

УДК 548.0:515.511

О.С. Кушнір*, О.В. Юркевич, А.С. Андрущак
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра телекомунікацій

* Львівський національний університет імені Івана Франка,
кафедра нелінійної оптики

КУТОВА СТАБІЛЬНІСТЬ МАКСИМУМІВ ВКАЗІВНИХ ПОВЕРХОНЬ ФІЗИЧНИХ ЕФЕКТІВ, ІНДУКОВАНИХ ЗОВНІШНІМИ ПОЛЯМИ

© Кушнір О.С., Юркевич О.В., Андрущак А.С., 2010

O.S. Kushnir, O.V. Yurkevych, A.S. Andrushchak

ANGULAR STABILITY OF MAXIMA OF THE INDICATIVE SURFACES OF PHYSICAL EFFECTS INDUCED WITH EXTERNAL FIELDS

© Kushnir O.S., Yurkevych O.V., Andrushchak A.S., 2010

Досліджено кутову ширину максимумів п'єзоелектричного (ПЕЕ) і електрооптичного (ЕОЕ) ефектів у разі зміни зовнішніх умов (орієнтації лазерного пучка, довжини хвилі світла та температури кристала). Зокрема, проаналізовано кутову стабільність ПЕЕ та індукованої оптичної різниці ходу внаслідок ЕОЕ у кристалах ніобату літію з оксидом магнію і лангаситу. Виявлено, що перевагою геометрій експерименту, пов'язаних із екстремальними значеннями для косих зрізів кристалів, є некритичність стосовно змін відносної кутової орієнтації зразка та напрямків зовнішнього поля, поширення та поляризації світла.

Ключові слова: п'єзоелектричний і електрооптичний ефекти, просторова анізотропія, вказівні поверхні, $La_3Ga_5SiO_{14}$, $LiNbO_3:MgO$.

In this work we have studied angular width of the maxima of piezoelectric and electrooptic effects when the external conditions (laser beam orientation, light wavelength and the crystal temperature) are changed. In particular, we have analyzed the angular stability of piezoelectric coefficients and the induced optical path difference due to electrooptic effect in langasite and lithium niobate crystals doped with magnesium oxide. The advantage of experimental geometries related to extremal values for the non-direct crystal cuts is noncriticality concerned with changing relative angular orientation of the sample and the directions of external field, light propagation and its polarization.

Keywords: piezoelectric and electrooptic effects, indicative surfaces, spatial anisotropy, $La_3Ga_5SiO_{14}$, $LiNbO_3:MgO$.

Вступ

Прогрес оптоелектроніки та лазерної техніки, зокрема розроблення оптичних модуляторів, дефлекторів і фільтрів та інших компонент систем телекомунікацій, виливає на передній план пошук матеріалів, оптичні властивості яких чутливі до дій зовнішніх впливів (найперше електричних, механічних або акустичних полів). Відповідні завдання передбачають і вдосконалення технологій отримання (вирощування) нових і ефективніше використання вже відомих кристалічних матеріалів. Серед останніх високою чутливістю до дій зовнішніх полів є низькосиметричні кристали середньої та нижчої категорій, які виявляють істотну анізотропію фізичних ефектів вищих порядків, що описуються тензорами третього та четвертого рангів. Відповідно, аналіз анізотропії та

пошук екстремальних значень і оптимальних геометричних умов електро-, п'єзо- чи акустооптичної взаємодії сприяє підвищенню ефективності застосування згаданих матеріалів як робочих елементів пристроїв твердотільної оптоелектроніки.

Сьогодні цей напрям у практичній фізиці твердого тіла можна вважати сформованим (див. [1–10]). Відповідні підходи передбачають комплексні дослідження індукованих оптичних ефектів і подальший пошук максимальних значень величини відповідних взаємодій і їхніх кутових напрямків на основі аналізу просторової анізотропії вказівних поверхонь (ВП) цих ефектів. У зв'язку з цим виникає потреба у дослідженні поведінки величини того чи іншого ефекту в околі максимуму ВП за умов зміни напрямку проходження світла в кристалах або дії зовнішніх чинників (змін температури, довжини хвилі світла тощо). По-суті, така поведінка визначатиме стабільність згаданих максимумів. Найпростішим прикладом є кутова ширина максимумів ВП, яка впливатиме на кутову апертуру пристрою.

Досі ці питання в літературі не аналізували, хоча вони актуальні з практичного боку. Насправді, для будь-якого ефекту, індукованого зовнішнім полем, напрямки прикладання цього поля, поширення та поляризації світла завжди можна задати з обмеженою точністю, а лазерний пучок характеризується обмеженою кутовою розбіжністю. Обмежена також і точність практичної орієнтації монокристала. Тому у разі надто швидких кутових змін, скажімо, ефективного п'єзоелектричного коефіцієнта (ПЕК) або параметра акустооптичної якості реально скористатися з максимального значення ВП на практиці може виявитися непросто.

Мета цієї роботи – розроблення загальної методики вирішення вказаних проблем та дослідження кутової стабільності максимумів ВП п'єзоелектричного (ПЕЕ) і електрооптичного (ЕОЕ) ефектів на прикладі кристалів ніобату літію, легованого оксидом магнію ($\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$) і лангаситу ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$). Перший з них є і модельним, і практичним матеріалом для оптоелектроніки [6, 10, 11], а на другий, незважаючи на його недостатнє дослідження, дослідники покладають певні надії у зв'язку зі стабільністю його властивостей [12, 13].

Методика кількісної оцінки кутової стабільності максимумів вказівних поверхонь

Розглянемо залежність величини r індукованого фізичного ефекту від кута a , довжини світлової хвилі I і температури кристала T у не надто великому околі максимуму ВП:

$$r(a, I, T) \approx r(a_0, I_0, T_0) + \left. \frac{\partial r}{\partial a} \right|_{a=a_0} (a - a_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 r}{\partial a^2} \right|_{a=a_0} (a - a_0)^2 + \\ + \left. \frac{\partial r}{\partial I} \right|_{I=I_0} (I - I_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 r}{\partial I^2} \right|_{I=I_0} (I - I_0)^2 + \left. \frac{\partial r}{\partial T} \right|_{T=T_0} (T - T_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 r}{\partial T^2} \right|_{T=T_0} (T - T_0)^2 + \dots, \quad (1)$$

де положення максимуму кількісно визначене параметрами a_0 , I_0 і T_0 . Формулу (1) можна переписати у вигляді

$$r(a, I, T) \approx r(a_0, I_0, T_0) + g_a^{(1)}(a - a_0) + g_a^{(2)}(a - a_0)^2 + \\ + g_I^{(1)}(I - I_0) + g_I^{(2)}(I - I_0)^2 + g_T^{(1)}(T - T_0) + g_T^{(2)}(T - T_0)^2 + \dots, \quad (2)$$

де, за аналогією до монографії [14], введено кутові (g_a), спектральні (g_I) і температурні (g_T) дисперсійні коефіцієнти першого та другого порядків.

Важливо, що кутовий дисперсійний коефіцієнт першого порядку $g_a^{(1)}$ нульовий, оскільки ми працюємо в околі максимуму ВП $r(a_0) = r_{\max}$. Крім того, за умови ненульових спектрального та температурного дисперсійних коефіцієнтів першого порядку відповідними коефіцієнтами другого порядку можна знехтувати. Отже, відхилення від максимуму ВП фізичних ефектів визначається наближеним виразом

$$r(a, I, T) - r_{\max}(I_0, T_0) \approx g_a^{(2)}(a - a_0)^2 + g_I^{(1)}(I - I_0) + g_T^{(1)}(T - T_0) + \dots \quad (3)$$

Нульовий $g_a^{(1)}$ на практиці означатиме високу кутову стабільність величини ефекту. Цей висновок виглядає дещо парадоксально, адже відомо, що кутова орієнтація максимуму ВП переважно відповідає експериментальним геометріям косих зрізів кристалічних зразків, а кутові зміни показника заломлення та коефіцієнта поглинання, пов'язаних із тензором діелектричної проникності другого рангу, критичні для таких зрізів. Насправді, для кристалів ромбічної або вищої симетрії головні осі еліпсоїда Френеля відповідають кристалофізичним осям X_1, X_2, X_3 , і саме для цих напрямків, які відповідають прямим зрізам, маємо екстремуми показників заломлення й некритичні кутові зміни останніх. Проте згадане вище протиріччя усувається, якщо згадати, що індуквані оптичні ефекти описуються тензорами вищих рангів, а їхні максимальні значення визначаються складною суперпозицією коефіцієнтів ЕОЕ, ПЕЕ, показників заломлення та інших параметрів (див., наприклад, результати [6]).

Отже, додатковою перевагою косих екстремальних геометрій, крім максимальної величини індукованих оптичних ефектів, є *некритичність* стосовно немінучих (випадкових чи намірених) змін відносної кутової орієнтації зразка та напрямків зовнішнього поля, поширення та поляризації світла. Цей факт, який досі залишався непоміченим у літературі, повинен посприяти істотному зростанню кутової апертури пристроїв оптоелектроніки, робочими елементами яких є косі зрізи кристалів з екстремальними значеннями ПЕЕ, ЕОЕ та інших ефектів. У нелінійній оптиці аналогічні *некритичні геометрії експерименту* становлять особливу практичну цінність [14].

Відомо, що природна оптична анізотропія в оптично одновісних системах вичерпно описується єдиним кутовим параметром (меридіональним кутом відхилення θ напрямку поширення світла від оптичної осі X_3 – див. [6]). Проте оптичні ефекти вищих порядків, які становлять предмет нашого дослідження, залежатимуть і від азимутального кута φ . Насправді, згідно з визначенням ВП, кутові залежності індукованих оптичних ефектів описуються функціями $r(\varphi, \theta)$, тобто $a = a(\varphi, \theta)$. Отже, насправді маємо два кутові дисперсійні коефіцієнти другого порядку – $g_j^{(2)}$ і $g_q^{(2)}$. Аналітично знайти ці коефіцієнти можна на підставі виразів для ВП індукованих оптичних ефектів (див., наприклад, роботу [6]) і відомих з експерименту числових значень коефіцієнтів цих ефектів. Відповідне дослідження становитиме предмет окремої роботи.

Проте, оскільки аналітичні підходи до аналізу кутової ширини максимумів ВП не універсальні в тому сенсі, що відповідні результати залежатимуть від точкової групи симетрії кристала та числових значень його коефіцієнтів, надалі зосередимося лише на розгляді критичності максимумів ВП, який ґрунтується на загальніших числових підходах. Тут найперше постає питання про те, який конкретно практичний параметр обрати для описування кутової ширини цих максимумів. Найдоречніше ввести поняття кутової ширини максимуму ВП, яка охоплює область ВП, де величина ефекту відрізняється від максимуму не більше ніж на деяку визначену наперед величину (наприклад, 10 %). Саме так діють, наприклад, для кількісного опису кутової ширини лазерних пучків [15].

Будуючи відповідну стереографічну проекцію, можна виділити на ній область порівняної стабільності максимуму (приклади для кристалів $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ і $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ див. нижче), а для встановлення відповідних допустимих відхилень від максимумів ВП за сферичними кутами θ і φ можна використати комп'ютерні методи розрахунку або загальновідому сітку Вульфа. Такі стереографічні проекції становитимуть практичний інтерес у сенсі визначення допустимих помилок орієнтації кристалів та точності дотримання оптимальної геометрії експерименту.

Кутова стабільність п'єзоелектричних і електрооптичних параметрів кристалів $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ і $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$

Тепер проаналізуємо кутову ширину максимумів ВП для ПЕЕ і ЕОЕ у кристалах $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ і лангаситу. Як приклад, на рис. 1 наведено стереографічні проекції, на яких зображено області

порівняної стабільності максимумів для таких поверхонь кристалів лангаситу: 1) ВП поперечного ПЕЕ $d_{lm}^{(p)}$, де індекси l, m – визначають напрямки відповідно електричного поля і п'єзодеформації, p – ортогональний до них напрямок (рис. 1а); 2) ВП індукованої зміни оптичної різниці ходу внаслідок ЕОЕ $d\Delta_{ii}'$, де індекс i – визначає напрямок поляризації світла (рис. 1б). Відповідні дані одержано на основі експериментальних результатів нашої роботи [13] шляхом застосування розробленого програмного пакета Calc3D для побудови і кількісного аналізу ВП і їхніх стереографічних проєкцій. Області стабільності на рис. 1 визначаються відхиленням кутових параметрів орієнтації, за якого величина ефекту відрізняється від максимуму не більше ніж на 10%, тобто ефективні ПЕК або електрооптична індукована різниця ходу становлять 90% або більше від максимальних величин.

Припустимо, що орієнтацію кристалічного зразка по одному з кутів (θ або φ) обрано абсолютно точно і знайдемо допустимі відхилення за іншим кутом для досягнення відповідних значень ПЕК. Ці відхилення по кутах θ і φ становлять відповідно $\theta = \pm 16,0^\circ$ при $\varphi_{\max} = 30^\circ, 150^\circ, 270^\circ$ (або $90^\circ, 210^\circ, 330^\circ$) та $\varphi = \pm 9,0^\circ$ при $\theta_{\max} = 15^\circ$ (або 165°). Для точного кількісного аналізу інших (більш загальних) випадків відхилення від максимуму, які стосуються обох кутів θ і φ водночас, можна скористатися сіткою Вульфа або числовими методами оброблення даних. Зрізи кристалів лангаситу, які визначаються встановленими вище кутовими параметрами орієнтації, можуть знайти практичне застосування для виготовлення п'єзоелектричних перетворювачів на основі кристалів лангаситу.

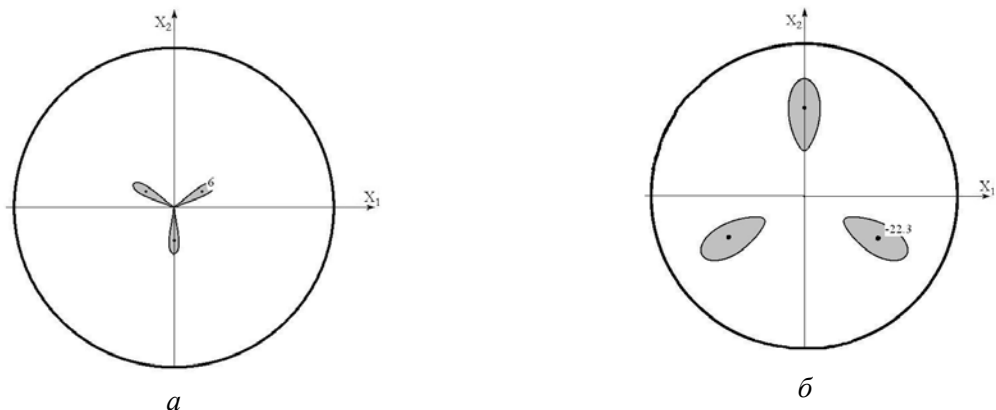


Рис. 1. Стереографічні проєкції, на яких заштриховано області стабільності максимумів (а) ВП $d_{lm}^{(p)}$ поперечного ПЕЕ ($\mathbf{E} \perp \mathbf{m}$, де \mathbf{E} і \mathbf{m} – напрямки відповідно електричного поля та п'єзодеформації) і (б) ВП електроіндукованої зміни оптичної різниці ходу $d\Delta_{ii}^{(i)}$ у кристалах лангаситу (всі цифри в од. 10^{-12} м/В)

Проаналізуємо дані рис. 1, б. Допустимі значення відхилення кутів θ і φ для ЕОЕ тут становлять відповідно $\theta = \pm 21,0^\circ$ (за умови $\varphi_{\max} = 90^\circ, 210^\circ, 330^\circ$ (або $30^\circ, 150^\circ, 270^\circ$)) і $\varphi = \pm 11,1^\circ$ (за умови $\theta_{\max} = 54^\circ$ (або 126°)). Як і для випадку ПЕЕ, ми також припускали, що геометрію експерименту по одному з кутів (наприклад, азимутальному) дотримано точно, а відхилення (помилка орієнтації) стосується лише іншого кута (відповідно, меридіонального). Враховуючи наведені міркування стосовно стабільності максимуму ВП ЕОЕ, описаний вище кристалічний зріз кристалів лангаситу можемо запропонувати для використання в електрооптичних пристроях як найстабільніший до змін просторової орієнтації електричного поля і світлової хвилі.

Цікаво порівняти кількісні показники кутових ширин максимумів ВП ПЕЕ і ЕОЕ для кристалів лангаситу. Величина електроіндукованої зміни оптичної різниці ходу для них менш чутлива до змін меридіонального кута θ , аніж до змін азимутального кута φ . Водночас, максимуми ПЕЕ критичніші щодо азимутального кута. Загалом же електрооптична різниця ходу виявляється стабільнішою (ширина відповідних максимумів приблизно в 1,3 раза більша).

Розглянемо тепер питання кутової стабільності максимумів ПЕЕ і ЕОЕ для кристалів $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$, використовуючи для аналізу експериментальні дані для ЕОК [16], електрооптичних пристроїв оптичної різниці ходу з урахуванням п'єзоелектричних змін розмірів кристала [17] і ПЕК [18]. Вирішення цієї проблеми передбачає попереднє розв'язання задачі про максимальні значення відповідних ВП і знаходження їхніх кутових координат. За браком місця наведемо лише остаточні дані для максимальних значень ВП ПЕЕ і їхньої кутової орієнтації для кристалів $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ (див. таблицю), одержані на підставі неопублікованих результатів вимірювань п'єзоелектричних коефіцієнтів, які виконали автори.

Проведений аналіз просторової анізотропії ПЕЕ для кристалів $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ дає змогу запропонувати кристалічні зрізи (рис. 2), для яких величина п'єзоелектричної взаємодії максимальна (див. таблицю). Тут для випадку перпендикулярності напрямків зміни розміру та прикладання електричного поля отримуємо величину ефекту, в 1,54 раза більшу, порівняно з найкращою геометрією прямого зрізу ($\mathbf{E} \parallel X_2, \mathbf{m} \parallel X_1$ – рис. 2, б). Для випадку $\mathbf{E} \parallel \mathbf{m}$ геометрія косоного зрізу (рис. 2, а) забезпечує удвічі більший ефект, порівняно з найкращою геометрією прямого зрізу ($\mathbf{E} \parallel X_2, \mathbf{m} \parallel X_2$).

Максимальні значення ВП ПЕЕ для кристалів $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ і їхня кутова орієнтація

ВП	Максимальні значення, 10^{-12} м/В	Кутові координати напрямків екстремальних значень	
		θ	φ
$d''_{11}^{(m)}$	$\pm 38,2$	61° (119°)	$90^\circ, 210^\circ, 330^\circ$ ($30^\circ, 150^\circ, 270^\circ$)
$d''_{1m}^{(p)}$	$\pm 19,2$	0° або 180°	$60^\circ, 180^\circ, 300^\circ$ ($0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$)
$d''_{1m}^{(1)}$	$\pm 29,6$	129° (51°)	$90^\circ, 210^\circ, 330^\circ$ ($30^\circ, 150^\circ, 270^\circ$)

Для кількісного опису ширини максимумів ВП скористаємося їхніми стереографічними проекціями. На рис. 3 наведено стереографічні проекції кутового розподілу ПЕЕ у кристалах $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$, на яких показано кутові області порівняно стабільних максимумів ПЕЕ, що відповідають повздовжній ВП ПЕЕ $d''_{11}^{(m)}$ ($\mathbf{E} \parallel \mathbf{m}$) (рис. 3, а) і поперечній ВП ПЕЕ електричного поля $d''_{1m}^{(1)}$ ($\mathbf{E} \perp \mathbf{m}$) (рис. 3, б). Стабільність максимумів тут описується ділянками кутів, у межах яких величина ефекту становить не менше 0,9 від максимального значення (ці ділянки на рисунку заштриховані). Допустимі значення відхилення по кутах θ і φ становлять відповідно $\theta = \pm 12,6^\circ$ при $\varphi_{\max} = 90^\circ, 210^\circ, 330^\circ$ (або $30^\circ, 150^\circ, 270^\circ$) та $\varphi = \pm 15,4^\circ$ при $\theta_{\max} = 61^\circ$ (або 119°) для $d''_{11}^{(m)}$ ($\mathbf{E} \parallel \mathbf{m}$), і $\theta = \pm 11,5^\circ$ при $\varphi_{\max} = 30^\circ, 150^\circ, 270^\circ$ (або $90^\circ, 210^\circ, 330^\circ$) та $\varphi = \pm 20^\circ$ при $\theta_{\max} = 51^\circ$ (або 129°) для $d''_{1m}^{(1)}$ ($\mathbf{E} \perp \mathbf{m}$), за умови, що геометрію експерименту по одному з кутів (наприклад, азимутальному) дотримано точно, а відхилення (помилка орієнтації) стосується лише меридіонального кута. Отже, стабільність максимумів для обох випадків приблизно однакова.

Зазначимо, що відповідні зрізи кристалів, виготовлені з дотриманням вказаних міркувань, можуть знайти застосування для виготовлення високоефективних п'єзоперетворювачів на основі кристалів $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$.

На рис. 4 наведено стереографічну проекцію, яка ілюструє кутовий розподіл стабільності згаданого максимуму ВП електроіндукованої оптичної різниці ходу $d\Delta''_{ij}(q, j)$ ($\mathbf{E} \parallel \mathbf{i}$, де одиничний вектор \mathbf{i} визначає напрямок поляризації світла). Відповідна область стабільності

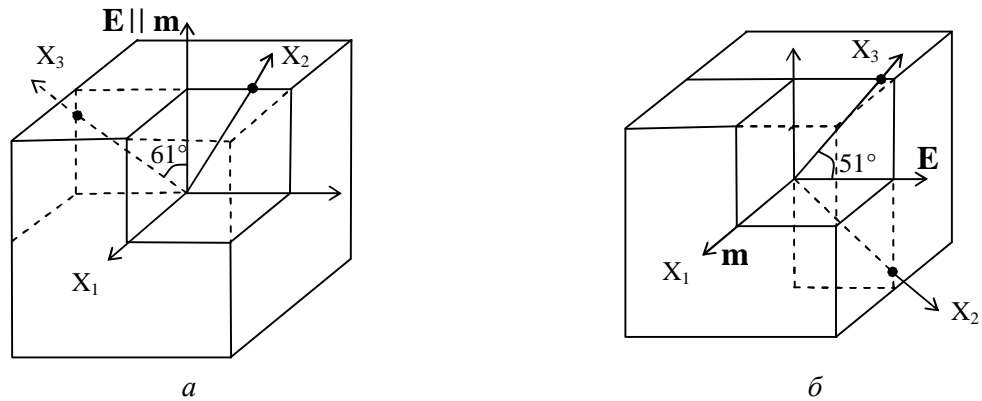


Рис. 2. Геометрії зразка кристалів $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ і орієнтації вектора електричного поля \mathbf{E} , що забезпечують найбільші значення n' електроелектричної деформації для випадків (а) $\mathbf{E} \parallel \mathbf{m}$ (максимум ВП $d_{11}^{(m)}$), і (б) $\mathbf{E} \perp \mathbf{m}$ (максимум ВП $d_{1m}^{(1)}$). X_1, X_2, X_3 – кристалофізичні осі

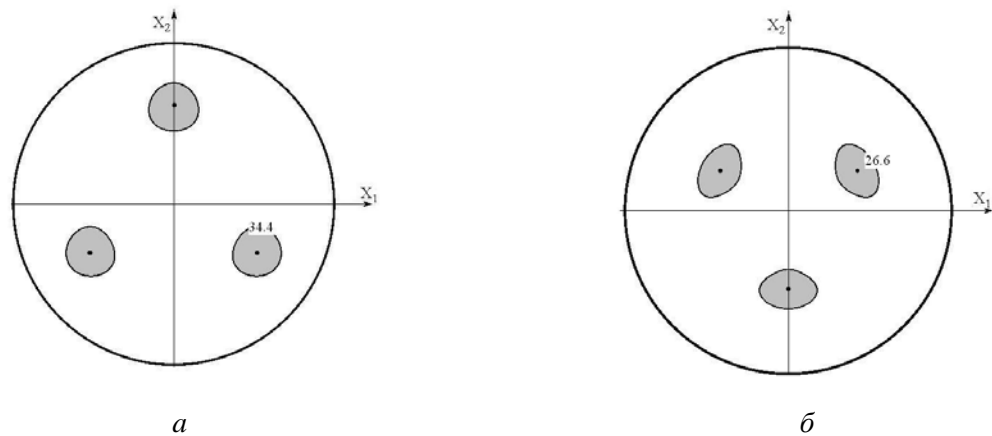


Рис. 3. Стереографічні проекції ВП для випадків повздовжнього ($\mathbf{E} \parallel \mathbf{m}$, а) та поперечного ($\mathbf{E} \perp \mathbf{m}$, б) ПЕЕ у кристалах $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$. Заштриховані ділянки відповідають ділянкам стабільності максимумів відповідних ВП, на яких значення ПЕЕ не менші ніж 90 % від максимальних значень, що позначені на рисунку точками (всі цифри в од. 10^{-12} м/В)

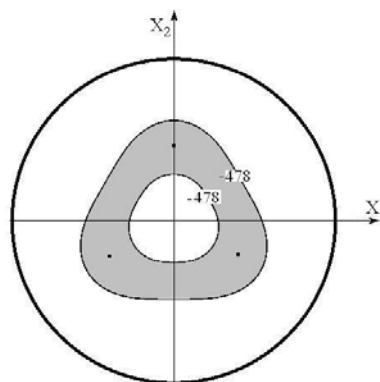


Рис. 4. Стереографічна проекція, яка ілюструє кутову стабільність максимуму електроіндукованої зміни оптичної різниці ходу, що відповідає ВП $d\Delta'_{ii}$ для повздовжнього випадку ($\mathbf{E} \parallel \mathbf{i}$) в кристалах $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ (всі цифри в од. 10^{-12} м/В)

визначається відхиленням від величини максимумів, меншим за 10 %. Допустимі значення відхилення по кутах θ становлять відповідно $\theta = \pm 13,0^\circ$ при $\varphi_{\max} = 90^\circ, 210^\circ, 330^\circ$ (або $30^\circ, 150^\circ, 270^\circ$) за умови, що геометрію експерименту за азимутальним кутом дотримано точно, а відхилення (помилка орієнтації) стосується лише меридіонального кута. Ці зрізи можуть знайти застосування для виготовлення електрооптичних пристроїв на основі кристалів $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$.

Зазначимо, що за умови заданого кута θ з оптимального діапазону (див. рис. 4) величина $d\Delta'_{ii}$ по-суті не залежить від кута φ . Інакше кажучи, азимутальні зміни геометрії експерименту тут абсолютно не критичні.

Висновки

У цій роботі вперше досліджено питання ширини максимумів ПЕЕ і ЕОЕ за умови зміни зовнішніх умов (довжини хвилі світла, температури кристала і орієнтації лазерного пучка), зокрема питання кутової ширини максимумів ПЕЕ і індукованої оптичної різниці ходу для ЕОЕ у кристалах $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ і $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$. Виявлено, що перевагою геометрій експерименту, пов'язаних із екстремальними значеннями індукованих оптичних ефектів для косих зрізів кристалів, є не критичність стосовно немінучих змін відносної кутової орієнтації зразка та напрямків зовнішнього поля, поширення та поляризації світла. Наприклад, за умови дотримання точної орієнтації зразків кристалів лангаситу по одному з кутів (меридіональному або азимутальному) відхилення порядку $\pm 10^\circ \div 20^\circ$ по іншому куту (відповідно, азимутальному або меридіональному) призводить до зменшення ПЕЕ та ЕОЕ лише на величину, яке не перевищує 10 %. Порівняно з максимумами ПЕЕ, максимуми ВП ЕОЕ кристалів лангаситу є менш критичними до змін кутових параметрів геометрії експерименту.

Оцінено кутову стабільність максимумів ВП електроіндукованої зміни різниці ходу кристалів $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$. Знайдено межі кутів орієнтації, у яких величина електрично індукованої зміни різниці ходу відхиляється від максимумів не більше, аніж на 10 %. Встановлено, що для найефективнішої геометрії за електроіндукованою зміною різниці ходу повздовжнього ЕОЕ допустиме відхилення по куту θ становить $\theta = \pm 13^\circ$.

Нарешті, зауважимо, що одержані у цій роботі дані визначають кутову стабільність екстремальних характеристик відповідних пристроїв твердотільної електроніки, зокрема їхню кутову апертуру, яка повинна істотно переважати апертуру пристроїв, робочі елементи яких являють собою прямі зрізи кристалічних матеріалів.

Робота виконана за підтримки Міністерства освіти і науки України в межах українсько-польського проекту № М/138-2009.

1. Bohatý L. // *Zeit. Kristallogr.* – 1991. – Vol. 194, No 3–4. – P. 235–239.
2. Kedyulich V.M., Slivka A.G., Gerzanich E.I., Guivan A.M., Lukach P.M. // *Condens. Matter Phys.* – 2003. – Vol. 6, No. 2. – P. 271–280.
3. Martynyuk-Lototska I., Dudok T., Dyachok Ya., Burak Ya., Vlokh R. // *Ukr. J. Phys. Opt.* – 2004. – Vol. 5, No 2. – P. 67–69.
4. Han P., Yan W., Tian J., Huang X., Pan H. // *Appl. Phys. Lett.* – 2005. – Vol. 86, No 1. – 052902-1–052902-3.
5. Say A., Mys O., Grabar A., Vysochanskii Yu., Vlokh R. // *Phase Trans.* – 2009. – Vol. 82, No 7. – P. 531–540.
6. Andrushchak A. S., Mytsyk B. G., Demyanyshyn N. M., Kaidan M. V., Yurkevych O. V., Dumych S. S., Kityk A. V., Schranz W. // *Opt. Lasers Eng.* – 2009. – Vol. 47. – P. 24–30.
7. Kaidan M.V., Tybinka B.V., Zadorozhna A.V., Schranz W., Sahraoui B., Andrushchak A.S., Kityk A.V. *The Indicative Surfaces of Photoelastic Effect for Cs_2HgCl_4 Biaxial Crystals // Optical Material.* – 2007. – Vol. 29. – P. 475–480.
8. 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 b-BaB₂O₄ Crystals // Optical Material.* – 2004. – Vol. 27. – P. 619–624.
9. Mytsyk B.G., Pryriz Ya.V., Andrushchak A.S.: *The lithium niobate piezooptical features // Cryst.Res.Technol.* – 1991. – Vol. 26, № 7. – P. 931–940.
10. Mytsyk B.G., Andrushchak A.S., Demyanyshyn M.N., Kost' Y.P., Kityk A.V., Mandracci P., Schranz W. // *Appl. Opt.* – 2009. – Vol. 48, No 10. – P. 1904–1911.
11. Andrushchak A.S., Mytsyk B.G.,

- Laba H.P., Yurkevych O.V., Solskii I.M., Kityk A.V., Sahraoui B. // J. Appl. Phys. – 2009. – Vol. 106, No 7. – P. 073510-1–073510-6.*
12. Андреев И. А. // Журн. техн. физ. – 2004. – Т. 74, № 9. – С. 1–3.
13. Yurkevych O.V., Mytsyk B.G., Andrushchak A.S. // 10th Intern. Conf. TCSET'2010, 23–27 February 2010: Proc. – Lviv-Slavske (Ukraine), 2010. – P. 335.
14. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. Прикладная нелинейная оптика. – М.: Радио и связь. – 1982.
15. Бруннер В., Юнге К. Справочник по лазерной технике – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 544 с.
16. 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. – 2009. –Vol. 47, N 1. – P. 31–38.
17. Юркевич О.В., Сольський І.М., Андрущак А.С. // Вісн. Нац. ун-ту „Львівська політехніка”. – 2009. – № 646: Електроніка. – С. 147– 152.
18. Лаба Г.П., Юркевич О.В., Карбовник І.Д., Кайдан М.В., Думич С.С., Сольський І.М., Андрущак А.С. // Вісн. Нац. ун-ту „Львівська політехніка”. – 2008. – № 619: Електроніка. – С. 172–180.