

УДК 548.0:535.5+537.2

ПРОСТОРОВА АНІЗОТРОПІЯ ФОТОПРУЖНОГО ЕФЕКТУ В КРИСТАЛАХ КВАРЦУ

А. Андрушак¹, О. Юркевич¹, Н. Андрушак^{1,2},
О. Кушнір³, А. Кітик⁴

¹ Національний університет “Львівська політехніка”,
вул. С. Бандери, 12, 79013 Львів, Україна, anat@polynet.lviv.ua.

² Університет Арканзасу, 72701 Файєтсвілл, Арканзас, США

³ Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. ген. Тарнавського, 107, 79017 Львів, Україна.

⁴ Ченстоховський технологічний університет,
алея Армії Крайовей, 17, 42-200 Ченстохова, Польща.

Проаналізовано кількісні параметри просторової анізотропії фотопружних явищ у кристалічному кварці. Одержано аналітичні вирази для вказівних поверхонь п'єзооптичного та пружнооптичного коефіцієнтів і механічно індукованої оптичної різниці ходу в кристалах точкової симетрії 32. На підставі літературних даних для фотопружних параметрів кварцу і розроблених нами програмних пакетів Calc3D і View3D, а також програмного додатка MSurf до стандартного пакета MatLab, побудовано та досліджено ці вказівні поверхні та їхні стереографічні проекції. З'ясовано, що шляхом переходу від стандартних геометрій прямих головних кристалічних зрізів до загальніших геометрій експерименту можна одержати вираш у фотопружних параметрах кристалів кварцу до ~ 30 %.

Ключові слова: фотопружність, п'єзооптичний ефект, кристалічний кварц, анізотропія.

Вступ. У працях [1–3] систематично проаналізовано просторову анізотропію індукованих зовнішніми полями ефектів, таких як електрооптичний, п'єзооптичний (ПОЕ), пружнооптичний (ПрОЕ) і акустооптичний, для кристалів різних класів симетрії. Цей аналіз, виконаний на підставі апарату вказівних поверхонь (ВП), довів наявність екстремальних значень перелічених ефектів, просторова орієнтація яких не збігається з напрямками головних осей кристалофізичної системи координат. Цим підтверджено принципову можливість поліпшення параметрів досліджених матеріалів за умови використання екстремальних геометрій відповідних ефектів і на цій підставі запропоновано [1, 4] нову методологію ефективного використання кристалічних матеріалів як робочих елементів пристроїв, які працюють на принципах електро-, п'єзо- або акустооптичної модуляції лазерного випромінювання.

Перші приклади застосування цієї методології виявилися досить обнадійливими. Наприклад, для найефективнішої геометрії ПОЕ в кристалах ніобату літію LiNbO₃, яка

відповідає глобальному максимуму ПОЕ зі сферичними кутовими координатами $\theta = 42^\circ$, $\varphi = 30^\circ$ і $\theta = 49^\circ$, $\varphi = 30^\circ$ у кристалофізичній системі, одержано, відповідно, майже п'яти- та чотириразове збільшення робочих параметрів п'єзооптичних перетворювачів [1]. Для цих же кристалів максимальна оптична різниця ходу світлових хвиль, індукована електрично за умов $\theta = 54^\circ$ і $\varphi = 90^\circ$, майже втричі більша [2], а екстремальний параметр акустооптичної якості для ізотропної дифракції світла за умов $\theta = 60^\circ$ і $\varphi = 7^\circ$ у 2,4 раза вищий [3] порівняно з відповідними параметрами для стандартних геометрій прямих кристалічних зрізів. Це дає змогу у стільки ж разів підвищити ефективність використання кристалів ніобату літію як робочих елементів оптоелектронних пристроїв.

Незважаючи на згадані успіхи, усе ще нез'ясованими є загальні питання, пов'язані з універсальністю запропонованої методології, а також питання її ефективності для різних груп симетрії та структурних типів кристалів у кількісному вимірі. З огляду на це, важливою є перевірка запропонованої методології на прикладі кристалічного кварцу SiO_2 . Інтерес до цих кристалів зрозумілий і виправданий, оскільки вони є класичним матеріалом для оптики загалом, акустооптики та акустоелектроніки. Достатньо згадати лише те, що багато зумовлених зовнішніми полями явищ, зокрема нелінійних, які є в основі фізичної оптики, відкриті саме на кристалах кварцу (див., наприклад, [5–7]). Отже, дослідження просторової анізотропії фотопружності (ПОЕ і ПрОЕ) цих кристалів, яке є предметом цієї праці, актуальне і може посприяти виявленню досі невикористаних резервів їхнього ефективнішого практичного використання.

Основні розрахункові співвідношення. Наведемо основні співвідношення, використані в аналізі просторової анізотропії ПОЕ і ПрОЕ кристалів кварцу. Як і для інших досліджених раніше оптично одновісних кристалів [1, 8, 9], найбільший практичний інтерес для кварцу становлять такі ВП для головних компонент тензорів поздовжнього та поперечного ПОЕ: 1) ВП поздовжнього ПОЕ π'_{ii} ($\mathbf{i} \parallel \mathbf{m} \parallel \mathbf{r}$); 2) поперечна ВП поляризації світла (або незвичайного променя) $\pi'_{im}^{(i)}$ ($\mathbf{i} \parallel \mathbf{r}$, $\mathbf{m} \parallel \mathbf{j}$); 3) поперечна ВП механічного стиску (або звичайного променя) $\pi'_{im}^{(m)}$ ($\mathbf{m} \parallel \mathbf{r}$, $\mathbf{i} \parallel \mathbf{j}$). Тут вектори \mathbf{i} , \mathbf{j} визначають напрямки поляризації, відповідно, незвичайного та звичайного променів в одновісному кристалі; \mathbf{r} – радіус-вектор ВП; \mathbf{m} – напрямок прикладання нормального механічного напруження (одновісного тиску). Аналогічні ВП описуватимуть і анізотропію ПрОЕ.

Для кристалів класу симетрії 32, до якого належить кварц, на підставі даних праць [9–11] можна одержати загальні рівняння ВП ПОЕ і ПрОЕ:

$$\begin{aligned} \pi'_{im} = & (\alpha_{i1}\alpha_{m1} + \alpha_{i2}\alpha_{m2})^2 \pi_{11} + (\alpha_{i1}\alpha_{m2} - \alpha_{i2}\alpha_{m1})^2 \pi_{12} + \alpha_{m3}^2 (\alpha_{i1}^2 + \alpha_{i2}^2) \pi_{13} + \\ & + \alpha_{i3}^2 ((\alpha_{m1}^2 + \alpha_{m2}^2) \pi_{31} + \alpha_{m3}^2 \pi_{33}) + \alpha_{m3} (\alpha_{m2} (\alpha_{i1}^2 - \alpha_{i2}^2) + 2\alpha_{i1}\alpha_{i2}\alpha_{m1}) \pi_{14} + 2\alpha_{i3} (\alpha_{i2} (\alpha_{m1}^2 - \\ & - \alpha_{m2}^2) + \alpha_{i1}\alpha_{m1}\alpha_{m2}) \pi_{41} + 2\alpha_{i3}\alpha_{m3} (\alpha_{i2}\alpha_{m2} + \alpha_{i1}\alpha_{m1}) \pi_{44}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} p'_{in} = & (\alpha_{i1}\alpha_{n1} + \alpha_{i2}\alpha_{n2})^2 p_{11} + (\alpha_{i1}\alpha_{n2} - \alpha_{i2}\alpha_{n1})^2 p_{12} + \alpha_{n3}^2 (\alpha_{i1}^2 + \alpha_{i2}^2) p_{13} + \alpha_{i3}^2 ((\alpha_{n1}^2 + \alpha_{n2}^2) p_{31} + \\ & + \alpha_{n3}^2 p_{33}) + 2\alpha_{n3} (\alpha_{n2} (\alpha_{i1}^2 - \alpha_{i2}^2) + 2\alpha_{i1}\alpha_{i2}\alpha_{n1}) p_{14} + 2\alpha_{i3} (\alpha_{i2} (\alpha_{n1}^2 - \alpha_{n2}^2) + 2\alpha_{i1}\alpha_{n1}\alpha_{n2}) p_{41} + \\ & + 4\alpha_{i3}\alpha_{n3} (\alpha_{i2}\alpha_{n2} + \alpha_{i1}\alpha_{n1}) p_{44}, \end{aligned} \quad (2)$$

де використано матричні позначення тензорів, π_{ij} і p_{ij} – компоненти тензорів, відповідно, ПОЕ і ПрОЕ, записані в головній системі координат, а α_{ij} – напрямні косинуси. Викори-

стовуючи формули (1) і (2), одержимо вирази для згаданих найбільш практичних ВП ПОЕ і ПрОЕ у сферичній системі координат:

$$\pi'_{ii}(\theta, \varphi) = \pi_{11} \sin^4 \theta + (\pi_{13} + \pi_{31} + 2\pi_{44}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \pi_{33} \cos^4 \theta + (\pi_{14} + 2\pi_{41}) \sin^3 \theta \cos \theta \sin 3\varphi, \quad (3)$$

$$\pi^{(i)}_{im}(\theta, \varphi) = \pi_{12} \sin^2 \theta + \pi_{31} \cos^2 \theta - 2\pi_{41} \sin \theta \cos \theta \sin 3\varphi, \quad (4)$$

$$\pi^{(m)}_{im}(\theta, \varphi) = \pi_{12} \sin^2 \theta + \pi_{13} \cos^2 \theta - \pi_{14} \sin \theta \cos \theta \sin 3\varphi, \quad (5)$$

$$p'_{ii}(\theta, \varphi) = p_{11} \sin^4 \theta + (p_{13} + p_{31} + 4p_{44}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + p_{33} \cos^4 \theta + 2(p_{14} + p_{41}) \sin^3 \theta \cos \theta \sin 3\varphi, \quad (6)$$

$$p^{(i)}_{im}(\theta, \varphi) = p_{12} \sin^2 \theta + p_{31} \cos^2 \theta - 2p_{41} \sin \theta \cos \theta \sin 3\varphi, \quad (7)$$

$$p^{(m)}_{im}(\theta, \varphi) = p_{12} \sin^2 \theta + p_{13} \cos^2 \theta - 2p_{14} \sin \theta \cos \theta \sin 3\varphi, \quad (8)$$

де π'_{ii} (або p'_{ii}) – так звана поздовжня ВП ПОЕ (або ПрОЕ) ($\mathbf{r} \parallel \mathbf{i} \parallel \mathbf{m} \parallel \mathbf{n} \parallel X'_3$, $\mathbf{k} \parallel X'_1$); $\pi^{(i)}_{im}$ (або $p^{(i)}_{im}$) – ВП поляризації світла для поперечного ПОЕ (або ПрОЕ) ($\mathbf{r} \parallel \mathbf{i} \parallel X'_3$, $\mathbf{j} \parallel \mathbf{m} \parallel \mathbf{n} \parallel X'_2$, $\mathbf{k} \parallel X'_1$); $\pi^{(m)}_{im}$ (або $p^{(m)}_{im}$) – ВП механічного напруження (або деформації) для поперечного ПОЕ (або ПрОЕ) ($\mathbf{r} \parallel \mathbf{m} \parallel \mathbf{n} \parallel X'_3$, $\mathbf{j} \parallel \mathbf{i} \parallel X'_2$, $\mathbf{k} \parallel X'_1$). Тут \mathbf{n} , \mathbf{k} – напрямки прикладання нормальної деформації та розповсюдження світлового променя, відповідно; X'_1 , X'_2 , X'_3 – осі нової системи координат (див. рис.1). Ці ВП для кристалів кварцу показано на рис. 2 і 3.

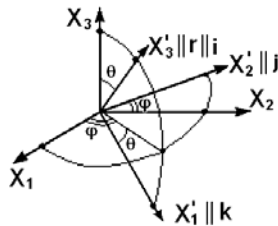


Рис. 1. Просторова орієнтація нової робочої системи координат $X'_1X'_2X'_3$ стосовно кристалофізичної системи $X_1X_2X_3$ для оптично одновісних кристалів (\mathbf{r} – радіус-вектор ВП; \mathbf{k} , \mathbf{i} , \mathbf{j} визначають напрямки поширення світла та двох можливих поляризацій, відповідно).

Зазначимо, що додатковим важливим параметром для оцінки перспектив практичних застосувань п'єзо- та акустооптичних матеріалів є індукована механічним напруженням оптична різниця ходу. Відповідний п'єзооптичний коефіцієнт індукованої різниці ходу π^0_{km} можна записати у вигляді [12]

$$\pi^0_{km} = \pi_{im} n_i^3 - \pi_{jm} n_j^3 - 2(n_i - n_j) S_{km}, \quad (9)$$

де, як уже зазначено, індекси i , k , m відповідають напрямкам поляризації світла (\mathbf{i}), його поширення (\mathbf{k}) і механічного напруження (\mathbf{m}); S_{km} – коефіцієнти пружної податливості; n_i , n_j – показники заломлення для двох поляризацій світла в кристалі.

Анізотропію п'єзоіндукованої оптичної різниці ходу можна описувати просторовим розподілом коефіцієнта π^0_{km} . Для того, щоб записати відповідне рівняння ВП, у співвідношенні (9) замість π_{im} , S_{km} і n_i потрібно підставити вирази, які визначають просторову анізотропію п'єзооптичного коефіцієнта π'_{im} (тобто рівняння ВП ПОЕ), пружного коефіцієнта S'_{km} (тобто рівняння ВП цього ефекту) і показника заломлення n'_i . Тоді вираз (9) зведемо до вигляду

$$\pi^0_{km} = \pi'_{im} n_i'^3 - \pi'_{jm} n_j'^3 - 2(n'_i - n'_j) S'_{km}. \quad (10)$$

З формули (10) випливає, що довжину радіуса-вектора \mathbf{r} , яка визначає ВП індукованої різниці ходу, можна визначити, підставляючи в (10) радіуси-вектори ВП π'_{im} , S'_{km} і зна-

чення n'_i для напрямку радіуса-вектора \mathbf{r} . На підставі наявності трьох практичних ВП для ПОЕ (π'_{ii} , $\pi'^{(i)}_{im}$ і $\pi'^{(m)}_{im}$) можна прийти до двох рівнянь ВП (див. [13]):

1) поздовжня ВП індукованої різниці ходу ($\mathbf{r} \parallel \mathbf{i} \parallel \mathbf{m} \parallel X'_3, \mathbf{k} \parallel X'_1$)

$$\pi^{o(m)}_{km} = \pi'_{ii} n'^3_i - \pi'^{(m)}_{jm} n'^3_j - 2(n'_i - n'_j) S'^{(m)}_{km}, \quad (11)$$

2) поперечна ВП індукованої різниці ходу ($\mathbf{r} \parallel \mathbf{i} \parallel X'_3, \mathbf{j} \parallel \mathbf{m} \parallel X'_2, \mathbf{k} \parallel X'_1$)

$$\pi^{o(i)}_{km} = \pi'^{(i)}_{im} n'^3_i - \pi'_{jj} n'^3_j - 2(n'_i - n'_j) S'^{(i)}_{km}. \quad (12)$$

Під час одержання виразів (11) і (12) ми не робили жодних припущень про клас симетрії, а тому вони загальні та правильні для будь-яких кристалів. Надалі зосередимося на конкретному випадку кристалів точкової симетрії 32. Рівняння ВП ПОЕ π'_{ii} , $\pi'^{(i)}_{im}$ і $\pi'^{(m)}_{im}$ для них обговорено вище, а головні компоненти пружної податливості S'_{km} (індекси $k, m \leq 3$) у декартових координатах мають такий вигляд [14, 15]:

$$\begin{aligned} S'_{km} = & S_{11}(\alpha_{k1}\alpha_{m1} + \alpha_{k2}\alpha_{m2})^2 + S_{12}(\alpha_{k1}\alpha_{m2} - \alpha_{k2}\alpha_{m1})^2 + S_{13}((\alpha_{k1}^2 + \alpha_{k2}^2)\alpha_{m3}^2 + \alpha_{k3}^2(\alpha_{m1}^2 + \\ & + \alpha_{m2}^2)) + S_{33}\alpha_{k1}^2\alpha_{m1}^2 + S_{44}(\alpha_{k2}\alpha_{k3}\alpha_{m2}\alpha_{m3} + \alpha_{k1}\alpha_{k3}\alpha_{m1}\alpha_{m3}) + S_{14}((\alpha_{k1}^2 - \alpha_{k2}^2)\alpha_{m2}\alpha_{m3} + \\ & + \alpha_{k2}\alpha_{k3}(\alpha_{m1}^2 - \alpha_{m2}^2) + 2\alpha_{k1}\alpha_{k2}\alpha_{m1}\alpha_{m3} + 2\alpha_{k1}\alpha_{k3}\alpha_{m1}\alpha_{m2}). \end{aligned} \quad (13)$$

Після визначення напрямних косинусів для випадків, описаних виразами (11) і (12), із (13) можна знайти (див. [10]) два рівняння ВП для пружної податливості ($S'^{(m)}_{km}$ за умов $\mathbf{r} \parallel \mathbf{m} \parallel X'_3, \mathbf{k} \parallel X'_1$) і $S'^{(i)}_{km}$ за умов $\mathbf{m} \parallel X'_2, \mathbf{k} \parallel X'_1$):

$$S'^{(m)}_{km} = S_{13} + (S_{11} + S_{33}2S_{13} - 2S_{44})\sin^2\theta\cos^2\theta + S_{14}\sin 4\theta\sin 3\varphi/4, \quad (14)$$

$$S'^{(i)}_{km} = S_{12}\cos^2\theta + S_{13}\sin^2\theta + S_{14}\sin\theta\cos\theta\sin 3\varphi. \quad (15)$$

Для оптично одновісних кристалів вирази для n'_i та n'_j мають такий вигляд [16]:

$$n'_i = (\sin^2\theta/n_o^2 + \cos^2\theta/n_e^2)^{-1/2}, \quad n'_j = n_o, \quad (16)$$

де n_o і n_e – звичайний і незвичайний показники заломлення, відповідно. Так можна одержати остаточні вирази для ВП індукованої різниці ходу, виражені через ПОК π^o_{km} (див. [13]).

У роботі побудовано відповідні ВП (див. рис. 2–4) і проведено кількісний аналіз просторової анізотропії індукованої оптичної різниці ходу для кристалів кварцу. Важливим кількісним параметром, що визначає відхилення ВП від геометричної фігури, яка описує ізотропну фізичну властивість (тобто сфери), є так званий ступінь анізотропії ВП, уведений у праці [9]. Ступінь анізотропії η для кожної зі згаданих ВП як функцій кутів сферичної системи координат ($f(\theta, \varphi) = \pi'_{ii}(\theta, \varphi)$, $\pi'^{(i)}_{im}(\theta, \varphi)$, $\pi'^{(m)}_{im}(\theta, \varphi)$ тощо) можна визначити згідно з формулою [9]

$$\eta = (V_s - |V^+ - V^-|) \cdot 100\% / V_s, \quad (17)$$

де $V_s = 4\pi|f_{\text{extr}}|^3/3$ – об'єм сфери з радіусом $|f_{\text{extr}}| = \max(|f_{\text{min}}|, |f_{\text{max}}|)$; V^+ і V^- – об'єми частин

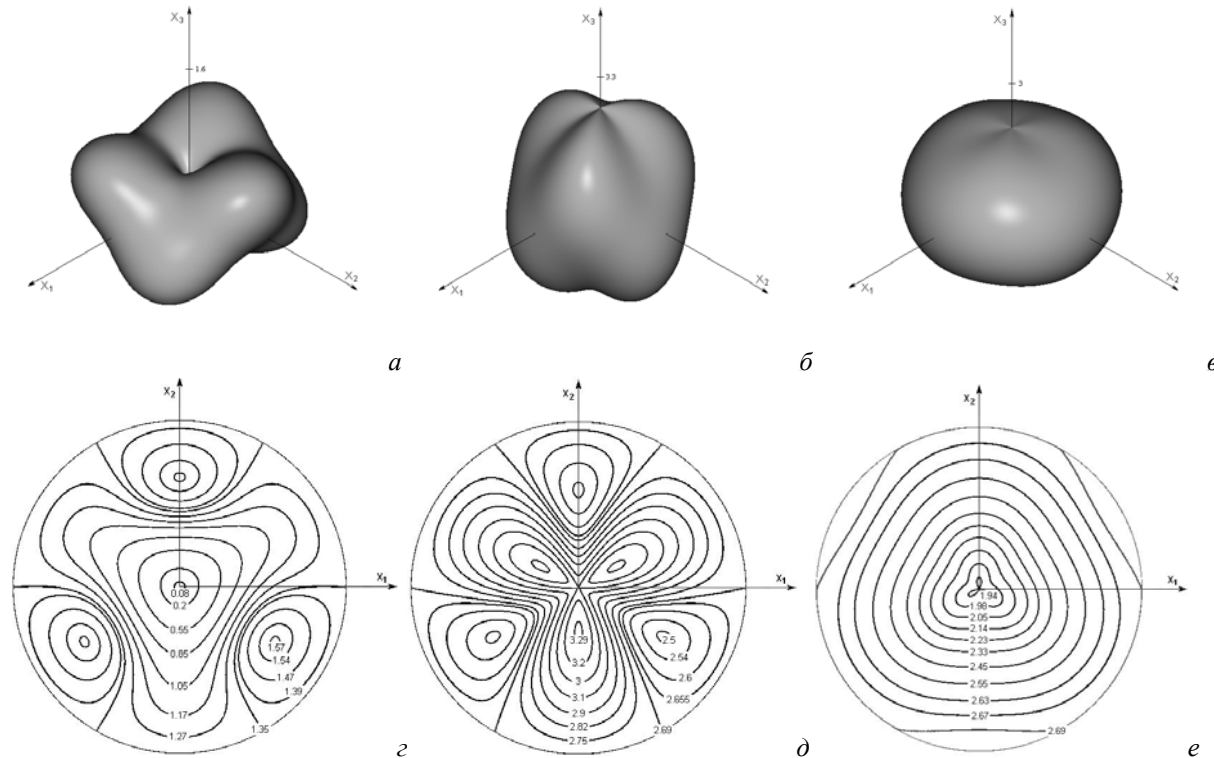


Рис. 2. ВП для поздовжнього (π'_{ii} (a)) і поперечного ($\pi^{(i)}_{im}$ (б), $\pi^{(m)}_{im}$ (в)) ПОЕ в кристалах кварцу та відповідні стереографічні проєкції (z-e); усе в Брюстерах.

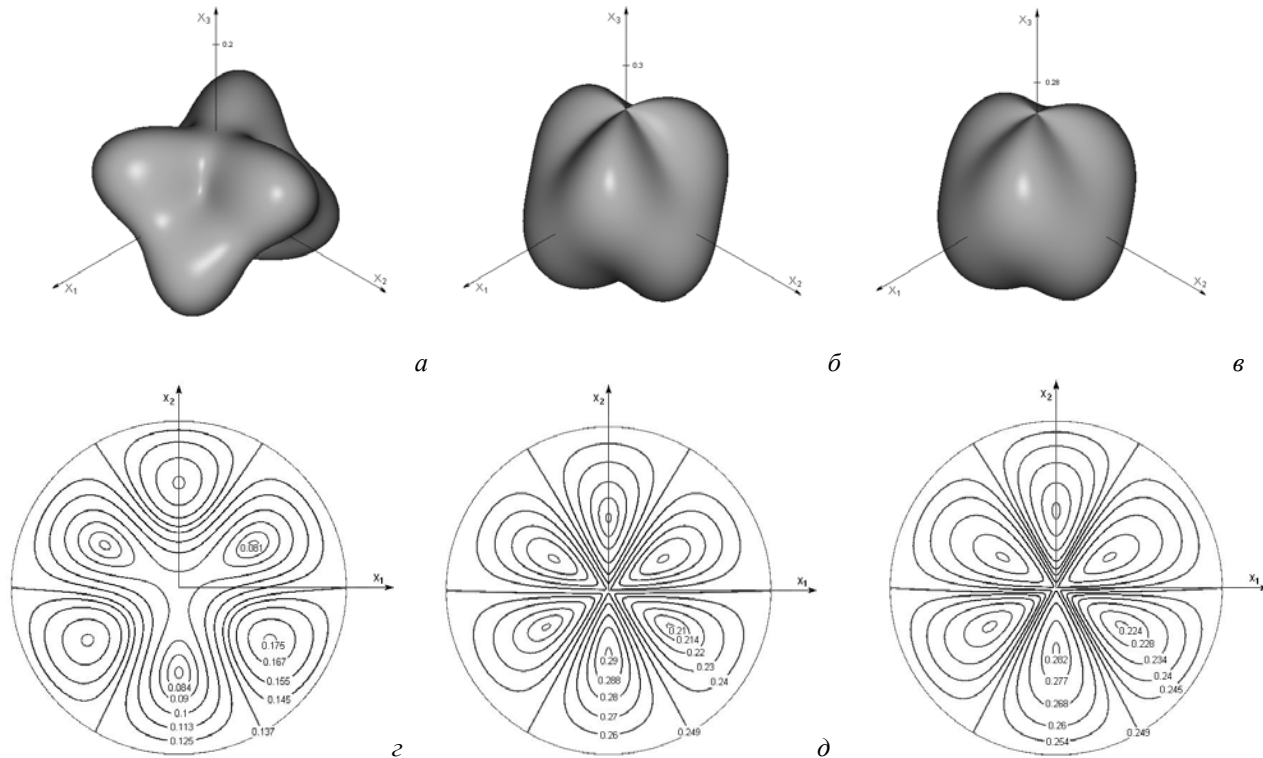


Рис. 3. ВП для поздовжнього (p'_{ii} (a)) і поперечного ($p^{(i)}_{im}$ (б), $p^{(m)}_{im}$ (е)) ПрОЕ в кристалах кварцу та відповідні стереографічні проекції (z-e).

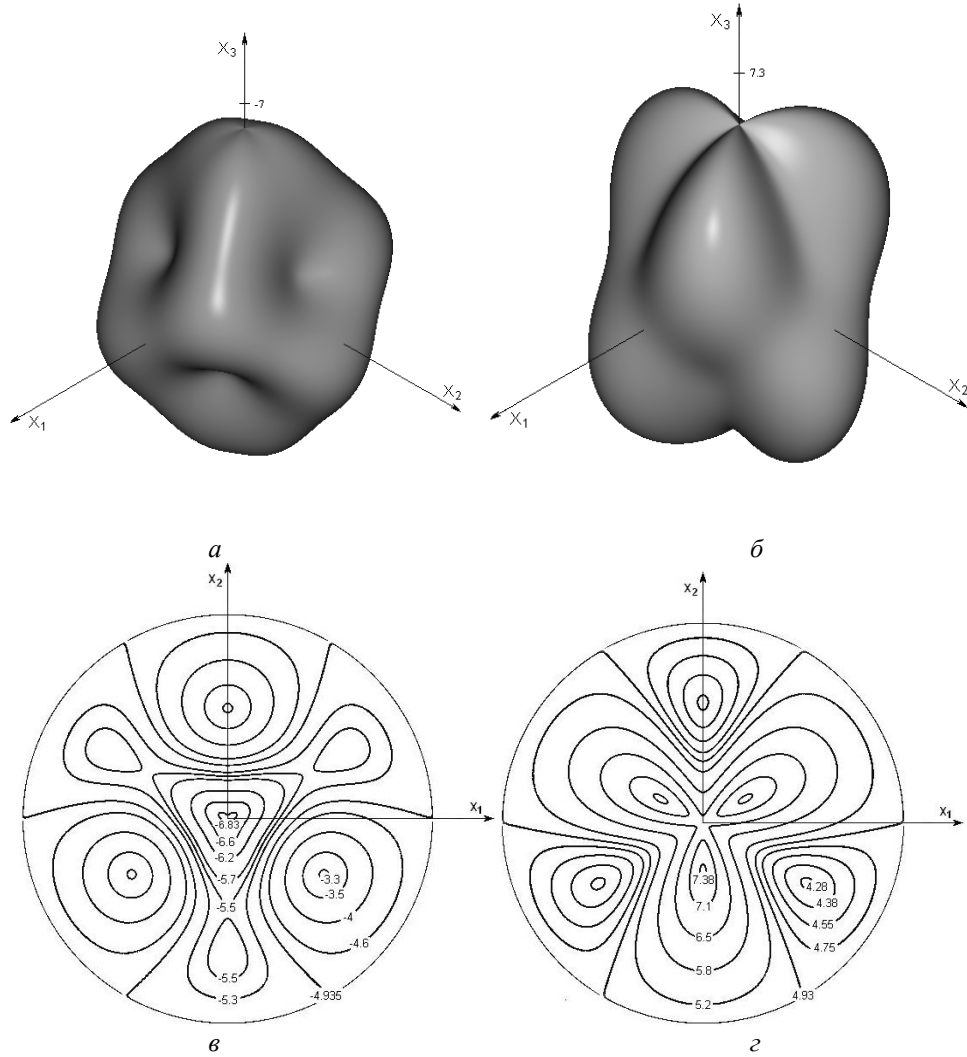


Рис. 4. Поздовжня (а) та поперечна (б) ВП п'єзооптично індукованої різниці ходу для кристалів кварцу та відповідні стереографічні проекції (в, г); усе в Брюстерах.

ВП відповідно з додатним і від'ємним знаками. Зазначимо, що в граничному випадку $\eta = 0$ анізотропії нема, а тому ВП перетворюється на сферу. У цьому гіпотетичному випадку запропонований нами підхід до підвищення ефективності індукованих зовнішніми полями взаємодій у кристалах, звісно, не працюватиме. Можна припустити, що практична придатність підходу зростатиме зі зростанням анізотропії кристала. Зокрема, якщо $V^+ = V^-$, то індукований ефект має максимальну анізотропію ($\eta = 100\%$). Інші важливі

кількісні параметри анізотропії – це екстремальні значення ВП, найперше максимуми. Конкретні приклади цих параметрів для кристалів кварцу наведено нижче.

Для оцінки дієвості запропонованої нами методології введено ще один параметр (табл. 1–3) – коефіцієнт підвищення ефективності γ . Він визначає відносне перевищення знайденого нами екстремального значення ВП x^{extr} ($x^{\text{extr}} = \pi^{\text{extr}}, p^{\text{extr}}$ або $(\pi^{\circ})^{\text{extr}}$) над найбільшим значенням ефекту x^{X_i} ($x^{X_i} = \pi^{X_i}, p^{X_i}$ або $(\pi^{\circ})^{X_i}$), який спостерігаємо уздовж напрямків головних осей X_i кристалофізичної системи координат:

$$\gamma = (x^{\text{extr}} - x^{X_i}) \cdot 100 \% / x^{\text{extr}}. \quad (18)$$

Методика розрахунків і результати. Для кількісного опису просторової анізотропії ПОЕ і ПрОЕ кристалів кварцу взято матеріальні параметри, відомі з літератури [17]: п'єзооптичні коефіцієнти $\pi_{11} = 1,35$, $\pi_{33} = 0,07$, $\pi_{44} = -1,13$, $\pi_{12} = 2,69$, $\pi_{13} = 1,94$, $\pi_{14} = -0,11$, $\pi_{31} = 3,11$, $\pi_{41} = -0,34$ (усі значення в Брюстерах) і пружнооптичні коефіцієнти $p_{11} = 0,128$, $p_{33} = 0,098$, $p_{44} = -0,0685$, $p_{12} = 0,25$, $p_{13} = 0,259$, $p_{14} = -0,029$, $p_{31} = 0,258$, $p_{41} = -0,042$. Усі вони стосуються кімнатної температури та довжини світлової хвилі 0,59 мкм. Відповідні коефіцієнти пружної податливості для кварцу такі: $S_{11} = 12,77$, $S_{12} = -1,82$, $S_{13} = -1,24$, $S_{33} = 9,68$, $S_{14} = -4,5$, $S_{44} = 20,02$ (усі значення в Брюстерах) [17].

Незважаючи на наявність у літературі даних для показників заломлення кристалічного кварцу, ми виконали їхні додаткові вимірювання, щоб апробувати удосконалений інтерферометрично-поворотний метод [18, 19]. Одержані нами результати ($n_o = 1,544$, $n_e = 1,553$, де відображено лише значущі цифри, що потрапляють у довірчий інтервал) добре корелюють з даними [17].

Для подальших комп'ютерних розрахунків розроблено алгоритми та практично реалізовано візуалізацію й кількісний аналіз анізотропії індукованих оптичних ефектів. Для побудови та дослідження ВП і їхніх стереографічних проєкцій створено оригінальні програмні пакети Calc3D і View3D, а також програмний додаток MSurf до стандартного пакета MatLab. Вони технічно забезпечують побудову ВП, які описують тензорами четвертого рангу. Порівняння з відомими комп'ютерними програмами (наприклад, зі стандартною програмою WinTensor) засвідчує деякі переваги наших програмних продуктів над аналогами.

На рис. 2–4 зображено побудовані нами ВП для ПОЕ і ПрОЕ, а також для індукованої механічним напруженням різниці ходу в кристалах кварцу. Там же показано відповідні стереографічні проєкції. У табл. 1–3 підсумовано результати кількісного аналізу просторової анізотропії згаданих ВП. Там наведено максимальні та мінімальні значення ВП, кути їхньої просторової орієнтації θ і ϕ , розраховані нами ступені анізотропії η ВП і коефіцієнти γ підвищення ефективності досліджених ефектів.

Аналіз результатів і висновки. Абсолютні максимуми ВП спостерігаємо не для прямих кристалічних зрізів (табл. 1–3). Загалом це ще раз засвідчує практичну потребу в дослідженнях анізотропії фотопружності для вибору оптимальних геометрій експерименту. Лише ці геометрії можуть забезпечити найбільші параметри ПОЕ і ПрОЕ і, відповідно, найвищу акустооптичну ефективність кристалів кварцу.

Анізотропія більшості з проаналізованих нами ВП помірна кількісно та змінюється

Таблиця 1

Екстремальні значення ВП ПОЕ, їхні кутові параметри, ступені анізотропії та коефіцієнти підвищення ефективності ПОЕ в кристалах кварцу

ВП	Абсолютні мінімуми та їхні напрямки			Абсолютні максимуми та їхні напрямки			Ступінь анізотропії			Коефіцієнт підвищення ефективності	
	Значення, Бр	θ , град	φ , град	Значення, Бр	θ , град	φ , град	V_s , (Бр) ³	$ V^+ - V^- $, (Бр) ³	η , %	π^{X_i}	γ , %
π_{ii}'	0,09	0	0	1,58	67	90, 210, 330	16,5	7,28	56	1,35	17
$\pi_{im}^{(i)}$	2,45	61	90, 210, 330	3,30	29	30, 150, 270	151	96,6	36	3,11	6
$\pi_{im}^{(m)}$	1,93	4	90, 210, 330	2,70	86	30, 150, 270	82,5	62,4	24	2,69	≈ 0

Таблиця 2

Екстремальні значення ВП ПрОЕ, їхні кутові параметри, ступені анізотропії та коефіцієнти підвищення ефективності ПрОЕ в кристалах кварцу

ВП	Абсолютні мінімуми та їхні напрямки			Абсолютні максимуми та їхні напрямки			Ступінь анізотропії			Коефіцієнт підвищення ефективності	
	Значення	θ , град	φ , град	Значення	θ , град	φ , град	V_s	$ V^+ - V^- $	η , %	p^{X_i}	γ , %
P_{ii}'	0,080	54	30, 150, 270	0,176	64	90, 210, 330	0,023	0,009	60	0,137	28
$P_{im}^{(i)}$	0,211	48	90, 210, 330	0,295	42	30, 150, 270	0,108	0,068	37	0,257	15
$P_{im}^{(m)}$	0,223	49	90, 210, 330	0,283	41	30, 150, 270	0,095	0,068	29	0,258	10

Таблиця 3

Екстремальні значення ВП індукованої різниці ходу, їхні кутові параметри, ступені анізотропії та коефіцієнти підвищення ефективності для кристалів кварцу

ВП	Абсолютні мінімуми та їхні напрямки			Абсолютні максимуми та їхні напрямки			Ступінь анізотропії			Коефіцієнт підвищення ефективності	
	Значення, Бр	θ , град	φ , град	Значення, Бр	θ , град	φ , град	V_s , (10 Бр) ³	$ V^+ - V^- $, (10 Бр) ³	η , %	$(\pi^0)^{X_i}$	γ , %
поздовжня	-3,28	57	90, 210, 330	-6,9	2	30, 150, 270	-1,38	-0,52	62	-6,86	≈ 0
поперечна	4,25	62	90, 210, 330	7,4	27	30, 150, 270	1,70	0,76	55	6,72	10

в межах 24–62 %. Певним винятком є ВП поздовжнього ПОЕ π'_{ii} і поздовжнього ПрОЕ ρ'_{ii} (див. рис. 2,а, 3,а). Ступені анізотропії для цих ВП становлять $\sim 60\%$ і тому приблизно вдвічі вищі, ніж відповідні параметри для ВП поперечних ПОЕ і ПрОЕ (див. табл. 1, 2). Водночас, ступені анізотропії для поздовжньої та поперечної ВП індукованої різниці ходу суттєво не відрізняються один від одного (див. табл. 3).

Загалом існує непогана кореляція між параметром анізотропії ВП η і коефіцієнтом ефективності γ (див. табл. 1–3). Це підтверджує доволі загальне й очевидне міркування, що досягнути виграшу в індукованому зовнішнім полем ефекті в кристалах завдяки анізотропії і переходу до косих геометрій експерименту можна лише тоді, коли ця анізотропія суттєва. Однак, винятком є ВП п'єзоіндукованої різниці ходу, для якої кореляції не спостерігаємо: для поздовжньої ВП виграшу в величині ефекту практично немає, хоча ступінь анізотропії тоді становить 62 %, і навпаки, для поперечної ВП маємо $\gamma \approx 10\%$ за умови нижчої анізотропії ($\eta \approx 55\%$). Для пояснення цього явища, пов'язаного, очевидно, зі специфікою форми ВП, потрібні додаткові дослідження.

Нарешті нагадаємо, що кристали кварцу на сьогодні дуже добре досліджено щодо і ПОЕ, і ПрОЕ. Тому досягнення навіть порівняно незначного виграшу ($\sim 6\text{--}28\%$) у керуючих механічних полях для них можна вважати успіхом методики покращення фотопружних параметрів шляхом послідовного аналізу їхньої просторової анізотропії. Предметом нашої наступної праці буде вивчення просторової анізотропії параметра акустооптичної якості кристалів кварцу.

1. Андрущак А. С. Просторова анізотропія електро-, п'єзо- та акустооптичних взаємодій у кристалічних матеріалах твердотільної оптоелектроніки. – Рукопис... Дис. на здобуття наукового ступеня д. т. н. / Андрущак А. С. – Львів : Нац. ун-т “Львівська політехніка”, 2009. – 405 с.
2. Spatial anisotropy of linear electro-optic effect for crystal materials: II. Indicative surfaces as efficient tool for electro-optic coupling optimization / A. S. Andrushchak, B. G. Mytsyk, N. M. Demyanyshyn, M. V. Kaidan, O. V. Yurkevych, S. S. Dumych, A. V. Kityk, W. Schranz // Opt. Lasers Eng. – 2009. – Vol. 47. – P. 24–30.
3. Spatial anisotropy of the acoustooptical efficiency in lithium niobate crystals / A. S. Andrushchak, E. M. Chernyhivsky, Z. Yu. Gotra, M. V. Kaidan, A. V. Kityk, N. A. Andrushchak, T. A. Maksymyuk, B. G. Mytsyk, W. Schranz // J. Appl. Phys. – 2010. – Vol. 108. – 103118 (P. 1–5).
4. Андрущак А. С. Просторова анізотропія електро-, п'єзо- та акусто-оптичного ефектів в кристалічних матеріалах твердотільної електроніки. Апробація на прикладі кристалів LiNbO_3 та $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$. Частина I. Розробка комплексної методики 3D-аналізу анізотропії індукованих оптичних ефектів в кристалах / А. С. Андрущак // Вісник НУ “Львівська політехніка”. Електроніка. – 2008. – № 619. – С. 165–171.
5. Ярив А. Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх. – М. : Мир, 1987. – 616 с.
6. Влох О. Г. Явления пространственной дисперсии в параметрической кристаллооптике / О. Г. Влох. – Львов : Вища школа, 1984. – 156 с.

7. Кушнір О. С. Практикум з фізики кристалів: Навчальний посібник / О. С. Кушнір, Л. П. Луців-Шумський, Ю. М. Корчак. – Львів : Видавн. центр ЛНУ імені Івана Франка, 2008. – 240 с.
8. Андрущак А. С. Вказівні поверхні п'єзооптичного ефекту одновісних кристалів. Анізотропія п'єзооптичного ефекту в кристалах бастрону / А. С. Андрущак, Б. Г. Мищик // Укр. фіз. журн. – 1995. – Т. 40, № 11–12. – С. 1122–1126.
9. Anisotropy of piezo- and elasto-optical effect in β -BaB₂O₄ crystals / A. S. Andrushchak, V. F. Adamiv, O. M. Krupych, I. Martyniuk-Lototska, R. O. Vlokh // *Ferroelectrics*. – 2000. – Vol. 238. – P. 299–305 (863–869).
10. Пространственное распределение пьезоиндуцированного изменения оптического пути на примере кристаллов ниобата лития / О. Г. Влох, Б. Г. Мыщк, А. С. Андрущак, Я. В. Прыриз // *Кристаллография*. – 2000. – Т. 45, № 1. – С. 144–150.
11. Spatial anisotropy of photoelastic and acoustooptic properties in β -BaB₂O₄ crystals / A. S. Andrushchak, Ya. V. Bobitski, M. V. Kaidan, B. V. Tybinka, A. V. Kityk, W. Schranz // *Opt. Mater.* – 2004. – Vol. 27. – P. 619–624.
12. Mytsyk B. Methods for the studies of the piezo-optical effect in crystals and the analysis of experimental data. I. Methodology for the studies of piezo-optical effect / B. Mytsyk // *Ukr. J. Phys. Opt.* – 2003. – Vol. 4. – P. 1–20.
13. Просторовий розподіл п'єзоіндукованої зміни різниці ходу на прикладі кристалів β -BaB₂O₄ / М. В. Кайдан, Б. В. Тибінка, А. С. Андрущак, М. Й. Павликевич // Моделювання та інформаційні технології. Збірн. наук. праць Ін-ту проблем моделювання НАН України. – 2005. – Вип. 31. – С. 123–129.
14. Шувалов Л. А. Современная кристаллография : в 4 т. / Л. А. Шувалов, А. А. Урусовская, И. С. Желудев. – М. : Наука, 1981. – Т. 4: Физические свойства кристаллов. – 1981. – 600 с.
15. Сиротин Ю. И. Основы кристаллофизики / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. – М. : Наука, 1979. – 640 с.
16. Борн М. Оптика / М. Борн. – К. : Гостехиздат, 1937. – 795 с.
17. Акустические кристаллы / А. А. Блистанов, В. С. Бондаренко, Н. В. Переломова, Ф. Н. Стрижевская, В. В. Чкалова, М. П. Шаскольская / Под ред. М. П. Шаскольской. – М. : Наука, 1982. – 632 с.
18. Пат. на корисну модель 39155 Україна. Інтерферометрично-поворотний спосіб вимірювання показника заломлення оптичних матеріалів / Андрущак А. С., Тибінка Б. В., Андрущак Н. А., Думич С. С. ; опубл. 10.02.2009, Бюл. №3.
19. Удосконалення процесу вимірювань показника заломлення інтерферометрично-поворотним методом / Н. Андрущак, І. Карбовник, Я. Бобицький, А. Андрущак, О. Кушнір // *Теоретична електротехніка*. – 2010. – Вип. 61. – С. 120–127.

SPATIAL ANISOTROPY OF PHOTOELASTIC EFFECT IN QUARTZ CRYSTALS

A. Andrushchak¹, O. Yurkevych¹, N. Andrushchak^{1,2}, O. Kushnir³, A. Kityk⁴

¹ Lviv National Polytechnic University, 12 S. Bandera St., UA-79013 Lviv, Ukraine, anat@polynet.lviv.ua

² University of Arkansas, 72701 Fayetteville, Arkansas, USA.

³ *Ivan Franko National University of Lviv,
107 Tarnavsky St., UA-79017 Lviv, Ukraine.*

⁴ *Czestochowa University of Technology,
17 Al. Armii Krajowej, 42-200 Czestochowa, Poland.*

We analyze spatial anisotropy parameters for the photoelastic phenomena in crystalline quartz. Analytical expressions for the indicative surfaces of piezooptic and elasto-optic coefficients and of mechanically induced optical path difference, are derived for the crystals of point symmetry group 32. Basing on literature data for the photoelastic parameters of quartz and using program packages Calc3D and View3D, along with a program supplement MSurf for the standard MatLab package, which have been developed by us, we have constructed and studied quantitatively the indicative surfaces mentioned and their stereographic projections. We have shown that a gain as large as 30 per cent can be achieved for the photoelastic parameters of quartz crystals by means of passing from standard geometries of principal crystalline cuts to more general experimental geometries.

Key words: photoelasticity, piezooptic effect, crystalline quartz, anisotropy.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ АНИЗОТРОПИЯ ФОТОУПРУГОГО ЭФФЕКТА В КРИСТАЛЛАХ КВАРЦА

А. Андрущак¹, О. Юркевич¹, Н. Андрущак^{1,2}, О. Кушнир³, А. Китык⁴

¹ *Национальный университет “Львовская политехника”,
ул. С. Бандеры, 12, 79013 Львов, Украина.
anat@polynet.lviv.ua*

² *Университет Арканзаса, 72701 Фаеввилль, Арканзас, США.*

³ *Львовский национальный университет имени Ивана Франко,
ул. ген. Тарнавского, 107, 79017 Львов, Украина.*

⁴ *Ченстоховский технологический университет,
аллея Армии Крайовой, 17, 42-200 Ченстохова, Польша.*

Проанализированы параметры пространственной анизотропии фотоупругости в кристаллическом кварце. Получены аналитические выражения для указательных поверхностей пьезооптического и упругооптического коэффициентов и механически индуцированной оптической разности хода в кристаллах точечной симметрии 32. На основе данных литературы для фотоупругих параметров кварца и разработанных нами программных пакетов Calc3D и View3D, а также дополнения MSurf к стандартному пакету MatLab, построены и исследованы эти указательные поверхности и их стереографические проекции. Показано, что путем перехода от стандартных геометрий прямых кристаллических срезов к общим геометриям эксперимента можно получить выигрыш в фотоупругих параметрах кристаллов кварца до ~ 30 %.

Ключевые слова: фотоупругость, пьезооптический эффект, кристаллический кварц, анизотропия.

Стаття надійшла до редколегії 18.07.2011
Прийнята до друку 30.09.2011