effect in langasite crystals / B. G. Mytsyk, A. S. Andrushchak, G. I. Gaskevich // *Ukr. J. Phys.* – 2007. – Vol. 52. – P. 798–808.
  17. Mytsyk B. G. Piezo-optic coefficients of MgO-doped LiNbO<sub>3</sub> crystals / B. G. Mytsyk, A. S. Andrushchak, N. M. Demyanyshyn, Ya. P. Kost', A. V. Kityk,

- P. Mandracci, W. Schranz // *Appl. Opt.* – 2009. – Vol. 48. – P. 1904–1911. doi: 10.1364/AO.48.001904.
18. Mytsyk B. Full set of piezo-optic and elasto-optic coefficients of  $\text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$  crystals at room temperature / B. Mytsyk, Y. Suhak, N. Demyanyshyn, O. Buryy, N. Syvorotka, D. Sugak, S. Ubizskii, H. Fritze // *Appl. Opt.* – 2020. – Vol. 59. – P. 8951–8958. doi: 10.1364/AO.398428.
19. Mytsyk B. Photoelasticity of ammonium sulfate crystals / B. Mytsyk, V. Stadnyk, N. Demyanyshyn, Ya. Kost, P. Shchepanskyi // *Opt. Mat.* – 2019. – Vol. 88. – P. 723–728. doi: 10.1016/j.optmat.2018.12.005.
20. Stadnyk V. Yo. Baric changes in refractive indices of  $\text{K}_2\text{ZnCl}_4$  crystals / V. Yo. Stadnyk, M. O. Romanyuk, B. V. Andrievsky, Z. O. Kogut // *Opt. Spectrosc.* – 2010. – Vol. 108. – P. 753–760. doi: <https://doi.org/10.1134/S0030400X10050139>.
21. Mytsyk B. Photoelasticity of anisotropic materials, Lviv, 2012, 400 p.
22. Mytsyk B. Piezo-optic, photoelastic, and acousto-optic properties of  $\text{SrB}_4\text{O}_7$  crystals / B. Mytsyk, N. Demyanyshyn, I. Martynyuk-Lototska, R. Vlokh // *Appl. Opt.* – 2011. – Vol. 50. – P. 3889–3895. doi: 10.1364/AO.50.003889.
23. Mytsyk B. Methods for the studies of the piezo-optical effect in crystals and the analysis of experimental data. I. Methodology for the studies of piezo-optical effect / B. Mytsyk // *Ukr. J. Phys. Opt.* – 2003. – Vol. 4. – P. 1–26. doi: 10.3116/16091833/4/1/1/2003.
24. Garg A., Srivastava R. C. Characteristic Debye temperature of ammonium fluoroberyllate,  $(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$  / A. Garg, R. C. Srivastava // *Acta Cryst.* – 1982. – Vol. A38. – P. 388–390. doi: 10.1107/S0567739482000783.
25. Rudysh M. Ya. Structure, electronic, optical and elastic properties of  $(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$  crystal in paraelectric phase / M. Ya. Rudysh, A. O. Fedorchuk, V. Yo. Stadnyk, P. A. Shchepanskyi, R. S. Brezvin, B. I. Horon, O.Yu. Khyzhun, O. M. Gorina // *Current Appl. Phys.* – 2023. – Vol. 45. – P. 76–85. doi: 10.1016/j.cap.2022.11.005.
26. Haussühl S. Elastische und thermoelastische konstanten von  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Rb}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Cs}_2\text{SO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Ti}_2\text{SO}_4$  und  $\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$  / S. Haussühl // *Acta Crystallog.* – 1965. – Vol. 18. – P. 839–842. doi: 10.1524/zkri.1965.122.3-4.311.
27. Garg A. Ammonium tetrafluoroberyllate (II) / A. Garg, R. C. Srivastava // *Acta Cryst.* – 1979. – Vol. B35. – P. 1429–1432. doi: 10.1107/s0567740879006609.

## References

1. Demyanyshyn N. M., Suhak Yu., Mytsyk B. G., Buryy O. A., Maksishko Yu. Ya., Sugak D., Fritze H. Anisotropy of piezo-optic and elasto-optic effects in langasite family crystals. *Opt. Mat.* 2021, 119, 111284/1–7. doi: 10.1016/j.optmat.2021.111284.
2. Dixon R. W., Cohen M. G. A new technique for measuring magnitudes of photoelastic tensors and its application to lithium niobate. *Appl. Phys. Lett.* 1966, 8, 205–207. doi: 10.1063/1.1754556.
3. Dixon R. W. Photoelastic properties of selected materials and their relevance for applications to acoustic light modulators and scanners. *J. Appl. Phys.* 1967, 38, 5149–5153. doi: 10.1063/1.1709293.
4. Uchida N., Niizeki N. Acoustooptic deflection materials and techniques. *Proc. IEEE.* 1973, 61, 1073–1092. doi: 10.1109/PROC.1973.9212.



5. Pinnow D. A. Guide lines for the selection of acoustooptic materials. *IEEE J. Quantum Electr.* 1970, QE6, 223–238. doi: 10.1109/JQE.1970.1076441.
6. Martynyuk-Lototska I, Mys O., Dudok T., Adamiv V., Smirnov Ye., Vlokh R. Acousto-optic interaction in  $\alpha$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> crystals. *Appl. Opt.* 2008, 47, 3446–3454. doi: 10.1364/AO.47.003446.
7. Krupych O., Kushnirevych M., Mys O., Vlokh R. Photoelastic properties of NaBi(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystals. *Appl. Opt.* 2015, 54, 5016–5023. doi: 10.1364/AO.54.005016.
8. Coquin G. A., Pinnow D. A., Warner A. W. Physical properties of lead molybdate relevant to acousto-optic device applications. *J. Appl. Phys.* 1971, 42, 2162–2168. doi: 10.1063/1.1660520.
9. Narasimhamurty T. S. Photoelastic and electrooptic properties of crystals. New York: Springer, 1981, 544 p.
10. Bergmann L. Der ultraschall und seine anwendung in wissenschaft und technik. Zürich 1954, 759 p.
11. Pettersen H. E. New ultrasonic technique for the determination of the ratios of strain-optical constants. *J. Acoust. Soc. Am.* 1970. 48, 1093–1097. doi: 10.1121/1.1912248.
12. Narasimhamurty T. S. Ultrasonic methods of determining elasto-optic constants of uniaxial and biaxial crystals. *Acta Crystallogr.* 1961, 14, 1176–1179. doi: 10.1107/S0365110X61003417.
13. Yamada M., Wasa K., Hamaguchi C. Brillouin scattering in GaP. *Jap. J. Appl. Phys.* 1976, 15, 1107–1111. doi: 10.1143/JJAP.15.1107.
14. Azuhata T., Takesada M., Yagi T., Shikanai A., Chichibu SF., Torii K., Nakamura A., Sota T., Cantwell G., Eason D. B., Litton C. W. Brillouin scattering study of ZnO. *J. Appl. Phys.* 2003, 94, 968–972. doi: 10.1063/1.1586466.
15. Trzaskowska A., Mielcarek S., Mroz B., Trybula Z. Elastic and elasto-optical properties of Rb<sub>1-x</sub>(NH<sub>4</sub>)<sub>x</sub>H<sub>2</sub>AsO<sub>4</sub> mixed crystals studied by Brillouin spectroscopy. *Cryst. Res. Technol.* 2010, 45, 48–52. doi: 10.1002/crat.200900357.
16. Mytsyk B. G., Andrushchak A. S., Gaskevich G. I. Comprehensive studies of piezo-optical effect in langasite crystals. *Ukr. J. Phys.* 2007, 52, 798–808.
17. Mytsyk B. G., Andrushchak A. S., Demyanyshyn N. M., Kost' Ya. P., Kityk A. V., Mandracci P., Schranz W. Piezo-optic coefficients of MgO-doped LiNbO<sub>3</sub> crystals. *Appl. Opt.* 2009, 48, 1904–1911. doi: 10.1364/AO.48.001904.
18. Mytsyk B., Suhak Y., Demyanyshyn N., Buryy O., Syvorotka N., Sugak D., Ubizskii S., Fritze H. Full set of piezo-optic and elasto-optic coefficients of Ca<sub>3</sub>TaGa<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>14</sub> crystals at room temperature. *Appl. Opt.* 2020, 59, 8951–8958. doi: 10.1364/AO.398428.
19. Mytsyk B., Stadnyk V., Demyanyshyn N., Kost Ya., Shchepanskyi P. Photoelasticity of ammonium sulfate crystals. *Opt. Mat.* 2019, 88, 723–728. doi: 10.1016/j.optmat.2018.12.005.
20. Stadnyk V. Yo., Romanyuk M. O., Andrievsky B. V., Kogut Z. O. Baric changes in refractive indices of K<sub>2</sub>ZnCl<sub>4</sub> crystals. *Opt. Spectrosc.* 2010, 108, 753–760. doi: 10.1134/S0030400X10050139.
21. Mytsyk B. Photoelasticity of anisotropic materials, Lviv, 2012, 400 p.

22. Mytsyk B., Demyanyshyn N., Martynyuk-Lototska I., Vlokh R. Piezo-optic, photoelastic, and acousto-optic properties of  $\text{SrB}_4\text{O}_7$  crystals. *Appl. Opt.* 2011, 50, 3889–3895. doi: 10.1364/AO.50.003889.
23. Mytsyk B. Methods for the studies of the piezo-optical effect in crystals and the analysis of experimental data. I. Methodology for the studies of piezo-optical effect. *Ukr. J. Phys. Opt.* 2003, 4, 1–26. doi: 10.3116/16091833/4/1/1/2003.
24. Garg A., Srivastava R. C. Characteristic Debye temperature of ammonium fluoroberyllate,  $(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$ . *Acta Cryst.* 1982, A38, 388–390. doi: 10.1107/S0567739482000783.
25. Rudysh M. Ya., Fedorchuk A. O., Stadnyk V. Yo., Shchepanskyi P. A., Brezvin R. S., Horon B. I., Khyzhun O. Yu, Gorina O. M. Structure, electronic, optical and elastic properties of  $(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$  crystal in paraelectric phase. *Current Appl. Phys.* 2023, 45, 76–85. doi: 10.1016/j.cap.2022.11.005.
26. Haussühl S. Elastische und thermoelastische konstanten von  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Rb}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Cs}_2\text{SO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Ti}_2\text{SO}_4$  und  $\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$ . *Acta Crystallog.* 1965, 18, 839–842. doi: 10.1524/zkri.1965.122.3-4.311.
27. Garg A., Srivastava R. C. Ammonium tetrafluoroberyllate (II). *Acta Cryst.* 1979, B35, 1429–1432. doi: 10.1107/s0567740879006609.

Статтю отримано: 14.08.2023  
Прийнято до друку: 11.10.2023

## Photoelastic properties of ammonium fluoroberyllate crystals

B. Mytsyk<sup>1</sup>, B. Horon<sup>2</sup>, N. Demyanyshyn<sup>1</sup>, V. Stadnyk<sup>2</sup>,  
P. Shchepanskyi<sup>2</sup>, Ya. Kost<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine,  
Naukova Str., 5, 79060 Lviv, Ukraine*

<sup>2</sup> *Ivan Franko National University of Lviv,  
Kyrylo and Mefodiy Str., 8, 79005 Lviv, Ukraine  
e-mail: bohdanhoron@lnu.edu.ua*

All independent piezo-optic  $\pi_{im}$  coefficients of ammonium fluoroberyllate  $(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$  crystals were determined by the interferometric method using experimental setups based on a single-pass Mach–Zehnder interferometer. Note that under the action of uniaxial pressure on the sample placed in one of the shoulders of the interferometer, the expression for determining the coefficients  $\pi_{im}$  has the form  $\pi_{im} = -\frac{\lambda}{n_i^3 \sigma_{im}^o} + 2S_{km} \frac{n_i - 1}{n_i^3}$  ( $n_i$  is the index of refraction,  $S_{km}$  is the coefficient of elastic compliance,  $\sigma_{im}^o \sigma_{im} d_k$  is the control stress,  $\sigma_{im}$  is the half-wave stress and  $d_k$  is the thickness of the sample in the direction of light propagation). The geometry of the experiment corresponds to the indices  $i$ ,  $k$ , and  $m$ , which indicate the directions of polarization and expansion of light and the direction of action of uniaxial pressure, respectively. Based on  $\pi_{im}$  and elastic stiffness coefficients  $C_{mk}$ , all independent elasto-optical coefficients  $p_{ik}$  were calculated using the product  $p_{ik} = \pi_{im} C_{mk}$ . It was found that some coefficients  $\pi_{im}$  have an atypically high value ( $\sim 10 - 13$  Br). It was established that all the largest values of piezo-optic and elastic-optic effects correspond to the main coefficients  $\pi_{11}$ ,  $\pi_{23}$ ,  $\pi_{33}$  and  $p_{11}$ ,  $p_{22}$ , and  $p_{23}$ . This makes it possible to attribute ammonium fluoroberyllate to the best acousto-optical materials for the ultraviolet region of the spectrum, since the lower limit of the FBA transmission spectrum is in the deep UV region  $\sim 250$  nm. The relative errors of determining the main piezo-optic coefficients are mainly within 13–18%. For coefficients  $\pi_{44}$ ,  $\pi_{55}$ ,  $\pi_{66}$ , the absolute and relative errors are slightly larger than the corresponding errors of the main coefficients  $\pi_{im}$ . This is due to the fact that the expressions for calculating such coefficients include complex sums of  $\pi_{im}$  and  $S_{km}$  coefficients, the errors of which get added up.

**Key words:** crystal, ammonium fluoroberyllate, piezo-optic effect, photoelastic effect, uniaxial pressure, half-wave strain, piezo-optic coefficients, photoelastic coefficients, refractive index.