

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

УДК 548.0:515.511

А.С. Андрущак

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра телекомунікацій

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 I. РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОЇ МЕТОДИКИ 3D-АНАЛІЗУ АНІЗОТРОПІЇ ІНДУКОВАНИХ ОПТИЧНИХ ЕФЕКТІВ У КРИСТАЛАХ

© Андрущак А.С., 2008

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 $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ CRYSTALS. PART I. COMPLEX METHOD DESIGN FOR ANISOTROPY 3D-ANALYSIS OF INDUCED OPTICAL EFFECTS IN CRYSTALS

© Andrushchak A.S., 2008

Для кристалів довільного класу симетрії розроблено комплексну методику 3D-аналізу просторової анізотропії індукованих оптичних (електро-, п'єзо- та акустооптичного) ефектів. На основі запропонованих методик та створених експериментальних установок проаналізовано послідовність виконання експериментів, необхідних для заповнення матриць пружних, п'єзоелектричних, електро-, п'єзо- та пружнооптичних коефіцієнтів для кристалів всіх класів симетрії, а також триклінні. Показано можливість повного аналізу анізотропії індукованих оптичних ефектів на основі вказівних поверхонь для різних компонент тензорів цих ефектів. Демонструється також можливість побудови вказівних поверхонь для індукованого двозаломлення та оптичної різниці ходу, а також просторових поверхонь для параметра акустооптичної якості.

Complex method for the analysis of spatial anisotropy of induced optical (electro-, piezo and acousto-optical) effects has been designed. The technique can be applied to the crystals belonging to arbitrary symmetry class. On the base of developed methods and designed experimental set-ups the sequence of experiments required to complete the matrices of elastic, piezo-electrical, electro-, piezo and elasto-optical coefficients for the crystals of different symmetry classes, including triclinic, has been analyzed. The possibility of complete analysis for induced optical effects anisotropy on the base of indicative surfaces for different components of these effects tensor has been shown. Additionally, it is shown how the suggested method can be

applied to construct the indicative surfaces describing the induced birefringence and optical path length and spatial surfaces describing the acousto-optic figure of merit.

Вступ

Сучасний розвиток новітньої оптоелектронної та лазерної техніки, приладів контролю, різного виду давачів, сенсорних пристроїв та компонент систем телекомунікацій вимагає використання нових матеріалів, які є чутливішими до дій зовнішніх впливів (механічного навантаження, акустичного, електричного чи магнітного полів). Серед таких матеріалів безперечними лідерами щодо чутливості до дій зовнішніх полів є низькосиметричні кристалічні матеріали середньої та нижчої категорій, які тепер інтенсивно вирощуються та вивчаються (див., наприклад, [1–6]). Але останні проявляють істотну анізотропію індукованих оптичних ефектів, що вимагає виконання відповідного аналізу цієї анізотропії, пошуку екстремальних значень та оптимізації геометричних умов електро-, п'єзо- чи акустооптичної взаємодій з метою підвищення ефективності застосування таких матеріалів як чутливі елементи різного роду пристроїв твердотільної електроніки.

Тому розробка методики 3D-аналізу просторової анізотропії із подальшою оптимізацією електро-, п'єзо- та акустооптичної взаємодій для нових чи вже існуючих анізотропних матеріалів є науково обґрунтованим та практично необхідним завданням, що і є загальною метою всієї роботи. Ця стаття, що є першою із циклу таких робіт, спрямована на розроблення методичної частини дослідження просторової анізотропії індукованих оптичних ефектів та пошуку їх екстремальних значень для кристалів довільного класу симетрії. Результати експериментальних досліджень кристалів LiNbO_3 та $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ щодо їх характеристизації, тобто заповнення матриць пружних, п'єзоелектричних, електро-, п'єзо- і пружнооптичних ефектів, та подальшого виконання 3D-аналізу просторової анізотропії і оптимізації геометрії електро-, п'єзо- та акустооптичної взаємодій світла в цих кристалах наведені в [7]. Тим самим методичні розробки цієї роботи повною мірою апробовані на модельному кристалі LiNbO_3 та вперше перевірені на новому електро- та акустооптичному матеріалі $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$.

Стан проблеми та шляхи її вирішення

Донедавна не існувало загальної методики 3D-аналізу просторової анізотропії індукованих оптичних (електро-, п'єзо- та пружнооптичного) ефектів у низькосиметричному кристалічному матеріалі. Це можна пояснити відсутністю донедавна методик заповнення матриць та складністю аналітичного опису і геометричного відображення просторової анізотропії електро-, п'єзо- та акусто-оптичного ефектів, що описуються тензорами третього або вище рангів.

Започаткована на прикладі електрооптичного ефекту в роботах [8, 9] та на прикладі ефективної пружнооптичної постійної в роботах [10, 11] постановка задачі про екстремальні значення стосувалась їх пошуку лише в площинах симетрії тензора електро- та пружнооптичних постійних і то лише для кристалів тригональної сингонії. У [12] аналогічний підхід був використаний для ефективної фотопружної постійної ромбічних кристалів, але також без одержання тих екстремальних напрямів, які не збігаються із елементами симетрії досліджуваної кристалічної групи (наявність таких екстремумів не заперечується самими авторами). Було розпочато роботи щодо виконання 3D-аналізу просторової анізотропії на прикладі п'єзо- [13–16], пружно- [17–20] та частково акусто-оптичного [21, 22] ефектів у кристалічних матеріалах середньої та нижчої категорій. Подальше виконання та завершення розробки методики повного аналізу просторової анізотропії індукованих оптичних ефектів для кристалів всіх класів симетрії, що дає можливість знайти екстремальні значення та виконати оптимізацію електро-, п'єзо-, пружно- та акусто-оптичної взаємодій, є практично важливим та актуальним і досі (див., наприклад, [23–26]).

Суть розробки полягає в новому підході до аналізу просторової анізотропії індукованих оптичних ефектів в низькосиметричних кристалічних матеріалах на основі вказівних поверхонь для

різних компонент тензора цих ефектів. Побудова вказівних поверхонь [13–22, 27–29, 30], які є єдиним засобом [31] геометричного відображення анізотропії фізичних ефектів, що описуються тензорами третього і вище рангів, здійснюється на основі визначення всіх ненульових компонент цих тензорів, що потребує попереднього однозначного та точного вимірювання їх абсолютних величин і, особливо, знаків [13, 32]. Обмеженість кількості варіантів побудови вказівних поверхонь для індукованих оптичних ефектів та використання найуживаніших умов електро-, п'єзо- чи акустооптичної геометрії експерименту забезпечує можливість повного аналізу просторового розподілу таких ефектів. Це одночасно гарантує можливість пошуку та однозначного вибору екстремального значення ефекту і відповідно підбору оптимальної геометрії електро-, п'єзо- чи акустооптичної взаємодії світла і зовнішнього поля для досліджуваного кристалічного матеріалу.

Розробка методики

Комплексна методика 3D-аналізу просторової анізотропії та оптимізації геометрії електро-, п'єзо- та акустооптичного ефектів у кристалічному матеріалі довільного класу симетрії передбачає:

1) комплексне вимірювання одночасно на тих самих зразках всіх членів матриць діелектричних, пружних, п'єзоелектричних, електрооптичних та фотопружних коефіцієнтів для досліджуваних кристалічних матеріалів із врахуванням термодинамічних умов їх досліджень (повний опис всієї процедури необхідних досліджень наведено у таблиці).

2) побудова просторових поверхонь і виконання 3-D аналізу анізотропії електро-, п'єзо- та пружно-оптичного ефектів, а також побудову відповідних поверхонь для параметра акустооптичної якості;

3) виконання оптимізації взаємодії світла з електричним полем чи акустичною хвилею в досліджуваних кристалах та вибір геометрії кристалографічного зрізу кристалів з екстремальними характеристиками вивченого ефекту.

Зауважимо, що запропонована комплексна методика оптимізації параметрів кристалічного матеріалу на порядок дешевша і потребує менших затрат часу, ніж експериментальна методика оптимізації, яка передбачає створення експериментальних зразків і дослідження їх необхідних параметрів на десятках зрізів із вибраного матеріалу.

Керуючись розвинутими авторами методичними розробками, перевіреними на створених експериментальних установках, опишемо коротко основні науково-технічні підходи та найуживаніші методи, які можна використовувати в кожному напрямку робіт, згідно з наведеною нумерацією в таблиці.

1. Підбір оптично якісних кристалів можна виконати на основі візуального спостереження їх інтерферограм та коноскопічних картин [30], а також за величиною зміни їх природного двозаломлення [33].

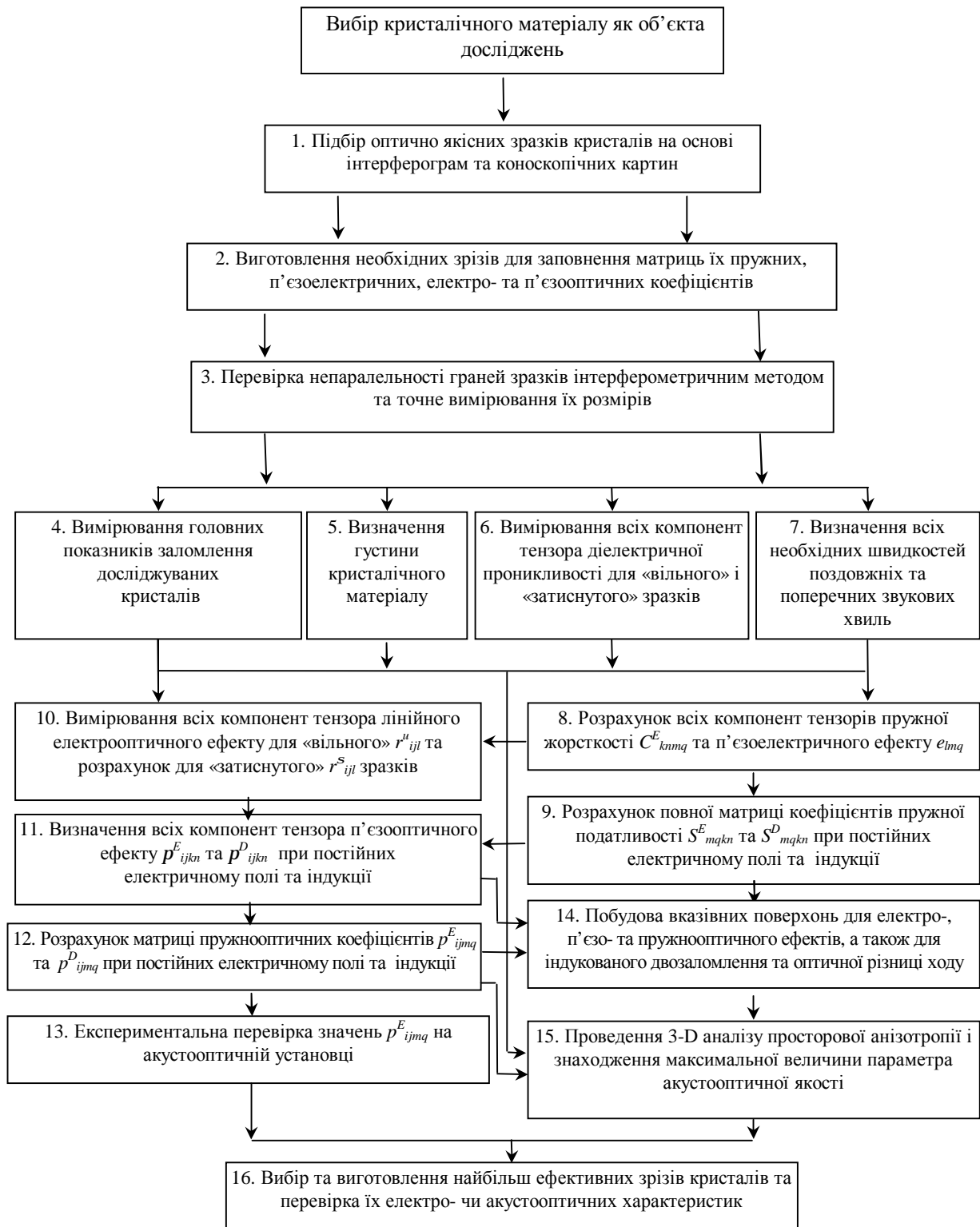
2. Виготовлення необхідних зрізів зразків можна здійснювати на основі рентгеноструктурного аналізу із подальшим шліфуванням і хіміко-механічним поліруванням цих матеріалів.

3. Визначення товщини зразків із оптичних матеріалів можна здійснити механічним методом за допомогою індикатора МИГ-1 з точністю 1 мкм та перевірено інтерферометричним методом [33]. Перевірка відхилення граней зразків від непаралельності, що істотно впливає на точність вимірювань п'єзооптичних коефіцієнтів [34], можна виконати на спеціально створеній інтерферометричній установці на базі інтерферометра Маха-Цендера із фазозсувними елементами [35].

4. Вимірювання показників заломлення n_i виготовлених зразків кристалів можна виконати інтерферометрично-поворотним методом на створеній лабораторній установці [36,37], яка була розроблена на основі наших патентів [38, 39]. Вимірюванням керують за допомогою комп'ютера розробленим програмним забезпеченням, яке дає змогу за виміряними кутами повороту (точність реєстрації 3") плоско-паралельного зразка із досліджуваного матеріалу та зареєстрованою відносною зміною його оптичного шляху безпосередньо розраховувати із експериментальною точністю до $\sim 7 \cdot 10^{-4}$ значення показника заломлення для будь-якого ізотропного чи анізотропного матеріалу.

5. Густина кристалів можна розрахувати із точного вимірювання ваги та об'єму зразків методом додаткового його зважування в рідині з еталонною густиною.

**Структура та послідовність виконання необхідних операцій
в комплексній методиці 3D-аналізу просторової анізотропії електро-, п'єзо-
та акусто-оптичних ефектів для кристалів довільного класу симетрії**



6. Вимірювання всіх компонент тензора діелектричної непроникності для “вільного” β^u_{ij} і “затиснутого” β^s_{ij} зразків можна виконати традиційним методом вимірювання їх ємності [40].

7. Визначення швидкостей поздовжніх та поперечних звукових хвиль V можна виконати на акустичній установці динамічним ехо-імпульсним [41] або неперервно-хвильовим резонансним [42] методами.

8–9. Розрахувати всі матриці пружної жорсткості C_{kmmq}^E та п'єзоелектричні коефіцієнти e_{lmq} (чи п'єзоелектричних модулів $d_{lkn}=e_{lmq}S_{mqkn}^E$) можна на основі вимірюваних швидкостей V , враховуючи розв'язок рівняння Крістофеля для кристалів досліджуваного класу симетрії. Через обернену матрицю можна розрахувати всі компоненти тензора пружної податливості S_{mqkn}^E [19,43]. При тому можна врахувати термодинамічні умови вимірювань та відповідні п'єзоелектричні добавки і розрахувати всі компоненти тензорів пружної жорсткості та податливості згідно з відомими співвідношеннями: $C_{kmmq}^D=C_{kmmq}^E+e_{lkn}e_{lmq}\beta_{ll}^u/\epsilon_0$ або $S_{kmmq}^D=S_{kmmq}^E-d_{lkn}d_{lmq}\beta_{ll}^u/\epsilon_0$ ($\epsilon_0=8.85\cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична постійна). З метою узгодження статичних і динамічних значень пружних констант можна також використовувати методику спекл-інтерферометрії та спекл-кореляції [44, 45].

10. Для кристалічних матеріалів вимірювання лінійного електрооптичного ефекту “вільного” зразка r_{ijl}^u можна виконати на інтерферометричній (на базі інтерферометра Майкельсона) установці. Всі компоненти тензора лінійного електрооптичного ефекту r_{ijl}^u можна обчислити на основі виведених в [46] робочих співвідношень для кристалів всіх класів симетрії, а також триклінний. За потреби коефіцієнти r_{ijl}^σ для “затиснутого” зразка можна обчислити на основі відомого співвідношення $r_{ijl}^\sigma = r_{ijl}^u + p_{ijmq}^E d_{lmq}$; значення p_{ijmq}^E можна вибрати із розрахунків, згідно з п. 12.

11. Вивчення п'єзооптичного ефекту в кристалічних матеріалах передбачає вимірювання на інтерферометричній (на базі інтерферометра Маха-Цендера) установці всіх компонент тензора п'єзооптичного ефекту. Розроблена в [47,48] методику вимірювань дає змогу з більшою точністю і за єдиними формулами визначати величину і знак п'єзооптичних коефіцієнтів для кристалів всіх класів симетрії. Достовірність отриманих експериментальних результатів можна забезпечити різними методами вимірювання: інтерферометричним [47] та поляризаційно-оптичним (наприклад, загальновідомим методом Сенармона [49]) із подальшою взаємною кореляцією отриманих результатів. Під час розрахунків можна використовувати значення показників заломлення та коефіцієнтів пружної податливості, виміряні згідно з п. 4 і 8. Можна також застосовувати нову експериментальну методику визначення п'єзооптичних коефіцієнтів [34], яка дозволяє істотно підвищити точність їх вимірювання.

12. Необхідні для розрахунку параметра акустооптичної якості M_2 значення всіх коефіцієнтів пружнооптичного ефекту при постійних електричному полі та індукції можна розрахувати на основі відомих співвідношень: $p_{ijmq}^E = \pi_{ijkn}^E C_{kmmq}^E$ та $p_{ijmq}^D = p_{ijmq}^E - \beta_{ll}^u e_{lmq} r_{ijl}^u$ з використанням попередньо вимірюваних (див. пп. 8–11) значень всіх необхідних величин. Такий підхід дає змогу розрахувати величину і знак всіх пружнооптичних коефіцієнтів p_{ijmq}^E та p_{ijmq}^D за відомими всіма іншими параметрами із врахуванням вторинної п'єзоелектрооптичної добавки, на відміну від способу безпосереднього вимірювання коефіцієнтів p_{ijmq}^E акустооптичними методами, в яких знак пружнооптичного коефіцієнта не визначається [49] (це і пояснює використання послідовності всіх методик, запропонованих в пп. 7–12).

13. Для достовірності розрахунків необхідно виконати експериментальну перевірку абсолютних значень p_{ijmq}^E на акустооптичній установці, створеній на основі модифікованого методу Діксона-Коуена [50].

14. Знак і величина всіх членів тензорів r_{ijl} , π_{ijkn} та p_{ijmq} , визначені згідно з пп. 10–12, необхідні для побудови вказівних поверхонь електро-, п'єзо- та пружнооптичного ефектів, які є геометричною інтерпретацією просторової анізотропії цих ефектів. Крім того, можуть бути побудовані вказівні поверхні і для індукованого двозаломлення та оптичної різниці ходу, які є більш вживаними, бо описують безпосередньо той параметр, який реально змінюється в кристалічному матеріалі під впливом зовнішніх (електричного чи механічного) полів. Створена нами комп'ютерна програма забезпечує можливість побачити тривимірне зображення вказівної поверхні, побудувати її стереографічну проекцію і розрахувати екстремальні значення та ступінь анізотропії для кожної вказівної поверхні (див., як приклад, наші роботи [17–20]). На цій основі може бути вибрано максимальне значення електро-, п'єзо- та пружнооптичного ефекту і задані необхідні для цього геометрія відповідного експерименту та орієнтація зразка.

15. Вибір максимуму пружнооптичного ефекту не передбачає максимуму параметра акустооптичної якості M_2 . На основі попередніх наших досліджень була розроблена методика та створена програма [21, 22], яка враховує взаємний просторовий розподіл трьох величин: ефективного пружнооптичного коефіцієнта $\rho_{\text{еф}}$, показників заломлення для падаючого n_i та дифрагованого n_j світла і швидкості акустичної хвилі V . Це забезпечує одержання максимального значення параметра M_2 , згідно з

відомим співвідношенням $M_2 = \frac{n_i^3 n_j^3 \rho_{\text{еф}}^2}{rV^3} \cos\beta_i \cos\beta_j \cos\gamma$ (тут ρ – густина кристала, β_i чи β_j та γ – кути

зсуву між напрямком поширення і хвильовим фронтом для падаючого чи дифрагованого світла та акустичної хвилі, відповідно), що дає можливість для досліджуваних кристалів знайти також оптимальні умови і для акустооптичної взаємодії світлової та акустичної хвиль з метою вибору найефективніших зрізів із екстремальним значенням параметра акустооптичної якості.

16. На основі попередніх досліджень можна вибрати та виготовити найефективніші зрізи із максимальною ефективністю електро- чи акустооптичної взаємодій світла в досліджуваних кристалах, на яких можна виконати експериментальну перевірку величини електро-оптичного ефекту чи параметра акустооптичної якості M_2 , згідно з п. 10 чи 13.

Висновки

Для кристалів будь-якого класу симетрії розроблено комплексну методику 3D-аналізу просторової анізотропії індукованих оптичних (електро-, п'єзо- та пружно-оптичного) ефектів, що дає можливість знайти всі екстремальні значення таких ефектів та виконати оптимізацію геометрії електро-, п'єзо- та акусто-оптичної взаємодій світла в досліджуваних кристалах. На основі розроблених методик та створених експериментальних установок проаналізовано послідовність виконання експериментів, необхідних для заповнення матриць пружних, п'єзоелектричних, електро-, п'єзо- та пружно-оптичних коефіцієнтів для кристалів всіх класів симетрії.

Показано можливість повного аналізу анізотропії індукованих оптичних ефектів на базі вказівних поверхонь для різних компонент тензорів цих ефектів. Для цього було створено відповідне програмне забезпечення з метою побудови тримірної зображення вказівних поверхонь та їх стереографічних проєкцій і для розрахунку їх екстремальних значень та ступеня анізотропії. Вказується також можливість побудови вказівних поверхонь для індукованого двозаломлення та оптичної різниці ходу, а також просторових поверхонь для параметра акусто-оптичної якості.

Запропонована методика апробована на прикладі кристалів LiNbO_3 та $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$, що буде наведено в наступних частинах цієї роботи, зокрема в [7].

Автор вдячний проф. Б.Г. Мицику за цінні дискусії та висловлені зауваження.

Роботу виконано за підтримки Українського науково-технологічного центру в межах гранту Європейського Союзу № 3222.

1. Davydov B.L., Krylov A.A., Yagodkin D.I. // *Quantum electronics*. - 2007. - Vol. 37, № 5. - С. 484–488. 2. Mys O., Martynyuk-Lototska I., Grabar A., Vysochanskii Yu. and Vlokh R. // *Ukr. J. Phys. Opt.* - 2006. - Vol. 7, № 3. - С. 124–128. 3. Taylor J. and Guo R. // *NSF EE REU PENN STATE Annual Research Journal*. - 2005. - Vol. III. - С. 177–186. 4. Yin X., Wang J.Y., Wei J.Q., Gang H.D. // *Optics and lasers in engineering*. - 2002. - Vol. 37, № 6. - С. 643–649. 5. Gregora I., Hlinka J. // *Ferroelectrics*. - 2002. - Vol. 267. - P. 237–243. 6. Broeuf N., Branning D., Chaperot I., Dauler E., Guerin S., Jaeger G., Muller A., Migdall A. // *Optical Engineering*. - 2000. - Vol. 39, № 4. - P. 1016–1024. 7. 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. – С. 173–181. 8. Блистанов А.А., Перемолова Н.В., Чирков Л.Е., Шкитин В.А. // *Кристаллография*. - 1979. – Т. 24, № 3. – С. 501–507. 9. Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. // *Кристаллография*. - 1980. – Т. 25, № 1. – С. 27–31. 10. Бондаренко В.С., Бышевский О.А.,

Переломова Н.В., Чирков Л.Е. // Кристаллография. - 1985. - Т. 30, № 2. - С. 220–226. 11. Бондаренко В.С., Билиевский О.А., Переломова Н.В., Чирков Л.Е. // Кристаллография. - 1986. - Т. 31, № 2. - С. 333–336. 12. Балакиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. // Физические основы акустооптики, радио и связь. - 1985. - 280 с. 13. Mytsyk V.G., Pryris Ya.V., Andrushchak A.S. // Cryst. Res. Technol. - 1991. - Vol. 26, № 7. - P. 931–940. 14. Андрущак А.С., Мицук Б.Г. // Укр. фіз. журн. - 1995. - Т. 40, № 11–12. - С. 1122–1126. 15. Мыцык Б.Г., Андрущак А.С. // Кристаллография. - 1996. - Т. 41, № 6. - С. 1054–1059. 16. Влох О.Г., Мыцык Б.Г., Андрущак А.С., Прыриз Я.В. // Кристаллография. - 2000. - Т. 45, № 1. - С. 144–150. 17. Andrushchak A.S., Adamiv V.T., Krupych O.M., Martynuk-Lototska I.Yu., Burak Ja.V., Vlokh R.O. // Ferroelectrics. - 2000. - Vol. 238. - P. 299–305. 18. Kaidan M.V., Zadorozhna A.V., Andrushchak A.S., Kityk A.V. // Applied Optics. - 2002. - Vol. 41, № 25. - P. 5341–5345. 19. Zadorozhna A.V., Kaidan M.V., Andrushchak A.S., Kityk A.V. // Optical Material. - 2003. - Vol. 22, № 3. - P. 263–268. 20. Kaidan M.V., Tybinka B.V., Zadorozhna A.V., Schranz W., Sahraoui B., Andrushchak A.S., Kityk A.V. // Optical Material. - 2007. - Vol. 29. - P. 475–480. 21. Andrushchak A.S., Bobitski Ya.V., Kaidan M.V., Tybinka B.V., Kityk A.V., Schranz W. // Optical Material. - 2004. - Vol. 27. - P. 619–625. 22. Андрущак А.С., Бобицкий Я.В., Кайдан М.В., Тибінка Б.В. // Укр. фіз. журн. - 2005. - Т. 50, № 1. - С. 26–33. 23. François L., Bartelt N.C. and Kellogg G.L. // Phys. Rev. B. - 2005. - Vol. 71. - P. 045416–045422. 24. Vlokh R., Mys O. and Vlokh O. // Ukrainian Journal of Physical Optics Number. - 2005. - Vol. 6, № 4. - С. 150–154. 25. Deliolanis N.C., Apostolidis A.G., Vanidhis E.D., Papazoglou D.G. // Applied Physics B. – Lasers and Optics. - 2002. - Vol. 75, № 1. - P. 67–73. 26. Бережной А.А. // Оптика и спектроскопия. - 2002. - Т. 92, № 3. - С. 503–509. 27. Mytsyk V. // Ukr. J. Phys. Opt. - 2003. - Vol. 4, № 3. - P. 105–118. 28. Мыцык Б.Г., Демьянишин Н.М. // Кристаллография. - 2006. - Т. 51, № 4. - С. 696–703. 29. Демьянишин Н.М., Мыцык Б.Г., Калиняк Б.И. // Укр. фіз. журн. - 2005. - Т. 50, № 5. - С. 521–526. 30. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики. - М., 1979. - 639 с. 31. Шувалов Л.А., Урусовская А.А., Желудев И.С. Современная кристаллография. Т. 4: Физические свойства кристаллов. - М., 1981. - 495 с. 32. Мицук Б.Г., Андрущак А.С. // Укр. фіз. журн. - 1993. - Т. 38, № 7. - С. 1015–1021. 33. Вороняк Т.І., Юркевич О.В., Андрущак А.С. // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. - 2007. - № 592. - С. 157–163. 34. Мицук Б.Г., Андрущак А.С., Гаськевич Г.І. // УФЖ. - 2007. - Vol. 52, № 8. - С. 800–809. 35. Voronyak T.I., Kmet’ A.B., Lychak O.V. // Proceeding of ICO Topical Meeting on Optoinformatics. - St. Petersburg, Russia, 2006. - P. 477–479. 36. Андрущак А.С., Мыцык Б.Г. // Измерительная техника. - 1992. - № 5. - С. 33–34. 37. Andrushchak A.S., Tybinka B.V., Ostrovskij I.P., Schranz W. and Kityk A.V. // Optics & Lasers in Engineering. - 2008. - Vol. 46, № 2. - С. 162–167. 38. Пат. РФ №2102700. / А.С. Андрущак. - 1998. - Бюл. № 2. 39. Пат. України № 17929. / А.С. Андрущак, І.П. Островський, Б.В.Тибінка. Від 16.10.2006. 40. Karbovnyk I. // Ferroelectrics. - 2005. - Vol. 317. - P. 5–9. 41. Sondergeld P., Schranz W., Troster A., Carpenter M.A., Libowitzky E., Kityk A.V. // Phys. Rev. B. - 2000. - Vol. 62, № 10. - P. 6143–6148. 42. Soprunyuk V.P., Fuith A., Kabelka H., Knorr K., Klöpperpieper A., Sokalski K., Kityk A.V. // Phys. Rev. B. - 2002. - Vol. 66. - P. 104102(1-5). 43. Kityk A.V., Zadorozhna A.V., Shchur Ya.I., Martynuk-Lototska I.Yu. and Vlokh O.G. // Phys. stat. sol. (b). - 1998. - Vol. 210. - P. 35–45. 44. Муравський Л.І., Вороняк Т.І., Смоляк В.І., Тхорук А.Л. // Відбір і обробка інформації. - 2002. - № 17. - С. 131–135. 45. Смоляк В.І., Тхорук А.Л., Вороняк Т.І., Олейник О.Т. // Оптичний журнал. - 2004. - Т. 71, № 7. - С. 58–61. 46. Андрущак А.С., Мицук Б.Г., Дем’янишин Н.М., Кайдан М.В., Юркевич О.В. // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. - 2007. - № 592. - С. 148–156. 47. Andrushchak A.S., Bobitski Ya.V., Kaidan M.V., Mytsyk V.G., Kityk A.V. and Schranz W. // Optics & Laser Technology. - 2005. - Vol. 37. - P. 319–328. 48. Mytsyk V. // Ukr. J. Phys. Opt. - 2003. - Vol. 4. - P. 1–20. 49. Нарасимхамурти Т.С. // Фотоупругие и электрооптические свойства кристаллов. - М.: Наука, 1984. - 624 с. 50. Богданов С.В., Семенов В.И. // Опт. и спектроскопия. - 1984. - Т. 57, № 1. - С. 71–73.