

ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АКУСТИЧНИХ ПРИСТРОЇВ В ОПТИЧНІЙ ТРАНСПОРТНІЙ МЕРЕЖІ ЗА ДОПОМОГОЮ 3D-АНАЛІЗУ КОЕФІЦІЄНТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ

© Кайдан М. В., 2016

Досліджено коефіцієнт електромеханічного зв'язку. Описано модель дослідження 3D-аналізу просторової анізотропії акустичних параметрів. Подано алгоритм побудови вказівної поверхні коефіцієнта електромеханічного зв'язку на основі рівнянь Гріна-Крістофеля. Вперше побудовано вказівні поверхні коефіцієнта електромеханічного зв'язку. Визначено максимальні значення для побудованих поверхонь. Для поперечної поляризації визначено напрямки, які дають змогу на 3 % енергоефективніше використовувати п'єзоперетворювачі на основі кристалів LiNbO_3 . Показана необхідність подальшого проведення досліджень просторового розподілу коефіцієнта електромеханічного зв'язку.

Ключові слова: коефіцієнт електромеханічного зв'язку, вказівна поверхня, поляризація акустичної хвилі, енергоефективність.

М. Kaidan

Lviv Polytechnic National University

DETERMINATION OF ENERGY EFFICIENCY ACOUSTIC DEVICES IN THE OPTICAL TRANSPORT NETWORK USING 3D-ANALYSIS OF ELECTROMECHANICAL COUPLING

© Kaidan M., 2016

In this paper we investigate electromechanical coupling coefficient. We show the investigation importance of spatial distribution coefficient of electromechanical coupling. This parameter characterizes the energy efficiency of piezoelectric transducer that in turn affects the acousto-optic devices in optical transport networks. We present basic definitions and types of electromechanical coupling coefficient. We also show the formula for determining the coefficient of electromechanical coupling that facilitates study of the spatial distribution of this coefficient.

We present a research model of spatial anisotropy for acoustic parameters and propose an algorithm for constructing the indicative surface of electromechanical coupling coefficients for a particular direction of the radius vector. The radius vector coincides with the direction of acoustic waves propagation by using the equation Green-Christoffel.

We show the adequacy of the results by analyzing previous studies conducted on the plane X_2X_3 in LiNbO_3 crystals. The indicative surface coefficients of electromechanical coupling have been constructed for the first time. This surfaces have been analyzed and maximum values have been defined. The indicative surfaces of electromechanical coupling coefficients do not exhibit a totally rotational symmetry with the axis of infinity order, what appears to be also consistent with the German's theorem. According to the principle of Curie-Neumann, the indicative surface is invariant here with respect to the symmetry operations of the point group $3m$ that describe the symmetry of the crystal structure of LiNbO_3 crystals.

The directions of efficient use of LiNbO_3 crystal for acoustic device were determined. For transverse polarization directions of efficient 3 % utilization of piezoelectric transducer

crystals LiNbO₃ were determined. For longitudinal polarization the directions that could improve energy efficiency of acoustic devices were not found.

We stress that further studies of the spatial distribution coefficient of electromechanical coupling to other piezoelectric materials should be conducted. We have concluded that the values of the sample orientation are different from the direction of the main planes of the sample and symmetry planes.

Key words: electromechanical coupling, the indicative surface, polarization of acoustic wave, energy efficiency.

Вступ

Сьогодні телекомунікаційне обладнання споживає приблизно 5 % електроенергії із загальної виробленої електричної потужності. Попит на телекомунікаційні послуги зростає і надалі, що призводить до зростання цього показника. Одним із ключовим параметрів у галузі енергетики телекомунікацій є параметр енергоспоживання. Однак власне енергетичне споживання мереж є важливішою проблемою порівняно з необхідною пропускну здатністю, оскільки саме енергоспоживання є фактором, що обмежує її зростання [1].

У [2, 3] показано, що сьогодні найефективніше в оптичній транспортній мережі використовувати акустооптичний комутатор. У разі використання акустооптичних комутаторів проблема маштабованості та втрат вирішується доволі просто, оскільки для забезпечення комутатора ємністю $n\lambda$ не потрібно створювати багатоланкових структур [2]. Швидкість комутації для цього пристрою становить приблизно 10 мкс, що гірше на порядок від електрооптичних комутаторів, однак достатньо відносно параметра затримки. Малі втрати, достатня маштабованість, відносно проста система керування надають переваги акустооптичним комутаторам з погляду енергоспоживання і мережі загалом. Електрооптичні комутатори порівняно із акустооптичними менш маштабовані, оскільки реалізуються на системі 2×2 [4].

Однією з важливих частин акустичного чи акустооптичного пристроїв є п'єзоперетворювач. П'єзоперетворювач – це пристрій, який за допомогою п'єзоелектричного ефекту перетворює механічну енергію на електричну і навпаки [5, 6]. Важливим параметром, що характеризує енергоефективність таких пристроїв, є коефіцієнт електромагнітного зв'язку. Єдиною можливістю визначення ефективного зрізу матеріалів для п'єзоперетворювача є 3D-аналіз просторової анізотропії [7, 8], який для коефіцієнта електромагнітного зв'язку обмежувався лише дослідженнями перерізів на головних площинах [9, 10]. Для апробації вибрано кристали ніобату літію, оскільки їх широко використовують як матеріали для п'єзоперетворювачів для акустооптичних пристроїв [9].

Отже, метою цієї роботи є визначення за допомогою 3D-аналізу ефективного зрізу кристалів ніобату літію для п'єзоперетворювача.

1. Коефіцієнт електромеханічного зв'язку

Коефіцієнт електромагнітного зв'язку виражає ступінь зв'язку між електричними і механічними властивостями п'єзоелектрика, характеризує здатність матеріалу перетворювати електричну енергію на механічну і навпаки [9], і його можна подати у вигляді

$$\kappa_m^2 = P_a / P_e, \quad (1)$$

де P_a – потужність акустичних коливань, що розвиває п'єзоелектрик у результаті виникнення п'єзоэффекту; P_e – електрична потужність, споживана п'єзоелектриком від джерела, що збуджує напругу.

В [11] коефіцієнт електромагнітного зв'язку визначають

$$K = \sqrt{\frac{W_{el}}{R_{mex}}}, \quad (2)$$

де $R_{mex} = W_{el} + W_{np}$ – механічна енергія; W_{el} – електрична енергія; W_{np} – пружна енергія.

В [12] коефіцієнт електромеханічного зв'язку визначається як відношення густини взаємної пружної та електричної енергій (або енергії електромеханічної взаємодії) U_m до середнього геометричного значення густини пружної U_l та електричної енергії U_d :

$$K = \frac{U_m}{\sqrt{U_l U_d}}. \quad (3)$$

Один з можливих варіантів, що дає змогу визначити коефіцієнт електромагнітного зв'язку, визначають за рахунок швидкостей [13]

$$K = \left(\frac{v^2}{v_o^2} - 1 \right)^{1/2}, \quad (4)$$

де v_o та v – швидкість звуку для заданого кристалографічного напрямку без врахування та з врахуванням п'єзоелектричного зв'язку, відповідно.

Швидкість звуку без урахуванням п'єзоелектричного зв'язку знаходять з рівняння Гріна–Крістофеля [9, 11, 14]:

$$\det |\rho v_o^2 \delta_{ik} - c_{ilkm} a_l a_m| = 0. \quad (5)$$

Швидкість звуку з врахуванням п'єзоелектричного зв'язку знаходять з рівняння Гріна–Крістофеля [7, 9]:

$$\det \left| \rho v^2 \delta_{ik} - c_{ilkm} a_l a_m - \frac{(e_{lmi} a_l a_m)(e_{pqk} a_p a_q)}{e_{rs} a_r a_s} \right| = 0, \quad (6)$$

де ρ – густина кристала; δ_{ik} – символ Кронекера; e_{lmi} – п'єзоелектричний тензор; ϵ_{rs} – тензор діелектричної проникності; a – одиничний вектор вздовж напрямку поширення звуку; C_{ijkl} – тензор пружної жорсткості.

Рівняння (5) і (6) має три розв'язки, пов'язані зі швидкостями трьох хвиль, кожна з яких має власний вектор $f(q)$ [11, 14]. Тут індекс q визначає, яка з трьох поляризацій акустичної хвилі розглядається [7, 8]: якщо $q = 1$ – поперечна хвиля з меншою швидкістю; $q=2$ – поперечна хвиля з більшою швидкістю; $q = 3$ – поздовжня акустична хвиля. Вектори $f(1)$, $f(2)$ і $f(3)$ взаємно перпендикулярні. Кут відхилення потоку енергії цих хвиль γ визначається згідно з [11,14]:

$$\cos \gamma = \rho V_q^2 (a_i (f_i f_k - c_{ilkm}) (c_{mrst} f_r f_s) a_t)^{-1/2}. \quad (7)$$

В [9] коефіцієнт електромеханічного зв'язку в загальному випадку записують

$$K = \frac{e_{ia}}{\sqrt{e_{jg} C_{ba} + e_{ig}^2}}. \quad (8)$$

У довідниках [15] з урахуванням (8) розрізняють коефіцієнти електромеханічного зв'язку:

- K_{33} – коефіцієнт зв'язку, що відповідає основній резонансній моді коливання вздовж полярного вектора по довжині циліндра з електродами, нанесеними на його торцевих поверхнях. Зазвичай цей коефіцієнт визначають для більшості кристалів як

$$K_{33} = \frac{e_{33}}{\sqrt{e_{33} C_{33} + e_{33}^2}}.$$

- K_{15} – коефіцієнт зв'язку, що відповідає резонансу коливання по товщині пластини, електроди на найбільших поверхнях. Полярний вектор лежить у площині пластини.

$$K_{15} = \frac{e_{15}}{\sqrt{e_{11} C_{44} + e_{33}^2}}$$

- K_{31} – коефіцієнт зв'язку, що відповідає резонансу коливання по довжині пластини, електроди на найбільших поверхнях. Полярний вектор перпендикулярний до найбільших площин.

$$K_{31} = \frac{e_{31}}{\sqrt{e_{33} C_{11} + e_{31}^2}}.$$

2. Модель дослідження 3D-аналізу просторової анізотропії акустичних параметрів

Для дослідження просторової анізотропії різних параметрів, що описуються тензорами, вищими, ніж другого роду, здійснюється побудова вказівних поверхонь [16]. Вказівна поверхня – це геометричне місце кінців радіуса-вектора, довжина якого дорівнює значенню компоненти у вибраному масштабі в розглядуваному напрямку [17].

У загальному випадку для $st...v$ – компоненти тензора $T_{ef...h}$ рівняння вказівної поверхні записують у вигляді [16]:

$$T'_{st...v} = \alpha_{se}\alpha_{tf}\dots\alpha_{vh}T_{ef...h}, \quad (9)$$

де $\alpha_{se}, \alpha_{tf}, \dots, \alpha_{vh}$ – напрямні косинуси, які пов'язують головну систему координат ($X_1, X_2, X_3 \dots$); з новою рухомою системою координат $X'_1 X'_2 X'_3 \dots$. У кристалофізиці розглядають тривимірну систему координат, тому в (9) індекси $se...vh$ набувають значення 1, 2 чи 3 і у цій роботі відповідають осям систем координат $X_1 X_2 X_3$ або $X'_1 X'_2 X'_3$; де $T_{pcl...}$ – коефіцієнти тензора, записаного в кристалофізичній системі координат.

Для побудови вказівних поверхонь, потрібно знати, як змінюються напрямні косинуси. Одним з важливих і визначальним є $\mathbf{r}$ – радіус-вектор вказівної поверхні, який приймемо паралельним до напрямку поширення акустичної хвилі.

Напрямні косинуси радіус-вектора $\mathbf{r}$ через сферичні координати φ і θ згідно з рис. 1 визначають за допомогою співвідношення [7, 8]:

$$\alpha_{r1} = \sin\theta \cos\varphi, \quad \alpha_{r2} = \sin\theta \sin\varphi, \quad \alpha_{r3} = \cos\theta. \quad (10)$$

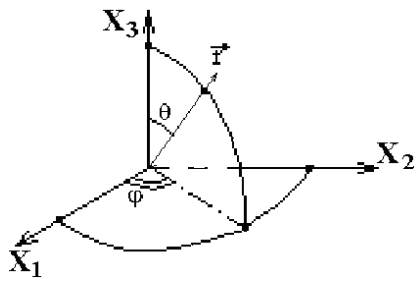


Рис. 1. Геометричне розміщення радіус-вектора $\mathbf{r}$

Як показує аналіз співвідношень для визначення коефіцієнта електромеханічного зв'язку (1)–(4) та (8), найпростіша для 3D-аналізу формула (4). Алгоритм визначення просторового розподілу порівняно простий. Для довільного напрямку визначаються за допомогою рівнянь (5) та (6) швидкості акустичних хвиль без врахування та з урахуванням п'єзоелектричного зв'язку. Отримані значення підставляємо в (4) і отримуємо коефіцієнт електромеханічного зв'язку у вибраному напрямку. Необхідно зазначити, що (4) є наближеною формулою, а і справедливе, коли у K малі значення,

інакше в деяких напрямках поширення акустичної хвилі можна отримати $K > 1$, що з огляду на означення і (2) принципово неможливо.

Враховуючи (1)–(4) та (8) і рівняння (5) та (6), можна отримати загальне співвідношення визначення коефіцієнта електромеханічного зв'язку у тензорному вигляді

$$K = \sqrt{\frac{(e_{lmi} a_l a_m f_i)(e_{pqk} a_p a_q f_k)}{(C_{ilk m} a_l a_m f_i f_k)(e_{rs} a_r a_s) + (e_{lmi} a_l a_m f_i)(e_{pqk} a_p a_q f_k)}}. \quad (11)$$

Легко побачити, що останнє співвідношення можна спростити і звести до матричного вигляду (8). Зауважимо про особливості різних переходів з тензорного вигляду у матричний, і навпаки, для розглянутих параметрів [11].

Отже, користуючись (11), можна побудувати вказівну поверхню коефіцієнта електромеханічного зв'язку. Алгоритм побудови вказівної поверхні для заданого напрямку радіуса-вектора, який збігається з напрямком поширення акустичної хвилі, такий:

1. За допомогою рівняння Гріна–Крістофеля (6) визначаємо три швидкості акустичних хвиль. Найменша відповідає $q=1$, найбільша зазвичай $q=3$.

2. Підставляючи отримані значення із швидкостей в (6), визначаємо напрям кожної поляризації $\mathbf{f}(q)$.

3. Підставляємо значення векторів $\mathbf{r} \parallel \mathbf{a}$ з (10) та $\mathbf{f}$, отримане в попередньому пункті, в (11).

3. Побудова вказівних поверхонь коефіцієнта електромеханічного зв'язку для кристалів LiNbO₃

Для проведення досліджень для кристалів LiNbO₃ використано параметри, отримані в роботі [7]: коефіцієнти пружної жорсткості $C_{11}=199,2$, $C_{12}=54,7$, $C_{13}=70$, $C_{14}=7,9$, $C_{33}=240$, $C_{44}=59,9$ ГПа; значення компонент тензора діелектричної проникності $\epsilon_{11}=\epsilon_{22}=44$ і $\epsilon_{33}=27,9$, п'єзоелектричні константи $e_{15}=3,67$, $e_{22}=2,38$, $e_{31}=0,34$, $e_{33}=1,6$ Кл/м² і значення густини $\rho=4,628 \cdot 10^3$ кг/м³.

Отже, користуючись (11), отримали графік залежності (рис. 2), який узгоджується з [9, 10]. Представлений рис. 2 має велике практичне значення і використовується для визначення напрямків зрізів для п'єзоперетворювача на основі кристалів LiNbO₃. Отже, алгоритм побудови вказівної поверхні адекватний стосовно отриманих раніше результатів. Важливо зауважити: вихідні параметри, використані в цих дослідженнях і в [10], різні. Порівнюючи з [9, 10], аналогічно спостерігаємо, що коефіцієнт електромеханічного зв'язку для однієї поперечної акустичної поляризації завжди дорівнює нулю і відповідає напрямку поляризації вздовж X_1 (називають просто – поперечна поляризація, для якої кут зсуву дорівнює нулю). На рис. 2 дві криві стосуються квазіпоздовжньої та квазіпоперечної поляризацій (кут зсуву не дорівнює нулю). Як зазначено в наших дослідженнях, для 3D-аналізу поперечні акустичні поляризації (в довільних напрямках вони здебільшого квазіпоперечні) розрізняються за швидкістю поширення. З рис. 2 спостерігаємо, що від 30° до 39° і від 63° до 90° від осі X_2 квазіпоперечна хвиля відповідає випадку $q=1$, тобто поперечній хвилі з меншою швидкістю, а для всіх інших випадків паруються акустична хвиля з поляризацією $q=2$.

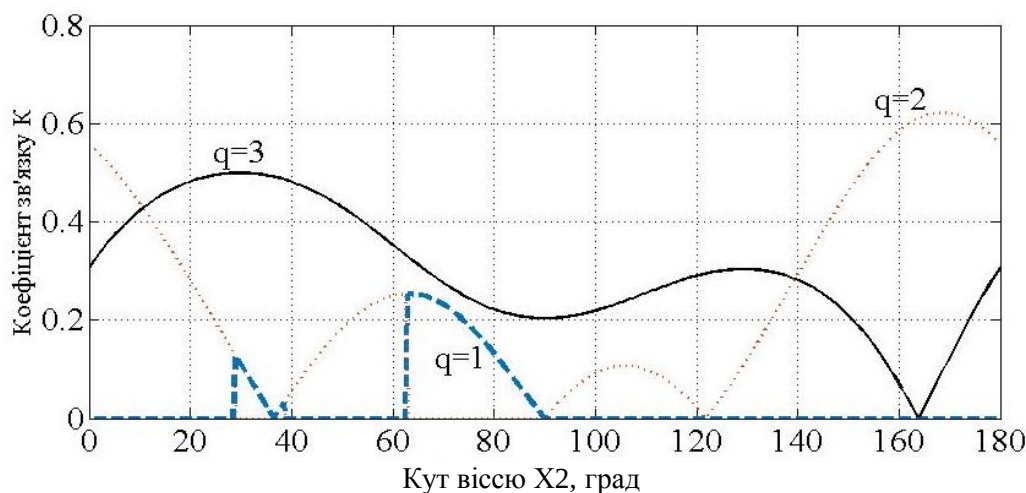


Рис. 2. Залежність коефіцієнта електромеханічного зв'язку для різних акустичних поляризацій від напрямку поширення акустичної хвилі в площині X_2X_3 кристалів LiNbO₃

Користуючись цим алгоритмом, побудували вказівні поверхні коефіцієнта електромеханічного зв'язку для різних акустичних поляризацій (рис. 3). Аналізуючи рис. 3, спостерігаємо у поверхнях для поперечних поляризацій різкі зміни значень, що можна пояснити наявністю акустичних осей, які також легко побачити і на рис. 2. З рис. 3, з бачимо, що коефіцієнт електромеханічного зв'язку для $q=1$ є значно меншим, ніж для $q=2$ і $q=3$, які між собою співмірні. Для побудованих вказівних поверхонь знайдено максимальні значення, які подано в таблиці, де вказано напрямки поширення акустичних хвиль та відповідні поляризації.

Максимальні значення коефіцієнта електромеханічного зв'язку кристалів LiNbO₃

Поляризація акустичної хвилі	Напрямок вектора a		Напрямок вектора f		K
	θ , град	φ , град	θ , град	φ , град	
$q=1$	27	30, 150, 270	66	-90, 30, 150	0.25
	153	90, 210, 330	114	-30, 90, 210	
$q=2$	90	0, 120, 240	37.6	-91, 29, 159	0.68
$q=3$	60	90, 210, 330	55	90, 210, 330	0.5
	120	30, 150, 270	125	30, 150, 270	

З рис. 3 та таблиці бачимо, що представлені вказівні поверхні не є фігурами обертання, що узгоджується з теоремою Германа [18]. Вони також зберігають, згідно з принципом Кюрі–Неймана [5], основні елементи симетрії, тобто вісь симетрії третього порядку і три перпендикулярні до малюнка площини симетрії, що характерно для кристалів класу симетрії $3m$. Зауважимо, що екстремальні значення у спостерігаються, коли кут $\varphi=30^\circ$ m , де $m \in \mathbb{Z}$ (див. таблицю), що характерно для кристалів LiNbO_3 [7, 8].

Напрямки, в яких коефіцієнт електромеханічного зв'язку має ненульові значення, лише для однієї акустичної поляризації мають особливе практичне значення, оскільки в цих напрямках можливе збудження лише однієї акустичної поляризації п'єзоперетворювачем. На практиці коефіцієнт електромеханічного зв'язку для інших акустичних поляризацій може бути $K>0$, але доволі малим $K<0,01$.

Проводячи такі дослідження виявили, що напрями поширення акустичних хвиль при $K>0.1$ для $q=1$ і водночас при $K<0,01$ для $q=2$ і $q=3$ у кристалах LiNbO_3 не спостерігаються взагалі. Для поляризацій $q=2$ і $q=3$ аналогічні випадки спостерігаються, причому найбільша кількість таких зрізів для поздовжньої хвилі.

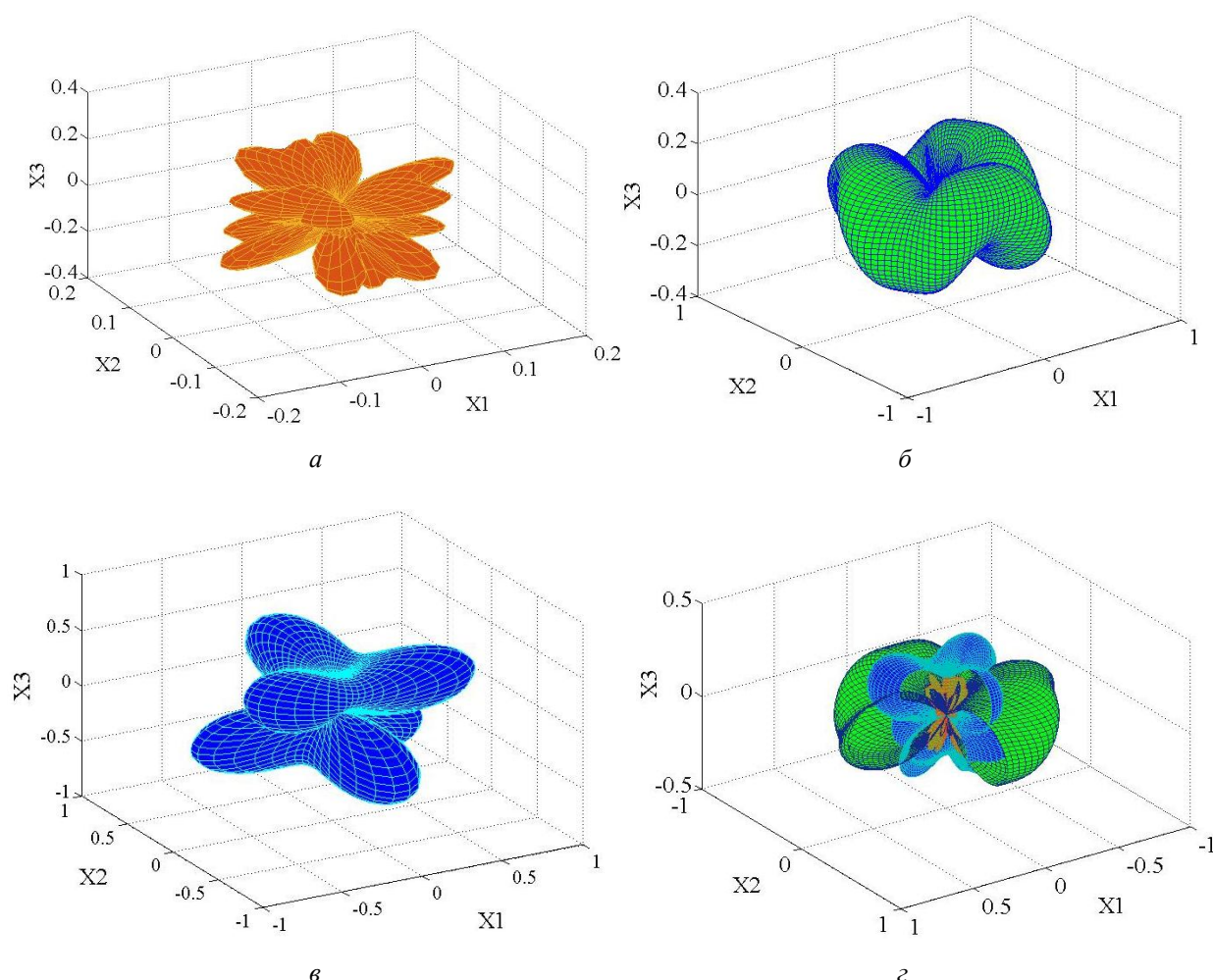


Рис. 3. Вказівні поверхні коефіцієнта електромеханічного зв'язку для кристалів LiNbO_3 :
а – $q=1$; б – $q=2$; в – $q=3$; г – $q=1, 2$ і 3 з частковим перерізом

Для поздовжньої поляризації найефективнішим є напрям, представлений на рис. 2, який і використовується [9], коли $K=0,49$. У сферичній системі координат згідно з принципом Кюрі–Неймана відповідає напрямкам $\theta=54^\circ$, коли $\varphi=0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ і $\theta=126^\circ$, коли $\varphi=60^\circ, 180^\circ, 300^\circ$. Для поперечної хвилі, згідно з рис. 2, використовують напрямки, коли $K=0,62$ [9]. З результатів інших досліджень визначено, що максимальне значення коефіцієнта електромеханічного зв'язку за

поперечної поляризації, коли для інших поляризацій $K < 0.01$ становить 0.65. Напряв поширення акустичної хвилі відповідає $\theta = 79^\circ$, коли $\varphi = 44^\circ$ і 76° ; 164° і 196° ; 284° і 316° , а також $\theta = 101^\circ$, коли -16° і 16° ; 104° і 146° ; 224° і 356° . Легко зауважити, що кут φ відхиляється від напрямів 60° , 180° , 300° , якщо $\theta = 79^\circ$ і від 0° , 120° , 240° , якщо $\theta = 101^\circ$ на 16° .

Останні результати показують можливість енергоефективніше на 3 % використовувати п'єзоперетворювач на основі кристалів LiNbO_3 для отримання поперечних акустичних хвиль. Крім того, одержані значення орієнтації зразка, що переконують у доцільності проведення 3D-аналізу коефіцієнта електромеханічного зв'язку і для інших п'єзоелектричних матеріалів.

Здійснено дослідження з метою визначення енергоефективності акустооптичного комутатора для заданих значень коефіцієнта електромеханічного зв'язку – $K=0,62$ і $K=0,65$. За основу взято формулу (1). Відповідно до теорії акустооптики, для досягнення акустооптичної взаємодії в кристалі необхідна певна акустична потужність P_a [19]. Тобто у разі зміни коефіцієнта електромеханічного зв'язку K (див. формулу (1)) акустична потужність залишається константою ($P_a = \text{const}$), а змінюється електрична потужність, споживана п'єзоелектриком від джерела P_v (оскільки цей коефіцієнт безпосередньо впливає на ефективність роботи п'єзоперетворювача). Відповідно на основі цих тверджень з формули (1) отримуємо, що за двох значень коефіцієнта електромеханічного зв'язку 0,62 і 0,65 відношення між електричними потужностями P_v становить $P_{e1} = 1,098 \cdot P_{e2}$, де P_{e1} при $K=0,62$, а P_{e2} при $K=0,65$. Звідси, очевидно, підтверджується, що збільшення коефіцієнта електромеханічного зв'язку зменшує необхідну кількість електроенергії для роботи п'єзоперетворювача.

У попередній роботі [20] розроблено програмну модель акустооптичного комутатора для визначення його енергоефективності. На основі вхідних даних, наведених у цій роботі (параметрів процесора, кристала, генератора та п'єзоперетворювача), здійснюємо моделювання роботи акустооптичного комутатора за двох значень коефіцієнта електромеханічного зв'язку. Результати моделювання показують, що з переходом від $K=0,62$ до знайденого значення $K=0,65$ відбувається зменшення енергетичного споживання акустооптичного комутатора на 5,17 %.

Висновки

У роботі досліджується просторовий розподіл коефіцієнта електромеханічного зв'язку, що дає змогу енергоефективніше використовувати акустооптичні пристрої в оптичній транспортній мережі. Здійснено аналіз та класифікацію коефіцієнтів електромеханічного зв'язку.

Представлено модель дослідження просторової анізотропії акустичних параметрів. Показано адекватність отриманих результатів за допомогою аналізу проведених раніше досліджень на площині X_2X_3 на основі кристалів LiNbO_3 .

Вперше побудовано вказівні поверхні коефіцієнта електромеханічного зв'язку. Визначено максимальні значення для побудованих поверхонь та напрями енергоефективного використання кристалів LiNbO_3 для акустичних пристроїв.

Встановлено можливість енергоефективніше на 3 % використовувати п'єзоперетворювач на основі кристалів LiNbO_3 для отримання поперечної поляризації. З'ясовано доцільність подальших досліджень просторового розподілу для коефіцієнта електромеханічного зв'язку для інших п'єзоелектричних матеріалів.

1. Musumeci F., Vismara F., Grkovic V., Tornatore M., Pattavina A. On the Energy Efficiency of Optical Transport with Time Driven Switching IEEE international Conference (ICC'2011). P. 1–5.
2. Кайдан М., Андрущак В. Модель розрахунку енергоефективності для електро- та акустооптичних пристроїв у оптичних транспортних мережах // I Міжнародна науково-практична конференція “Нові досягнення в галузі інформаційно-комунікаційних технологій – 2015” 29 жовтня – 1 листопада, 2015. Львів, Україна. С. 171–174.
3. Kaidan M., Andrushchak V., Pitsyk M. Calculation model of energy efficiency in optical transport networks // 2015 second international scientific-practical conference “Problem of infocommunications science and technology (PIC S&T'2015)” October 13–15. 2015. Kharkiv, Ukraine, P. 167–170.
4. Слепов Н. Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных

сетей связи. Москва: Радио и связь, 2000. 468 с. 5. Nye J. F. *Physical Properties of Crystals*, Clarendon, Oxford. 1985. 325 p. 6. Богуш М. В. Пьезоэлектрическое приборостроение: сб. в 3 т. Ростов-на-Дону: Издательство СКНЦ ВШ, 2006. Т. 3. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. 346 с. 7. Лаба Г. П., Юркевич О. В., Карбовник И. Д., Кайдан М. В., Думич С. С., Сольский И. М., Андрущак А. С. Просторова анізотропія електро-, п'єзо- та акустооптичного ефектів в кристалічних матеріалах твердотільної електроніки. Апробація на прикладі кристалів LiNbO_3 та $\text{LiNbO}_3\text{:MgO}$. Частина II. Заповнення матриць пружних та п'єзоелектричних коефіцієнтів кристалів LiNbO_3 та $\text{LiNbO}_3\text{:MgO}$ // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Електроніка". 2008. № 619. С. 172–180. 8. 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*. 2010. V.108. P.103118(1–5). 9. Dieulesaint E., Royer D. *Elastic waves in solids: applications to signal processing*. 1980. Chichester, J. Wiley. 10. Warner A. W., Onoe M., Coquin G. A. Determination of elastic and piezoelectric constants for crystals in class (3 m) // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1967. Vol. 42, Issue 6. P. 1223–1231. 11. Сиротин Ю. И., Шаскольская М. П. Основы кристаллофизики. Москва: Наука, 1979. 640 с. 12. *Physical acoustics-principles and methods* edited by Warren P. Mason: volume I, Parts A and B, Methods and Devices, New York: Academic Press Inc. Cloth. volume IA 1964. 515 p. 13. Королюк А. П., Мацаков Л. Я., Васильченко В. В. Определение упругих и пьезокристаллических постоянных монокристаллов ниобата лития // *Кристаллография*. 1970. Т. 15, № 5. С. 1028–1032. 14. Балакиши В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. Москва: Радио и связь, 1985. 280 с. 15. *Акустические кристаллы: справочник* / А. А. Блистанов, В. С. Бондаренко, В. В. Чкалова и др.; под ред. М. П. Шаскольской. Москва: Наука. 1982. 632 с. 16. Shuvalov L. A., Urusovskaya A. A., Zheludev I. S. *Physical properties of crystals*, vol. 4. Berlin: Springer; 1988. P. 583. 17. Бутабаев Ш. М., Смыслов И. И. Указательные поверхности продольных компонент некоторых тензоров четвертого ранга // *Кристаллография*. 1971. Т. 4, № 4. С. 796–800. 18. Герман В. Л. Некоторые теоремы об анизотропных средах // Докл. АН СССР. 1945. Т. 48, № 2. С. 95–98. 19. Бондаренко В. С., Зоренко В. П., Чкалова В. В. Акустооптические модуляторы света. Москва: Радио и связь. 1988. С. 136. 20. Кайдан М. В., Андрущак В. С. Визначення параметра енергоефективності оптичних транспортних мереж // Системи обробки інформації. 2016. № 7(144). С. 134–142.

References

1. F. Musumeci, F. Vismara, V. Grkovic, M. Tornatore, A. Pattavina (2011) "On the Energy Efficiency of Optical Transport with Time Driven Switching" *IEEE international Conference (ICC'2011)* P. 1–5. 2. Kaidan M., Andrushchak V. (2015) "The model for calculating energy efficiency and acousto-optic electrical devices in the optical transport network" // 1st International conference on Information and Communication Technologies – 2015 "29 October – 1 November, 2015 Lviv, Ukraine P. 171–174. 3. Kaidan M., Andrushchak V., Pitsyk M. (2015) "Calculation model of energy efficiency in optical transport networks" // 2015 second international scientific-practical conference "Problem of infocommunications science and technology (PIC S&T'2015)" October 13–15, 2015 Kharkiv, Ukraine, P. 167–170. 4. Slepov N.N. (2000) "Modern technology digital fiber-optical communication networks". Moscow, Radio and Communications, 468 p. 5. Nye J.F. (1985) "Physical Properties of Crystals", Clarendon, Oxford, 325 p. 6. Bohush M. V. (2006) "Piezoelectric instrument": Handbook in 3 volumes. – Rostov-on-Don: Publishing SKNTS HS, V.3. Piezoelectric sensors for extreme conditions, 346 p. 7. Laba H. P., Yurkevych O. V., Karbovnyk I. D., Kaidan M. V., Dumych S. S., Soliskii I. M., Andrushchak A. S. (2008) "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" // *Herald Lviv Polytechnic National Univ ELEKTRONIKA*, № 619, P. 172–180. 8. 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. (2010) "Spatial anisotropy of

the acoustooptical efficiency in Lithium Niobate Crystals" // *J. Applied Physics*. Vol. 108. – P. 103118(1–5).

9. Dieulesaint E., Royer D. (1980). "Elastic waves in solids: applications to signal processing". Chichester, J. Wiley.

10. Warner A. W., Onoe M., Coquin GA. (1967) "Determination of elastic and piezoelectric constants for crystals in class (3m)" // *The Journal of the Acoustical Society of America*, Volume 42, Issue 6 – P. 1223–1231.

11. Sirotnin Yu. I., Shaskolskaya M. P. (1982) "Fundamentals of Crystal Physics" Moscow: Mir Publ., 640 p.

12. "Physical acoustics-principles and methods" (1964) in Warren P. Mason (ed.): volume I, Parts A and B, *Methods and Devices*, New York: Academic Press Inc. Cloth. volume IA, 515 p.

13. Koroliuk A. P., Matsakov L. Ia., Vasylychenko V. V. (1970) "Determination of elastic and piezoelectric constants of crystalline lithium niobate single crystals" // *Krystallohrafiya* T. 15, № 5. – S. 1028–1032.

14. Balakshyi V. I., Paryhyn V. N., Chyrkov L. E. (1985) "Basic Physics of Acoustooptics", Moscow. Radio and Communications, 280 p.

15. Blystanov A. A., Bondarenko B. C., Chkalova V. V. and etc. (1982) "Acoustic Crystals: Handbook", in Shaskolskaya M. P. (ed.), Moscow, Nauka/ – 632 p.

16. Shuvalov, L. A., Urusovskaya A. A., Zheludev I. S. (1988) "Physical properties of crystals", vol. 4. Berlin: Springer. 583 p.

17. Butabaev, Sh. M., Smyslov, Y. Y. (1971) "The indicative the surface of the longitudinal components some tensor fourth rank" // *Krystallohrafiya*.– T. 4, No. 4. – C. 796–800.

18. German, V. L. (1945) "Some theorems of anisotropic media" // *Dokl. AN USSR*. – T. 48, № 2. – P. 95–98.

19. V. S. Bondarenko, V. P. Zorenko, V. V. Chkalova. (1988) "Acoustooptic modulators of light". Moscow. Radio and communication. 136 p.

20. M. V. Kaidan, V. S. Andrushchak. (2016) "The determination of parameter of energy efficiency for optical transport network" // *Information processing system*. – № 7(144). – P. 134–142.