

Г.П. Лаба, О.В. Юркевич, І.Д. Карбовник, М.В. Кайдан,
С.С. Думич, І.М. Сольський¹, А.С. Андрущак
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра телекомунікацій,
¹НВП “Карат”

**ПРОСТОРОВА АНІЗОТРОПІЯ ЕЛЕКТРО-, П’ЄЗО-
ТА АКУСТО-ОПТИЧНОГО ЕФЕКТІВ У КРИСТАЛІЧНИХ
МАТЕРІАЛАХ ТВЕРДОТІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ. АПРОБАЦІЯ
НА ПРИКЛАДІ КРИСТАЛІВ LiNbO_3 ТА $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$.
ЧАСТИНА ІІ. ЗАПОВНЕННЯ МАТРИЦЬ ПРУЖНИХ
ТА П’ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ КРИСТАЛІВ LiNbO_3
ТА $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$**

© Лаба Г.П., Юркевич О.В., Карбовник І.Д., Кайдан М.В., Думич С.С.,
Сольський І.М., Андрущак А.С., 2008

H.P. Laba, O.V. Yurkevych, I.D. Karbovnyk, M.V. Kaidan,
S.S. Dumych, I.M.Solskii, A.S. Andrushchak,

**SPATIAL ANISOTROPY OF ELECTRO-, PIEZO- AND ACOUSTO-OPTIC
EFFECTS IN CRYSTALLINE MATERIALS OF SOLID ELECTRONICS.
APPROBATION ON EXAMPLE OF LiNbO_3 AND $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$. PART II.
COMPLETING OF ELASTIC AND PIEZOELECTRIC COEFFICIENTS
MATRIX FOR LiNbO_3 AND $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ CRYSTALS**

© Laba H.P., Yurkevych O.V., Karbovnyk I.D., Kaidan M.V., Dumych S.S.,
Solskii I.M., Andrushchak A.S., 2008

Друга частина роботи започатковує комплекс експериментальних та розрахункових досліджень, спрямованих на апробацію на прикладі кристалів LiNbO_3 і $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ методики 3D-аналізу анізотропії електро-, п’єзо- та акустооптичного ефектів, розвинутої в першій частині. Для цього були виконані вимірювання всіх швидкостей акустичних хвиль, необхідних для заповнення матриць пружних та п’єзоелектричних коефіцієнтів у кристалах LiNbO_3 українського, російського і японського виробництва, а також вперше в кристалах $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$. На цій основі були розраховані всі існуючі пружні та п’єзоелектричні коефіцієнти для вказаних кристалів, які для випадку чистого ніобату літію добре узгоджуються з літературними даними. Крім того, на основі побудованих просторових поверхонь швидкостей для трьох можливих (двох поперечних та однієї поздовжньої) акустичних хвиль, що поширюються в досліджуваних кристалах, проаналізовані їхні просторової анізотропії; одержані екстремальні значення для кожної поверхні та відповідні їм кутові параметри.

The given work is extension of first part and initiates a set of experimental and calculated investigations directed on approbation of method for anisotropy 3D-analysis of electro-, piezo-

and acousto-optical effects on example of LiNbO_3 and $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ crystals. For that in this part all the acoustical wave velocities necessary for completing of elastic and piezoelectric coefficients matrixes in crystals of LiNbO_3 of Ukrainian, Russian and Japanese productions as well as at first in $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ crystals have been measured. On this basis all the elastic and piezoelectric coefficients for investigated crystals have been calculated. In the case of pure lithium niobate crystals, they are in good agreement with references data. Using constructed spatial surfaces for velocities of three possible (two transverse and one longitudinal) acoustical waves, which propagate in investigated crystals, the analysis of their spatial anisotropy have been conducted, for each surface the extreme values and corresponding angular parameters have been defined.

Вступ

Сьогодні в оптичному приладобудуванні доволі широко використовуються анізотропні кристалічні матеріали [1–3]. Так, наприклад, у сучасних електро- та акусто-оптичних комірках світла як робочі елементи використовують переважно такі кристали, як LiNbO_3 , LiTaO_3 , TeO_2 , SiO_2 , PbMnO_4 та $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$. Ці матеріали належать до кристалографічних класів симетрії середньої категорії, тому вони є істотно анізотропними за своїми електро-, п'єзо- та акусто-оптичними властивостями.

З іншого боку, використання інших низько-симетричних кристалів як робочих елементів у різноманітних пристроях твердотільної електроніки [1–3] є також перспективним з огляду на більшу чутливість таких матеріалів до змін зовнішніх полів. Беручи до уваги високий ступінь анізотропії електро-, п'єзо- чи акусто-оптичного ефектів у таких матеріалах, потреба аналізу їх просторової анізотропії під час розробки відповідних пристроїв на базі цих ефектів є беззаперечною, насамперед з метою ефективнішого використання досліджуваних кристалів.

Згідно зі створеною в першій частині цієї роботи [4] методикою аналізу просторової анізотропії електро-, п'єзо- та акустооптичної взаємодій світла в кристалах першим завданням є знаходження всіх існуючих параметрів анізотропних матеріалів. Це передбачає визначення всіх ненульових компонент для тензорів досліджуваних фізичних ефектів, що вимагає попереднього однозначного і точного вимірювання їх значень і, особливо, знаків.

Для апробації запропонованої методики були взяті кристали ніобату літію, які за своїми унікальними хіміко-фізичними властивостями [5–8] стали модельним кристалічним матеріалом для перевірки багатьох фундаментальних підходів у матеріалознавстві та й, крім того, мають широке практичне використання як робочі елементи різноманітних пристроїв твердотільної електроніки [8]. Незважаючи на широке вивчення багатьох фізичних властивостей кристалів ніобату літію [5–8], комплексного та одночасного дослідження на тих самих зразках їх діелектричних, акустичних, пружних, п'єзоелектричних, електро-, п'єзо- та акустооптичних характеристик із аналізом просторової анізотропії цих властивостей досі не виконували.

Великий розкид літературних даних стосовно значень п'єзоелектричних та пружних коефіцієнтів [5, 9–12] зумовив виконання на початковому етапі всього комплексу необхідних експериментальних досліджень на зразках чистого ніобату літію, вирощеного в різних лабораторіях світу. Це були зразки українського (НВО “Карат”, м. Львів), російського (м. Богородицьк) та японського виробництв.

Крім того, були здійснені аналогічні дослідження і для кристалів ніобату літію з 7 % домішкою MgO , для яких вперше були виконані всі необхідні акустичні вимірювання. Кристали $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ мають у чотири рази вищу променеву стійкість [13], що робить їх перспективнішими на практиці та забезпечує вищу експлуатаційну витривалість цих кристалів у разі дії значно потужнішого лазерного випромінювання.

Співвідношення для розрахунку

Як відомо [14], кристали ніобату літію належать до точкової групи $3m$ тригональної сингонії. Оскільки кристали ніобату літію з домішками оксиду отримують частковим заміщенням атомів ніобію, то вони також належать до класу симетрії $3m$ [13].

Кристали класу симетрії $3m$ мають шість незалежних пружних коефіцієнтів, чотири незалежних п'єзоелектричних і два незалежні діелектричні константи [11], як показано в пружно-п'єзо-діелектричній матриці:

C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	0	0	0	$-e_{22}$	e_{31}
C_{12}	C_{11}	C_{13}	$-C_{14}$	0	0	0	e_{22}	e_{31}
C_{13}	C_{13}	C_{33}	0	0	0	0	0	e_{33}
C_{14}	$-C_{14}$	0	C_{44}	0	0	0	e_{15}	0
0	0	0	0	C_{44}	C_{14}	e_{15}	0	0
0	0	0	0	C_{14}	C_{66}	$-e_{22}$	0	0
0	0	0	0	e_{15}	$-e_{22}$	e_{11}	0	0
$-e_{22}$	e_{22}	0	e_{15}	0	0	0	e_{11}	0
e_{31}	e_{31}	e_{33}	0	0	0	0	0	e_{33}

де C_{ilm} – компоненти тензора пружної жорсткості, подані в матричному вигляді ($C_{lm} = C_{ilm}$ для $il \leftrightarrow l = 1, \dots, 6$; $km \leftrightarrow m = 1, \dots, 6$ [15]), e_{lmi} , e_{pqk} – компоненти тензора п'єзоелектричного ефекту, подані в матричній формі ($e_{il} = e_{lmi}$ для $mi \leftrightarrow l = 1, \dots, 6$ [15]), e_{rs} – компоненти тензора діелектричної проникливості.

Існують різні методики визначення пружних та п'єзоелектричних коефіцієнтів. Деякі з них ґрунтуються на теорії поширення механічного збурення в анізотропному середовищі, що, як правило, забезпечує акустична хвиля. Відповідна акустична методика і була використана в цій роботі.

Згідно з теорією Крістоффеля рівняння, які описують поширення акустичних хвиль у кристалографічній системі координат, містять набір співвідношень між фазовою швидкістю і напрямними косинусами хвильового вектора акустичної хвилі \mathbf{a} . Три можливі фазові швидкості J , які відповідають хвильовому вектору \mathbf{a} для п'єзоелектричного кристала, визначаються як корені такого кубічного рівняння [9], наведеного в системі СІ:

$$\left| rJ^2 d_{ik} - C_{ilm} n_l n_m - \frac{(e_{lmi} n_l n_m)(e_{pqk} n_p n_q)}{e_0 e_{rs} n_r n_s} \right| = 0 \quad (1)$$

де r – густина матеріалу; n – одиничний вектор напряму поширення акустичної хвилі; d_{ik} – символ Кронекера; e_0 – діелектрична стала.

Це загальне співвідношення, до якого входять як пружні, так і п'єзоелектричні коефіцієнти, конкретизується для випадку точкової групи $3m$ досліджуваних кристалів. Враховуючи останнє та розписавши вираз (1) для необхідних кристалографічних напрямів, отримуємо відомі [9] співвідношення для розрахунку пружних та п'єзоелектричних коефіцієнтів через виміряні значення швидкостей акустичних хвиль J_{ij} (i та j – напрями поляризації та поширення акустичної хвилі відповідно, 4 – діагональний напрям між додатними напрямками, визначеними згідно з стандартами IRE [16], осей X_2 та X_3 , а $\bar{4}$ – йому перпендикулярний):

$$C_{11} = rJ_{1,x}^2, C_{14} = \frac{r(J_{1,4}^2 - J_{\bar{4}}^2)}{2}, C_{44} = rJ_{1,z}^2, C_{66} = rJ_{1,y}^2, C_{12} = C_{11} - 2C_{66}; \quad (2)$$

$$C_{33} = rJ_{3,z}^2 - \frac{e_{33}^2}{e_0 e_{33}},$$

$$C_{13} = 2 \left[\sqrt{b} - \left\{ \frac{(e_{22} + e_{15} + e_{31})(e_{15} + e_{33})}{2e_0(e_{22} + e_{33})} \right\} \right] - C_{14} + C_{44},$$

$$\text{де } b = a_{33} a_{22} - (rJ_{4,4} J_{4,4})^2, \quad a_{33} = \frac{C_{33} + C_{44}}{2} + \frac{(e_{15} + e_{33})^2}{2e_0(e_{22} + e_{33})} i$$

$$a_{22} = \frac{C_{11} - 2C_{14} + C_{44}}{2} + \frac{(e_{22} + e_{15} + e_{31})^2}{2e_0(e_{22} + e_{33})}, \quad (3)$$

$$C_{13} = 2 \left[-\sqrt{g} - \left\{ \frac{(e_{22} - e_{15} - e_{31})(e_{15} + e_{33})}{2e_0(e_{22} + e_{33})} \right\} \right] - C_{14} - C_{44},$$

$$\text{де } g = a_{33} a_{22}' - (rJ_{4,4} J_{4,4}')^2 \quad i \quad a_{22}' = \frac{C_{11} + 2C_{14} + C_{44}}{2} + \frac{(e_{22} - e_{15} - e_{31})^2}{2e_0(e_{22} + e_{33})};$$

$$e_{15}^2 = e_0 e_{11} \frac{r^2 (J_{2,x}^2 J_{3,x}^2 - J_{2,y}^2 J_{3,y}^2) - C_{44} (C_{66} - C_{11})}{C_{66} - C_{11}}, \quad e_{22}^2 = e_0 e_{22} \left[r(J_{2,y}^2 + J_{3,y}^2) - \left(C_{11} + C_{44} + \frac{e_{15}^2}{e_0 e_{22}} \right) \right],$$

$$e_{31} = \frac{e_0 (e_{22} + e_{33}) [r(J_{4,4}^2 + J_{4,4}^2) - r(J_{4,4}^2 + J_{4,4}^2) + 2C_{14}]}{2e_{22}} - e_{15},$$

$$e_{33} = e_{15} \frac{e_{33}}{e_{22}} - \sqrt{\frac{e_{33}}{e_{22}} \left[e_{15}^2 \left(1 + \frac{e_{33}}{e_{22}} \right) - e_0 (2r(J_{4,4}^2 + J_{4,4}^2) - 2a - rJ_{3z}^2 - C_{44}) (e_{22} + e_{33}) \right]}}, \quad (4)$$

$$\text{де } a = \frac{1}{2} (C_{11} - 2C_{14} + C_{44}) + \frac{(e_{22} + e_{15} + e_{31})^2}{2e_0(e_{22} + e_{33})}.$$

Послідовність розрахунків така: спочатку визначаються за формулами (2) коефіцієнти C_{11} , C_{14} , C_{44} і C_{66} визначаються безпосередньо через виміряні значення швидкостей J_{ij} ; далі за формулами (4) знаходять п'єзоелектричні коефіцієнти e_{15} , e_{22} , e_{31} і e_{33} ; а наприкінці розраховують решту пружних коефіцієнтів C_{33} і C_{13} за формулами (3). Це дає можливість одночасно заповнити матрицю як пружних, так і п'єзоелектричних коефіцієнтів на основі виміряних всіх необхідних швидкостей акустичних хвиль. З отриманих формул можна бачити, які швидкості акустичних хвиль необхідно визначити для заповнення матриць пружних та п'єзоелектричних коефіцієнтів.

Опис методики вимірювань

Було використано ультразвуковий метод досліджень, відомий як метод Пападакіса [17,18], суть якого полягає у вимірюванні часу проходження звукової хвилі від п'єзоперетворювача до грані кристала і назад. Чутливість такого методу до змін швидкості становить порядку 10^{-4} – 10^{-5} від величини самої швидкості, а її розрахунок здійснюється за відомим співвідношенням:

$$J = 2Nfl \quad (5)$$

де N – різниця номерів двох суміщених відбитих імпульсів, f – частота синхронізації, l – розмір кристала вздовж напрямку поширення хвилі.

На рис. 1, *a* показано цуг імпульсів, зафіксованих на дисплеї осцилографа під час поширення поперечної акустичної хвилі в кристалі ніобату літію прямого зрізу. Цифри 1, 2 і т. д. на цьому рисунку позначають відбитий імпульс, який пройшов кристал двічі (вперед і назад), імпульс, який

пройшов кристал чотири рази (вперед-назад та вперед-назад), і т. д., відповідно. Нульова стрілка вказує на збуджувальний сигнал від п'єзоперетворювача.

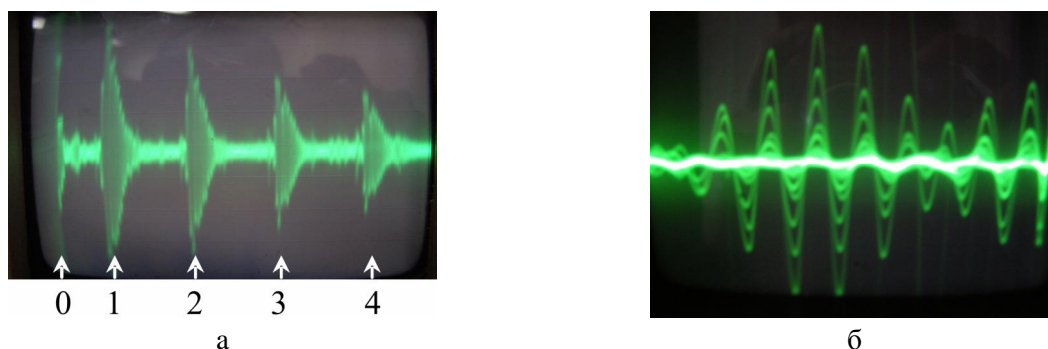


Рис. 1. Цуг відбитих імпульсів (а) та приклад синхронізації імпульсів (б), знятих з дисплея осцилографа, для поперечної акустичної хвилі, яка поширюється в зразку прямого зрізу кристала ніобату літію

Частота слідування імпульсів є оберненою величиною до часу проходження акустичної хвилі через кристал. Високочастотні коливання, які заповнюють загасаючі імпульси, відповідали частоті коливань п'єзоперетворювача, що становила приблизно 10 МГц. На рис. 1, б зображено сигнал під час накладання імпульсів, тобто у разі синхронізації відбитих імпульсів звукової хвилі.

Цим методом були виконані всі акустичні дослідження на кристалах чистого та з домішками MgO ніобату літію.

Результати експериментальних вимірювань

Результати вимірювань швидкостей акустичних хвиль у кристалах чистого ніобату літію українського, російського та японського виробництв і кристалів ніобату літію з домішкою оксиду магнію наведено в табл. 1. Під час розрахунків було використано експериментально виміряні значення густини кристалів чистого ($r = 4,628 \cdot 10^3$ кг/м³) і легованого MgO ($r = 4,638 \cdot 10^3$ кг/м³) ніобату літію та значення компонент тензора діелектричної проникливості $e_{11} = e_{22} = 44$ і $e_{33} = 27,9$, які в межах похибки нашого експерименту не відрізняються для кристалів LiNbO₃ і LiNbO₃:MgO.

Таблиця 1

**Результати вимірювань швидкостей акустичних хвиль
у кристалах LiNbO₃ (українського, російського та японського виробництв) та LiNbO₃:MgO
(L – поздовжня хвиля, S – поперечна, QL – квазіпоздовжня, QS – квазіпоперечна,
 ΔJ – різниця між швидкостями акустичних хвиль українського зразка
LiNbO₃ та LiNbO₃:MgO)**

	Напрямок поляризації	Напрямок поширення хвилі	Мода	Швидкість звуку, м/с					
				LiNbO ₃ український	LiNbO ₃ російський	LiNbO ₃ японський	LiNbO ₃ : MgO	ΔJ	Літ. дані [11]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Прямий зріз	[1 0 0]	[1 0 0]	L	6560	6550	6572	6654	94	-
	[0 1 0]	[1 0 0]	S	4040	4029	4038	4069	29	4050
	[0 0 1]	[1 0 0]	S	4758	4735	4752	4846	88	4800
	[0 0 1]	[0 0 1]	L	7351	7329	7365	7399	48	7330

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	[0 1 0], [1 0 0]	[0 0 1]	2S	3598	3595	3601	3627	29	3570
	[0 1 0]	[0 1 0]	QL	6832	6842	6842	6894	62	6880
	[0 0 1]	[0 1 0]	QS	4463	4449	4453	4543	80	4490
	[1 0 0]	[0 1 0]	S	3951	3942	3949	3997	46	3960
X/45°	[1 0 0]	[0 1 1]	S	3998	3991	3996	4032	34	3960
	[0 1 $\bar{1}$]	[0 1 1]	QS	4003	4001	4009	4039	36	4030
	[0 1 1]	[0 1 1]	QL	7366	7356	7376	7426	60	7380
	[1 0 0]	[0 1 $\bar{1}$]	S	3544	3540	3549	3584	40	3570
	[0 1 1]	[0 1 $\bar{1}$]	QS	4126	4121	4125	4158	32	4200
	[0 1 $\bar{1}$]	[0 1 $\bar{1}$]	QL	7086	7076	7096	7146	60	7010

Точність вимірювання швидкостей акустичних хвиль за цим методом становить 0,1 %. Як зрозуміло з отриманих результатів, значення швидкостей для зразків чистого ніобату літію різного виробництва збігаються між собою із задовільною точністю. Незначну різницю в швидкостях можна пояснити особливостями технологій росту цих кристалів.

У значеннях швидкостей для легованого MgO зразка кристалів LiNbO₃ проявляється певна закономірність, яка очевидна із розрахунків ΔJ – різниці між значеннями швидкостей акустичних хвиль для чистого ніобату літію українського зразка та легованого оксидом магнію. Як зрозуміло з табл. 1, швидкості акустичних хвиль легованого кристала більші від чистого ніобату літію на 29–94 м/с.

Результати розрахунків матриць пружних та п'єзоелектричних коефіцієнтів

На основі визначених необхідних значень швидкостей (див. табл. 1) розраховано та показано в табл. 2 коефіцієнти пружної жорсткості C_{1m} та п'єзоелектричні константи e_{1l} для кристалів ніобату літію різного виробництва та кристалів LiNbO₃:MgO. У цій таблиці також наведені значення п'єзоелектричних модулів d_{lm} , які визначалися за співвідношенням $d_{lm} = e_{1l} \cdot S_{1m}$, де $S_{1m} = C_{1m}^{-1}$ – коефіцієнти пружної податливості, що також наведені в табл. 2. Похибки були розраховані як середньоквадратичні значення від похибок всіх вимірюваних (точність визначення швидкостей акустичних хвиль за нашим методом брали 0,1 %) чи розрахованих попередньо величин, які входять в робочі співвідношення (2)–(4).

Таблиця 2

Результати розрахунку п'єзоелектричних констант e_{1l} і модулів d_{lm} та коефіцієнтів пружної жорсткості C_{1m} і податливості S_{1m} для чистого та легованого домішками MgO кристалів ніобату літію (одиниці вимірювань: $e_{1l} = [\text{Кл/м}^2]$; $d_{lm} = [10^{-12} \text{ Кл/Н}]$; $C_{1m} = [10^9 \text{ Н/м}^2]$; $S_{1m} = [10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}]$)

Коефіцієнти	Результати наших розрахунків				Літературні дані для LiNbO ₃				
	LiNbO ₃ (український)	LiNbO ₃ (російський)	LiNbO ₃ (японський)	LiNbO ₃ : MgO	[5]	[9]	[10]	[11]	[12]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
П'єзоелектричні константи									
e_{15}	3,67±0,03	3,71±0,03	3,63±0,03	3,75±0,03	3,61	3,60	3,7	3,76	3,8
e_{22}	2,38±0,06	2,38±0,06	2,38±0,06	2,32±0,06	2,40	2,52	2,5	2,43	2,5
e_{31}	0,34±0,14	0,29±0,14	0,37±0,14	0,40±0,15	0,28	0,75	0,2	0,23	-
e_{33}	1,6±0,9	1,6±0,9	1,7±1,1	1,1±0,6	1,59	1,67	1,3	1,33	1,7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
П'єзоелектричні модулі									
d_{15}	66,6±0,5	67,9±0,5	65,8 ±0,5	66,6±0,5	65,36	64,3	68	69,2	78
d_{22}	20,1±1,3	19,8±1,3	20,1 ±1,3	19,2±1,2	20,29	20,6	21	20,8	19,2
d_{31}	-0,57±1,85	0,44±1,50	-0,57 ±2,20	0,40±1,34	-1,22	1,15	-1	-0,85	1,3
d_{33}	6,9±4,5	4,2±2,8	7,3 ±5,3	4,1±2,7	8,27	6,53	6	6,0	18,9
Коефіцієнти пружної жорсткості									
C_{11}	199,2±0,4	198,6±0,4	199,9±0,4	205,4±0,4	199	202	203	203,0	199
C_{12}	54,7±0,5	54,7±0,5	55,6±0,5	57,2±0,5	53,8	55,7	53	57,3	-
C_{13}	70±19	69±20	70±23	74±11	71,4	69	75	75,2	74,2
C_{14}	7,9±0,1	7,8±0,1	7,8±0,1	7,9±0,1	7,85	7,48	9	8,5	7,7
C_{33}	240±11	238±12	240±14	249±5	237,2	240	245	242,4	238
C_{44}	59,9±0,1	59,8±0,1	60,0±0,1	60,9±0,1	-	60,7	60	59,5	-
C_{66}	72,2±0,1	71,9±0,1	72,2±0,1	74,1±0,1	-	72,9	75	72,8	-
Коефіцієнти пружної податливості									
S_{11}	5,86±0,38	5,87±0,36	5,84±0,38	5,71±0,35	5,86	5,77	5,7	5,831	5,81
S_{12}	-1,16±0,38	-1,18±0,36	-1,18±0,38	-1,13±0,35	-1,12	-1,77	-	-1,150	-
S_{13}	-1,37±0,71	-1,37±0,41	-1,37±0,86	-1,36±0,41	-1,43	-1,32	-	-1,452	1,5
S_{14}	-0,93±0,02	-0,93±0,02	-0,91±0,02	-0,89±0,02	-0,91	-0,85	-	-1,000	0,91
S_{33}	4,97±0,37	5,00±0,74	4,98±0,48	4,82±0,16	5,08	4,92	5,0	5,026	5,12
S_{44}	16,94±0,03	16,96±0,0	16,90±0,03	16,65±0,03	16,88	16,6	17,	17,10	17,6
S_{66}	14,04±0,02	14,10±0,3	14,13±0,02	13,68±0,02	13,97	13,9	13,	13,96	14

Розраховані нами значення пружних і п'єзоелектричних констант для кристалів чистого ніобату літію добре узгоджуються з даними інших авторів (див. табл. 2), що також свідчить про задовільну точність виконаних вимірювань. Стосовно похибок вимірювань зауважимо, що точність розрахунків пружних констант висока у випадках, коли коефіцієнти розраховують безпосередньо через швидкості акустичних хвиль. Великі похибки розрахунку коефіцієнтів C_{13} , C_{33} , e_{31} і e_{33} можна пояснити нагромадженням похибки, оскільки ці сталі розраховуються через велику кількість інших членів, кожен з яких вносить свою похибку у значення, яке розраховується. Знак коефіцієнта C_{14} визначали, згідно з правилами вибору [16] додатного напрямку кристалофізичних осей X_2 та X_3 . Збіг у межах похибки всіх розрахованих значень коефіцієнтів для кристалів LiNbO_3 різних виробників свідчать про задовільну акустичну якість цих матеріалів, достатню точність наших вимірювань і вказує на можливість виконання подальших досліджень лише на зразках українського виробництва.

З іншого боку, відмінність між коефіцієнтами для кристалів LiNbO_3 та $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$, що в деяких випадках істотно впливало на похибку розрахунку, вимагає всі подальші дослідження і розрахунки виконувати окремо для чистого і легованого оксидом магнію кристалів ніобату літію.

3D-аналіз анізотропії швидкості акустичних хвиль

Було виконано також 3D-аналіз анізотропії швидкостей поширення акустичних хвиль у кристалах чистого ніобату літію українського виробництва та в кристалах з домішками оксиду магнію на основі побудованих поверхонь швидкостей акустичних хвиль. Для цього було вико-

ристано сферичну систему координат (r, θ, φ) відносно осей X_1, X_2, X_3 головної кристалофізичної системи координат. Тоді для будь-якого напрямку з координатами θ, φ розраховували величину швидкості, яка визначалась з рівняння Крістоффеля (1).

На рис. 2 показано просторові поверхні швидкостей акустичних хвиль для кристалів LiNbO_3 . Індекс q визначає поляризацію звукової хвилі: при $q=1$ – поперечна хвиля з меншою швидкістю, $q=2$ – поперечна хвиля з більшою швидкістю, $q=3$ – поздовжня акустична хвиля. Оскільки швидкості акустичних хвиль у кристалах $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ незначно відрізняються, то відмінності в просторовому розподілі вказівних поверхонь швидкостей для цих кристалів візуально не проявляються, тому вони тут не наведені.

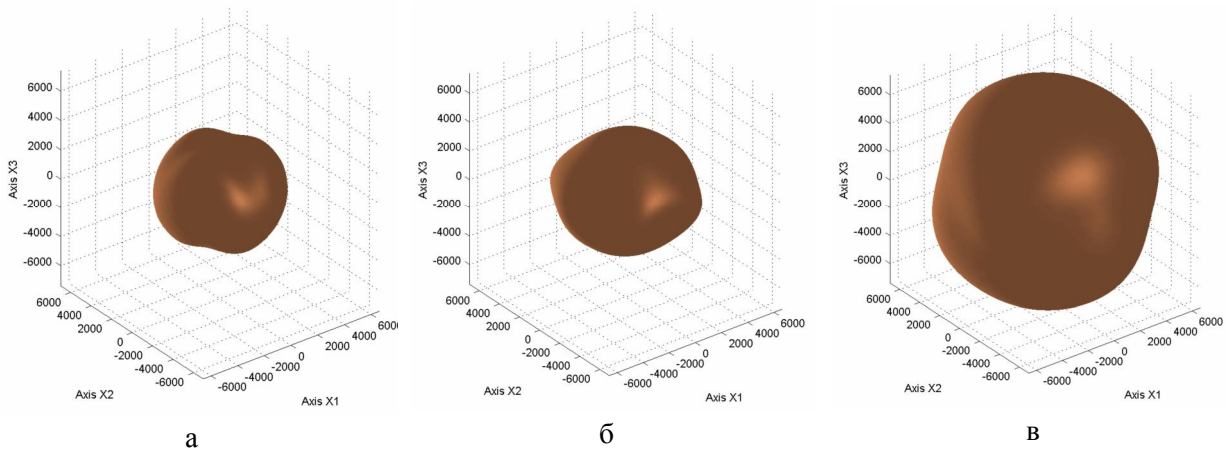


Рис. 2. Поверхні швидкостей акустичних хвиль (в од. м/с) кристалів LiNbO_3 : а) $q=1$; б) $q=2$; в) $q=3$

Враховуючи просторовий аналіз швидкостей поширення акустичних хвиль вищезгаданих кристалів, були визначені напрями, за яких швидкості акустичних хвиль мають максимальні та мінімальні значення для трьох можливих поляризацій звукової хвилі. Результати таких розрахунків наведені в табл. 3 та 4 для кристалів LiNbO_3 та $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$, відповідно.

Таблиця 3

Екстремальні значення швидкостей і їх кутові параметри для кристалів LiNbO_3

Поляризація хвилі	Мінімальне			Максимальне		
	θ , град	φ , град	J , м/с	θ , град	φ , град	J , м/с
$q=1$	25,9	-90	3480	64,1	90	4055
$q=2$	0	-	3598	90	0	4779
$q=3$	90	0	6561	51,8	90	7372

Таблиця 4

Екстремальні значення швидкостей і їх кутові параметри для кристалів $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$

Поляризація хвилі	Мінімальне			Максимальне		
	θ , град	φ , град	J , м/с	θ , град	φ , град	J , м/с
$q=1$	25,0	-90	3512	65,0	90	4096
$q=2$	0,2	0,4	3624	90	0	4816
$q=3$	90	0	6655	54,5	90	7426

З порівняння табл. 3 і 4 можна зробити висновок, що екстремальні значення швидкостей акустичних хвиль у кристалах $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ є дещо вищі на величину 25–95 м/с, ніж у кристалах LiNbO_3 . Відхилення куткових параметрів для екстремальних величин кристалів $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ порівняно з LiNbO_3 є незначне і становить максимально $2,7^\circ$.

Висновки

У цій статті досліджено прямі та $X/45^\circ$ зрізи кристалів чистого ніобату літію українського, російського та японського виробництва та ніобату літію, легованого 7 % MgO . Для цих кристалів виміряно всі швидкості акустичних хвиль, необхідні для заповнення матриць пружних та п'єзоелектричних коефіцієнтів. На основі цих вимірювань визначено всі пружні та п'єзоелектричні коефіцієнти для досліджених кристалів, які, у випадку чистого LiNbO_3 , добре узгоджуються з літературними даними. Враховуючи порівняльний аналіз значень швидкостей акустичних хвиль, встановлено, що швидкість у кристалах $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ на 29–94 м/с вища, ніж у кристалах чистого ніобату літію.

Було виконано також 3D-аналіз анізотропії швидкостей поширення трьох акустичних хвиль у кристалах чистого ніобату літію та в кристалах з домішками оксиду магнію на основі побудованих просторових поверхонь швидкостей акустичних хвиль. Встановлено, що геометрія екстремальних значень швидкостей кристалів $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ відрізняється в межах $0,9\text{--}2,7^\circ$ від відповідної геометрії кристалів чистого ніобату літію.

Ця частина роботи започатковує комплекс експериментальних та розрахункових робіт, спрямованих в остаточному випадку на вивчення просторової анізотропії електро-, п'єзо- та акустооптичних властивостей кристалів LiNbO_3 і $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ з метою оптимізації робочих параметрів та підвищення ефективності використання цих кристалів як робочих елементів відповідних пристроїв, що працюють на принципі електро-, п'єзо- чи акустооптичної модуляції світла.

1. Блистанов А.А. Кристаллы квантовой и нелинейной оптики. – М.: МИСИС, 2000. – 431 с.
2. Nikogosyan D.N. Properties of optical and laser-related materials. A handbook. – Chichester-New York-Weinheim-Brisbane-Singapore-Toronto: John Wiley & Sons, 1997. – 594 p.
3. Гурзадян Г.Г., Дмитриев В.Г., Никогосян Д.Н. Нелинейно-оптические кристаллы. Свойства и применение в квантовой электронике. Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 159 с.
4. Андрущак А.С. // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2008 (див. Частина I в цьому номері).
5. Даньков И.А., Токарев Е.Ф., Кудряшов Г.В., Белобаев К.Г. // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. – 1983. – Т. 19, № 7. – С. 1165–1171.
6. Киселев Д.Ф., Фирсова М.М. // Физ. тверд. тела. – 1973. – Т. 15, № 1. – С. 279–281.
7. Chapter 1. Structure, Stoichiometry and Phase Transitions. Ed. by K.K. Wong. – London: IEE- INSPEC, 2002. – 22 p.
8. Кузьминов Ю.С. Ниобат и танталат лития. Материалы для нелинейной оптики. – М.: Наука, 1975. – 224 с.
9. Королюк А.П., Мацаков Л.Я., Васильченко В.В. // Кристаллография. – 1970. – Т. 15, № 5. – С. 1028–1032.
10. Warner A.W., Onoe M., Coquin G.A. // J. Acoust. Soc. Amer. – 1967. – Vol. 42, No 6. – С. 1223–1231.
11. Smith R.T., Welsh F.S. // J. Appl. Phys. – 1971. – Vol. 42, No 6. – С. 2219–2230.
12. Чкалова В.В., Бондаренко В.С., Фокина Г.О., Стрижевская Ф.Н. // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1971. – Т. 35, № 9. – С. 1886–1889.
13. Sugak D.Yu., Matkovskii A.O., Solskii I.M., et.al. // Cryst. Res. Technol. – 1997. – Vol. 32, No 6. – P. 805–808.
14. Акустические кристаллы / Под ред. М.П. Шаскольской. – М.: Наука, 1982. – 632 с.
15. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики. – М.: Наука, 1979. – 640 с.
16. Standarts on Piezoelectric Crystals // Proc. IRE. – 1949. – Vol. 37. – P. 1378–1395.
17. А. с. СССР 1608432. / О.Г. Влох, О.М. Мокрый, А.В. Кутык. – 1990.
18. Papadakis E.P. // J. Acoust. Am. – 1967. – Vol. 42, No 5. – P. 1045–1051.