

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
„ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

На правах рукопису

АНДРУЩАК Анатолій Степанович

УДК 548.0:535.5+537.2

**ПРОСТОРОВА АНІЗОТРОПІЯ ЕЛЕКТРО-, П’ЄЗО- ТА
АКУСТООПТИЧНИХ ВЗАЄМОДІЙ У КРИСТАЛІЧНИХ
МАТЕРІАЛАХ ТВЕРДОТІЛЬНОЇ ОПТОЕЛЕКТРОНІКИ**

01.04.07 – фізика твердого тіла

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті „Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України.

- Науковий консультант:** доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Мицик Богдан Григорович,
провідний науковий співробітник Фізико-механічного інституту НАН України ім. Г. В. Карпенка (м. Львів)
- Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, професор, академік НАН України
Харченко Микола Федорович,
завідувач відділу оптичних і магнітних властивостей твердих тіл Фізико-технічного інституту низьких температур НАН України ім. Б. І. Веркіна (м. Харків);
- доктор фізико-математичних наук, професор
Поплавко Юрій Михайлович,
професор кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут”;
- доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Григорчак Іван Іванович,
професор кафедри інженерного матеріалознавства і прикладної фізики Національного університету „Львівська політехніка”.

Захист відбудеться 2009 р. о 14³⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.12 у Національному університеті „Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету „Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розіслано „___” _____ 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради, професор

Заячук Д. М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Кристалічні тверді тіла широко використовують у пристроях оптико- та акустоелектроніки. Переважна більшість відомих кристалічних матеріалів володіють низькою симетрією та належать до середньої і нижчої кристалографічних категорій. За характеристиками, що описують вплив електричних і магнітних полів, механічних напружень, акустичних хвиль і потужного лазерного випромінювання на оптичні властивості матеріалів, саме низькосиметричні кристали часто виявляються найбільш перспективними в прикладних застосуваннях. Один з прикладів – це оптично двовісні кристали для нелінійно-оптичних перетворювачів частоти. Проте дослідження і практичне використання таких твердих тіл стримується істотною анізотропією їх властивостей, а тому складністю визначення основних фізичних та робочих характеристик.

Навіть у кристалах кубічної сингонії, у яких фізичні ефекти, що описуються тензорами другого рангу, є ізотропними, ефекти вищих порядків (електро-, п'єзо- та акустооптичні взаємодії) анізотропні. Тому проблеми, пов'язані з анізотропією вказаних взаємодій, актуальні і для „оптично ізотропних” кубічних кристалів. Як наслідок, повне вивчення впливів зовнішніх полів на фізичні властивості кристалічних твердих тіл, що описуються тензорами вищих рангів, потребує належного дослідження анізотропії відповідних ефектів.

Вивчення анізотропії фізичних властивостей шляхом побудови поверхонь просторового розподілу індукованих ефектів та аналізу таких поверхонь на екстремальні значення дає змогу суттєво підвищити ефективність відповідних пристроїв (наприклад, електро-, п'єзо- та акустооптичних комірок для керування лазерним випромінюванням). Такий підхід сприятиме розробці наукових основ технології вдосконалення пристроїв твердотільної оптикоелектроніки, зокрема підвищенню ефективності експлуатаційних характеристик електро-, п'єзо- та акустооптичних пристроїв керування електромагнітним випромінюванням, таких як модулятори і дефлектори світла, сенсори, фільтри та ін.

Важливо, що така технологія навіть не потребує модифікації складу або будови робочих матеріалів електронних пристроїв або екстенсивного пошуку нових матеріалів. Вона реалізує приховані можливості, іноді притаманні й класичним матеріалам, які пов'язані з їх анізотропією та існуванням оптимальних напрямків поширення і поляризації світла, а також напрямків зовнішніх впливів, для яких параметри кристала сягають екстремальних величин.

Незважаючи на те, що кристалооптика та акустооптика анізотропних об'єктів на сьогодні є сформованими галузями, приклади послідовного застосування запропонованого в дисертації підходу на момент початку наших досліджень були відсутні.

Проте наші попередні результати засвідчують його плідність, оскільки пов'язані з анізотропією просторові зміни фізичних ефектів загалом немалі й іноді можуть стосуватися навіть порядку величини. Особливо це актуально для об'єктів з низькою симетрією. Більше того, можна стверджувати, що використання підходу, що включає побудову та аналіз вказівних поверхонь (ВП) фізичних ефектів вищих порядків, – це найкоротший шлях вивчення екстремальних параметрів нового оптичного матеріалу під дією зовнішніх факторів і встановлення оптимальної геометрії застосування зразків у прикладних задачах. У даній роботі ефективність створеної технології продемонстровано на прикладі електро-, п'єзо-, пружно- та акустооптичних ефектів (ЕОЕ, ПОЕ, ПрОЕ та АОЕ), хоча її можна трансформувати й на випадок інших фізичних ефектів, що описуються тензорами вищих рангів.

Наведені міркування доводять актуальність комплексного аналізу просторової анізотропії та пошуку оптимальних геометрій електро-, п'єзо- та акустооптичних взаємодій у кристалічних матеріалах з точки зору наукових і практичних перспектив.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у науково-дослідній лабораторії НДЛ-109 при кафедрі телекомунікацій Національного університету „Львівська політехніка” у відповідності до науково-дослідних програм і тематичних планів Інституту телекомунікацій, радіотехніки та електронної техніки.

Зокрема, як відповідальний виконавець автор брав участь у виконанні держбюджетної наукової теми „Дослідження матеріалів, елементів та розробка пристроїв оптичних інфокомунікаційних систем” (№ державної реєстрації 0108U000383, 2008–2009). Як відповідальний виконавець виконував міжнародний проект Українського Науково-технологічного Центру (УНТЦ) „Акустооптичні пристрої для керування надпотужним лазерним випромінюванням” (№1712, 2002–2004). Під науковим керівництвом автора виконувався проект УНТЦ „Оптимізація геометрії електро-, п'єзо- та акустооптичних взаємодій на основі повного тривимірного аналізу просторової анізотропії (нова комп'ютеризована розробка високоефективних оптичних модуляторів і дефлекторів)” (№3222, 2005–2007) та в даний час виконується ще один проект УНТЦ „Розробка методології створення найбільш ефективних акустооптичних комірок НВЧ-діапазону для управління потужним лазерним випромінюванням” (№4584, 2008–2009). Як виконавець автор також брав участь у виконанні окремих етапів держбюджетних тем кафедри фотоніки: ДБ/Фонон „Розробка методів формування дво- і тривимірних періодичних структур, у тому числі фотонних кристалів” (0102U001171, 2002–2003) і ДБ/Фільтр „Моделювання пристроїв оптоелектроніки та радіотехніки з періодичними структурами та прогнозування їх характеристик” (0104U002313, 2004–2005).

Наукові та практичні результати виконаних досліджень використані також в учбовому процесі, у лекційних курсах і лабораторних практикумах для студентів

Національного університету „Львівська політехніка”, що навчаються за напрямом „Телекомунікації” (спеціальність „Інформаційні мережі зв’язку”), зокрема в таких курсах як „Електродинаміка інформаційних систем”, „Оптичні та радіоканали” і „Апаратура волоконно-оптичних систем передачі інформації”.

Мета і задачі дослідження. **Мета роботи** полягає в розробці наукових основ технології підвищення ефективності застосування кристалічних матеріалів як робочих елементів пристроїв твердотільної оптоелектроніки на основі вивчення просторової анізотропії їх електро-, п’єзо- і акустооптичних властивостей.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі задачі:

- одержання співвідношень для визначення всіх електро-, п’єзо- і пружнооптичних коефіцієнтів (ЕОК, ПОК і ПрОК) кристалів довільних класів симетрії;
- розробка, вдосконалення і апробація експериментальних методик вивчення ЕОЕ, ПОЕ, ПрОЕ, АОЕ та визначення показників заломлення, пружних і п’єзоелектричних коефіцієнтів (ПЕК);
- розробка методики комплексного аналізу просторової анізотропії ЕОЕ, п’єзоелектричного ефекту (ПЕЕ), ПОЕ, ПрОЕ і АОЕ в низькосиметричних кристалах на основі ВП та їх стереографічних проекцій;
- експериментальні дослідження електро-, п’єзо- і акустооптичних характеристик, швидкостей акустичних хвиль, пружних і п’єзоелектричних коефіцієнтів кристалічних матеріалів, перспективних як робочих елементів пристроїв твердотільної оптоелектроніки;
- визначення матриць ЕОК, ПОК і ПрОК, знаходження ефективних значень останніх, а також параметра акустооптичної якості досліджених матеріалів;
- встановлення закономірностей просторового розподілу електро-, п’єзо-, пружно- і акустооптичних характеристик досліджених матеріалів і розрахунки ступеня анізотропії;
- знаходження оптимальних геометрій електро-, п’єзо- і акустооптичних взаємодій у досліджених кристалічних матеріалах для їх ефективного практичного застосування в пристроях твердотільної оптоелектроніки; дослідження робочих параметрів макетів електро- і акустооптичних комірок.

Об’єктом дослідження дисертаційної роботи є індуковані зовнішніми полями зміни оптичних властивостей анізотропних тіл.

Предмет дослідження – електро-, п’єзо-, пружно- і акустооптичні параметри кристалічних матеріалів твердотільної оптоелектроніки та їх анізотропія.

Методи дослідження: інтерферометричні методи контролю якості зразків, визначення показників заломлення кристалів, ЕОК, ПОК і пружних сталих; поляризаційно-оптичні методи вивчення ЕОЕ і ПОЕ; ехо-імпульсний метод визначення акустичних параметрів для розрахунку пружних сталих і ПЕК; розрахунок і визначення ефективних ПрОК, параметра акустооптичної якості і робочих параметрів акустооп-

тичних комірок методами бреггівської дифракції.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі розроблено наукові основи підвищення ефективності електро-, п'єзо- та акустооптичних взаємодій у твердотільних кристалічних матеріалах на основі теоретичних і експериментальних досліджень просторової анізотропії відповідних фізичних ефектів. Наукова новизна роботи полягає в наступному:

1. На основі створеної методики комплексного тривимірного аналізу просторової анізотропії розроблено наукові основи цілеспрямованого підвищення ефективності електро-, п'єзо- та акустооптичних взаємодій в кристалічних матеріалах довільної симетрії, що забезпечує найбільш ефективне використання цих матеріалів і є основою технології виготовлення вискоефективних робочих елементів пристроїв твердотільної оптоелектроніки. Вперше одержано аналітичні співвідношення, що описують ВП ЕОЕ і ПрОЕ, електро- і п'єзоіндукованої оптичної різниці ходу, ефективних ПрОК і параметра акустооптичної якості для ортогональних геометрій використання кристалічних матеріалів як найбільш придатних для покращення експлуатаційних характеристик відповідних пристроїв.
2. Виявлено, що анізотропія ЕОЕ для випадку ортогональних геометрій описується ВП поздовжнього ЕОЕ і трьома ВП поперечного ЕОЕ (поверхнями електричного поля, поляризації світла та хвильового вектора світла). Аналогічно для кожної з трьох акустичних хвиль, що можуть поширюватися в довільному напрямку кристала, АОЕ для ізотропної дифракції світла можна описати трьома ВП – поздовжньою і двома поперечними ВП (поверхнями поляризації світла та акустичної хвилі), а для анізотропної дифракції – двома ВП, що дає можливість повністю описати просторову анізотропію цих ефектів в кристалах.
3. Вперше одержані аналітичні співвідношення між параметрами, що експериментально визначаються в рамках інтерферометричного методу двократних вимірювань, і абсолютними ЕОК та частиною поворотних і поворотно-зсувних ПОК, забезпечують можливість вимірювання з вищою точністю всіх компонент тензорів ЕОЕ та ПОЕ для кристалів будь-яких класів симетрії.
4. При розробці нових методів вимірювання компонент тензорів електро- та п'єзооптичних ефектів виявлено, що
 - використання симетрично тотожних геометрій експерименту дає змогу позбутися впливу неконтрольованої паразитної „постійної” інтерферометричної установки в розробленому методі двократних вимірювань ПОК кристалів і підвищує точність визначення ЕОК та ПОК;
 - застосування способу подвійних вимірювань та одержані аналітичні співвідношення, які його описують, враховують неминучу непаралельність граней зразків і підвищують точність інтерферометричних вимірювань ПОК;

– при визначенні півхвильових механічного напруження та електричної напруги новим поляризаційно-оптичним методом вдвічі підвищується чутливість вимірювання та розширюються межі його застосування;

– врахування показника заломлення середовища та запропоновані способи визначення „нульового положення” зразка забезпечують підвищення точності в інтерферометрично-поворотному методі вимірювання показників заломлення оптичних матеріалів.

5. На основі теоретичних і експериментальних досліджень встановлено закономірності для просторової анізотропії електро-, п'єзо-, пружно- і акустооптичних характеристик кристалів LiNbO_3 , $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$, $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{11}$, $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$, Cs_2HgCl_4 , $\alpha\text{-HfO}_3$, GaP, BaF_2 та ін. Виявлено, що напрямки електричного поля, механічного навантаження, поляризації та поширення світла і акустичних хвиль, які забезпечують найбільші електро-, п'єзо- та акустооптичні параметри кристалічних матеріалів, загалом не збігаються з кристалофізичними осями. Зокрема, максимальні електрично індуковані оптичні різниці ходу для кристалів НЛ і НЛОМ майже втричі більші, а екстремальні значення параметра акустооптичної якості для ізотропної дифракції світла у 2,4 рази більші, порівняно з відповідними параметрами для стандартної геометрії прямих зрізів цих кристалів, що слід враховувати при виготовленні на їх основі робочих елементів пристроїв твердотільної оптоелектроніки.
6. Встановлені закономірності для просторової анізотропії дають можливість визначити оптимальні експериментальні геометрії, що забезпечують найбільш ефективне використання досліджених матеріалів в технології виготовлення робочих елементів електро- та акустооптичних комірок світла. Виявлено, що експериментально виміряні параметри створених макетів модуляторів, виготовлених на основі оптимізованих зрізів кристалів LiNbO_3 і $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$, добре узгоджуються з теоретично розрахованими параметрами та забезпечують пониження керуючої електричної напруги і підвищення дифракційної ефективності відповідних пристроїв.

Практичне значення одержаних результатів. Одержані в дисертаційній роботі експериментальні та теоретичні результати стосуються кристалічних матеріалів для оптоелектронних пристроїв, що працюють на принципах електро-, п'єзо- і акустооптики. Отримані результати, запропоновані рішення, методичні і технічні прийоми є базою для цілеспрямованого підвищення ефективності пристроїв твердотільної оптоелектроніки. Зокрема:

1. Запропонована технологія цілеспрямованого підвищення ефективності електро-, п'єзо- та акустооптичних взаємодій дає змогу досягти істотного покращення параметрів робочих елементів пристроїв твердотільної оптоелектроніки для керування електромагнітним випромінюванням (електро- та акустооптичних модуляторів, фільтрів, затворів, дефлекторів тощо) і її можна запропонувати спеціалізованим фірмам із випуску відповідної серійної продукції.

2. Запропоновану методику комплексного тривимірного аналізу просторової анізотропії електро-, п'єзо-, пружно- та акустооптичних взаємодій, зокрема відповідні практичні прийоми та критерії, можна використовувати для дослідження анізотропії інших індукованих явищ у кристалах довільної симетрії.
3. Метод двократних вимірювань абсолютних ЕОК і ПОК та спосіб врахування неминучої непаралельності оптичних граней зразків у вивченні ПОЕ, які відзначаються підвищеною точністю та ширшими практичними можливостями можна рекомендувати для досліджень ЕОЕ та фотопружності нових матеріалів твердотільної оптоелектроніки.
4. Запропоновану технологію контролю геометрії поверхонь і оптичної неоднорідності кристалічних зразків можна застосовувати при виготовленні активних елементів електро- і акустооптичних комірок або інших пристроїв твердотільної оптоелектроніки.
5. Модифікований інтерферометрично-поворотний метод вимірювання показників заломлення кристалічних матеріалів і відповідну автоматизовану вимірювальну установку, що захищені патентами і відзначаються високою точністю та спрощеним процесом вимірювань, можна використовувати при вивченні нових матеріалів в наукових лабораторіях чи на виробництві.
6. Низку вдосконалень, запропонованих для інтерферометричних, поляризаційно-оптичних та інших методик визначення якості зразків, дослідження електро-, п'єзо- і акустооптичних характеристик, а також відповідні експериментальні установки можна рекомендувати для застосування в науково-дослідних і технологічних лабораторіях.
7. Результати щодо електро-, п'єзо-, пружно- та акустооптичних характеристик досліджених у роботі кристалічних матеріалів демонструють їх досі невраховані можливості та вказують на конкретні умови, за яких ці матеріали є найбільш ефективними при подальших прикладних застосуваннях. Зокрема, характеристики електрооптичних і акустооптичних модуляторів на основі LiNbO_3 і $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ у випадку оптимальної геометрії робочих елементів у кілька разів кращі, ніж для відомої стандартної геометрії; причому променево стійкіші кристали $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ мають перевагу в 1,3 рази над кристалами LiNbO_3 за величиною максимального параметра акустооптичної якості; характеристики кристалів $\beta\text{-BaV}_2\text{O}_4$ найкращі для анізотропної дифракції світла; температурно стабільні кристали $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{11}$ мають акустооптичні характеристики, сумірні з характеристиками LiNbO_3 .

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно здійснив вибір мети і задач досліджень, а також засобів їх розв'язання. Основні результати дисертаційної роботи та положення, які відображають її наукову новизну, одержані автором самостійно. Зокрема, автору належать формулювання тих основних висновків у статтях, на яких базуються висновки дисертації, а також визначальний внесок у написання бі-

льшості статей. Особистий внесок автора полягає у вдосконаленні експериментальних методик дослідження, розвиткові та систематичному застосуванні методів вивчення анізотропії електро-, п'єзо та акустооптичних взаємодій у кристалах і поліпшення на цій основі характеристик відповідних пристроїв, одержанні переважної більшості конкретних результатів роботи, їх узагальненні та встановленні можливостей прикладного застосування.

Більшість результатів роботи обговорено з науковим консультантом проф. Б. Г. Мициком, який привернув увагу автора до проблем аналізу просторової анізотропії фізичних ефектів та оптимізації п'єзо- та електрооптичних елементів. Спільно з проф. Р. О. Влохом автор обговорив низку результатів для ПОЕ в кристалах різних класів симетрії та виконав інтерпретацію перехресного п'єзо-електрооптичного ефекту [6]. Експериментальні вимірювання ПОК, ПрОК [7, 9, 13] і акустичних параметрів [15, 16, 18] кристалів β - BaV_2O_4 , а також побудову ВП для них [15, 16, 18] і для кристалів Cs_2HgCl_4 [14, 22] проведено за участю канд. техн. наук М. В. Кайдана та канд. фіз.-мат. наук І. Ю. Мартинюк-Лотоцької. Дані для ПОЕ кристалів Cs_2HgCl_4 [11, 12] і ЕОЕ кристалів LiNbO_3 і $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ [25, 30, 31] одержано спільно з канд. фіз.-мат. наук А. В. Задорожною і асп. О. В. Юркевичем, відповідно. Окремі робочі формули для кристалів груп mmm і $3m$ [17] виведено за участю М. В. Кайдана. Можливість застосування інтерферометрично-поворотного методу в діапазоні міліметрових і сантиметрових довжин хвиль [49] з'ясовано спільно з доц. Сиротинським О. І. Окремі експериментальні дані для анізотропії ПОЕ [1, 3] здобуто за допомогою канд. фіз.-мат. наук Н. М. Дем'янишин, а частину акустичних і акустооптичних досліджень [26, 29] виконано за участю ст. н. сп. Т. І. Вороняка, пров. інж. Д. М. Винника і доц. Г. П. Лаби. Програмне забезпечення автоматизованого інтерферометричного визначення показників заломлення [20] створено у співпраці зі ст. викл. Б. В. Тибінкою. В окремих підрозділах дисертаційної роботи містяться оглядові частини, де описано стан проблеми і поставлено задачі дослідження.

Кристали для досліджень вирощено в лабораторіях Львівського НВП „Карат”, Ін-ту фізичної оптики, Ужгородського національного ун-ту, Богородицького заводу технохімічних виробів (Тульська обл., Росія) та Інституту кристалографії РАН (Москва, Росія).

В основних працях, які відображають результати дисертації, внесок автора є переважачим і полягає в наступному: [1, 2, 5] – вдосконалення методики, розрахунки, аналіз та інтерпретація; [3, 7, 13] – апробація методики, підготовка експерименту, участь у його проведенні, обробленні даних, аналітичних розрахунках та інтерпретації; [9, 17, 40] – розробка експериментальних методик, проведення експерименту, більшість розрахунків, інтерпретація результатів; [8, 10–12] – розробка методики досліджень і експериментальної установки, апробація методики, участь в розрахунках та інтерпретації результатів; [4, 14, 16, 22, 45] – розробка методики дослі-

джені, переважаюча участь у розрахунках, аналізі та інтерпретації результатів; [15, 18, 34, 38, 39] – вибір моделі та робочих методів, участь в аналітичних розрахунках, аналізі та інтерпретації результатів; [20, 21, 23, 24, 27, 32, 37, 41, 43, 44, 46, 48–51] – розробка методик, проведення експерименту за участю співавторів, аналіз та інтерпретація результатів; [6, 19, 25, 26, 29–31, 33, 35, 42] – планування та участь в експерименті, переважаюча участь в аналізі результатів.

Постановку завдань досліджень у переважній більшості опублікованих робіт здійснено автором або за його співучастю. Авторів дисертації належить формулювання тих висновків у статтях, на яких базуються дисертаційні висновки. Автор брав активну участь у написанні статей і тез доповідей, а також особисто представляв і захищав на конференціях наукові положення переважної більшості доповідей за результатами дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на Міжнародній науково-практичній конференції „П’єзотехніка-95” (Ростов-на-Дону, Росія, 1995), IV Українсько-польській конференції з фазових переходів і фізики сегнетоелектриків (Дніпропетровськ, 1998), IX Європейській конференції з сегнетоелектрики (Прага, Чехія, 1999), I Українській школі-семінарі з фізики сегнетоелектриків і споріднених матеріалів (Львів, 1999), Міжнародній конференції „Сучасні матеріали” (Київ, 1999), Відкритій українсько-французькій конференції з сегнетоелектриків (Київ, 2000), V Європейській конференції із застосувань полярних діелектриків (Юрмала, Латвія, 2000), X Міжнародній конференції з сегнетоелектрики (Мадрид, Іспанія, 2001), Міжнародній конференції з параметричної оптики (Львів, 2001), X Європейській конференції з сегнетоелектрики EMF-03 (Кембридж, Великобританія, 2003), I Міжнародній конференції з сучасної оптоелектроніки та лазерів SAOL-03 (Алушта, 2003), VI Міжнародній конференції з лазерів і моделювання волоконно-оптичних мереж „LFNM 2004” (Харків, 2004), Ювілейній конференції, присвяченій 25-річчю кафедри нелінійної оптики (Львів, 2004), Відкритій науково-технічній конференції Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Національного університету „Львівська політехніка” з проблем електроніки (Львів, 2005), Міжнародній конференції TCSET’2006 (Львів–Славськ, 2006), Міжнародній школі-семінарі IEEE EWDWTW’06 (Сочі, Росія 2006), Міжнародній конференції OPTO’2006 (Нюрнберг, Німеччина, 2006), Симпозіумі з проблем фотоніки (Вроцлав, Польща, 2006), Ювілейній десятій науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу Національного університету „Львівська політехніка” (Львів, 2007), Міжнародній конференції „Оксидні матеріали електронної техніки – отримання, властивості, застосування” (Львів, 2007), Міжнародній конференції „Кристалічні матеріали’2007” (Харків, 2007), Міжнародній конференції CADSM’2007 (Львів–Поляна, 2007), Міжнародній конференції „Функціональні матеріали” ICFM’2007 (Партеніт, 2007), XIII Міжнародній кон-

ференції SENSOR'2007 (Нюрнберг, Німеччина, 2007), Міжнародній конференції з сучасних проблем радіоінженерії, телекомунікацій та комп'ютерних наук TCSET'2008 (Львів–Славсько, 2008), XI і XII Відкритих науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки НУ „Львівська політехніка” з проблем електроніки (Львів, 2008, 2009), IX Міжнародній науково-практичній конференції „Сучасні інформаційні та електронні технології” (Одеса, 2008), V Міжнародному оптичному конгресі „Оптика XXI століття” (Санкт-Петербург, Росія, 2008), IX Міжнародній конференції з лазерів і моделювання волоконно-оптичних мереж LFNМ-08 (Алушта, 2008) і Міжнародному симпозиумі OMEE-2009 (Львів, 2009).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 82 праці, зокрема 46 статей у фахових журналах, збірниках наукових праць і матеріалах конференцій, 31 тези виступів на конференціях, а також 5 патентів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, шести розділів, висновків, чотирьох додатків і списку використаних джерел. Її загальний обсяг складає 405 стор. (у т. ч. машинописного тексту основної частини дисертації – 255 стор., обсяг додатків – 21 стор.). Робота містить 100 рисунків, 73 таблиці (90 стор.) і 344 бібліографічні найменування (39 стор.).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі дослідження, описано об'єкт, предмет і методи досліджень, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, а також подано інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію результатів роботи, її структуру та публікації.

Перший розділ дисертаційної роботи присвячено аналітичному описові електрооптичних і фотопружних явищ в анізотропних кристалічних матеріалах.

Оскільки аналіз літератури засвідчив фактичну відсутність загальної методики визначення всіх абсолютних ЕОК для кристалів різних класів симетрії, в роботі одержано аналітичні співвідношення, які встановлюють зв'язок коефіцієнтів лінійного ЕОЕ і параметрів, виміряних інтерферометричними та поляризаційно-оптичними методами, для кристалів довільної, зокрема найнижчої триклінної симетрії. Показано, що для визначення всіх ЕОК кристала найнижчої симетрії потрібно виготовити чотири зразки: зразок прямого зрізу для визначення головних коефіцієнтів, а також три зразки сорокап'ятиградусних зрізів – для визначення решти ЕОК.

Для кожної з конкретних геометрій експерименту виведено формули, які пов'язують ЕОК з індукованими змінами оптичного шляху променя. Замість загального, проте громіздкого, методу перерізів оптичної індикатриси, збуреної зовнішніми діями, у цих розрахунках застосовано тензорний метод. Для довільної геометрії

електрооптичного експерименту, виконаного, наприклад, на базі інтерферометра Маха-Цендера, індукована зміна оптичного шляху $\delta\Delta'_{ikl}$ для кристалічного зразка, розташованого в одному з плечей інтерферометра, описується виразом

$$\delta\Delta'_{ikl} = -r'_{il} n_i^3 E_l t_k / 2 + d'_{lk} (n_i - 1) E_l t_k, \quad (1)$$

де \mathbf{k} , \mathbf{i} , \mathbf{l} визначають відповідно напрямки поширення світлового променя, його поляризації та напруженості прикладеного електричного поля; штрихи позначають „нову” систему координат, обрану так, щоб її осі були паралельними до згаданих напрямків; t_k – розмір кристала вздовж променя; E_l – напруженість електричного поля; n_i – показник заломлення зразка; r'_{il} і d'_{lk} – відповідно ЕОК і ПЕК у матричному представленні. Зв'язки ефективних величин r'_{il} і d'_{lk} з їх головними значеннями в кристалофізичній системі координат задаються формулами перетворення тензорів третього рангу, а ефективний показник заломлення n'_i знаходять, виконуючи відповідне перетворення для тензора діелектричної непроникуваності.

Наприклад, для визначення коефіцієнта r_{41} використовують геометрії експерименту $i = 4$, $k = \bar{4}$, $l = 1$ та $i = \bar{4}$, $k = 4$, $l = 1$ (тут $\bar{4}$ – діагональний напрямок між додатними напрямками головних осей X_2 і X_3 , $\bar{4}$ – напрямок, перпендикулярний до нього), які можна назвати відповідно прямими та симетричними умовами. Результати для цих двох геометрій визначення ЕОК аналізуються методом двократних вимірювань ЕОК. Відповідний робочий вираз для ЕОК r_{41} має вигляд

$$r_{41} = -n_4^{-3} [\delta\Delta_{4\bar{4}1} / (t_4 E_1) - \delta\Delta_{\bar{4}41} / (t_4 E_1) - (n_4 - 1) d_{14}], \quad (2)$$

де $n_4 = 2^{1/2} / [n_2^{-2} + n_3^{-2}]^{1/2}$. Метод підвищує точність вимірювання коефіцієнта r_{41} та всіх інших неголовних ЕОК через відсутність потреби врахування в виразі (2) головних ЕОК та ПЕК, які на практиці завжди визначають з певними похибками.

Порівняння похибок визначення ЕОК, розрахованих за стандартними підходами, для звичайного (однократного) методу та методу двократних вимірювань засвідчує перевагу останнього (~ 9% і 6% відповідно). Апробацію методики проведено на модельних електрооптичних кристалах ніобату літію (НЛ) LiNbO_3 , для яких співвідношення типу (2) для вимірювань на базі інтерферометра Майкельсона приведені до методу півхвильових напруг (тоді $\delta\Delta_{ikl} = \lambda/2$, λ – довжина світлової хвилі).

Для загального випадку триклінних кристалів виведено порівняно прості аналітичні вирази, що описують ПОЕ в інтерферометричних експериментах. Основні результати стосуються поворотних і поворотно-зсувних п'єзооптичних коефіцієнтів (ПОК) π_{im} , для яких коректні формули одержано вперше. Наприклад, для ПОК π_{55} у рамках методу двократних вимірювань отримано вираз

$$\pi_{55} = -2n_5^{-3} \left(\frac{\delta\Delta_{555}}{t_5 \cdot \sigma_5} + \frac{\delta\Delta_{\bar{5}\bar{5}\bar{5}}}{t_5 \cdot \sigma_{\bar{5}}} \right) + n_5^{-3} (n_5 - 1) (S_{11} + S_{33} + 2S_{13} - S_{55}) - (\pi_{11} + \pi_{13} + \pi_{31} + \pi_{33}) / 2, \quad (3)$$

де σ_m і S_{km} – матричні компоненти механічного напруження та пружної податливості, відповідно; $n_5 = 2^{1/2} / [n_1^{-2} + n_3^{-2}]^{1/2}$ – показник заломлення; $\delta\Delta_{ikm}$ – індукована зміна оптичного шляху. Крім того, одержано додаткові співвідношення для окремих ПОК кристалів вищої симетрії, експериментальні геометрії визначення яких найскладніші. Ці формули дають змогу спростити вимірювання ПОК або зменшити необхідну кількість кристалічних зразків.

Уведено поправки до робочих співвідношень для визначення ПОК, пов'язані з реальною незначною за величиною непаралельністю граней досліджуваних кристалічних зразків. Для усунення похибки внаслідок клиновидності зразка за методом подвійних вимірювань потрібно визначити півхвильове напруження двічі: для прямого проходження світла (σ_{im}) і після повороту зразка на 180° навколо напрямку просвічування (σ'_{im}). Тоді робочий вираз для розрахунку ПОК набуде вигляду

$$\pi_{im} = -\left(\delta\Delta_{ikm} / n_i^3 t_k \right) (1/\sigma_{im} + 1/\sigma'_{im}) + 2S_{km} (n_i - 1) / n_i^3. \quad (4)$$

У граничному випадку відсутності клину ($\sigma_{im} = \sigma'_{im}$) формула (4) зводиться до стандартної, відомої з літератури. Оскільки вирази (4) правильні лише для головних ПОК π_{im} ($i, m = 1, 2, 3$), поправки на клиновидність зразків записано також для неголовних ПОК. Наприклад, при використанні методу півхвильових напружень компоненту π_{41} для кристалів класу симетрії 32 можна визначити із такого виразу:

$$\pi_{41} = -\lambda / 4n_4^3 (1/\sigma_{41}^0 + 1/\sigma'_{41}{}^0 - 1/\sigma_{41}^0 - 1/\sigma'_{41}{}^0) - S_{14} (n_4 - 1) / n_4^3, \quad (5)$$

де $\sigma_{im}^0 = t_k \sigma_{im}$ і $\sigma'_{im}{}^0 = t_k \sigma'_{im}$ – керуючі механічні напруження, що характеризують індуковану зміну оптичного шляху.

У першому розділі наведено співвідношення, використані для інтерпретації даних для ЕОК, ПОК і ПрОК кристалів залежно від термодинамічних умов їх вимірювання, найперше механічного стану (механічно вільний і затиснутий зразки) та електричного стану (умови постійних електричного поля та індукції). Сформульовані також узагальнені правила вибору знаків ПОК, якими необхідно користуватись при порівнянні ПОК, одержаних з різних експериментів і за різними методами.

У **другому розділі** наведено опис просторової анізотропії індукованих зовнішніми полями ефектів у кристалічних матеріалах довільної симетрії, представлено загальний підхід до аналізу анізотропії ЕОЕ, ПОЕ, ПрОЕ і АОЕ та запропоновано технологію підвищення ефективності електро-, п'єзо- та акустооптичних взаємодій.

Основна задача роботи – це вибір оптимальної геометрії електро-, п'єзо- або акустооптичних комірок, тобто встановлення кристалографічної орієнтації робочого

кристалічного елемента комірки, напрямків зовнішніх полів (зокрема, поширення та поляризації акустичної хвилі), поширення та поляризації світла, що забезпечує відповідні максимальні параметри даного матеріалу. Така технологія базується на аналізі анізотропії тензорної фізичної властивості, яку для тензорів вищих рангів описують ВП. Донедавна цей апарат використовували переважно для аналізу тензорів другого рангу, а в описі тензорів третього та четвертого рангів обмежувалися лише ВП для поздовжніх компонент; саму анізотропію розглядали в головних площинах, визначаючи екстремальні значення тільки в площинах симетрії тензора.

У роботі одержано загальне рівняння ВП для лінійного ЕОЕ у кристалах довільної симетрії. Для класу $3m$, до якого, зокрема, належить НЛ, маємо такі чотири можливі рівняння ВП ЕОЕ в сферичній системі координат:

$$\begin{aligned} r'_{ii}(\theta, \varphi) &= -r_{22}\sin^3\theta\sin 3\varphi + (r_{13} + 2r_{51})\sin^2\theta\cos\theta + r_{33}\cos^3\theta, \\ r'^{(i)}_{il}(\theta, \varphi) &= -r_{22}\sin^2\theta\cos 3\varphi, \\ r'^{(\ell)}_{il}(\theta, \varphi) &= r_{22}\sin\theta\sin 3\varphi + r_{13}\cos\theta, \\ r'^{(k)}_{il}(\theta, \varphi) &= -r_{22}\sin\theta\cos^2\theta\sin 3\varphi + r_{13}\cos^3\theta + (r_{33} - 2r_{51})\sin^2\theta\cos\theta. \end{aligned} \quad (6)$$

У формулах (6) верхній індекс у дужках вказує на напрямок, паралельний до радіус-вектора \mathbf{r} ВП; $r'_{ii}(\theta, \varphi)$ визначає ВП поздовжнього ЕОЕ; $r'^{(i)}_{il}(\theta, \varphi)$, $r'^{(\ell)}_{il}(\theta, \varphi)$ і $r'^{(k)}_{il}(\theta, \varphi)$ – ВП поперечного ЕОЕ, названі відповідно як ВП поляризації світла, електричного поля та хвильового вектора світла. Приклади ВП ЕОЕ для кристалів LiNbO_3 подані на рис. 1.

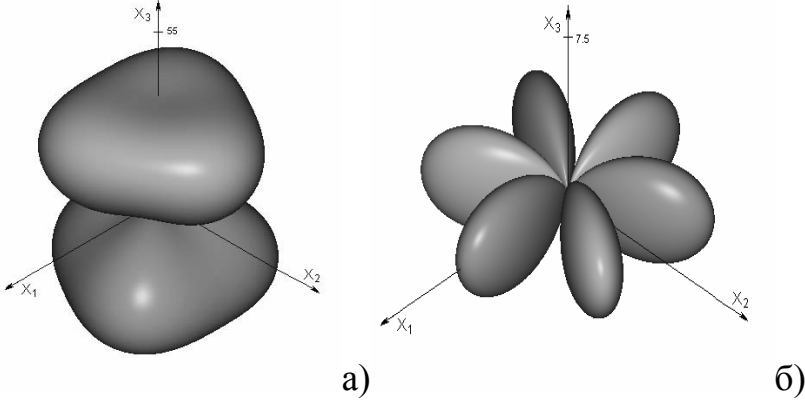


Рис. 1. Приклади ВП для поздовжнього (а) і поперечного (б) ЕОЕ в кристалах НЛ

Крім загальних програмних методів знаходження кутових напрямків екстремумів (найперше, максимумів) ВП, які визначають напрямки оптимізованих електрооптичних взаємодій, для класу симетрії $3m$ аналітично описано їх кутову орієнтацію.

Використовуючи ефективний ЕОК $r_{kl}^0 = r_{il}n_i^3 - r_{jl}n_j^3 - 2(n_i - n_j)d_{lk}$, кількісно описано три ВП електрично індукованого приросту різниці ходу, які важливі для розробки електрооптичних комірок для пристроїв твердотільної оптоелектроніки.

У роботі створено загальну методику побудови ВП індукованих оптичних ефектів для оптично двовісних кристалів. Аналізуючи процес поширення світла в цих кристалах і визначаючи напрямки двох можливих поляризацій світла \mathbf{i} та \mathbf{j} (для одновісних кристалів це відповідно поляризації незвичайної і звичайної хвиль) залежно від напрямку поширення \mathbf{k} на основі невизначеного множника Лагранжа, виведено загальні рівняння ВП ПОЕ і ПрОЕ для триклінних кристалів. Напрямні косинуси поляризації світла \mathbf{i} ($\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \alpha_{i3}$), нормальних механічних напружень \mathbf{m} ($\alpha_{m1}, \alpha_{m2}, \alpha_{m3}$) і нормальних деформацій \mathbf{n} ($\alpha_{n1}, \alpha_{n2}, \alpha_{n3}$), що входять до формул для цих ВП, містять складні функції різниць головних компонент тензора діелектричної непроницності. Одержано також рівняння ВП для поздовжніх і поперечних ПОЕ і ПрОЕ, зокрема для ромбічних кристалів класу симетрії mmm . Подібно до оптично одновісних кристалів, у двовісних теж можливі три практично важливі ВП ПОЕ: ВП поздовжнього ПОЕ π'_{ii} ($\mathbf{i} \parallel \mathbf{m} \parallel \mathbf{r}$), поперечна ВП поляризації світла $\pi^{(i)}_{im}$ ($\mathbf{i} \parallel \mathbf{r}, \mathbf{m} \parallel \mathbf{j}$) і поперечна ВП механічного напруження $\pi^{(m)}_{im}$ ($\mathbf{m} \parallel \mathbf{r}, \vec{i} \parallel \vec{j}$).

Одержано рівняння ВП п'єзо-індукованого приросту оптичного шляху $\delta\Delta'_1, \delta\Delta'_2$ і $\delta\Delta'_3$, що відповідають вказаним експериментальним геометріям для класів симетрії $3m$ та 32 . На рис. 2 подані приклади поверхонь ПОЕ для кристалів $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{11}$.

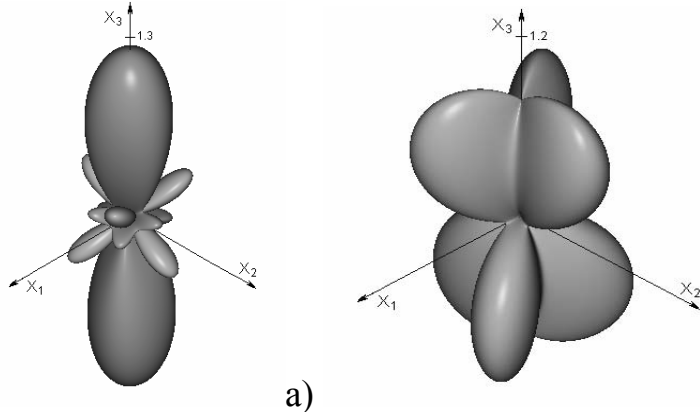


Рис. 2. Приклади ВП для поздовжнього (а) і поперечного (б) ПОЕ в кристалах лангаситу $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{11}$.

Для опису відхилення ВП для ПОЕ і ПрОЕ від геометричної фігури, що відповідає ізотропній властивості (сфери), в роботі введено ступінь анізотропії ВП:

$$\eta = [(V_{sp} - |V^+ - V^-|)/V_{sp}] \cdot 100\%, \quad (7)$$

де $V_{sp} = 4\pi|f_{extr}|^3/3$ – це об'єм сфери з радіусом $|f_{extr}| = \max(|f_{min}|, |f_{max}|)$, а V^+ і V^- – об'єми відповідно додатних і від'ємних частин ВП.

Для оцінки акустооптичної ефективності досліджених матеріалів використано коефіцієнт акустооптичної якості $M_2 = (n_\mu^3 n_\nu^3 p_{ef}^2 / \rho V^3) \cos\beta_\mu \cos\beta_\nu \cos\gamma$, де $\mu, \nu = 1, 2$; p_{ef} – ефективна пружнооптична постійна; ρ – густина кристала; n_μ, n_ν – показники заломлення падаючого та дифрагованого світла, V – швидкість акустичної хвилі, β_μ, β_ν і γ – відповідно кути зсуву напрямків переносу енергії відносно хвильових норма-

лей для падаючого світла, дифрагованого світла та акустичної хвилі ($\mu = \nu$ відповідає ізотропній, $\mu \neq \nu$ – анізотропній акустооптичній дифракції).

Отримано рівняння ВП для параметра p_{ef} через ПрОК p_{in} , визначених у кристалофізичній системі координат, на прикладі кристалів класу симетрії $3m$:

$$\begin{aligned}
 p_{ef} = & 0,5\sin\theta_\mu\sin\theta_\nu\sin\theta_a\sin\theta_f(\cos(\varphi_\mu-\varphi_\nu)\cos(\varphi_a-\varphi_f)+\cos(\varphi_\nu+\varphi_\mu-\varphi_a-\varphi_f))p_{11}+ \\
 & +0,5\sin\theta_\mu\sin\theta_\nu\sin\theta_a\sin\theta_f(\cos(\varphi_\mu-\varphi_\nu)\cos(\varphi_a-\varphi_f)+\cos(\varphi_\nu+\varphi_\mu-\varphi_a-\varphi_f))p_{12}+ \\
 & +\sin\theta_\mu\sin\theta_\nu\cos\theta_a\cos\theta_f\cos(\varphi_\mu-\varphi_\nu)p_{13}+\cos\theta_\mu\cos\theta_\nu\sin\theta_a\sin\theta_f\cos(\varphi_a-\varphi_f)p_{31}+ \\
 & +\cos\theta_\mu\cos\theta_\nu\cos\theta_a\cos\theta_f p_{33}+(\sin\theta_\mu\cos\theta_\nu(\sin\theta_a\cos\theta_f\cos(\varphi_\mu-\varphi_a)+\cos\theta_a\sin\theta_f\times \\
 & \times\cos(\varphi_\mu-\varphi_f))+\cos\theta_\mu\sin\theta_\nu(\cos\theta_a\sin\theta_f\cos(\varphi_\nu-\varphi_f)+\sin\theta_a\cos\theta_f\cos(\varphi_\nu-\varphi_a)))p_{44}+ \\
 & +\sin\theta_\mu\sin\theta_\nu(\sin\theta_a\cos\theta_f\sin(\varphi_\mu+\varphi_\nu+\varphi_a)+\cos\theta_a\sin\theta_f\sin(\varphi_\mu+\varphi_\nu+\varphi_f))p_{14}+ \\
 & +\sin\theta_a\sin\theta_f(\sin\theta_\mu\cos\theta_\nu\sin(\varphi_\mu+\varphi_a+\varphi_f)+\cos\theta_\mu\sin\theta_\nu\sin(\varphi_\nu+\varphi_a+\varphi_f))p_{41}, \quad (8)
 \end{aligned}$$

де індекси μ, ν, a, f для сферичних кутів θ і φ вказують, яких векторів вони стосуються ($\mathbf{i}_\mu, \mathbf{i}_\nu$ – це одиничні вектори поляризації падаючої та дифрагованої світлових хвиль; \mathbf{a}, \mathbf{f}_q – відповідні вектори для напрямку поширення та поляризації акустичної хвилі).

На підставі сукупного аналізу задач кристалооптики та еластодинаміки плоских хвиль було проведено аналітичний опис анізотропії акустооптичних взаємодій і одержано вирази для ВП коефіцієнта M_2 для ізотропної та анізотропної дифракції світла на поздовжніх і поперечних акустичних хвилях в оптично одновісних кристалічних матеріалах. Показано, що у випадку ізотропної дифракції на кожній з трьох акустичних хвиль, що поширюються в даному напрямку кристала, актуальні такі ВП: поздовжня ВП ($\mathbf{i}_\mu \parallel \mathbf{a} \parallel \mathbf{r}$, де \mathbf{r} – це радіус-вектор ВП), поперечна ВП поляризації світла ($\mathbf{i}_\mu \parallel \mathbf{r}; \mathbf{a} \parallel \mathbf{j}$) і поперечна ВП акустичної хвилі ($\mathbf{a} \parallel \mathbf{r}; \mathbf{i}_\mu \parallel \mathbf{j}$). Випадок анізотропної дифракції слід описувати лише першою та третьою зі згаданих ВП.

Вкінці розділу описана методика комплексного 3D-аналізу анізотропії індукованих оптичних ефектів (ЕОЕ, ПОЕ, ПрОЕ і АОЕ) для кристалів довільної симетрії та технологія підвищення ефективності характеристик електро- і акустооптичних комірок. Відповідну послідовність експериментів і розрахунків подано на рис. 3. Запропонований у роботі підхід істотно дешевший і потребує менших затрат часу, аніж емпірична експериментальна методика. До того ж, остання трудомістка та не може дати гарантій того, що найкращі з досягнутих в експериментах параметрів справді відповідають глобальному максимуму ефекту, а оптимальну геометрію не пропущено.

Третій розділ присвячено розвитку експериментальних методів і апаратурного забезпечення для досліджень електро-, п'єзо-, пружно-, акустооптичних та інших характеристик кристалічних твердих тіл, потрібних для досягнення мети роботи.

Описано технологію інтерферометричного контролю за якістю виготовлення зразків (клиновидністю граней, їх відхиленням від площинності, локальними оптич-

ними неоднорідностями, характером спотворень по апертурі лазерного променя тощо) на основі інтерферометра Маха-Цендера (рис. 4). Зокрема, клиновидність зразка θ_x уздовж напрямку X можна визначати за періодом Λ інтерференційної картини ($\theta_x = (2/(n-1))\arcsin(\lambda/2\Lambda_x)$). На цій установці з точністю до $\sim 0,2$ мкм визначено клиновидність зразків, виготовлених з кристалів $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ (НЛОМ) у Росії, Японії та на НВП „Карат”, і оцінено неоднорідності їх оптичних характеристик.

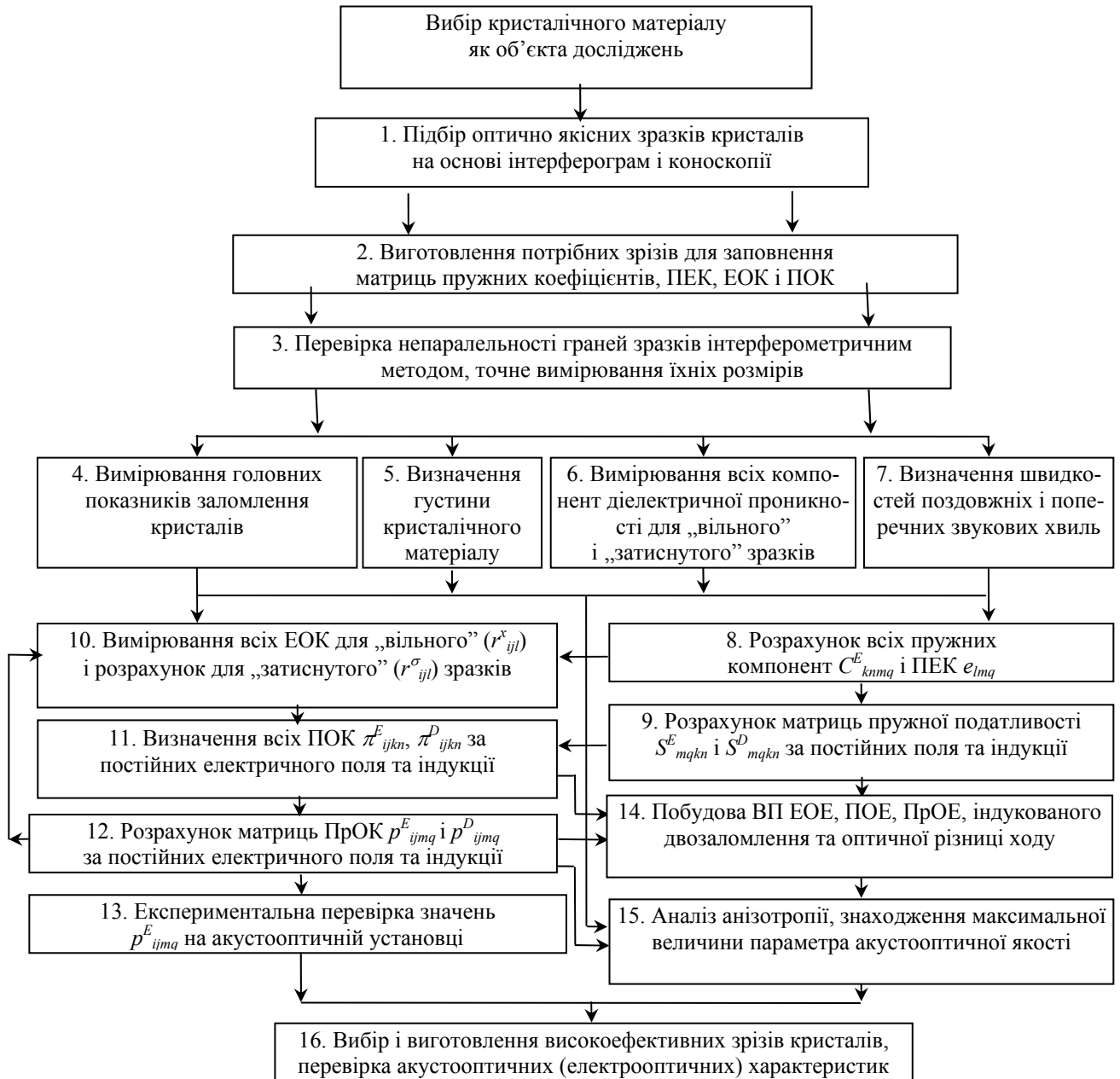


Рис. 3. Структура комплексної методики аналізу просторової анізотропії та технології цілеспрямованого підвищення ефективності електро-, п'єзо- та акустооптичних взаємодій в кристалічних матеріалах довільної симетрії з метою розробки та виготовлення кристалічних елементів пристроїв твердотільної оптоелектроніки

Удосконалено та запатентовано інтерферометрично-поворотний метод вимірювання показників заломлення оптичних матеріалів. Спрощено процес вимірювань,

створено автоматизовану установку на базі інтерферометра Майкельсона (рис. 5а) і розроблено оригінальне програмне забезпечення для керування процесом вимірювань і обробки результатів, яке включає фільтрацію спотворень і шумів (рис. 5б). Ключову задачу високоточного визначення „нульового положення” (нормальної орієнтації) зразка вирішено і програмним методом, і за допомогою експериментального алгоритму. Похибка „нуля” ($\sim 0,004^\circ$) визначає граничну точність визначення показника заломлення ($4 \cdot 10^{-6}$), що відповідає кращим світовим аналогам.

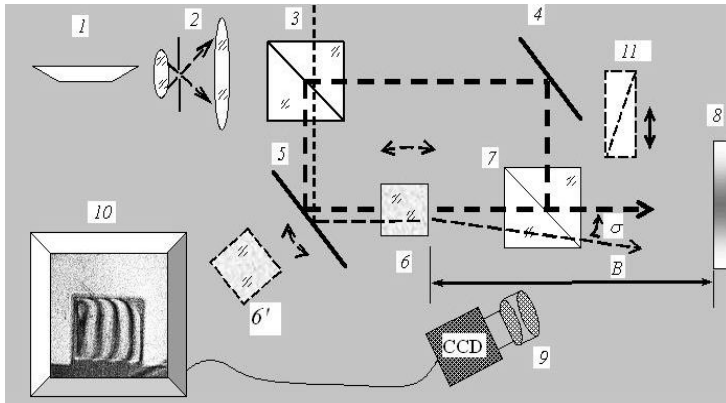
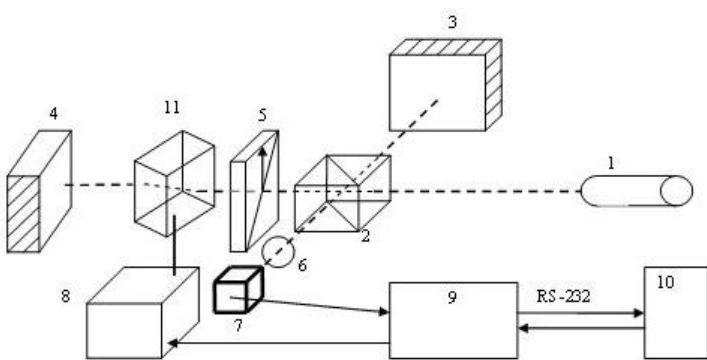
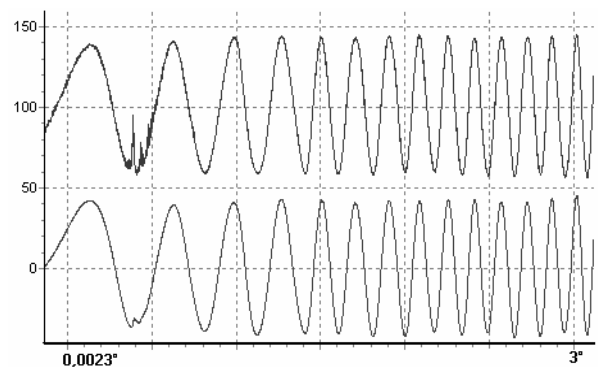


Рис. 4. Схема установки для контролю якості поверхонь зразків: 1 – лазер; 2 – розширювач променя; 3, 7 – світлоподільники; 4, 5 – поворотні дзеркала; 6 або 6' – кристалічний зразок; 8 – екран; 9 – відеокамера; 10 – монітор комп'ютера, 11 – поляризатор; B – віддаль від зразка до екрана



а)



б)

Рис. 5. (а) Схема установки для вимірювання показника заломлення (1 – лазер; 2 – світлоподільна призма; 3, 4 – дзеркала; 5 – поляризатор; 6 – лінза; 7 – фотоприймач; 8 – механізм обертання; 9 – модуль керування; 10 – персональний комп'ютер; 11 – досліджуваний зразок); (б) Експериментальна (верхня крива) і оброблена фільтром (нижня крива) залежності відносного значення інтенсивності світла від кутового положення зразка

Проаналізовано існуючі методи дослідження ЕОЕ та ПОЕ і на цій основі розвинуто метод двократних вимірювань абсолютних ЕОК та ПОК на базі інтерферометрів Майкельсона та Маха-Цендера (рис. 6).

Модифіковано способи прикладення одновісних механічних напружень до зразків і детально вивчено питання „стійкості” інтерферометра та причини появи паразитної „постійної” установки, серед яких є деформація камери для зразків під дією тиску та інші фактори. Використання низки способів мінімізації та визначення вели-

чини „постійної” установки дали змогу вдосконалити інтерферометричні вимірювання та підвищити точність і достовірність вивчення ПОЕ та ЕОЕ.

Для визначення статичних пружних сталих S_{km} кристалів використано імерсійно-інтерферометричний метод, згідно з яким імерсійну кювету зі зразком розміщують в плечі інтерферометра. Точність та надійність методу підвищено за рахунок врахування практичних поправок до робочого співвідношення, пов'язаних з паразитною „постійною” інтерферометричної установки. Вираз для визначення S_{km} за методом півхвильових напружень має такий вигляд:

$$S_{km} = \frac{\lambda}{2t_k(n_p - 1)} \left(\frac{1}{\sigma_{km}} - \frac{1}{\sigma_{km}^p} + \frac{1}{\sigma'_p} - \frac{1}{\sigma'} \right), \quad (9)$$

де півхвильові напруження σ_{km} і σ_{km}^p стосуються зразка в повітрі та імерсійній рідині (останню позначає індекс „p”), а параметри σ' і σ'_p описують „паразитну” зміну $\delta\Delta_k$ оптичного шляху в одиницях півхвильового напруження, що індукує зміну $\delta\Delta_k = \lambda/2$ (для нашої експериментальної установки $\sigma' = \infty$ і $\sigma'_p = -1200$ кГ/см²). Формула (9) зводиться до стандартної, відомої з літератури, лише за гіпотетичної умови відсутності вказаних похибок установки, а саме, коли $\delta\Delta_k = 0$ і $\sigma' = \sigma'_p = \infty$.

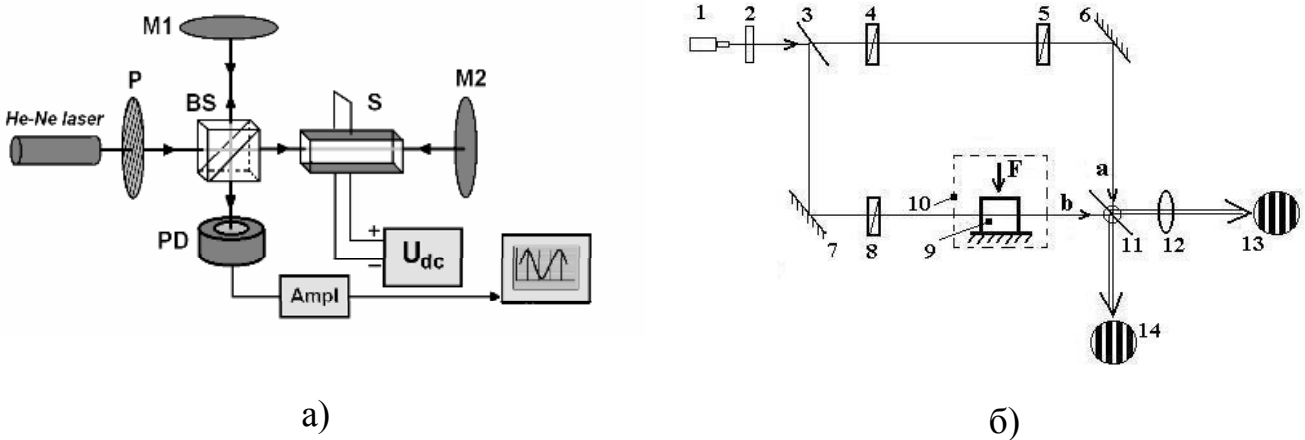


Рис. 6. Схеми установок: а) для визначення ЕОК на базі інтерферометра Майкельсона (BS – світлоподільник; M1, M2 – дзеркала; P – поляризатор; U_{dc} – джерело високої напруги; S – зразок; PD – фотодіод; Ampl – підсилювач); б) для визначення абсолютних ПОК на базі інтерферометра Маха-Цендера (1 – газовий лазер; 2 – чвертьхвильова пластинка; 3, 11 – напівпрозорі дзеркала; 4, 5, 8 – поляризатори; 6, 7 – дзеркала; 9 – зразок; 10 – камера для зразків; 12 – лінза; 13, 14 – схематичні картини інтерференції)

У розділі описано менш трудомісткі, порівняно з інтерферометричними, поляризаційно-оптичні методи і апаратуру для дослідження ЕОЕ і ПОЕ. Зокрема, запропоновано та запатентовано поляризаційно-оптичний спосіб визначення ПОК оптичної різниці ходу π_{km}^0 і ПОК двозаломлення π_{km}^* шляхом вимірювання півхвильового

механічного напруження у відбитому світлі (рис. 7). Тут промінь двічі проходить зразок, тому півхвильової зміни різниці ходу досягаємо при механічному напруженні σ'_{km} , удвічі меншому, ніж півхвильове напруження для однократного проходження променя σ_{km} ($\sigma_{km} = 2\sigma'_{km}$). Оскільки величини σ_{km} часто сумірні з механічною міцністю матеріалів, запропонований спосіб дає змогу суттєво розширити межі застосовності поляризаційно-оптичного методу, включаючи вивчення ЕОЕ.

У розділі описано модифіковані методики вивчення температурних залежностей ПОК різниці ходу, потрібні для вирішення проблем температурної стабільності п'єзо- і акустооптичних комірок. Описано також установку для акустичних вимірювань за ехо-імпульсним методом, вдосконалення якої підвищило точність вимірювань швидкості та загасання ультразвукових хвиль (чутливість до змін швидкості 10^{-4} – 10^{-5}). Проаналізовано методи бреггівської дифракції для визначення акустооптичних параметрів кристалічних твердих тілах. Реалізовано методику Діксона-Коуена, а також усунуто фактори, що понижували її точність. Створено установки для вимірювання робочих параметрів електро- і акустооптичних комірок.

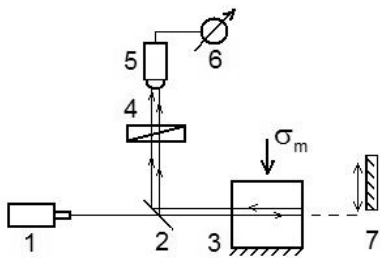


Рис. 7. Нова поляризаційно-оптична схема для визначення різниці ходу зразків у відбитому світлі: 1 – лазер; 2 – півпрозоре дзеркало; 3 – зразок; 4 – поляризатор; 5 – фотоприймач; 6 – мікроамперметр; 7 – дзеркало

Четвертий розділ містить результати експериментального вивчення лінійного ЕОЕ в кристалах і аналізу його анізотропії, скерованих на підвищення ефективності електрооптичних взаємодій. Для модельних кристалів НЛ знайдено, що $n_o = 2,2865 \pm 0,0007$, $n_e = 2,2034 \pm 0,0007$, виконано детальні інтерферометричні дослідження ЕОЕ і розраховано абсолютні ЕОК r_{il} . Крім того, поляризаційно-оптичним методом визначено індуковані зміни різниць ходу $\delta\Delta_{kl}^* = \delta[\Delta n_k t_k]$ (де $\Delta n_k = n_i - n_j$ – двозаломлення для напрямку поширення світла k). ЕОК r_{kl}^* розраховано за формулами $r_{kl}^* = -\delta\Delta_{kl}^* t_l / (U_l t_k) + 2d_{lk} (n_i - n_j)$ (де U_l – керуюча напруга; t_l і t_k – розміри зразка відповідно вздовж напрямків прикладення електричного поля l та поширення світлового променя k). Порівняння ЕОК r_{il} і r_{kl}^* проведено на основі відомої формули $r_{kl}^* = r_{il} n_i^3 - r_{jl} n_j^3$. На досліджених щодо ЕОЕ зразках визначені також ПЕК d_{lk} і ПрОК p_{ik} та розраховано ЕОК r_{il}^x і r_{il}^σ для термодинамічних умов, що відповідають механічно „затиснутому” та „вільному” кристалом. Виявлено, що вторинний внесок для деяких ЕОК значний, особливо для r_{51} (40%) і r_{22} (28%).

Анізотропію лінійного ЕОЕ вивчено шляхом побудови ВП, їх стереографічних проєкцій і головних перерізів, знаходження екстремальних значень ефекту та їх кутової орієнтації. Встановлено, що ВП ЕОЕ не є поверхнями обертання, що узгоджується з теоремою Германа. У відповідності з принципом Неймана, ці ВП описуються симетрією $3m$. Наявність осі симетрії третього порядку впливає також із формул (6).

Максимуми поздовжнього ефекту, знайдені числовими та аналітичними методами, не відповідають головним осям. Відповідні екстремальні напрямки відхилені від оптичної осі X_3 на кути $\theta_m = 43^\circ$ ($\varphi_m = 90, 210$ або 330°) або $\theta_m = 137^\circ$ ($\varphi_m = 30, 150$ або 270°). Максимум ВП ЕОЕ ($|r'_{ii}(\theta_m, \varphi_m)| = 39,7 \cdot 10^{-12}$ м/В) на $\sim 20\%$ перевищує найбільший ЕОК ($r_{33} = 33,2 \cdot 10^{-12}$ м/В), що описує ЕОЕ вздовж головних осей.

Аналіз ВП електрично індукованої різниці ходу, вираженої ефективним ЕОК (табл. 1), засвідчує, що анізотропія п'єзоелектричних деформацій і показників заломлення має слабкий вплив на форму ВП ЕОЕ. ВП різниці ходу не зводяться за формою до ВП абсолютних ЕОК, а кутова орієнтація їх екстремумів інакша. Максимум індукованої різниці ходу $|r'_{kl}{}^{o(l)}(\theta_m, \varphi_m)| = 432 \cdot 10^{-12}$ м/В для поздовжнього ЕОЕ майже втричі більший за відповідну величину в кристалах НЛ за стандартної геометрії $\mathbf{k} \parallel X_3, \mathbf{e} \parallel X_2$ ($|r'_{32}{}^{o}| = 162 \cdot 10^{-12}$ м/В), яку переважно використовують на практиці (див. рис. 8а). Тобто, перехід до геометрії комірки, зображеної на рис. 8б, дає змогу майже втричі підвищити ефективність електрооптичної модуляції.

Таблиця 1

Екстремальні значення ВП електрично індукованої різниці ходу для кристалів НЛ (температура 300 К, $\lambda = 632,8$ нм)

ВП	Мінімум K_1 на ВП і його напрямок			Максимум K_2 на ВП і його напрямок		
	$K_1,$ 10^{-12} м/В	θ , град	φ , град	$K_2,$ 10^{-12} м/В	θ , град	φ , град
$r'_{kl}{}^{o(l)}(\theta, \varphi)$	0	78	30, 150, 270	432	54	90, 210, 330
$r'_{kl}{}^{o(i)}(\theta, \varphi)$	0	довільний	$30 \pm 60 \cdot n, n \in Z$	162	90	$0 \pm 60 \cdot n, n \in Z$
$r'_{kl}{}^{o(k)}(\theta, \varphi)$	0	6, 17, 79	90, 210, 330	263	124	90, 210, 330

З огляду на обмеження застосування НЛ у пристроях керування потужним лазерним випромінюванням, пов'язані з явищем фоторефракції, перспективними є кристали НЛ, леговані оксидом магнію, в яких це явище істотно слабше, а променеву стійкість в 3–5 разів вища. Показники заломлення НЛОМ ($n_o = 2,2841$ і $n_e = 2,1994$) дещо нижчі, ніж для чистого НЛ.

Для кристалів НЛОМ визначено всі абсолютні ЕОК і п'єзоелектричні внески до ЕОК та індукованої оптичної різниці ходу. ЕОК кристалів $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ в середньому на 10% більші від коефіцієнтів LiNbO_3 . Тож $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ з огляду на його високу променеву стійкість є перспективним при конструюванні електрооптичних комірок для керування потужним лазерним випромінюванням.

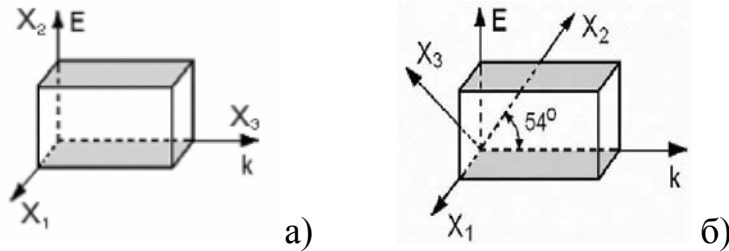


Рис. 8. Схеми геометрій електрооптичних комірок на основі кристалів НЛ: а) стандартна комірka; б) комірka з геометрією, оптимізованою за електрично індукованою різницею ходу. На тоновані поверхні напилено електроди, вектори \mathbf{E} і \mathbf{k} визначають напрямки електричного поля і поширення світла, відповідно

Вивчено анізотропію ЕОЕ в кристалах НЛОМ і встановлено оптимальні геометрії експерименту. На рис. 9 наведено окремі ВП абсолютного ЕОЕ і електрично індукованої оптичної різниці ходу для НЛОМ та їх стереографічні проекції. Максимальний ефективний коефіцієнт поздовжнього ЕОЕ складає $|r'_{ii}(\theta_m, \varphi_m)| = 43,3 \cdot 10^{-12}$ м/В. З аналізу ВП індукованої оптичної різниці ходу маємо, що її максимум ($|r'_{kl}{}^{(l)}(\theta_m, \varphi_m)| = 475 \cdot 10^{-12}$ м/В для $\theta = 54^\circ$ і $\varphi = 90, 210, 330^\circ$) втричі перевищує відповідну величину для стандартної геометрії зразка прямого зрізу ($\theta, \varphi = 0^\circ$ або 90°). Отже, оптимальні орієнтація зразка та напрямки електричного поля, поширення і поляризації світла, потрібні для забезпечення оптимальної електрооптичної взаємодії, не відповідають загальноприйнятій геометрії прямих зрізів, а відповідна оптимізація цих комірок дає змогу значно підвищити ефективність електрооптичної модуляції.

Для кристалів танталату літію виявлено перехресний п'єзоелектрооптичний ефект (названий у подальших дослідженнях комбінованим), який виникає при сукупній дії на кристал електричного поля та механічного напруження. Він описує зміну ПОК під дією поля \mathbf{E} , або, що те саме, зміну лінійних ЕОК під дією механічних напружень σ_{mn} . З точки зору термодинаміки цей ефект можна описати розкладом густини вільної енергії G за \mathbf{E} і σ_{mn}

$$\left(\frac{\partial^4 G}{\partial \sigma_{mn} \partial E_i \partial E_j \partial E_l} = - \frac{\partial}{\partial E_l} \left(\frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial \sigma_{mn}} \right) = - \frac{\partial}{\partial \sigma_{mn}} \left(\frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial E_l} \right) \right),$$

де ε_{ij} – тензор діелектричної проникності). Описано також ефект, що дає електрично індуковану поправку до пружної податливості S_{klj} або поправку до ПЕК d_{nij} через механічні напруження. Запропоновано феноменологічний опис перехресного

ефекту в термінах приросту тензора діелектричної непроникуваності a_{ij} ($\Delta a_{ij} = \pi_{ijmn} \sigma_{mn} + r_{ijl} E_l + P_{ijmnl} \sigma_{mn} E_l$, де P_{ijmnl} – тензор абсолютних п'єзоелектро-оптичних коефіцієнтів).

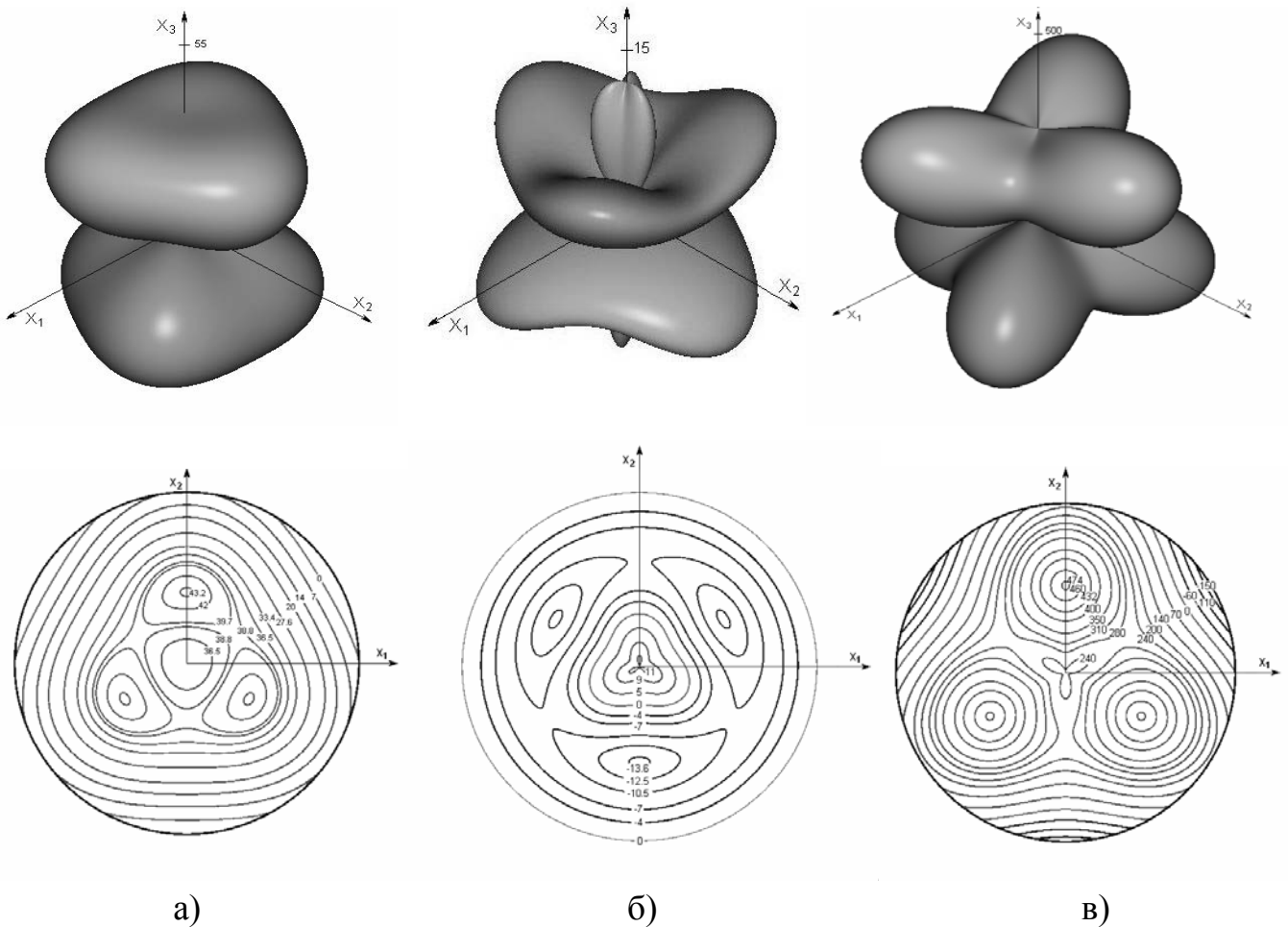


Рис. 9. Приклади ВП поздовжнього ЕОЕ $r'_{ii}(\theta, \varphi)$ (а), ВП поперечного ЕОЕ $r'_{il}^{(k)}(\theta, \varphi)$ (б), ВП електрично індукованої оптичної різниці ходу $r'_{kl}^{o(\ell)}(\theta, \varphi)$ (в) для кристалів НЛОМ, а також їх стереографічних проєкцій

Описано результати перших експериментів, зокрема для кристалів танталату літїю, що засвідчили існування ефекту. Із залежностей приросту двозаломлення $\delta(\Delta n_2)$ від σ_{11} і від E_3 (рис. 10) одержано близькі величини коефіцієнтів – відповідно $P_{22113}^* \approx -5,1 \cdot 10^{-18} \text{ м}^3 \text{ Н}^{-1} \text{ В}^{-1}$ і $-4,7 \cdot 10^{-18} \text{ м}^3 \text{ Н}^{-1} \text{ В}^{-1}$). Подальші теоретичні та прецизійні експериментальні дослідження, відомі з літератури, підтвердили положення, сформульовані в дисертаційній роботі, зокрема про взаємний характер перехресного ефекту: зміна ЕОК під дією механічного напруження та зміна ПОК під дією електричного поля описуються тими ж коефіцієнтами.

У п'ятому розділі описано експериментальні результати для ПОЕ та ПрОЕ в кристалічних матеріалах, перспективних для прикладної п'єзо- та акустооптики, і проаналізовано анізотропію цих ефектів з метою підвищення ефективності пристро-

їв твердотільної оптоелектроніки.

Для чистих кристалів НЛ різних виробників і кристалів НЛОМ визначено всі абсолютні ПОК π_{im} , ПОК оптичної різниці ходу π_{im}^0 і ПОК двозаломлення π_{im}^* . Коефіцієнти π_{im}^* розраховано на основі виміряних за поляризаційно-оптичною методикою ПОК π_{im}^0 з урахуванням внеску пружних коефіцієнтів S_{km} .

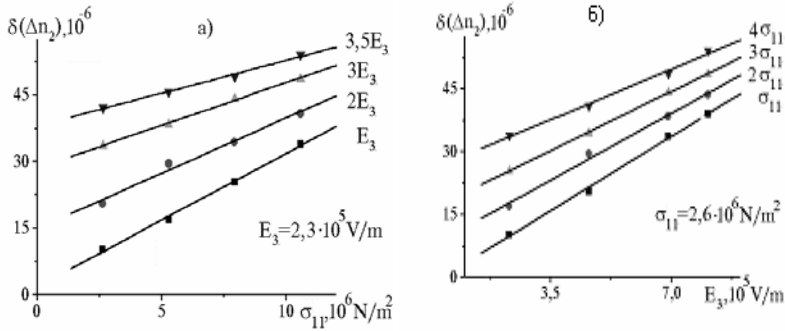


Рис. 10. Залежності $\delta(\Delta n_2)$ від механічного напруження σ_{11} для різних значень електричного поля E_3 (а) і від E_3 для різних значень механічного напруження σ_{11} (б) для кристалів танталату літію ($T = 300$ К, $\lambda = 0,6328$ мкм)

Абсолютні ПОК π_{im} для кристалів НЛ, вирощених в Японії, у межах точності їх визначення тотожні до ПОК кристалів НЛ з НВП „Карат” (м. Львів), а відмінності між коефіцієнтами π_{im}^* незначні. За окремими ПОК і сумою модулів усіх компонент $\Sigma |\pi_{im}|$, яка характеризує „п’єзооптичну якість”, японські кристали дещо програють кристалам НВП „Карат”. Крім того, ПОЕ у японських зразках для низки геометрій експерименту виявляє значні релаксаційні ефекти, що може понизити швидкодію акустооптичних комірок.

ПОЕ кристалів НЛ відзначається великою анізотропією: значення π_{im}^0 і π_{im}^* змінюються від $\sim 2,0$ Бр до ~ 22 Бр. Геометрії зразків з великими π_{im}^0 перспективні в застосуванні до фотопружної модуляції світла. Розраховано суто п’єзооптичні та пружні внески до індукованих змін оптичного шляху. Встановлено, що всі абсолютні ПОК, ПОК оптичної різниці ходу та ПОК двозаломлення кристалів НЛ і НЛОМ однакові за знаком і близькі за величиною. Виконано також розрахунки ПОК і ПрОК π_{im}^E , π_{im}^D , p_{in}^E , p_{in}^D кристалів НЛ і НЛОМ для різних термодинамічних умов, що відповідають постійним електричному полю ($E = \text{const}$) або індукції ($D = \text{const}$).

З огляду на важливість температурної стабільності акустооптичних комірок досліджено вплив температури на ПОК і двозаломлення кристалів НЛ і НЛОМ в інтервалі $20\text{--}120^\circ\text{C}$. Приклади температурної поведінки найбільших із головних (π_{21}^0) і неголовних (π_{44}^0) ПОК наведено на рис. 11. Їх зміни незначні: коефіцієнт π_{12}^0 зменшується лише на 1,8% та 1,5% відповідно для НЛ і НЛОМ, а π_{44}^0 – відповідно на 2,9% і 1,0%. Параметри Δn_1 і Δn_4 змінюються відповідно на 5,0% (4,4%) і 5,2% (4,3%) для НЛ (НЛОМ). Отже, крім високої променевої стійкості, кристали НЛОМ переважають НЛ і за температурною стабільністю ПОЕ.

Досліджена анізотропія ПОЕ і ПрОЕ, проведено аналіз ВП для ПОК, ПрОК і п'єзо-індукованої різниці ходу. Ступінь анізотропії ПОЕ в кристалах НЛ і НЛОМ переважно значний і сягає 90%. Напрямки екстремумів ВП зазвичай визначаються нетривіальними кутами, які не зводяться до типових значень кута $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ тощо, а кутова орієнтація екстремумів абсолютних ПОК і ПОК двозаломлення часто різна. Порівняння ступенів анізотропії η для ПрОК і ПОК (або індукованого приросту оптичного шляху) приводить до висновку про те, що анізотропія ПрОЕ дещо нижча ($\sim 80\%$), аніж для ПОЕ.

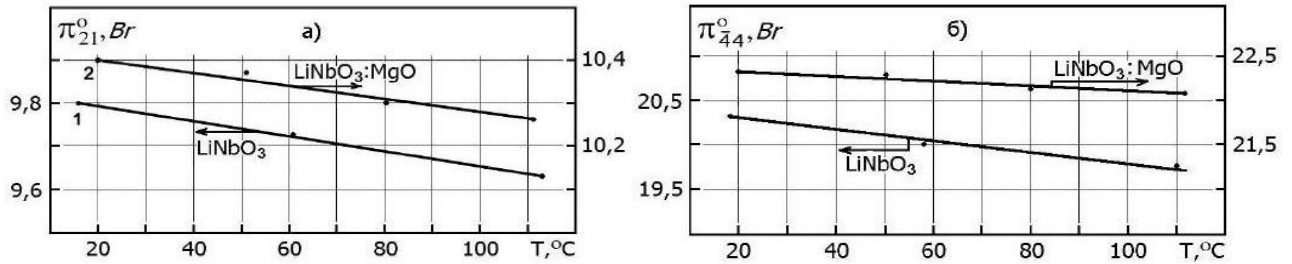


Рис. 11. Температурні залежності ПОК оптичної різниці ходу π_{21}^0 (а) і π_{44}^0 (б) для кристалів НЛ і НЛОМ

Спільна риса всіх ВП для кристалів НЛ і НЛОМ, як і для ББ та лангаситу, – це наявність у ВП головного колового перерізу в площині, перпендикулярній до оптичної осі. Водночас, на стереографічних проекціях ВП можна зауважити окремі кількісні відмінності для НЛ і НЛОМ, які необхідно враховувати під час точного розрахунку екстремумів ВП для кристалів і їх кутової орієнтації НЛОМ.

У роботі досліджено ПОЕ і ПрОЕ в кристалах лангаситу (клас симетрії 32), які відзначаються винятковою температурною стабільністю характеристик, у декілька разів вищою, ніж у кварцу. Для них заповнено матриці ПОК і ПрОК, детально проаналізовано похибки визначення ПОК π_{im} для різних геометрій і наслідки симетричних зв'язків різних ПОК. Для підвищення достовірності визначення абсолютних ПОК π_{im} додатково виміряно коефіцієнти π_{im}^* . У результаті визначено ПОК і ПрОК, що відповідають різним термодинамічним умовам, і розраховано п'єзооптичний і пружний внески. Загалом показник $\Sigma |p_{in}^E|$ для лангаситу дещо гірший, ніж для НЛ, проте фотопружність для окремих просторових напрямків в лангаситі сумірна за величиною, а ступені анізотропії дещо вищі, ніж для НЛ або НЛОМ.

Проведено повне вивчення ПОЕ і ПрОЕ в кристалах бета-борату барію $\beta\text{-Ba}_2\text{V}_2\text{O}_6$ (ББ). За ПрОК (особливо p_{11} і p_{12}) ББ переважає НЛ і сумірний з плавленим кварцом. ВП ПОЕ для ББ виявляють більш ніж удвічі вищий ступінь анізотропії, аніж ВП ПрОЕ. Максимуми ВП поперечного ПОЕ $\pi_{im}^{(i)}$ визначаються кутами орієнтації $\theta = 0,5 \arctg[2 \pi_{41} / (\pi_{12} - \pi_{31})] \approx 43^\circ$, $\varphi = 30^\circ \pm 120^\circ n$, де n – цілі числа. Висока й анізотропія ВП механічно індукованої оптичної різниці ходу (див. табл. 2). Цікаво,

що для низки напрямків у кристалах ББ поздовжній ПрОЕ відсутній, що відповідає нульовій ізолінії на відповідній стереографічній проекції.

Таблиця 2

Екстремальні значення, їх кутові параметри та ступені анізотропії ВП індукованої різниці ходу в кристалах ББ (температура 300 К, $\lambda = 632,8$ нм)

ВП	Мінімум K_1 і його напрямок			Максимум K_2 і його напрямок			Ступінь анізотропії		
	K_1 , Бр	θ , град	ϕ , град	K_2 , Бр	θ , град	ϕ , град	V_{sp} , (10Бр) ³	$ V^+ - V^- $, (10Бр) ³	η , %
поздо- вжня	7,37	1	90, 210, 330	-58,5	47,5	30, 150, 270	-839	-177	79
попе- речна	-6,85	43	90, 210, 330	8,53	47,0	30, 150, 270	2,6	0,18	93

Досліджено ПОЕ кристалів CaWO_4 (клас симетрії $4/m$), які можуть знайти застосування для фотопружної модуляції світла. Усі виміряні головні ПОК π_{im} для CaWO_4 істотно більші, ніж для лангаситу і групи НЛ, коефіцієнти $\pi_{31}^* \equiv \pi_{32}^*$ більш ніж у півтора рази переважають відповідні головні ПОК π_{im}^* порівняно із вказаними кристалами, а пружний внесок $2\Delta n_i S_{im}$ до ПОК π_{im}^0 не перевищує 3%.

У розділі також описано ПОЕ і ПрОЕ інших досліджених в роботі кристалів (кубічних, оптично одновісних і двовісних; зокрема GaP, BaF_2 , SiO_2 , Cs_2HgCl_4 і $\alpha\text{-NiO}_3$). Основний наголос зроблено на анізотропії властивостей, яку проаналізовано шляхом побудови ВП для поздовжнього і поперечного ПОЕ і ПрОЕ та ВП п'єзо-індукованої різниці ходу. Побудовано стереографічні проекції ВП, визначено екстремальні значення ВП, кутові параметри їх просторової орієнтації та ступені анізотропії. Виконано порівняння цих параметрів для всіх досліджених кристалів. У ряді випадків додатково встановлено величину та орієнтацію екстремумів ВП аналітичними методами.

Вивчення фотопружних властивостей для кристалів GaP, BaF_2 , SiO_2 , Cs_2HgCl_4 і $\alpha\text{-NiO}_3$ показало, що анізотропія ПрОЕ в них, як і у випадку НЛ та НЛОМ, теж нижча, ніж анізотропія ПОЕ, а абсолютні максимуми ВП переважно мають місце не для прямих кристалічних зрізів (крім окремих ВП для Cs_2HgCl_4).

Специфікою ВП ПОЕ в кубічних кристалах фосфіду галію GaP і фториду барію BaF_2 є найперше різка відмінність загального вигляду ВП для поперечного та поздовжнього ефектів (для GaP відповідні ступені анізотропії відрізняються більш ніж удвічі). Анізотропія більшості ВП для кварцу (клас симетрії 32) порівняно незначна, крім ВП поздовжнього ПОЕ π_{ii}' і поздовжнього ПрОЕ p_{ii}' , для яких ступені анізотропії складають $\sim 60\%$.

У роботі наведено детальні дані для фотопружних параметрів оптично двовісних кристалів Cs_2HgCl_4 (клас mmm). Побудовано ВП ПОЕ і ПрОЕ і їх стереографічні

проекції (див. приклад на рис. 12). ВП ПОЕ дещо складніші за будовою, ніж ВП ПрОЕ, і містять частини з протилежними знаками, а найвищий ступінь анізотропії серед поверхонь ПОЕ має ВП поздовжнього ефекту π'_{ii} . Незважаючи на значну анізотропію ПОЕ і ПрОЕ в кристалах Cs_2HgCl_4 , екстремуми спостерігаємо близько або строго вздовж кристалофізичних осей, за винятком мінімуму для поздовжньої ВП.

Просторова залежність ПрОЕ для йодноватої кислоти $\alpha\text{-HIO}_3$ (клас симетрії 222) має складний характер, що особливо стосується поперечних ВП $p'^{(i)}_{in}$ і $p'^{(m)}_{in}$. Ступінь анізотропії для останніх різко відмінний від ступеня анізотропії для поздовжньої ВП p'_{ii} , що можна пов'язати з низькою симетрією кристала.

Шостий розділ присвячено розглядові акустооптичних характеристик досліджених матеріалів і питанням підвищення ефективності акустооптичних взаємодій.

Для кристалів НЛ різних виробників, кристалів НЛОМ і лангаситу визначено всі необхідні для подальших розрахунків швидкості акустичних хвиль. Для НЛОМ вони дещо вищі, ніж для НЛ. На основі відповідних ВП (рис. 13а, де індекс поляризації $q = 1$ позначає поперечну хвилю з меншою швидкістю) проаналізовано анізотропію і знайдено екстремуми та кутові параметри їх орієнтації. Встановлено, що напрямки екстремумів акустичних швидкостей для кристалів НЛ і НЛОМ відрізняються в межах $0,9\text{--}2,7^\circ$.

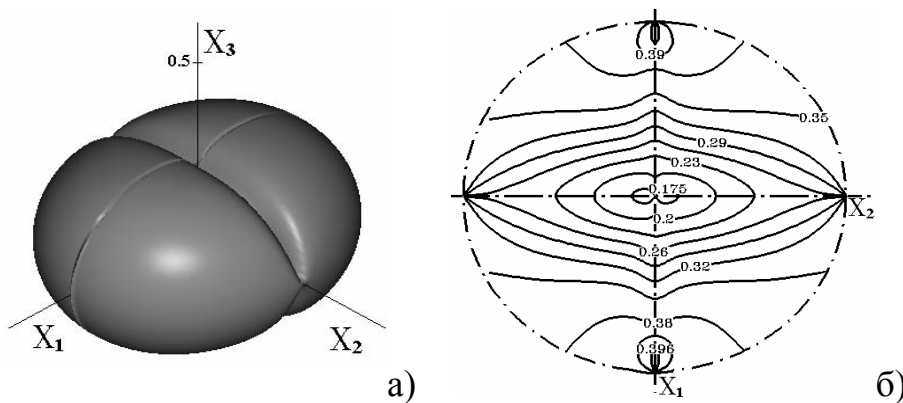


Рис. 12. ВП поперечного ПрОЕ $p'^{(i)}_{in}$ у кристалах Cs_2HgCl_4 (а) та її стереографічна проекція (б)

Оскільки в літературі існує значний розкид даних для ПЕК і пружних коефіцієнтів, у роботі встановлено матриці коефіцієнтів пружної жорсткості $C_{\lambda\mu}$ та пружної податливості $S_{\lambda\mu}$ за постійних електричного поля та індукції, а також всі п'єзоелектричні константи $e_{i\lambda}$ і модулі $d_{i\mu}$ для кристалів НЛ, вирощених та придбаних в різних лабораторіях світу.

Детально вивчено анізотропію акустооптичних взаємодій в кристалах НЛ (рис. 13б), НЛОМ (рис. 14), лангаситу, ББ, Cs_2HgCl_4 та в деяких інших кристалічних матеріалах. Виявлено, що анізотропія ефективного ПрОК p_{ef} кристалів НЛ і НЛОМ суттєвіше впливає на просторовий розподіл параметра акустооптичної якості M_2 , ніж анізотропія акустичних швидкостей і показників заломлення. Екстремуми пара-

метрів p_{ef} і M_2 для НЛОМ в середньому на 30% більші, ніж для чистого НЛ, що засвідчує кращі перспективи кристалів НЛОМ як акустооптичного матеріалу, а орієнтація згаданих максимумів для кристалів НЛ і НЛОМ дещо різна. Що стосується кристалів ББ, то орієнтація екстремумів ВП p_{ef} і M_2 для них ($\theta = 51-90^\circ$) відмінна від головної осі X_3 , а мінімальна швидкість поздовжньої акустичної хвилі орієнтована вздовж X_3 .

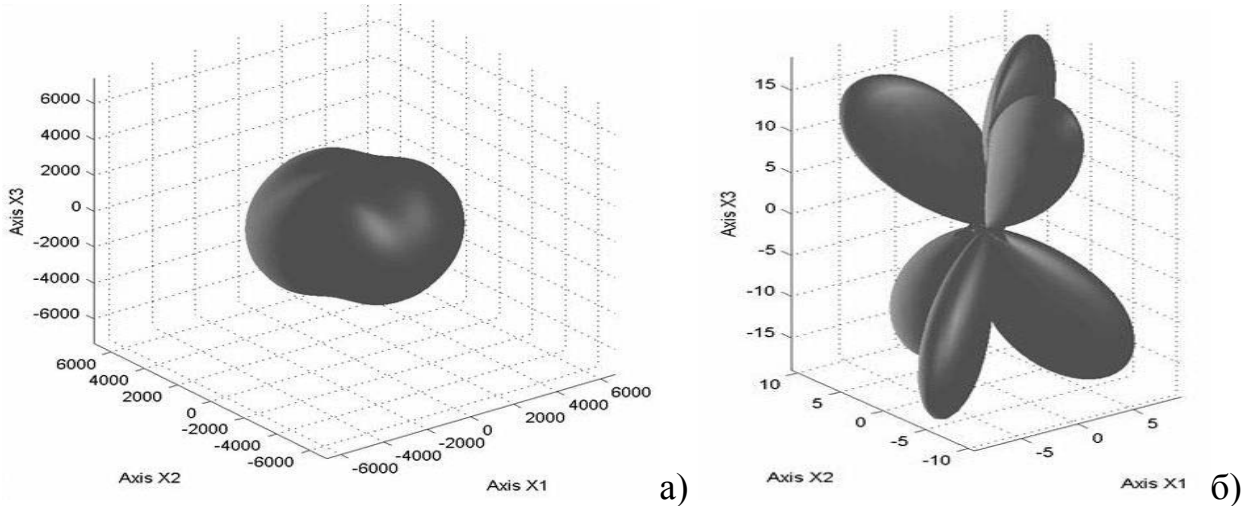


Рис. 13. ВП швидкості акустичної хвилі $q = 1$ в одиницях м/с (а); ВП параметра акустооптичної якості M_2 в одиницях $10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ за умов ізотропної дифракції світла, $\mathbf{i}_\mu \parallel \mathbf{a} \parallel \mathbf{r}$, $q = 1$ (б) для кристалів НЛ

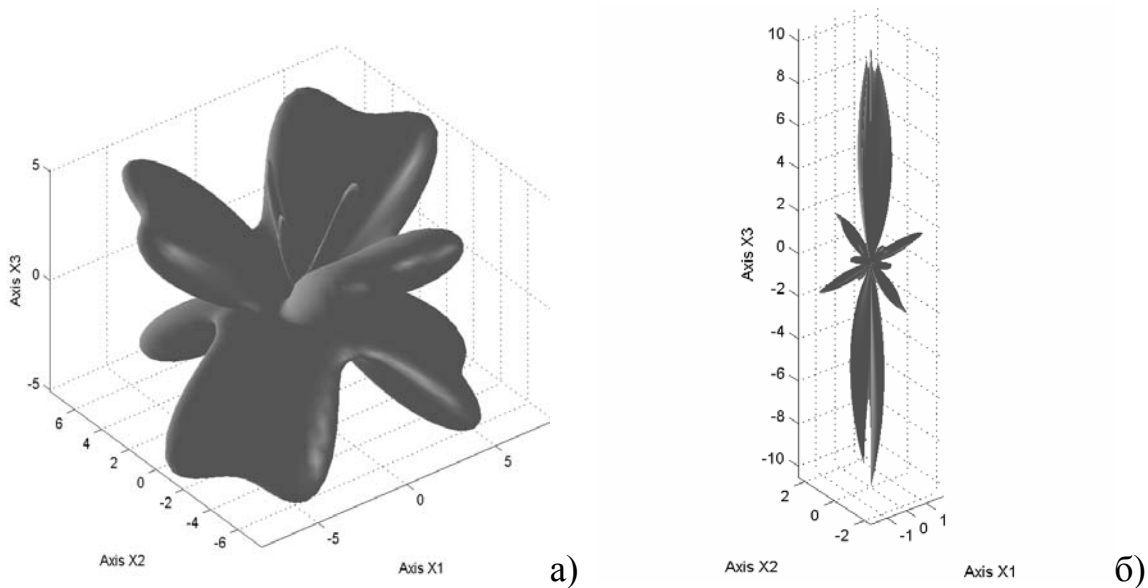


Рис. 14. Приклади ВП параметра акустооптичної якості M_2 для кристалів НЛОМ (в одиницях $10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$): а) ізотропна дифракція світла, $\mathbf{i}_\mu \parallel \mathbf{a} \parallel \mathbf{r}$, $q = 2$; б) анізотропна дифракція світла, $\mathbf{i}_\mu \parallel \mathbf{a} \parallel \mathbf{r}$, $\mathbf{i}_\nu \parallel \mathbf{j}$, $q = 2$

Аналіз анізотропії акустичних і акустооптичних параметрів лежить в основі способу вибору оптимальних геометрій кристалічних зразків і експерименту. У плані демонстрації можливостей і практичних перспектив розробленої технології підвищення ефективності акустооптичної взаємодії в розділі подано дані для анізот-

ропії цих ефектів у різних кристалах і результати оптимізації геометрій акустооптичних комірок на їх основі, які забезпечують найвищу ефективність таких комірок.

Для доведення ефективності технології покращення параметрів акустооптичних комірок наведемо декілька прикладів. На основі 3D-аналізу анізотропії акустооптичних характеристик виявлено напрямки в кристалах НЛ, для яких параметр акустооптичної якості для ізотропної дифракції більший майже в 2,4 рази, порівняно з відомими літературними даними для прямих зрізів, і становить $M_2 = 6,9 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$. Для анізотропної дифракції в кристалах НЛ параметр M_2 ще більший ($M_2 = 15,8 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$). Максимуми ВП параметра M_2 для кристалів НЛОМ і орієнтацію основних векторів акустооптичної взаємодії \mathbf{i}_μ , \mathbf{i}_ν , \mathbf{a} , \mathbf{f} наведено в табл. 3.

Аналіз анізотропії АОЕ в кристалах лангаситу дає максимуми $M_2 = 3,37 \cdot 10^{-15}$ і $1,89 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ відповідно для випадків ізотропної та анізотропної дифракції світла. Орієнтацію векторів \mathbf{k} , \mathbf{i}_μ , \mathbf{i}_ν , \mathbf{a} , \mathbf{f} , що визначає оптимальний зріз (ізотропна дифракція на поперечній акустичній хвилі), показано на рис. 15.

Таблиця 3

Максимальні значення ВП параметра M_2 кристалів НЛОМ і відповідні напрямки взаємодіючих векторів \mathbf{i}_μ , \mathbf{i}_ν , \mathbf{a} , \mathbf{f}

Тип дифракції	Орієнтація векторів	Світлова хвиля				Акустична хвиля				$M_2, 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$
		\mathbf{i}_μ , град		\mathbf{i}_ν , град		\mathbf{a} , град		\mathbf{f} , град		
		θ_μ	φ_μ	θ_ν	φ_ν	θ_a	φ_a	θ_f	φ_f	
ізотропна	$\mathbf{i}_\mu \parallel \mathbf{a} \parallel \mathbf{r}$, $q=3$	46,8	150	46,8	150	46,8	150	43,7	150	6,4
анізотропна	$\mathbf{i}_\mu \parallel \mathbf{a} \parallel \mathbf{r}$, $\mathbf{i}_\nu \parallel \mathbf{j}$ $q=1$	25	-90	90	0	25	-90	90	0	20,6

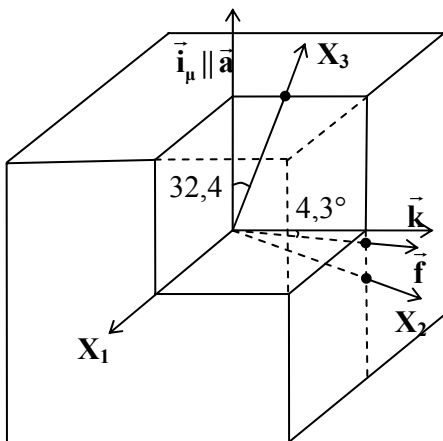


Рис. 15. Геометрія кристалічного зразка та орієнтація взаємодіючих векторів, що забезпечують найбільше значення параметра акустооптичної якості M_2 для випадку ізотропної дифракції світла на поперечній акустичній хвилі в кристалах лангаситу

Використання оптимальних зрізів кристалів ББ підвищує параметр M_2 у 4,2 рази для ізотропної та в 1,3 рази для анізотропної дифракції: абсолютні максимуми цього параметра дорівнюють $M_2 = 6,3 \cdot 10^{-15}$ і $40 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$, відповідно.

Підсумовано акустооптичні параметри Cs_2HgCl_4 і виконано їх порівняння з ві-

домим низькосиметричним акустооптичним матеріалом – кристалами йодоватої кислоти α -НІО₃. Просторова анізотропія АОЕ в Cs₂HgCl₄ досить істотна, оптимальна геометрія прямого зрізу забезпечує дуже хороші характеристики ($M_2 = 114 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$), а додаткова оптимізація АОЕ дає порівняно слабкий ефект ($M_2 = 116 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$). Цей результат нетиповий для інших кристалів і пов'язаний з особливостями просторового розподілу акустооптичних параметрів Cs₂HgCl₄.

Оптимізація геометрії АОЕ для модельного матеріалу кварцу дає коефіцієнт M_2 , приблизно на 30% більший за найбільший максимум для прямих зрізів ($M_2 = 2,38 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$). Це ще раз підтверджує перспективність технології підвищення ефективності кристалічних елементів для акустооптичних пристроїв.

З урахуванням геометрій зрізів, що забезпечують екстремальний АОЕ, виготовлено робочі елементи акустооптичних комірок на основі кристалів НЛ, НЛОМ і лангаситу. Загальний вигляд однієї з комірок (розмір світлового вікна $6 \times 9 \text{ мм}^2$) показано на рис. 16. Розглянуто також процес поширення та ефективність взаємодії зі світлом високочастотних об'ємних зсувних акустичних хвиль, що збуджуються з поверхні НЛ зустрічно-штировим перетворювачем, а також оцінено енергетичні втрати. Досліджено ефективність збудження хвиль зустрічно-штировим перетворювачем.

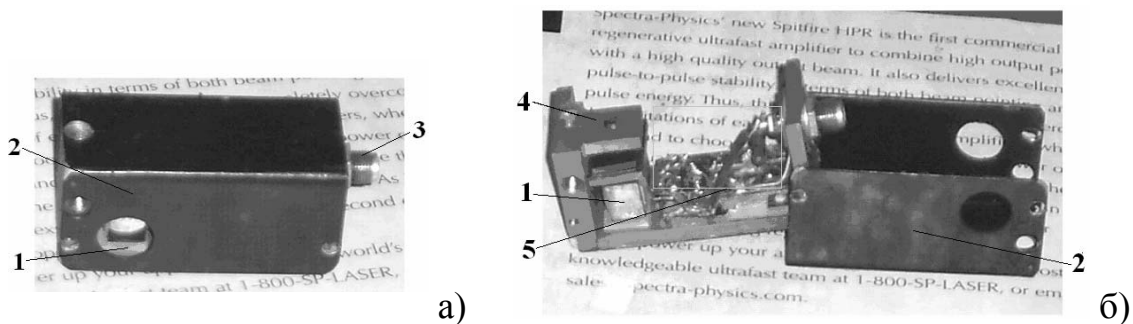


Рис. 16. Загальний вигляд виготовленої АОК (а) та її вигляд з відкинутою захисною кришкою (б): 1 – акустосвітлопровід; 2 – захисна кришка; 3 – роз'єм; 4 – каркас; 5 – ланка узгодження

Щоб перевірити практично ефективність запропонованої технології для випадку акустооптичних пристроїв з робочими матеріалами оптимальних зрізів, експериментально досліджено параметр акустооптичної якості створених комірок і низку їх робочих параметрів. Перевагу кристалів НЛОМ над НЛ засвідчило більше, ніж у 1,5 рази, вимірне значення параметра M_2 для прямої геометрії. Суттєво більші й параметри M_2 , одержані для комірок зі зразками оптимальних зрізів. Це підтверджує дані розрахунків і надійність вжитих феноменологічних підходів. Дослідження оптичних параметрів по апертурі комірки показали, що їх неоднорідність не перевищує 10%. Це цілком задовільно для лабораторних умов.

У додатках наведено геометрії експериментів і співвідношення для розрахунку ПОК досліджених кристалів; рівняння ВП для ПОЕ і ПрОЕ в кристалах деяких

класів симетрії (mmm , $3m$ і 32); матриці тензорів пружної жорсткості, ПЕЕ і діелектричної проникності для класів симетрії вивчених кристалів, а також 5 актів впровадження результатів роботи.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертації розроблено новий підхід до створення високоефективних електро- і акустооптичних пристроїв з робочими елементами, виготовленими на основі анізотропних кристалічних матеріалів. Аналіз відомих з літератури методів і результатів засвідчив, що досі згадану вище проблему переважно вирішували шляхом екстенсивного пошуку нових матеріалів з кращими характеристиками, а просторову анізотропію явищ, індукованих зовнішніми полями в кристалах, послідовно не враховували: спроби такого аналізу були фрагментарними. Результати дисертаційної роботи дають змогу одержати повну інформацію про просторову анізотропію електро-, п'єзо-, пружно- і акустооптичних характеристик при відповідних дослідженнях кристалічних матеріалів. Різнобічне вивчення індукованих оптичних ефектів та їх анізотропії спрямоване на розв'язання важливої науково-технічної проблеми фізики твердого тіла – цілеспрямоване підвищення ефективності електро-, п'єзо- та акустооптичних взаємодій у кристалічних матеріалах оптоелектроніки на основі послідовного врахування просторової анізотропії відповідних фізичних ефектів, що описуються тензорами третього і вищих рангів. Результати роботи демонструють перспективність використання досліджених матеріалів у пристроях твердотільної оптоелектроніки для керування електромагнітним випромінюванням. Основні результати та висновки роботи полягають у наступному.

1. На основі комплексного теоретичного та експериментального вивчення просторової анізотропії фізичних ефектів, індукованих зовнішніми полями в матеріалах довільної симетрії, створено технологію цілеспрямованого підвищення ефективності електро-, п'єзо- та акустооптичних взаємодій у кристалічних матеріалах твердотільної оптоелектроніки. Одержано аналітичні вирази для ВП, що описують просторову анізотропію ЕОЕ, ПрОЕ та АОЕ. Показано, що анізотропія ЕОЕ для ортогональних геометрій експерименту повністю описується чотирма ВП, анізотропія ПрОЕ – трьома ВП, а анізотропія АОЕ для кожної з акустичних хвиль – п'ятьма ВП. Для ЕОЕ та ПОЕ встановлені також вирази, що описують ВП індукованих змін різниці ходу.
2. Проведено аналітичний опис лінійного ЕОЕ в кристалах усіх класів симетрії. Для інтерферометричного методу двократних вимірювань вперше одержано співвідношення для визначення абсолютних ЕОК на основі змін показників заломлення з врахуванням деформації зразків, зумовленої оберненим п'єзоелектричним ефектом. Встановлено також нові співвідношення для складних експе-

риментальних геометрій вивчення ПОЕ, на основі яких збільшується точність розрахунку поворотних, зсувних і поворотно-зсувних ПОК.

3. Для покращення параметрів робочих елементів електро- і акустооптичних комірок і технології їх виготовлення розроблено нові методи вимірювань показників заломлення, електро- і п'єзооптичних коефіцієнтів і вдосконалено установки для акустичних і акустооптичних досліджень кристалів, а саме:
 - метод високоточного контролю геометрії поверхонь і оптичної неоднорідності зразків кристалічних матеріалів на основі широкоапертурного інтерферометра Маха-Цендера;
 - інтерферометрично-поворотний метод вимірювання показників заломлення, для якого запропоновано і реалізовано нові способи точного визначення „нульового положення” кристалічного зразка та враховано показник заломлення середовища, в якому перебуває зразок, що дало змогу підвищити точність методу до $4 \cdot 10^{-6}$;
 - інтерферометричний метод двократних вимірювань для визначення ЕОК і ПОК кристалів на основі симетрично тотожних геометрій експерименту, в рамках якого вирішено проблему неконтрольованої паразитної „постійної” інтерферометричної установки для дослідження ПОЕ;
 - метод подвійних вимірювань абсолютних ПОК, що враховує реальну не-паралельність оптичних граней зразків;
 - метод вимірювання півхвильових механічних напружень і електричних напруг у відбитому світлі, який дає змогу розширити межі застосування та підвищити чутливість поляризаційно-оптичної методики;
 - модифікований поляризаційно-оптичний метод вивчення ПОЕ та ЕОЕ, який скерований на дослідження температурної стабільності вказаних ефектів з високою ($\sim 0,5\%$) точністю.
4. Вперше проведено повне вивчення ЕОЕ, ПОЕ, ПрОЕ, включаючи заповнення матриць цих ефектів, а також досліджено акустичні, п'єзоелектричні, пружні та акустооптичні властивості низки кристалічних матеріалів, зокрема кристалів LiNbO_3 різних виробників, $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$, $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{11}$, $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$, Cs_2HgCl_4 і CaWO_4 . Досліджено температурну стабільність ПОЕ в кристалах LiNbO_3 і $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$. На основі проведеного термодинамічного опису перехресного п'єзо-електрооптичного ефекту в кристалах встановлено співвідношення для визначення відповідних коефіцієнтів і одержано експериментальне підтвердження цього ефекту.
5. На основі заповнених матриць коефіцієнтів електро-, п'єзо- та пружнооптичних ефектів (див. п. 4) побудовано відповідні ВП для досліджених у роботі кристалів. Такі побудови для ортогональних геометрій електро-, п'єзо-, пружно- та акустооптичних взаємодій – це ВП, які слід використовувати для покращення показників фі-

зичних властивостей кристалів і характеристик пристроїв для управління електромагнітним випромінюванням на їхній основі.

6. Числовими та аналітичними методами проведено аналіз анізотропії ЕОЕ, ПОЕ, ПрОЕ і АОЕ; побудовано стереографічні проекції ВП, знайдено екстремальні значення ВП та кутові параметри просторової орієнтації екстремумів відносно кристалофізичних осей. Показано, що саме максимальні значення цих ефектів і їх просторова орієнтація є основними критеріями вибору геометрій зразків, які забезпечують найвищу ефективність фотопружних, електро- і акустооптичних пристроїв.
7. Вивчено анізотропію ЕОЕ, ПОЕ, ПрОЕ і АОЕ для кристалів LiNbO_3 , $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$, $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{11}$, $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$, Cs_2HgCl_4 , SiO_2 , GaP, BaF_2 і $\alpha\text{-HfO}_3$. Для АОЕ встановлено, що анізотропія параметра акустооптичної якості для всіх досліджених діелектричних матеріалів у більшій мірі визначається анізотропією ефективною пружно-оптичної постійної, аніж анізотропією швидкості акустичних хвиль і показника заломлення. Максимуми ВП для усіх вивчених ефектів, як правило, мають місце не для прямих кристалічних зрізів, тобто їх напрямки в більшості випадків не збігаються з кристалофізичними осями.
8. Виявлено, що кристали $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$, $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{11}$, $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ і Cs_2HgCl_4 перспективні як робочі матеріали пристроїв електро- та акустооптики, а променево стійкіші кристали НЛОМ мають перевагу над НЛ за акустооптичною ефективністю (в 1,3 рази для оптимальної акустооптичної геометрії).
9. Знайдено орієнтації зразків і експериментальні геометрії електро-, п'єзо-, пружно- та акустооптичних взаємодій з найвищою ефективністю. Зокрема, максимальна електрично індукована різниця ходу для НЛ майже втричі більша за відповідну величину для напрямку поширення світла вздовж оптичної осі; виявлено окремі напрямки в цих кристалах, для яких параметр акустооптичної якості M_2 для випадку ізотропної дифракції світла більший в 2,4 рази, порівняно з відомими даними для прямих зрізів; це стосується і кристалів НЛОМ; температурно стабільні кристали лангаситу мають акустооптичні характеристики, сумірні з характеристиками НЛ; використання оптимальних зрізів кристалів ББ дає змогу підвищити параметр M_2 у 4,2 рази для випадку ізотропної та в 1,3 рази для випадку анізотропної дифракції.
10. На основі оптимізованих зрізів LiNbO_3 та $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ виготовлено електро- і акустооптичні комірки та досліджено їх робочі параметри, які добре узгоджуються з теоретично розрахованими, що свідчить про перспективність запропонованої технології цілеспрямованого підвищення ефективності електро- та акустооптичних взаємодій для покращення параметрів кристалічних матеріалів як робочих елементів пристроїв твердотільної оптоелектроніки.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Анизотропия пьезооптического эффекта в кристаллах алюмокалиевых квасцов и фторида бария / Б. Г. Мыщык, А. С. Андрущак, Н. В. Демьянишин, Н. М. Яковлева // Кристаллография. – 1996. – Т. 41, №3. – С. 500–504.
2. Мыщык Б. Г. Пространственное распределение пьезооптического эффекта в кристаллах танталата лития / Б. Г. Мыщык, А. С. Андрущак // Кристаллография. – 1996. – Т. 41, №6. – С. 1054–1059.
3. Photoelasticity and its relaxation in TGS+Gr³⁺ crystals / M. O. Romanyuk, B. G. Mytskyk, N. M. Demyanyshyn, A. S. Andrushchak, Ya. V. Pryriz // Ferroelectrics. – 1997. – Vol. 203. – P. 101–106.
4. Multimode polarization optical compensators for precise pressure measurements / B. G. Mytskyk, A. S. Andrushchak, N. M. Demyanyshyn, V. V. Ostapyuk, Ya. V. Pryriz // Proc. SPIE. – 1997. – Vol. 3238. – P. 192–198.
5. Пространственное распределение пьезоиндуцированного изменения оптического пути на примере кристаллов ниобата лития / О. Г. Влох, Б. Г. Мыщык, А. С. Андрущак, Я. В. Прыриз // Кристаллография. – 2000. – Т. 45, №1. – С. 144–150.
6. The crossflow piezo-electrooptic effect in crystals. Example of lithium tantalate / A. S. Andrushchak, I. V. Sydoryk, M. V. Kaidan, R. O. Vlokh // Condens. Matter Phys. – 2000. – Vol. 3, No 4(24). – P. 857–862.
7. Anisotropy of piezo- and elasto-optical effect in β -BaB₂O₄ crystals / A. S. Andrushchak, V. F. Adamiv, O. M. Krupych, I. Martynyuk-Lototska, R. O. Vlokh // Ferroelectrics. – 2000. – Vol. 238. – P. 299–305 (863–869).
8. Refractive indexes and piezo-optical effect in the Ca₂Pb(C₂H₅CO₂)₆ crystals / R. O. Vlokh, Z. Yu. Gotra, A. S. Andrushchak, O. G. Mys, M. V. Kaidan // Ukr. J. Phys. Opt. – 2001. – Vol. 2, No 1. – P. 36–39.
9. Метод двократних вимірювань для заповнення матриць фотопружного ефекту кристалів різних класів симетрії. Апробація методу на прикладі кристалів β -BaB₂O₄ / А. С. Андрущак, Я. В. Бобицький, Б. І. Гнатик, М. В. Кайдан, Б. Г. Мицик // Вісник НУ "Львівська політехніка". Електроніка. – 2002. – №455. – С. 110–120.
10. Combined piezoelectro-optical effect in LiNbO₃ and LiTaO₃ crystals / R. O. Vlokh, O. G. Mys, A. S. Andrushchak, M. Kostyrko // Ukr. J. Phys. Opt. – 2002. – Vol. 3, No 2. – P. 115–118.
11. Photoelastic and acousto-optical properties of Cs₂HgCl₄ crystals / M. V. Kaidan, A. V. Zadorozhna, A. S. Andrushchak, A. V. Kityk // Appl. Opt. – 2002. – Vol. 41, No 25. – P. 5341–5345.
12. Cs₂HgCl₄ crystals as a new material for acousto-optical applications / M. V. Kaidan, A. V. Zadorozhna, A. S. Andrushchak, A. V. Kityk // Opt. Mater. – 2003. – Vol. 22, No 3. – P. 263–268.

13. Photoelastic properties of the beta barium borate crystals / A. S. Andrushchak, Ya. V. Bobytski, M. V. Kaidan, V. T. Adamiv, Ya. V. Burak, B. G. Mytsyk // *Optica Applicata*. – 2003. – Vol. 33, No 2–3. – P. 345–357.
14. Вказівні поверхні індукованих оптичних ефектів для двовісних кристалів / М. В. Кайдан, А. С. Андрущак, М. М. Климаш, А. В. Кітик, Я. В. Бобицький // *Укр. фіз. журн.* – 2003. – Т. 48, №10. – С.1104–1109.
15. Методика вивчення просторової анізотропії акустооптичного ефекту на прикладі кристалів бета борату барію / А. С. Андрущак, Я. В. Бобицький, М. В. Кайдан, А. В. Кітик, Б. В. Тибінка // *Вісник НУ „Львівська політехніка”*. Електроніка. – 2004. – №513. – С.158–166.
16. 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.
17. Two-fold interferometric measurements of piezo-optic constants: application to β -BaB₂O₄ crystals / A. S. Andrushchak, Ya. V. Bobitski, M. V. Kaidan, B. G. Mytsyk, A. V. Kityk, W. Schranz // *Opt. Laser Technol.* – 2005. – Vol. 37. – P. 319–328.
18. Просторовий аналіз ізотропної та анізотропної дифракцій світла на поперечних акустичних хвилях в кристалах бета борату барію / А. С. Андрущак, Я. В. Бобицький, М. В. Кайдан, Б. В. Тибінка // *Укр. фіз. журн.* – 2005. – Т. 50, №1. – С. 26–33.
19. 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.
20. Тибінка Б. В. Автоматизація вимірювання показників заломлення плоско паралельних пластин із оптичних матеріалів інтерферометрично-поворотним методом / Б. В. Тибінка, І. П. Островський, А. С. Андрущак // *Вісник НУ „Львівська політехніка”*. Електроніка. – 2006. – №558. – С. 128–132.
21. Фотопружність кристалів лангаситу (La₃Ga₅SiO₁₄) / А. С. Андрущак, А. С. Дем'янишин, Б. Г. Мицик, І. М. Сольський // *Вісник НУ „Львівська політехніка”*. Електроніка. – 2006. – №558. – С. 86–91.
22. The indicative surfaces of photoelastic effect for Cs₂HgCl₄ biaxial crystals / M. V. Kaidan, B. V. Tybinka, A. V. Zadorozhna, W. Schranz, B. Sahraoui, A. S. Andrushchak, A. V. Kityk // *Opt. Mater.* – 2007. – Vol. 29. – P. 475–480.
23. Мицик Б. Г. Повне вивчення п'єзооптичного ефекту в кристалах лангаситу / Б. Г. Мицик, А. С. Андрущак, Г. І. Гаськевич // *Укр. фіз. журн.* – 2007. – Т. 52, №8. – С. 800–809.
24. Вороняк Т. І. Технологія контролю геометрії оптичних поверхонь зразків із кристалічних матеріалів / Т. І. Вороняк, О. В. Юркевич, А. С. Андрущак // *Вісник НУ „Львівська політехніка”*. Електроніка. – 2007. – №592. – С. 157–163.

25. Заповнення матриць лінійного електрооптичного ефекту в кристалах довільного класу симетрії. Апробація методу на прикладі кристалів ніобату літію / А. С. Андрущак, Б. Г. Мицик, Н. М. Дем'янишин, М. В. Кайдан, О. В. Юркевич // Вісник НУ „Львівська політехніка”. Електроніка. – 2007. – №592. – С. 148–156.
26. Енергетичні втрати при збудженні, поширенні та взаємодії зі світлом надвисоко-частотних об'ємних акустичних хвиль в кристалах ніобату літію / Д. М. Винник, Т. І. Вороняк, Даніель Фоті, А. С. Андрущак // Моделювання та інформаційні технології. Збірн. наук. праць Ін-ту проблем моделювання НАН України. – 2007. – Вип. 42. – С. 54–60.
27. Automated interferometric technique for express analysis of the refractive indices in isotropic and anisotropic optical materials / A. S. Andrushchak, B. V. Tybinka, I. P. Ostrovskij, W. Schranz, A. V. Kityk // Opt. Lasers Eng. – 2008. – Vol. 46. – P. 162–167.
28. 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.
29. 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 II. Заповнення матриць пружних та п'єзо-електричних коефіцієнтів кристалів LiNbO_3 та $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ / Г. П. Лаба, О. В. Юркевич, І. Д. Карбовник, М. В. Кайдан, С. С. Думич, І. М. Сольський, А. С. Андрущак // Вісник НУ „Львівська політехніка”. Електроніка. – 2008. – №619. – С. 172–180.
30. Spatial anisotropy of linear electro-optic effect for crystal materials: I. Experimental determination of electro-optic tensor by means of interferometric technique / A. S. Andrushchak, B. G. Mytsyk, N. M. Demyanyshyn, M. V. Kaidan, O. V. Yurkevych, I. M. Solskii, A. V. Kityk, W. Schranz // Opt. Lasers Eng. – 2009. – Vol. 47. – P. 31–38.
31. 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.
32. Найбільш ефективні акустооптичні модулятори інформаційного сигналу для волоконно-оптичних інфокомунікаційних систем / А. С. Андрущак, М. В. Кайдан, О. В. Юркевич, Б. Г. Мицик, І. М. Сольський // Моделювання та інформаційні технології. Збірн. наук. праць Ін-ту проблем моделювання НАН України. – 2008. – Вип. 49. – С. 194–201.

33. П'єзооптичний ефект у кристалах $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ / Б. Г. Мицик, А. С. Андрушак, Я. П. Кость, І. М. Сольський // Журн. фіз. дослідж. – 2008. – Т. 12, №3. – С. 3702-1–3702-5.
34. Piezo-optic coefficients of MgO-doped LiNbO_3 crystals / B. G. Mytsyk, A. S. Andrushchak, M. N. Demyanyshyn, Y. P. Kost', A. V. Kityk, P. Mandracci, W. Schranz // *Appl. Opt.* – 2009. – Vol. 48, No 10. – P. 1904–1911.
35. Complete sets of elastic constants and photoelastic coefficients of pure and MgO-doped lithium niobate crystals at room temperature / A. S. Andrushchak, B. G. Mytsyk, H. P. Laba, O. V. Yurkevych, I. M. Solskii, A. V. Kityk, B. Sahraoui // *J. Appl. Phys.* – 2009. – Vol. 106, No 7. – P. 073510-1–073510-6.
36. Andrushchak A. S. Efficiency increasing of electro- and acousto-optical light modulators as main component of fiber-optical system for information transmission / A. S. Andrushchak // *Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science – International Conference TCSET'2006*, 28 February – 4 March 2006 : *Proceeding.* – Lviv-Slavske (Ukraine), 2006. – P. 466–468.
37. Tybinka B. V. Novel computer aided interferometric equipment for refractive index determination of isotropic and anisotropic materials / B. V. Tybinka, I. P. Ostrovskij, A. S. Andrushchak // *International Conference OPTO'2006*, 30 May–1 June 2006 : *Proceedings.* – Nürnberg (Germany), 2006. – P. 153–158.
38. Optimization for electro- and acousto-optical interactions in low-symmetric anisotropic materials / M. Kaidan, H. Laba, I. Ostrovskij, N. Demyanyshyn, A. Andrushchak, B. Mytsyk // *IEEE East-West Design & Test Workshop (EWDWTW'06)*, September 15–19, 2006 : *Proceeding.* – Sochi (Russia), 2006. – P. 179–183.
39. Anisotropy of piezo-, elasto- and acousto-optic properties of $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ crystal / M. V. Kaidan, H. P. Laba, N. M. Demyanyshyn, A. S. Andrushchak, B. G. Mytsyk // *Symposium on Photonics Technologies for the 7th Framework Program*, 12–14 October 2006 : *Proceedings.* – Wroclaw (Poland), 2006. – P. 396–399.
40. Efficiency increasing of electro- and acousto-optical modulators as main component of optical communication network / M. V. Kaidan, H. P. Laba, N. M. Demyanyshyn, A. S. Andrushchak, B. G. Mytsyk // *Symposium on Photonics Technologies for the 7th Framework Program*, 12–14 October 2006 : *Proceedings.* – Wroclaw (Poland), 2006. – P. 562–565.
41. Andrushchak A. S. Automatic interferometric equipment for refractive index determination of isotropic and anisotropic materials / A. S. Andrushchak, I. D. Karbovnyck, I. P. Ostrovskij // *Symposium on Photonics Technologies for 7th Framework Program*, 12–14 October 2006 : *Proceedings.* – Wroclaw (Poland), 2006. – P. 525–528.
42. Optimization technique for piezo- and acousto-optical interactions geometry of light in anisotropic materials for example of pure and MgO-doped lithium niobate crystals / A. S. Andrushchak, I. B. Tchaikovsky, N. M. Demyanyshyn, S. S. Dumych, O. V. Yurke-

- vych, M. V. Kaidan, H. P. Laba, B. G. Mytsyk // International Conference CADSM'2007, 20–24 February 2007 : Proceeding. – Lviv-Polyana (Ukraine), 2007. – P. 18–22.
43. Method of experimental 3D-analysis of spatial anisotropy of optical parametric effects in crystals / A. S. Andrushchak, I. P. Ostrovskij, M. B. Kaidan, O. V. Yurkevych, B. G. Mytsyk // 13th International Conference SENSOR'2007, 22–24 May 2007 : Proceedings. – Nürnberg (Germany), 2007. – Vol. 2. – P. 289–294.
 44. New computer aided design of most efficient electro- and acousto-optics cells as main component for modern fiber-optic infocommunication systems / A. S. Andrushchak, B. G. Mytsyk, I. M. Solskii, M. V. Kaidan, T. I. Voronyak, N. M. Demyanyshyn, O. V. Yurkevych // International Conference on modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science TCSET'2008, 19–23 February 2008 : Proceeding. – Lviv-Slavske (Ukraine), 2008. – P. 392–395.
 45. Optimization of the effective crystal cutoff searching technique for acousto-optic light modulators / N. M. Demyanyshyn, B. G. Mytsyk, A. S. Andrushchak, Ya. P. Kost' // International Optical Congress “Optics–XXI century” (Topical Meeting on Opto-informatics), 15–18 September 2008 : Proceedings. – Saint-Petersburg (Russia), 2008. – P. 335–338.
 46. Design of optimization technique for electro- and acousto-optical interactions of light in crystalline materials / A. S. Andrushchak, B. G. Mytsyk, N. M. Demyanyshyn, M. V. Kaidan, O. V. Yurkevych // 9th International Conference on Laser and Fiber-Optical Network Modeling LFNM 2008, 2–4 October 2008 : Proceedings. – Alushta, Crimea (Ukraine), 2008. – P. 66–68.
 47. Пат. 2102700 Российская Федерация. Двухлучевой интерферометр для определения показателей преломления изотропных и анизотропных материалов / Андрущак А. С. ; опубл. 1998, Бюл. №2.
 48. Пат. на корисну модель 17929 Україна. Спосіб визначення показника заломлення оптичних матеріалів / Андрущак А. С., Островський І. П., Тибінка Б. В. ; опубл. 16.10.2006, Бюл. №10.
 49. Пат. на корисну модель 35224 Україна. Інтерферометрично-поворотний пристрій для вимірювання показника заломлення ізотропних та анізотропних матеріалів в діапазонах міліметрових та сантиметрових довжин хвиль / Андрущак А. С., Сиротинський О. І., Андрущак Н. А., Яцишин Є. М. ; опубл. 10.09.2008, Бюл. №17.
 50. 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.
 51. Пат. на корисну модель 39218 Україна. Поляризаційно-оптичний пристрій для визначення індукованої зміни різниці ходу в оптичних матеріалах / Мицик Б. Г., Андрущак А. С., Кость Я. П., Юркевич О. В. ; опубл. 10.02.2009, Бюл. №3.

Анотація

Андрущак А. С. Просторова анізотропія електро-, п'єзо- та акустооптичних взаємодій у кристалічних матеріалах твердотільної оптоелектроніки. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Національний університет „Львівська політехніка”, Львів, 2009.

Дисертація присвячена проблемі розробки технології цілеспрямованого підвищення ефективності електро-, п'єзо- та акустооптичних взаємодій у кристалічних матеріалах на основі послідовного врахування та аналізу просторової анізотропії властивостей цих матеріалів, а також розробці відповідних підходів до поліпшення електро- та акустооптичних характеристик пристроїв з робочими кристалічними елементами.

Удосконалено інтерферометричні та поляризаційно-оптичні методи дослідження анізотропних кристалічних матеріалів. Розроблено універсальний підхід до аналізу анізотропії електрооптичного, фотопружного та акустооптичного ефектів у кристалах довільної симетрії, що базується на побудові та аналізі вказівних поверхонь, а також нову технологію покращення параметрів електро- та акустооптичних комірок. Проведено дослідження акустичних, п'єзоелектричних, пружних, електрооптичних, фотопружних і акустооптичних параметрів кристалів LiNbO_3 , $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$, $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{11}$, $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$, Cs_2HgCl_4 , CaWO_4 та ін. Проаналізовано та обрано експериментальні геометрії застосування вивчених кристалічних матеріалів, які забезпечують високу ефективність відповідних електро-, п'єзо- і акустооптичних пристроїв.

Ключові слова: технологія вдосконалення кристалічних матеріалів, твердотільна оптоелектроніка, електрооптика, фотопружність, параметр акустооптичної якості, анізотропія, вказівні поверхні.

Аннотация

Андрущак А. С. Пространственная анизотропия электро-, пьезо- и акустооптических взаимодействий в кристаллических материалах твердотельной оптоэлектроники. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Национальный университет „Львовская политехника”, Львов, 2009.

Диссертация посвящена проблеме разработки технологии целенаправленного повышения эффективности электро-, пьезо- и акустооптических взаимодействий в кристаллических материалах на основе последовательного учета и анализа пространственной анизотропии свойств этих материалов, а также разработке соответст-

вующих подходов к улучшению электро- и акустооптических характеристик устройств с рабочими кристаллическими элементами.

Усовершенствованы интерферометрические и поляризационно-оптические методы исследования анизотропных кристаллических материалов. Разработан универсальный подход к анализу анизотропии электрооптического, фотоупругого и акустооптического эффектов в кристаллах произвольной симметрии, который базируется на построении и анализе указательных поверхностей, а также новая технология улучшения параметров электро- и акустооптических ячеек. Проведены исследования акустических, пьезоэлектрических, упругих, электрооптических, фотоупругих и акустооптических параметров кристаллов LiNbO_3 , $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$, $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{11}$, $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$, Cs_2HgCl_4 , CaWO_4 и др. Проанализированы и выбраны конкретные экспериментальные геометрии применения исследованных кристаллических материалов, обеспечивающие высокую эффективность соответствующих электро-, пьезо- и акустооптических устройств.

Ключевые слова: технология усовершенствования кристаллических материалов, твердотельная оптоэлектроника, электрооптика, фотоупругость, параметр акустооптического качества, анизотропия, указательные поверхности.

Abstract

Andrushchak A. S. Spatial anisotropy of electro-, piezo- and acoustooptic interactions in crystalline materials of solid state optoelectronics. – Manuscript.

Thesis for degree of Doctor of Technical Sciences by speciality 01.04.07 – Solid State Physics. – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2009.

This thesis is devoted to development of technology for efficiency increasing of electro-, piezo- and acoustooptic interactions in crystalline materials on the basis of consistent consideration and analysis of spatial anisotropy of the properties of those materials, as well as to the development of the corresponding techniques for improving electro- and acoustooptic characteristics of devices that involve working crystalline elements.

A systematic theoretical consideration is given to manifestations of electrooptic and piezooptic effects in typical interferometric and polarization-optical experiments. The main working relations are derived that enable one to calculate absolute electrooptic, piezooptic and elasto optic tensor constants and the corresponding constants referred to optical birefringence and optical path difference basing on the data of two-fold interferometric and polarization-optical measurements, including the most cumbersome experimental geometries. Moreover, practical corrections for the working relations are obtained that take into account inevitable non-plane-parallelism of sample edges.

The most general formulae for indicative surfaces describing 3D spatial behaviour of parametric optical effects in crystalline materials are derived. A universal method is

suggested for analyzing the anisotropy of electrooptic, photoelastic and acoustooptic effects in crystals characterized with arbitrary symmetry, which is based upon constructing the indicative surfaces and their further analysis. It is revealed for the first time that the anisotropy of electrooptic characteristics for the cases most frequently used in practice can be completely described in terms of four indicative surfaces.

Several interferometric and polarization-optical experimental techniques are developed or improved aimed at studying anisotropic crystalline materials. In particular, these are the interferometric method for checking quality of crystal surfaces and their deviation from the condition of plane-parallelity, the automated interferometric technique for highly accurate express-analysis of the refractive indices of isotropic and anisotropic optical materials, the improved apparatus for measuring electrooptic and piezooptic coefficients and a number of practical techniques for measuring of acoustic, elastic, piezoelectric and acoustooptic characteristics. Combined experimental investigations of acoustic, elastic, piezoelectric, electrooptic, photoelastic and acoustooptic parameters are carried out for LiNbO_3 , $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$, $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{11}$, β - BaB_2O_4 , Cs_2HgCl_4 , CaWO_4 and some other crystals. They include derivation of complete matrices of the corresponding tensor coefficients, revealing of their anisotropy, along with analysis of the appropriate indicative surfaces, the acoustooptic figure of merit, etc.

The anisotropy degree of the parametric crystal optical effects is introduced and calculated for the materials under test. We propose a general technique for optimizing the principal characteristics of electrooptic and acoustooptic cells. It is demonstrated that there exist specific directions of light propagation, light polarization, application of external electric or static mechanical (or acoustic) fields and the acoustic wave polarization, for which the efficiency of electrooptic (or acoustooptic) interactions and the characteristics of the corresponding cells for controlling laser radiation turn out to be substantially higher than those commonly believed to be the limits for a given material. The possibilities, specific conditions and the experimental geometries are analyzed, which prove to be promising for practical utilization of anisotropic crystalline materials studied in the framework of this thesis.

Key words: technology for improving crystalline materials, solid state optoelectronics, electrooptics, photoelasticity, acoustooptic figure of merit, anisotropy, indicative surfaces.

Підписано до друку 19.11.2009 р.
Формат 60×90/16. Папір офсетний.
Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 1,7.
Тираж 100 прим. Зам. .
Поліграфічний центр видавництва
Національного університету „Львівська політехніка”,
вул. Ф. Колесси, 2, 79000, м. Львів