

УДК 548.0:535.5+537.2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АНІЗОТРОПІЇ ЕЛЕКТРООПТИЧНОГО ЕФЕКТУ НА ПРИКЛАДІ КРИСТАЛІВ LiNbO_3

О. В. Юркевич¹, В. С. Андрущак¹, І. М. Сольський², А. В. Кітик³, А. С. Андрущак¹

¹ Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра телекомунікацій,

² Науково-виробниче підприємство “Карат”, Львів, Україна,

³ Ченстоховський технологічний університет, Ченстохова, Польща

© Юркевич О. В., Андрущак В. С., Сольський І. М., Кітик А. В., Андрущак А. С., 2014

На прикладі кристалів ніобату літію були проведені експериментальні дослідження просторової анізотропії лінійного електрооптичного ефекту. Для цього на вісьмох різних зразках прямого та X/α ($\alpha = 10^\circ, 23.3^\circ, 36^\circ, 46.8^\circ, 54^\circ, 66.7^\circ, 80^\circ$) зрізів, вирізаних із однієї ростової булі кристала, були визначені для всіх можливих умов експерименту діючі ефективні величини як абсолютного електрооптичного коефіцієнта інтерферометричним методом, так і електроіндукованої зміни двозаломлення поляризаційно-оптичним методом вимірювання. Добре узгодження отриманих просторових розподілів лінійного електрооптичного ефекту із результатами проведеного аналітичного розрахунку відповідної анізотропії цього ефекту на основі вказівних поверхонь свідчить про достовірність експериментальних результатів та підтверджує перспективність інформаційної технології найефективнішого та стабільнішого використання кристалічних матеріалів, розвинутої в попередніх роботах.

Ключові слова: лінійний електрооптичний ефект, просторова анізотропія, вказівна поверхня, кристалічні матеріали, ніобат літію.

Вступ

У попередніх роботах було розвинуто методику оптимізації електро- [1, 2], п'єзо- [3, 4] та акустооптичного [4–6] ефектів і запропоновано інформаційну технологію найефективнішого та стабільнішого використання кристалічних матеріалів для всіх класів симетрії [7]. Ця технологія виходить із 3D-аналізу просторової анізотропії відповідних ефектів, що описуються тензорами третього і вище рангів, та ґрунтується на побудові вказівних [1–5] чи екстремальних [6, 8] поверхонь як єдиного засобу [9] геометричного представлення тензорів вищих рангів. Відповідний підхід до підвищення ефективності використання кристалічних матеріалів аналітично був апробований і показав свою ефективність на прикладі кристалів LiNbO_3 [1, 5–8, 10], $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ [1, 2], Cs_2HgCl_4 [3], $\beta\text{-BaV}_2\text{O}_3$ [4], лангаситу [7, 10], SiO_2 [11], GaP [7, 12] та ін.

Відмітимо також, що для більшості вивчених кристалічних матеріалів знайдено цікаву закономірність, що напрямки електричного поля, механічного навантаження, поляризації та поширення світла чи акустичних хвиль, які забезпечують найбільші електро-, п'єзо- чи акустооптичні параметри кристалічних матеріалів, загалом, не збігаються з головними кристалофізичними осями [7]. При цьому, для ортогональної геометрії взаємодій виявлено, що максимальні електрично індуквані оптичні різниці ходу для кристалів ніобату літію майже **втричі більші** [1], а екстремальні значення параметра акустооптичної якості для ізотропної дифракції світла у **2,4 рази більші** [5] порівняно з відповідними параметрами для стандартної геометрії прямих зрізів цих кристалів. А використання косокутної геометрії за нашими розрахунками [6] ще на 20% підвищує ефективність використання кристалів ніобату літію як робочих елементів акустооптичних пристроїв. Крім того, використання анізотропних матеріалів в максимумі їх індукованих оптичних ефектів гарантує також (див. [10]), крім найбільш ефективного, ще й стабільніше застосування досліджених кристалів.

Тому дослідження анізотропії індукованих оптичних ефектів в кристалічних матеріалах, особливо тих, які нині широко досліджуються і використовуються в практиці [13–15] і, насамперед, в низькосиметричних кристалах [16–20], є обґрунтованим як з наукового, так і з практичного поглядів. Це в остаточному підсумку дає можливість розкрити приховані резерви істотного підвищення ефективності прикладного застосування таких кристалічних матеріалів.

Метою цієї роботи є експериментальне підтвердження наявного просторового розподілу лінійного електрооптичного ефекту (ЕОЕ) в кристалах ніобату літію та його узгодження із проведеним в [1] аналітичним розрахунком просторової анізотропії цього ефекту на основі відповідних вказівних поверхонь.

Геометрія вибраних зрізів та схема експериментальної установки

У [1, 21] проведено аналіз просторової анізотропії електрооптичної взаємодії на основі побудови вказівних поверхонь та їх стереографічних проєкцій для кристалів LiNbO_3 (LNO) та $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ як у випадку лінійного ЕОЕ, так і для електроіндукованої зміни оптичної різниці ходу. Було знайдено величини максимумів цих взаємодій та відповідні кутові параметри і запропоновано геометрії їх найефективнішого використання. Також були отримані співвідношення, які дозволяють розрахувати діючі величини ЕОЕ та електроіндукованої зміни оптичної різниці ходу для довільних кутових умов експерименту.

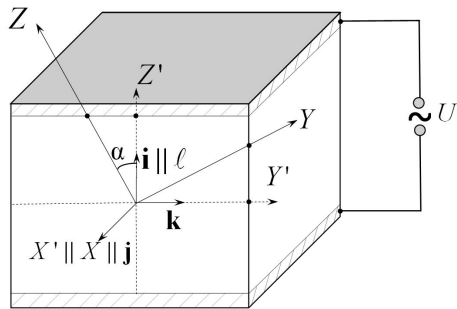


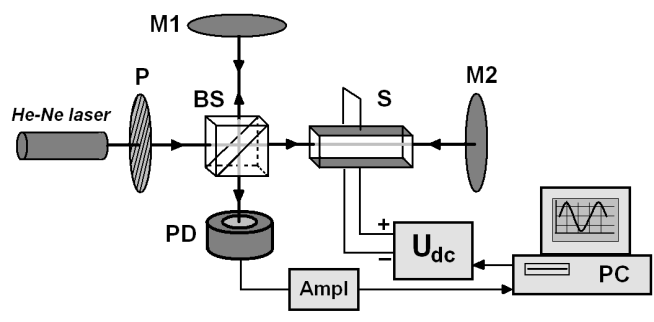
Рис. 1. Вибрані орієнтації зразків для електрооптичних вимірювань (X, Y, Z та X', Y', Z' – осі старої кристалофізичної та нової систем координат відповідно)

Для порівняння результатів цих розрахунків з відповідними експериментальними даними, було взято набір кристалічних зрізів, на яких за різних умов поширення світла \mathbf{k} , його поляризації \mathbf{i} чи \mathbf{j} та прикладання електричного поля ℓ було знайдено діючі ефективні значення електрооптичних коефіцієнтів (ЕОК), враховуючи всі можливі геометрії ЕОЕ. Для цього були вибрані зразки кристалів LNO прямого та X/α ($\alpha = 10^\circ, 23.3^\circ, 36^\circ, 46.8^\circ, 54^\circ, 66.7^\circ, 80^\circ$) зрізів (рис. 1). Вибір таких зрізів зумовлений розрахованими в [1, 5–8] на основі вказівних

поверхонь можливими кутовими положеннями екстремумів (чи їх перпендикулярними напрямками) для повздовжнього та поперечного електро-, п'єзо- чи акустооптичного ефектів.



a



б

Рис. 2. Зовнішній вигляд (*a*) та схема (*б*) установки на базі інтерферометра Майкельсона для експериментального дослідження електрооптичного ефекту в кристалічних матеріалах: He-Ne laser – лазерне джерело випромінювання, P – поляризатор, BS – напівпрозорий кубик, M1 та M2 – відбиваючі дзеркала, S – досліджуваний зразок із приклеєними електродами, розміщений в юстуючому тримачі U_{dc} – високовольтний блок живлення, PD – фотоприймач, Ampl – підсилювач, PC – реєструючий пристрій

До граней зразка, перпендикулярних до осі Z' (чи Y') прикріплювалися липучі електроди, а світло з хвильовим вектором \mathbf{k} спрямовувалось через кристал вздовж Y' (чи Z') відповідно (див. рис. 1). Дослідження проводились, коли поляризація \mathbf{i} або \mathbf{j} падаючого світла була паралельна (вздовж Z' чи Y') або перпендикулярна (вздовж осі $X' \parallel X$) до напрямку прикладання електричного поля у випадку інтерферометричних вимірювань чи під кутом 45° до цих осей для поляризаційно-оптичних досліджень.

Відмітимо, що всі досліджені зразки виготовили із однієї булі кристала, який був вирощений у НВП “КАРАТ” (див. www.en.carat.electron.ua).

Вимірювання проводилися за допомогою установки на базі інтерферометра Майкельсона, описаній в [21] і наведеній на рис. 2.

Необхідні робочі співвідношення

Більшість робочих формул для розрахунку діючих ефективних значень ЕОК r'_{il} в довільних напрямках прикладання електричного поля ℓ , поширення \mathbf{k} та поляризації \mathbf{i} світла наведені в [21]. Наведемо їх тут без виведення, враховуючи геометрію наших експериментів.

Так відомо, що електроіндукована зміна $\delta\Delta_{ikl}$ оптичного шляху Δ_{ikl} світлового променя, який проходить через досліджуваний зразок у випадку двопрхідного інтерферометра (наприклад, інтерферометра Майкельсона), визначається зміною показника заломлення цього зразка (електро-оптичний ефект) та його розмірів (обернений п'єзоелектричний ефект) в напрямку просвітлення під дією електричного поля [21]:

$$d\Delta_{ikl} = 2(t_k d n_i + (n_i - 1) d t_k) = -r'_{il} n_i^3 \frac{U_1 t_k}{t_1} + 2(n_i - 1) d'_{lk} \frac{U_1 t_k}{t_1}, \quad (1)$$

де U_ℓ – прикладена електрична напруга; t_ℓ та t_k – довжини зразків у напрямках прикладання електричного поля ℓ та поширення світла \mathbf{k} ; n_i – показник заломлення для напрямку поляризації світла \mathbf{i} ; r'_{il} та d'_{lk} – діючий ефективний коефіцієнт ЕОЕ та оберненого п'єзоелектричного ефекту відповідно. З формули (1), з огляду на вищеописані умови експерименту, можна отримати співвідношення для розрахунку всіх діючих ефективних ЕОК для двох різних випадків наших інтерферометричних вимірювань (див. рис. 1):

$$r'_{ii}{}^I = -n_i^{-3} \frac{d\Delta_{ikl}}{U_1} \frac{t_1}{t_k} + 2n_i^{-3} d'_{lk} (n_i - 1) \quad (\text{випадок } \mathbf{i} \parallel \ell \parallel Z' \text{ або } Y'), \quad (2)$$

$$r'_{jl}{}^I = -n_j^{-3} \frac{d\Delta_{jkl}}{U_1} \frac{t_1}{t_k} + 2n_j^{-3} d'_{lk} (n_j - 1) \quad (\text{випадок } \mathbf{j} \parallel X \parallel X'), \quad (3)$$

де
$$d'_{lk} = d_{22} \cos^2 q \sin q \sin 3j + (d_{33} - d_{15}) \sin^2 q \cos q + d_{31} \cos^3 q. \quad (4)$$

Остання формула описує взятю із [1] просторову зміну оберненого п'єзоелектричного ефекту (для випадку наших вимірювань потрібно взяти умову: $\varphi = 90^\circ$).

Формула (2) відповідає випадку, коли вектор поляризації падаючої хвилі $\mathbf{i} \parallel \ell$ завжди розміщений в головній площині кристала, перпендикулярно до X (оскільки у всіх зрізах кристалофізична система координат повернута навколо X). У такому випадку в кристалі поширюється тільки одна незвичайна хвиля, показник заломлення якої $n_i = (n_o^{-2} \sin^2 q + n_e^{-2} \cos^2 q)^{-1/2}$ (за винятком випадку, коли $\theta = 90^\circ$, тоді $n_i = n_o$). Співвідношення (3) відповідає випадку, коли поляризація $\mathbf{j} \parallel X \parallel X' \perp \ell$ (тут матимемо справу лише із звичайною хвилею, для якої $n_j = n_o$). Обрахувавши за результатами інтерферометричних вимірювань величини ефективних ЕОК для двох випадків, можна одержати величину відповідного ЕОК за двозаломленням [21]:

$$r_{kl}^*{}_{imm} = r'_{ii}{}^I n_i^3 - r'_{jl}{}^I n_j^3. \quad (5)$$

У випадку поляризаційно-оптичних вимірювань експериментальна величина ЕОК за двозаломленням r_{k1}^* визначається через електроіндуковану зміну оптичної різниці ходу $d\Delta_{k1}^*$ за формулою [21]

$$r_{k1}^* = 2d_{1k}(n_i - n_j) - \frac{d\Delta_{k1}^* t_1}{U_1 t_k}. \quad (6)$$

Електрооптичні коефіцієнти за двозаломленням r_{k1}^* , виміряні поляризаційно-оптичним методом на основі формули (6), узгоджувались із розрахунковими значеннями r_{k1inm}^* , отриманими із значень ЕОК, що вимірювались інтерферометрично, згідно зі співвідношенням (5). Знаки електроіндукованої зміни оптичної різниці ходу $d\Delta_{k1}^*$ і відповідно ЕОК r_{k1}^* визначали згідно з узагальненим правилом знаків [22].

Крім того, розрахункові значення ефективних коефіцієнтів можуть бути отримані також аналітично з рівняння відповідних вказівних поверхонь для повздовжньої $r_{ii}(q, j)$ та поперечної $r_{j1}(q, j)$ компонент із [1]:

$$r_{ii}^{II} = -r_{22} \sin^3 q \sin 3j + (r_{13} + 2r_{51}) \sin^2 q \cos q + r_{33} \cos^3 q, \quad (7)$$

$$r_{j1}^{II} = r_{22} \sin q \sin 3j + r_{13} \cos q, \quad (8)$$

на основі визначених раніше [21] всіх ненульових ЕОК кристалів ніобату літію (випадок наших досліджень тут також відповідає умові: $\varphi = 90^\circ$). Тоді і для поляризаційно-оптичних вимірювань із (7) та (8) можна аналогічно записати аналітичні розрахункові значення відповідних коефіцієнтів за двозаломленням:

$$r_{k1}^{*II} = r_{ii}^{II} n_i^3 - r_{j1}^{II} n_j^3. \quad (9)$$

Для наших вимірювань кут θ визначався як кут між віссю Z та напрямком прикладання електричного поля, а φ завжди дорівнює 90 або 270° , залежно від полярності електродів.

Індекси згори (I) чи (II) у всіх формулах означають відповідно значення, обчислені на основі експериментальних вимірювань (I) чи розраховані аналітично (II) з ранішеотриманої [21] матриці ЕОК кристалів LNO, для яких ненульовими коефіцієнтами є $r_{22} = -r_{12} = -r_{61} = 6.79$, $r_{13} = r_{23} = 10.4$, $r_{33} = 33.2$ та $r_{51} = r_{42} = 31.1$ (тут і надалі величини всіх ЕОК та п'єзоелектричних модулів подаються в Брюстерах, $1 \text{ Бр} = 10^{-12} \text{ м/В}$). Значення ненульових п'єзоелектричних модулів $d_{22} = 20.08$, $d_{31} = 0.57$, $d_{33} = 6.89$, $d_{15} = 66.6$ та величини показників заломлення $n_o = 2.2865$ і $n_e = 2.2034$ відповідно взяті із [23, 24].

Експериментальні результати та їх аналіз

Результати всіх наших вимірювань та обчислень наведено в таблиці. У першій колонці значення кутів θ між віссю Z та напрямком прикладання електричного поля для всіх можливих умов експерименту. У наступних колонках відповідні їм діючі значення ЕОК, знайдені (I) на основі результатів вимірювання та розраховані (II) з рівнянь відповідних вказівних поверхонь (4), (7) та (8). У колонці 6 наведені значення r_{k1inm}^* , розраховані за співвідношенням (5) із наших інтерферометричних вимірювань.

Графічна інтерпретація аналітичних розрахунків та проведених експериментальних вимірювань показана на рис. 3. Тут точками наведено експериментальні значення, а суцільними лініями проведені аналітичні криві r_{ii} , r_{j1} , r_{k1}^* на основі даних із [21] за формулами (4), (7) та (8) відповідно. Під час побудови цих ліній у сферичній системі координат використана властивість цих функцій, що $r(360^\circ - q, 90^\circ) = r(q, 270^\circ)$, тому значення $\theta > 180^\circ$ на рис. 3 треба розуміти саме так, що робить наведені криві аналогічними до перерізу вказівних поверхонь із [1] площиною ZOY .

Значення r_{ii} , r_{jl} та r_{kl}^* , виміряні експериментально (I) та розраховані з рівнянь вказівних поверхонь (II). Величини $r_{kl}^*_{iim}$ розраховані з інтерферометричних вимірювань (всі коефіцієнти подаються в Брюстерах, 1 Бр = 10^{-12} м/В)

θ	Інтерферометричні вимірювання					Поляризаційно-оптичні вимірювання	
	r_{ii}		r_{jl}		$r_{kl}^*_{iim}$	r_{kl}^*	
1	2	3	4	5	6	7	8
	(I)	(II)	(I)	(II)		(I)	(II)
0°	30,7	33,2	8,6	10,1	226	196	234
10°	28,8	33,9	9,3	8,8	198	207	259
23,3°	35,7	36,5	7,9	6,6	294	269	319
36°	39,7	39,2	--	4,2	--	353	385
46,8°	33,8	39,6	4,9	1,96	370	338	425
54°	41	38,2	2,9	0,44	436	418	433
66,7°	29,8	31,4	-7	-2,24	434	254	396
80°	13,3	18,8	--	-4,9	--	205	283
90°	4,7	6,8	-8,9	-6,8	162	130	162
90°+10°	-4,3	-5,9	-8,5	-8,4	50	67	31
90°+23,3°	-27,7	-20,9	-13,8	-10,2	-160	-172	-123
90°+36°	-35,6	-31,0	-12,5	-11,4	-260	-245	-219
90°+46,8°	-36,7	-35,4	-13,3	-12,0	-254	-238	-255
90°+54°	-36,1	-36,4	-10,1	-12,2	-280	-231	-259
90°+66,7°	-30,5	-35,7	-12	-12,0	-189	-165	-245
90°+80°	-29,2	-33,8	-9,8	-11,1	-197	-195	-230
180°	-30,7	-33,2	-8,6	-10,1	-226	-196	-234

Проаналізуємо отримані результати. Насамперед, хотілось би відзначити досить добре (в межах похибки інтерферометричних та поляризаційно-оптичних електрооптичних вимірювань, що іноді може досягати і 10%) узгодження експериментально отриманих нами значень ефективного ЕОК (див. на рис. 3 позначення точками) із розрахунковими аналітичними залежностями (див. суцільні лінії там само). Останні є перерізами вказівних поверхонь (7) та (8) площиною ZOY (тобто за умови $\varphi = 90^\circ$), які побудовані в [1] на основі всіх існуючих ненульових ЕОК кристалів LiNbO₃, визначених в [21]. Зазначимо також доволі строгий збіг (див. рис. 3, в) експериментального та розрахункового екстремального значення для більш точних поляризаційно-оптичних вимірювань (див. колонки 7 і 8 в таблиці) як за кутовим параметром ($\theta = 54^\circ$), так і в межах похибки експерименту за абсолютною величиною (відповідно 418 та 433 Бр).

Незначні відхилення для інтерферометричних досліджень (див. колонки 2–5 в таблиці) можуть бути зумовлені як дещо вищою похибкою їх експериментальних вимірювань, так і меншою гостротою їх максимумів (див. рис. 3, а, б). Останнє є показовішим для випадку r_{jl} , для якого майже сфероподібна розрахункова залежність в кожній із півплощин на рис. 3, б та малі їх абсолютні величини зробили більше розкиданими відповідні експериментальні значення в цьому випадку (див. колонки 4–5 в таблиці), які інколи навіть не вдавалось експериментально визначити.

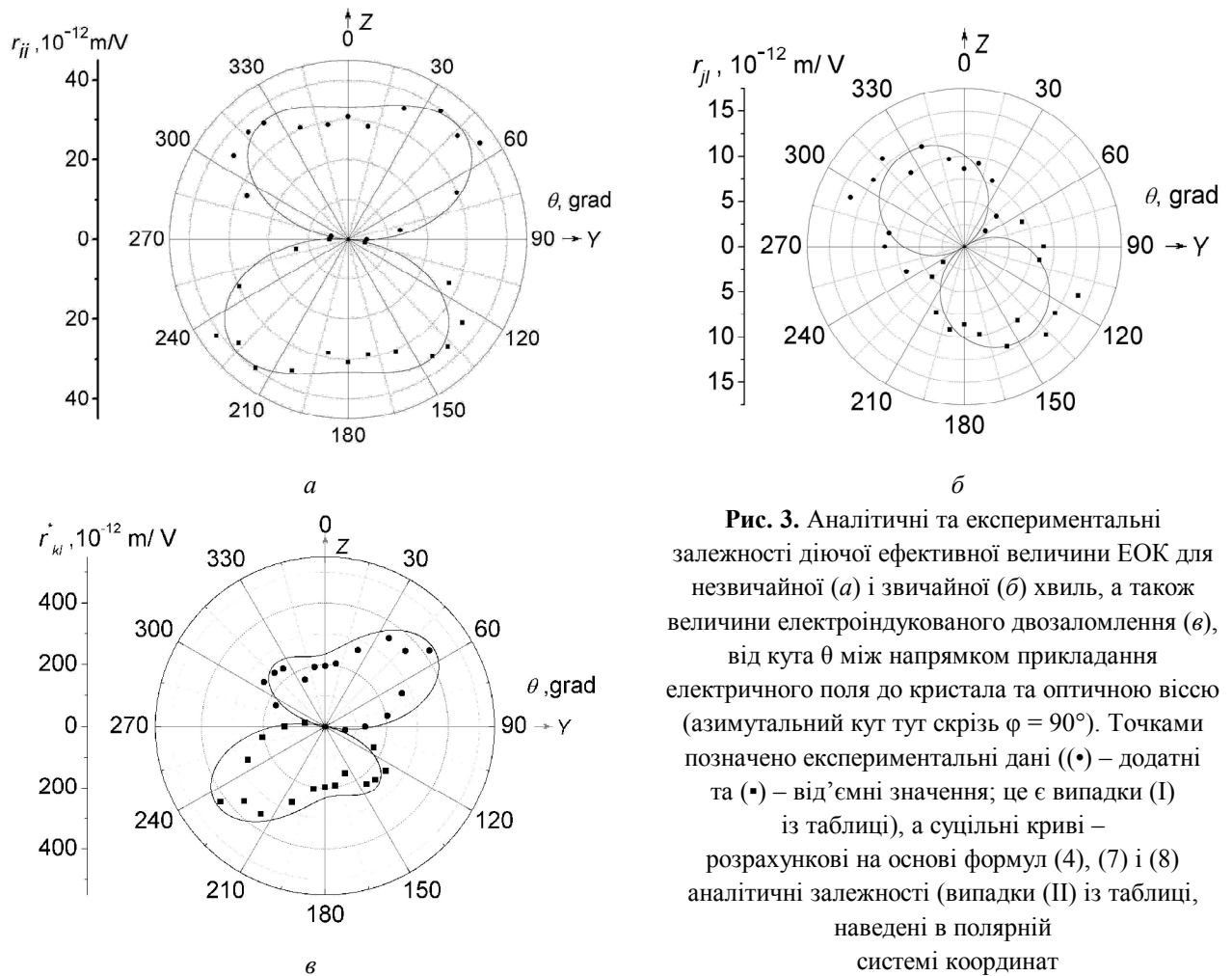


Рис. 3. Аналітичні та експериментальні залежності діючої ефективної величини ЕОК для незвичайної (а) і звичайної (б) хвиль, а також величини електроіндукованого двозаломлення (в), від кута θ між напрямком прикладання електричного поля до кристала та оптичною віссю (азимутальний кут тут скрізь $\varphi = 90^\circ$). Точками позначено експериментальні дані ((•) – додатні та (•) – від’ємні значення; це є випадки (I) із таблиці), а суцільні криві – розрахункові на основі формул (4), (7) і (8) аналітичні залежності (випадки (II) із таблиці, наведені в полярній системі координат

Висновки

У цій роботі вперше на прикладі лінійного ЕОЕ в кристалах LiNbO_3 наводиться експериментальне підтвердження просторового розподілу величини цього ефекту, виміряне на зразках різних зрізів цих кристалів, які були виготовлені із однієї ростової булі. Доволі наочна і чітка експериментальна відтворюваність на всіх рисунках (див. рис. 3) загального ходу зміни ЕОЕ порівняно із аналітичними розрахунковими значеннями, показаними в попередніх роботах [1, 7, 21], свідчить про достовірність проведених експериментальних вимірювань і є одним із доказів правильності нашого підходу до методологічних основ 3D-аналізу просторової анізотропії індукованих оптичних ефектів, започаткованого в [1–8]. Це підтверджує також перспективність розробленої в межах виконання Європейських грантів інформаційної технології найефективнішого та стабільнішого використання кристалічних матеріалів [7, 25–28], яка дає можливість розкрити великі приховані резерви підвищення ефективності їх прикладного застосування як робочих елементів для електро-, п’єзо-, акусто- чи нелінійно-оптичних пристроїв.

Подяка

Один із авторів (А.С. Андрущак) висловлює щирі подяку Акції Марії Кюрі 7 Рамкової програми Європейського Союзу (проекти №272715 та №910715 програми FP7-PEOPLE-2010-IFP).

- [1] Andrushchak A.S., Mytsyk B.G., Demyanyshyn N.M., Kaidan M.V., Yurkevych O.V., Dumych S.S., Kityk A.V. and Schranz W. Spatial anisotropy of linear electro-optic effect for crystal materials : II. Indicative surfaces as efficient tool for electro-optic coupling optimization // Optics & Lasers in Engineering, 47, No.1 (2009) 24-30.

- [2] Andrushchak A.S., Yurkevych O.V., Strychalyuk B.M., Klymash M.M., Rusek A., Kityk A.V. Electric-field-induced optical path length change in $\text{LiNbO}_3\text{:MgO}$ crystals: spatial anisotropy analysis // *Applied Optics*, 52, No.16 (2013) 3757–3763.
- [3] Kaidan M.V., Tybinka B.V., Zadorozhna A.V., Andrushchak A.S., Schranz W., Sahraoui B., Kityk A.V. The Indicative Surfaces of Photoelastic Effect for Cs_2HgCl_4 Biaxial Crystals // *Optical Material*, 29, No. 25 (2007) 475–480.
- [4] Andrushchak A.S., Bobitski Ya.V., Kaidan M.V., Tybinka B.V., Kityk A.V., Schranz W. Spatial anisotropy of photoelastic and acoustooptic properties in $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ Crystals // *Optical Material*, 27 (2004) 619–624.
- [5] Andrushchak A.S., Chernyhivsky E.M., Gotra Z.Yu., Kaidan M.V., Kityk A.V., Andrushchak N.A., Maksymyuk T.A., Mytsyk B.G., Schranz W. Spatial Anisotropy of the Acoustooptical Efficiency in Lithium Niobate Crystals // *J. Applied Physics*, 108 (2010) 103118(1-5).
- [6] Buryy O. A., Andrushchak A. S., Ubizskii S. B., Vynnyk D. M., Yurkevych O. V., Larchenko A. V., Chaban K. O., Gotra O. Z., Kushnir O. S., and Kityk A. V. Method of extreme surfaces for optimizing geometry of acousto-optic interactions in crystalline materials: Example of LiNbO_3 crystals // *J. Applied Physics*, 113 (2013) 083103 (1-12).
- [7] Андрущак А. С. Просторова анізотропія електро-, п'єзо- та акустооптичних взаємодій у кристалічних матеріалах твердотільної оптоелектроніки. – Дис. ... д-ра техн. наук за спец. 01.04.07 – фізика твердого тіла. Нац. ун-т “Львівська політехніка”, Львів, 2009, 405с.
- [8] Buryy O.A., Ubizskii S.B., Andrushchak A.S. New Method of Extremal Surfaces for Most Efficient Application of Crystalline Materials in Electro-Optic Devices // *Proc. of 11th Internat. conference on modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: TCSET'2012*, 21-24 February 2012, Lviv-Slavske (Ukraine), p. 495–497.
- [9] Syrotin Yu.I., Shaskolskaya M.P. *Fundamentals of Crystal Physics* / Nauka, Moscow, 1979, 640p.
- [10] Kushnir O. S., Yurkevych O. V., Andrushchak A. S. Angular stability of electric field-induced effects in crystalline materials // *Cryst. Res. Technol.* 48, No.6 (2013) 387–399.
- [11] Andrushchak A. S., Yurkevych O. V., Andrushchak N. A., Kushnir O. S., Kityk A.V. Spatial anisotropy of photoelastic effect in quartz crystals // *Electronics and information technologies*, 1 (2011) 98–109.
- [12] Mytsyk B.G., Andrushchak A.S., Kost' Ya.P. Static photoelasticity of gallium phosphide crystals // *Crystallography Reports*, 57, No.1 (2012) 124-130.
- [13] Mortazy E. et. al. Low-loss $\text{Ca}_{(x)}\text{Ba}_{(1-x)}\text{Nb}_2\text{O}_6$ ridge waveguide for electro-optic devices // *Microelectronic Engineering*, 88, No.3 (2010) 218–221.
- [14] Herrmann H. et. al. Tunable integrated electro-optic wavelength filter with programmable spectral response // *J. Lightwave Technol.* 28, No.7 (2010) 1051–1056.
- [15] *Lasers and Electro-Optics* / Ed. by William T. Arkin, Binding: Hardcover, 2007, 318 p.
- [16] García-Fernández P., Moreno M. and Aramburu J. A. Electrostatic Control of Orbital Ordering in Noncubic Crystals // *J. Phys. Chem. C*. 118, No.14 (2014) 7554–7561.
- [17] Wang P. L. and Mozharivskij Y. The low-symmetry lanthanum(III) oxotellurate(IV), $\text{La}_{10}\text{Te}_{12}\text{O}_{39}$ // *Acta Cryst. Sec. E*. 69, No.6 (2013) 136.
- [18] Yannopoulos V. One-way photonic band gaps and optical isolation with three-dimensional photonic crystals of low symmetry // *Phys. Rev. A*. 88 (2013) 043837.
- [19] Gao J.-H., Li Sh., Song L.-M., Li J., Wan Y. Growth of single crystal $\text{K}_3\text{Y}_3(\text{BO}_3)_4$ with low-symmetry structure and multi-type of substitutional sites / in: *Rare Metals* / Springer, Berlin, Heidelberg.
- [20] Sugak D., Zhydachevskii Y., Sugak Y., Buryy O., Ubizskii S., Solskii I., Borger A. Becker K.-D. In situ investigation of coloration processes in $\text{LiNbO}_3\text{:MgO}$ during reducing/oxidizing high-temperature treatments // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 11 (2009) 3138-3143.
- [21] Andrushchak A.S., Mytsyk B.G., Demyanyshyn N.M., Kaidan M.V., Yurkevych O.V., Solskii I.M., Kityk A.V. and Schranz W. Spatial anisotropy of linear electro-optic effect for crystal materials: I. Experimental determination of electro-optic tensor by means of interferometric technique // *Optics & Lasers in Engineering*, 47, No.1 (2009) 31-38.
- [22] Mytsyk B.G., Pryriz Ya.V., Andrushchak A.S. The lithium niobate piezooptical features // *Cryst.Res.Technol.* 26, No.7 (1991) 931-940.

- [23] Andrushchak A.S., Mytsyk B.G., Laba H.P., Yurkevych O.V., Solskii I.M., Kityk A.V. and Sahraoui B. Complete sets of elastic and photoelastic constants of pure and MgO doped lithium niobate crystals at room temperature // *J. Applied Physics*, 106 (2009) 073510(1-6).
- [24] Andrushchak A.S., Tybinka B.V., Ostrovskij I.P., Schranz W. and Kityk A.V. Automated interferometric technique for express analysis of the refractive indices in isotropic and anisotropic optical materials // *Optics & Lasers in Engineering*, 46, No.2 (2008) 162-167.
- [25] Andrushchak A.S., Mytsyk B.G., Solskii I.M., Kaidan M.V., Voronyak T.I., Demyanyshyn N.M., Yurkevych O.V. New computer aided design of most efficient electro- and acousto-optics cells as main component for modern fiber-optic infocommunication systems // *Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science - Proceeding of the International Conference TCSET'2008, 19-23 February 2008, Lviv-Slavske, Ukraine*, p.392-395.
- [26] Андрущак А.С. Просторова анізотропія електро-, п'єзо- та акустооптичного ефектів в кристалічних матеріалах твердотільної електроніки. Апробація на прикладі кристалів LiNbO₃ та LiNbO₃:MgO. Частина I. Розробка комплексної методики 3D-аналізу анізотропії індукованих оптичних ефектів в кристалах // *Вісник НУ "Львівська політехніка" ЕЛЕКТРОНІКА*, 619 (2008) 165-171.
- [27] Andrushchak A.S., Mytsyk B.H., Demyanyshyn N.M., Yurkevych O.V., Buryy O.A., Kityk A.V. Novel informational technology development for most efficient application of the piezo-, acousto-, electro- and nonlinear optical crystalline materials // *Proc. of Sixth International Workshop "Relaxed, nonlinear and acoustic optical processes and materials" (RNAOPM'2012), May 25-29, 2012, Lutsk-Lake "Svityaz"*, Ukraine, p. 71-73.
- [28] Andrushchak A.S., Yurkevych O.V., Larchenko A.V., Kityk A.V. Efficiency improvement of electro-, acousto- and nonlinear optical devices: hidden opportunities through the spatial anisotropy analysis // *Proceedings of the 1st International Conference "Actual Problems of Applied Physics", September 24-28, 2012, Sevastopol, Crimea, Ukraine*, p. 208-210.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE ELECTRO-OPTICAL EFFECT ANISOTROPY ON THE EXAMPLE OF LINBO₃ CRYSTALS

O. V. Yurkevych¹, V. S. Andrushchak¹, I. M. Solskii², A. V. Kityk³, A. S. Andrushchak¹

¹Lviv Polytechnic National University, Department of Telecommunications,

²Scientific Research Company "Carat", Lviv, Ukraine

³Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland

© *Yurkevych O. V., Andrushchak V. S., Solskii I. M., Kityk A. V., Andrushchak A. S., 2014*

The experimental studies of spatial anisotropy of linear electro-optical effect on the examples of lithium niobate crystals have been carried out. These experiments were performed on eight different samples of direct and X/ α ($\alpha = 10^\circ, 23.3^\circ, 36^\circ, 46.8^\circ, 54^\circ, 66.7^\circ, 80^\circ$) cuts, which were cut from a single crystal boule. For all possible experimental conditions the effective values of absolute electro-optical coefficient using interferometric method as well as electro-induced change of birefringence using polarization-optical method were determined. Good agreement of obtained spatial distributions of linear electro-optical effect with the results of analytical calculations proves the reliability of experimental results and confirms the prospects of the information technology for the most efficient and more stable application of crystalline materials developed in our previous works.

Key words: linear electro-optical effect, spatial anisotropy, indicative surface, crystalline materials, lithium niobate