

ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ім. І. ФРАНКА

*На правах рукопису*

**АНДРУЩАК**  
Анатолій Степанович

УДК 548.0:535.[327+551]

**РОЗВИТОК МЕТОДОЛОГІЇ ПОВНОГО ВИВЧЕННЯ  
П'ЄЗООПТИЧНОГО ЕФЕКТУ В КРИСТАЛАХ**

(01.04.07 — фізика твердого тіла)

**Авгореферат**  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата фізико-математичних наук



Робота виконана в Державному науково-дослідному інституті прикладної акустики, м.Львів.

**Науковий керівник:**

доктор фізико-математичних наук МІЦІК В.Г.

**Офіційні опоненти:**

доктор фізико-математичних наук, професор ХАРЧЕНКО М.Ф.;

кандидат фізико-математичних наук, доцент ЛУЦІВ-ШУМСЬКИЙ Л.П.

Провідна організація - Київський державний університет.

Захист відбудеться "1" грудня 1993 року о 15.30 год. на засіданні спеціалізованої ради Д.068.26.06 Львівського державного університету ім.І.Франка за адресою: 290006, Львів, вул.Ломоносова,8, Велика фізична аудиторія.

З дисертацією можна ознайомитись в науковій бібліотеці університету (м.Львів, вул.Драгоманова,5).

Відгуки на автореферат надсилати на адресу: 290006, Львів, вул.Ломоносова,8, фізичний факультет, вченому секретареві.

Автореферат розіслано "28" листопада 1993 р.

Вчений секретар спеціалізованої ради,  
доктор фіз.-мат.наук, професор

А.С.НОСЕНКО

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність досліджень. До недавнього часу дослідження п'єзооптичного ефекту (ПОЕ) носили некомплексний характер і стосувались, в основному, кубічних кристалів і деяких простіших форм кристалів нижчих класів симетрії. Це було зумовлено як складністю експериментальних вимірювань, які проводяться інтерферометричними методами, так і відсутністю повного аналітичного опису ПОЕ в кристалах нижчої і середньої категорій. Останнє, очевидно, і пояснює відсутність аналізу анізотропії ПОЕ в кристалах. Подальший розвиток фундаментальних досліджень і прикладні задачі зумовлюють актуальність проведення повного вивчення п'єзооптичного ефекту в кристалах усіх класів симетрії, а саме: заповнення матриць п'єзооптичних коефіцієнтів (ПОК), вивчення ПОК, що описують індуковані двоазломлення і різницю ходу, та їх кореляцію з абсолютними ПОК, побудову п'єзооптичних вказівних поверхонь, їх перерізів та стереографічних проєкцій, аналіз анізотропії ПОЕ.

Крім того, використання того чи іншого кристалічного матеріалу в різноманітних пристроях на базі ПОЕ (в модуляторах оптичного випромінювання, акустичних дефлекторах, в фотопружній динамометрії та ін.) вимагає знання величин ПОЕ не тільки в головних напрямках кристалофізичної системи координат, але й його просторового розподілу з метою комплексного аналізу анізотропії ПОЕ і вибору оптимальних зрізів та відповідних геометрій п'єзооптичного експерименту.

Розв'язання цих задач дає можливість якісно по-новому розглядати питання дослідження ПОЕ в чутливих анізотропних матеріалах із наступним їх використанням для потреб практики.

Таким чином, повне вивчення ПОЕ в кристалах являється актуальним і важливим як з наукової, так і практичної сторін.

Метов дисертаційної роботи є розвиток та апробація методології повного вивчення п'єзооптичного ефекту в кристалах.

Це забезпечувалось вирішенням таких задач.

1. Проведення тензорним методом феноменологічного опису п'єзооптичного ефекту і встановлення спрощених робочих співвідношень для розрахунку поворотних, зсувних та поворотно-зсувних п'єзооптичних коефіцієнтів кристалів усіх класів симетрії.

2. Аналітичний опис анізотропії ПОЕ за допомогою вказівних поверхонь для поздовжньої та поперечної компонент тензора ПОЕ.

3. Розвиток методів дослідження п'єзооптичних властивостей кристалів. Створення установки для вивчення ПОЕ.

4. Дослідження п'єзооптичного ефекту та його анізотропії для ря-

ду кристалів різних класів симетрії.

## 5. Вивчення релаксацій фотопружності в твердих тілах.

Наукова новизна.

1. В роботі вперше тензорним методом для кристалів триклінної симетрії із одного рівняння отримані співвідношення, що дозволяють знайти всі члени матриці ПОК на основі вимірювань індукованих одновісним тиском змін показників заломлення зразків і врахуванням їх пружних деформацій. Встановлені співвідношення є справедливими при вимірюванні всіх не рівних нулю поворотних, зсувних та поворотно-зсувних ПОК для кристалів будь-якого класу симетрії.

2. Знайдено особливу властивість ПОЕ в низькосиметричних кристалах, яка приводить до неоднозначності у визначенні п'єзооптичних коефіцієнтів як за знаком, так і за абсолютною величиною. Для виключення цієї неоднозначності правила вибору кристалофізичної системи координат доповнені вимогою задавати додатні напрями її осей. Обґрунтовано відповідні практичні рекомендації.

3. Отримано загальні рівняння вказівних поверхонь позовної та поперечної компонент тензора ПОЕ для одновісних та кубічних кристалів. Як часткові випадки записані рівняння вказівних поверхонь для кристалів усіх класів симетрії середньої та вищої категорій.

4. Виведені рівняння вказівних поверхонь, що описують індуковану одновісним тиском зміну оптичного шляху зразка, розміщеного в плечі інтерферометра, а також п'єзозміну його різниці ходу при поляризаційно-оптичних дослідженнях.

5. Отримано співвідношення для визначення поворотних і поворотно-зсувних ПОК методом реєстрації п'єзозміни просторового положення оптичної осі.

6. Встановлені робочі формули і проаналізовано можливість точного визначення показників заломлення ізотропних та анізотропних матеріалів методом повороту плоскопаралельної пластини із досліджуваного матеріалу в одному із плеч інтерферометра Майкельсона.

7. Проведено аналітичний опис методики незалежного вимірювання ПОК і коефіцієнтів пружної податливості модифікованим імерсійно-інтерферометричним методом.

8. Заповнені матриці ПОК ряду кристалів різних класів симетрії. Для них побудовані вказівні поверхні, їх перерізи головними площинами та стереографічні проєкції, на основі яких проведено аналіз анізотропії ПОЕ в цих кристалах.

На захист виставляється.

І. Спрощені співвідношення для визначення всіх ненульових членів

метриці ПОК кристалів будь-якого класу симетрії на основі вимірювань п'єзооптичного впливу інтерферометричного променя, що проходить через зразок, при дії механічних напружень стиску із врахуванням пружної деформації зразка.

2. Рівняння вказівних поверхонь поздовжньої та поперечної компонент тензора ПОЕ кристалів усіх фотопружних груп середньої і вищої категорій. Побудовані на основі заповнених матриць ПОК відповідні поверхні для кристалів ніобату літію, тенталату літію, бастрону, алюмокалієвих квасців, фтористого барію і хлористого натрію та знайдені для кожної поверхні їх екстремальні значення.

3. Рівняння вказівних поверхонь ПОЕ із врахуванням пружності та індукованої різниці ходу і необхідні при цьому рівняння вказівних поверхонь для дієвих компонент пружного ефекту одновісних та кубічних кристалів, а також побудовані на основі цих рівнянь вказівні поверхні кристалів ніобату літію і знайдені їх екстремальні значення.

#### 4. Методи п'єзооптики:

- імерсійно-інтерферометричний метод незалежного вимірювання ПОК та дієвих коефіцієнтів пружної податливості;

- метод визначення поворотних та поворотно-зсувних ПОК на основі реєстрації індукованої зміни просторової орієнтації оптичної осі і аналітичні співвідношення, що їх описують;

- інтерферометричний метод визначення з високою точністю показників заломлення ізотропних і анізотропних матеріалів та співвідношення, що покладені в його основу.

#### 5. Технічні рішення:

- одноканальні вимірювачі тиску з однопорядковою і багатопорядковою реєстрацією вихідного сигналу;

- двоканальний однопорядковий перетворювач тиску із компенсацією впливу температури і одночасним її вимірюванням;

- двоканальні перетворювачі тиску із багатопорядковою автоматичною реєстрацією вихідного сигналу.

#### 6. Наступні положення:

- для однозначності визначення поворотних, зсувних і поворотно-зсувних ПОК кристалів необхідно доповнити правила кристалографічної установки та вибору кристалофізичної системи координат вимогою задавати позитивні напрями їх осей;

- відмічена неоднозначність визначення п'єзооптичних коефіцієнтів як за знаком, так і за абсолютною величиною характерна і для ряду інших фізичних ефектів, що описуються тензорами 3-го і вище рангів;

- п'єзооптичний ефект в кристалах, обумовлений зміною показника

заломлення під дією нормальних механічних напружень, повністю описується трьома якісно відмінними вказівними поверхнями: однією для поздовжньої і двома для поперечної компонент тензора ПОВ;  
- для всіх кристалів кубічної системи поздовжній п'єзооптичний ефект приймає максимальне значення при однакових куткових координатах напрямку поляризації світла чи прикладання тиску, які не залежать від величини п'єзооптичних коефіцієнтів.

#### Практична цінність роботи.

1. Виведені формули можуть бути використані для експериментально-го визначення інтерферометричним методом всіх членів матриці ПОК кристалів будь-якого класу симетрії.

2. Отримані рівняння для кристалів середньої та вищої категорій дають можливість побудувати на основі визначених членів матриці ПОК вказівні поверхні як для поздовжнього та поперечного ПОВ, так і для індукованих оптичного шляху та різниці ходу.

3. Розроблена програма для графічного зображення з допомогою ЕОМ загального вигляду вказівних поверхонь, їх перерізів та стереографічних проєкцій з метою вивчення анізотропії ПОВ та знаходження його екстремальних значень. Останнє служить критерієм знаходження оптимальних зрізів кристалів для їх практичного застосування в різноманітних функціональних пристроях на базі ПОВ.

4. Запропоновані практичні рекомендації на основі п'єзоелектричного (для полярних) та п'єзооптичного (для центросиметричних кристалів) ефектів щодо вибору позитивних напрямів осей кристалофізичної системи координат, що викликають неоднозначність визначення п'єзооптичних коефіцієнтів як за знаком, так і за абсолютною величиною.

#### 5. Розроблені методи:

- а) визначення з меншою похибкою поворотних і поворотно-зсувних ПОК;
- б) незалежного вимірювання абсолютних ПОК та дієвих коефіцієнтів пружної податливості;
- в) визначення з більшою точністю показників заломлення ізотропних та анізотропних матеріалів.

6. Повне вивчення ПОВ ряду кристалів дозволяє рекомендувати їх для практичних застосувань. Приводиться приклад такого застосування в багатопорядкових перетворювачах статичного тиску.

#### 7. Запропоновано ряд технічних рішень:

- а) одноканальний однопорядковий вимірник тиску із диференціального реєстрацією вихідного сигналу;
- б) двоканальний однопорядковий перетворювач тиску із компенсацією

впливу температури і одночасним її точним вимірюванням;  
в) одноканальні багатопорядкові вимірювачі тиску із дискретним повертанням аналізатора або  $\lambda/8$ -фазової пластини;  
г) двоканальні багатопорядкові перетворювачі тиску із синхронним переключенням  $\lambda/4$ - або  $\lambda/6$ - і  $\lambda/3$ -фазових пластинок.

8. Вивчення релаксаційних залежностей фотопружності дозволяє встановити динамічні границі застосування фотопружних матеріалів як чутливих елементів фотопружних перетворювачів тиску.

Апробація роботи. Основні результати дисертації представлялись на Всесоюзній конференції із фізики сегнетоелектриків (Ростов-на-Дону, 1989р.), VIII Міжнародному симпозиумі із застосування сегнетоелектриків (Gleason, USA, 1992р.), Українсько-Французькому симпозиумі "Кондесована речовина-наука і індустрія" (Львів, 1993р.), Міжнародній конференції "Electronic ceramics-90" (Рига, 1990р.), Міжнародній нараді "Оптоелектроніка-89" (Баку, 1989р.), Всесоюзному семінарі "Оптика анізотропних серед" (Москва, 1990р.), Республіканській конференції по параметричній кристалооптиці (Львів, 1990р.), VII Міжнародній конференції "Електричні методи та засоби вимірювання температури" (Львів, 1992р.), Республіканських семінарах "Оптичні датчики фізичних величин" (Бельци, Молдова, 1989, 1990рр.), Раді директорів і науково-технічному семінарі Мінсудпрому (Санкт-Петербург, Київ, 1988р.), Міжгалузевій виставці "ВОСПИ-88" (Москва, 1988р.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано більше 30 робіт в наукових журналах і збірниках. Основні з них приводяться в кінці автореферату. Аналітичний опис ПОЕ та його анізотропії, а також всі вимірювання і обробка експериментальних результатів проведені особисто автором. Співавтори приймали участь переважно в постановці задачі, в обговоренні і узагальненні отриманих результатів.

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти глав, заключення, списку літератури, який включає 283 найменувань, 4 додатків. Загальний об'єм роботи 273 стор. Основна частина містить 155 стор. тексту, 86 рисунків і 9 табл. Додатки - 12 стор.

#### ЗМІСТ РОБОТИ

Перша глава побудована на основі літературного огляду із поставленої проблематики дисертації.

Описуються відомі методи дослідження фотопружного ефекту, які полягають у вимірюванні або п'єзооптичних коефіцієнтів  $\kappa_{im}$  квазістатичними методами фотопружності або пружнооптичних

коефіцієнтів  $P_{in}$  динамічними методами. Обговорюється проблема визначення знаків фотопружних коефіцієнтів  $\kappa_{im}$  та  $P_{in}$ . Аналізуються методи експериментального визначення абсолютних ПОК  $\kappa_{im}$ , що описують п'язозміну показників заломлення, а також ПОК індукованого двозаломлення  $\kappa_{im}^*$  і різниці ходу  $\kappa_{im}^0$ .

В кінці першої глави проаналізовано різні способи геометричного представлення анізотропії фізичних ефектів, що описуються тензорами вищих рангів, як з допомогою характеристичних, так і вказівних поверхонь. Приводиться також аналіз побудованих в літературі вказівних поверхонь та їх стереографічних проєкцій для різних фізичних ефектів в кристалах.

Друга глава присвячена феноменологічному опису п'язооптичного ефекту в кристалах.

Особлив'стю всіх раніше проведених феноменологічних описів як п'язооптичного, так і інших фізичних ефектів є те, що всі вони здійснені на основі єдиного математичного апарату, а саме традиційним класичним методом перерізу характеристичних поверхонь. Складність останнього та громіздкість математичних розрахунків при його проведенні, особливо для низькосиметричних кристалів, спонукали нас при аналітичному описі п'язооптичного ефекту скористатися *тензорним методом*, який дозволяє із одного загального рівняння отримати необхідні робочі співвідношення для розрахунку всіх існуючих компонент тензора ПОЕ, навіть для триклінного класу симетрії. Отримані цим методом в дисертації робочі формули для кристалів триклінної симетрії дали можливість підтвердити достовірність раніше отриманих класичним методом аналогічних співвідношень та скоректувати ряд формул, пізніше підтверджених повторним їх виводом тим же класичним методом.

Крім того, простота та можливість значно глибшого і повнішого аналізу всіх доступних умов п'язооптичного експерименту при тензорному методі забезпечили виведення додаткових співвідношень, що, разом із усуненням описаної нижче неоднозначності за знаком при вимірюванні неголовних ПОК, дозволило суттєво спростити остаточні робочі формули для розрахунку абсолютних ПОК. Більше того, отримані співвідношення для розрахунку неголовних ПОК кристалів триклінного класу симетрії є повністю справедливими для знаходження всіх ненульових членів матриць ПОК кристалів інших класів симетрії. Відповідний аналіз щодо експериментального заповнення матриць ПОК для всіх класів симетрії, разом із даними про потрібну кількість зразків, їх орієнтацій та необхідне число

п'єзооптичних вимірювань приведені в другій главі.

Проведений тензорним методом аналітичний опис п'єзооптичного ефекту показав, що таким методом можна здійснити значно оперативніше феноменологічний розгляд і будь-якого іншого фізичного ефекту, що описується тензором вищого рангу.

Неоднозначність визначення абсолютних ПОК. Відмічено цікаву особливість, а саме: всі неголовні, за винятком діагональних поворотно-зсувних, абсолютні ПОК визначаються на практиці з точністю до знака в залежності від вибору правої кристалофізичної системи координат, тобто є неоднозначними за знаком. Запропоновано для усунення цієї неоднозначності правила вибору кристалофізичних осей доповнити вимогою задавати додатні напрями їх осей. Більше того, невиконання останнього може взагалі привести до неправильного результату і за абсолютною величиною у визначенні більшості поворотних та недіагональних поворотно-зсувних ПОК.

Для усунення цієї неоднозначності пропонуються практичні рекомендації для задання додатніх напрямів осей кристалофізичної системи координат на основі п'єзоелектричного ефекту (для 10 класів симетрії полярних кристалів) або ж на базі п'єзооптичного ефекту (для решти 6 класів центросиметричних кристалів, для яких характерна неоднозначність визначення ПОК).

В цій главі проведено також аналітичний опис анізотропії ПОЕ на основі вказівних поверхонь (ВП).

Осміюючись розглядом вказівних поверхонь для головних компонентів тензора ПОЕ одновісних та кубічних кристалів (всі інші поверхні для зсувних, поворотних та поворотно-зсувних ПОК носять скоріше чисто теоретичне значення і по своїй суті малоприматні в практичному використанні), записано загальне рівняння вказівної поверхні (i1111)-компоненти тензора п'єзооптичного ефекту  $\kappa_{im}$ :

$$\begin{aligned} \kappa'_{i1111} = \kappa'_{im} = & \kappa_{11} (\alpha_{11}^2 \alpha_{m1}^2 + \alpha_{12}^2 \alpha_{m2}^2) + \kappa_{12} (\alpha_{11}^2 \alpha_{m2}^2 + \alpha_{12}^2 \alpha_{m1}^2) + \kappa_{13} (\alpha_{11}^2 + \alpha_{12}^2) \alpha_{m3}^2 + \\ & + \kappa_{31} \alpha_{13} (\alpha_{m1}^2 + \alpha_{m2}^2) + \kappa_{33} \alpha_{13}^2 \alpha_{m3}^2 + \kappa_{14} ((\alpha_{11}^2 - \alpha_{12}^2) (\alpha_{m2} \alpha_{m3}) + 2\alpha_{11} \alpha_{12} \alpha_{m1} \alpha_{m3}) + \\ & + \kappa_{25} ((\alpha_{12}^2 - \alpha_{11}^2) \alpha_{m1} \alpha_{m3} + 2\alpha_{11} \alpha_{12} \alpha_{m2} \alpha_{m3}) + \kappa_{16} (\alpha_{11}^2 - \alpha_{12}^2) \alpha_{m1} \alpha_{m2} + \\ & + 2\kappa_{61} \alpha_{11} \alpha_{12} (\alpha_{m1}^2 - \alpha_{m2}^2) + 2\kappa_{41} (\alpha_{12} \alpha_{13} (\alpha_{m1}^2 - \alpha_{m2}^2) + 2\alpha_{11} \alpha_{13} \alpha_{m1} \alpha_{m2}) + \\ & + 2\kappa_{52} (\alpha_{11} \alpha_{13} (\alpha_{m2}^2 - \alpha_{m1}^2) + 2\alpha_{12} \alpha_{13} \alpha_{m1} \alpha_{m2}) + 2\kappa_{44} (\alpha_{12} \alpha_{13} \alpha_{m2} \alpha_{m3}) + \\ & + \alpha_{11} \alpha_{13} \alpha_{m1} \alpha_{m3}) + 2\kappa_{45} (\alpha_{12} \alpha_{13} \alpha_{m1} \alpha_{m3} - \alpha_{11} \alpha_{13} \alpha_{m2} \alpha_{m3}) + 2\kappa_{66} (\alpha_{11} \alpha_{12} \alpha_{m1} \alpha_{m2}). \end{aligned} \quad (I)$$

Тут  $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}$  та  $\alpha_{m1}, \alpha_{m2}, \alpha_{m3}$  - відповідно напрямлячі косинуси напрямів поляризації світла  $\vec{l}$  та прикладання нормального механічного напруження  $\vec{m}$  відносно осей  $X_1, X_2, X_3$  кристалофізичної системи

координат. З метою спрощення подальших розрахунків останнє рівняння записане для гіпотетичної матриці ПОК, яка аналогічна матриці класу симетрії 3, але з такою умовою:  $\kappa_{16} \neq \kappa_{61}$  і  $\kappa_{66} \neq \kappa_{11} - \kappa_{12}$ .

Тоді для поздовжньої компоненти, для якої  $\vec{i} \parallel \vec{m} \parallel \vec{r}$  ( $\vec{r}$  - радіус-вектор), напрямляючі косинуси в сферичній системі координат будуть рівні

$$\alpha_{11} = \alpha_{m1} = \sin\theta \cos\varphi; \quad \alpha_{12} = \alpha_{m2} = \sin\theta \sin\varphi; \quad \alpha_{13} = \alpha_{m3} = \cos\theta. \quad (2)$$

Підстановкою (2) в (1) отримуємо рівняння *вказівної поверхні поздовжнього ПОВ*

$$\begin{aligned} \kappa_{11}^{(m)} = & \kappa_{11} \sin^4\theta + 2(\kappa_{12} - \kappa_{11} + \kappa_{66}) \sin^4\theta \sin^2\varphi \cos^2\varphi + (\kappa_{13} + \kappa_{31} + 2\kappa_{44}) \sin^2\theta \times \\ & \times \cos^2\theta + \kappa_{33} \cos^4\theta + [(\kappa_{14} + 2\kappa_{41}) \sin 3\varphi - (\kappa_{25} + 2\kappa_{52}) \cos 3\varphi] \sin^2\theta \cos\theta + \\ & + 1/4(\kappa_{16} + 2\kappa_{61}) \sin^4\theta \sin 4\varphi. \end{aligned} \quad (3)$$

Для поперечного ПОВ, виходячи із фізичної обмеженості на допустимі просторові положення напрямів поляризації світла, яке поширюється в анізотропному напрямі кристала, були знайдені рівняння двох можливих *вказівних поверхонь*:

1) *вказівної поверхні поляризації світла*  $\kappa_{im}^{(1)}$  ( $\vec{i} \parallel \vec{r}, \vec{m} \perp \vec{i}$ ), для якої

$$\begin{aligned} \alpha_{11} = \sin\theta \cos\varphi; & \quad \alpha_{12} = \sin\theta \sin\varphi; & \quad \alpha_{13} = \cos\theta; \\ \alpha_{m1} = \cos(90^\circ + \varphi) = -\sin\varphi; & \quad \alpha_{m2} = \cos\varphi; & \quad \alpha_{m3} = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{тоді } \kappa_{im}^{(1)} = & \kappa_{12} \sin^2\theta + 2(\kappa_{11} - \kappa_{12} - \kappa_{66}) \sin^2\theta \sin^2\varphi \cos^2\varphi + \kappa_{31} \cos^2\theta + \\ & + 2(\kappa_{52} \cos 3\varphi - \kappa_{41} \sin 3\varphi) \sin\theta \cos\theta - 1/4(\kappa_{16} + 2\kappa_{61}) \sin^2\theta \sin 4\varphi; \end{aligned} \quad (5)$$

2) *вказівної поверхні механічного напруження*  $\kappa_{im}^{(m)}$  ( $\vec{m} \parallel \vec{r}, \vec{i} \perp \vec{m}$ ):

$$\begin{aligned} \alpha_{11} = -\sin\varphi; & \quad \alpha_{12} = \cos\varphi; & \quad \alpha_{13} = 0; \\ \alpha_{m1} = \sin\theta \cos\varphi; & \quad \alpha_{m2} = \sin\theta \sin\varphi; & \quad \alpha_{m3} = \cos\theta, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{тоді } \kappa_{im}^{(m)} = & \kappa_{12} \sin^2\theta + 2(\kappa_{11} - \kappa_{12} - \kappa_{66}) \sin^2\theta \sin^2\varphi \cos^2\varphi + \kappa_{13} \cos^2\theta + \\ & + (\kappa_{25} \cos 3\varphi - \kappa_{14} \sin 3\varphi) \sin\theta \cos\theta - 1/4(\kappa_{16} + 2\kappa_{61}) \sin^2\theta \sin 4\varphi. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким чином, на відміну від більшості фізичних ефектів, які описуються тензорами вище 2-го рангу і анізотропія яких характеризується безліччю *вказівних поверхонь*, п'єзооптичний ефект повністю можна описати обмеженим числом *вказівних поверхонь*.

Із загальних рівнянь (3), (5) і (7) шляхом викреслення коефіцієнтів, рівних нулю, або підстановкою  $\kappa_{16} = -2\kappa_{61}$  чи  $\kappa_{66} = -\kappa_{11} - \kappa_{12}$ , були записані рівняння *вказівних поверхонь поздовжньої і поперечної компонент тензора ПОВ для кристалів усіх фотопружних груп середньої та вищої категорій*.

Для практичного використання вказівних поверхонь в дисертаційній роботі знайдені рівняння відповідних поверхонь із врахуванням пружності та на основі індукованих різниць ходу.

Для побудови вказівних поверхонь із врахуванням пружності, аналогічно як і для ПОВ, отримано необхідні два рівняння вказівних поверхонь  $S_{km}^{(m)}$  та  $S_{km}^{(i)}$  поперечної компоненти тензора пружної податливості  $S_{km}$ . Тоді для кожної вказівної поверхні були записані рівняння відповідних поверхонь із врахуванням пружності, а саме.

1. Для вказівної поверхні поздовжньої компоненти тензора ПОВ  $\kappa_{ii}^{(m)}$  величина зміни оптичного шляху  $\delta\Delta_k$  зрезка з показником заломлення  $n_1$  на одиницю його довжини  $d_k$  в напрямі просвітлення та одиницю прикладеного навантаження  $\sigma_m$  рівна

$$\left(\frac{\delta\Delta_k}{\sigma_m d_k}\right)_{ii}^{(m)} = f(\theta, \varphi) = -\kappa_{ii}^{(m)} n_1^3 / 2 + S_{km}^{(m)} (n_1 - 1) \quad (8)$$

2. Відповідно для вказівної поверхні поляризації світла  $\kappa_{im}^{(i)}$ :

$$\left(\frac{\delta\Delta_k}{\sigma_m d_k}\right)_{im}^{(i)} = -\kappa_{im}^{(i)} n_1^3 / 2 + S_{km}^{(i)} (n_1 - 1) \quad (9)$$

3. Для вказівної поверхні механічного напруження  $\kappa_{im}^{(m)}$ :

$$\left(\frac{\delta\Delta_k}{\sigma_m d_k}\right)_{im}^{(m)} = -\kappa_{im}^{(m)} n_0^3 / 2 + S_{km}^{(m)} (n_0 - 1). \quad (10)$$

Аналогічно для побудованих вказівних поверхонь головних ПОК записано два можливі варіанти вказівних поверхонь індукованої зміни різниці ходу:

$$1) \kappa_{km}^{o(m)} = \kappa_{ii}^{(m)} n_1^3 - \kappa_{im}^{(m)} n_0^3 - 2(n_1 - n_0) S_{km}^{(m)}. \quad (11)$$

$$2) \kappa_{km}^{o(i)} = \kappa_{im}^{(i)} n_1^3 - \kappa_{jj}^{(i)} n_0^3 - 2(n_1 - n_0) S_{km}^{(i)}. \quad (12)$$

Тут кутова залежність показника заломлення  $n_1$  для одновісних кристалів має вигляд

$$n_1 = \left( \frac{\sin^2 \theta}{n_o^2} + \frac{\cos^2 \theta}{n_e^2} \right)^{-1/2}, \quad (13)$$

$n_o$ ,  $n_e$  - звичайний та незвичайний показники заломлення, а  $\kappa_{jj}$  - це є переріз ізотропною площиною вказівної поверхні поздовжньої компоненти тензора ПОВ, який легко знайти із (3) при умові  $\theta = 90^\circ$ .

В т р е т і й г л а в і описано особливості експериментальної установки і методичні аспекти вивчення п'єзооптичного ефекту в кристалах, а також розглядаються запропоновані методи дослідження ПОВ.

Створена на базі інтерферометра Маха-Цендера універсальна лазерна установка дозволяла проводити, не міняючи положення зрезка, по черговому вимірюванню абсолютних п'єзооптичних коефіцієнтів та ПОК індукованої різниці ходу на основі відповідно

інтерферометричної та поляризаційно-оптичної методик. Це давало можливість порівнювати отримані різними методами результати, одночасно гарантуючи їм більшу достовірність.

П'єзооптичні коефіцієнти визначались *методом екстремальних інтенсивностей* по зсуву на п екстремумів чітко сформованих інтерференційних картин або, при малих ПОК, *методом безпосереднього визначення зсуву* інтерференційної картини на екрані.

Завдання заповнення матриці ПОК кристалів, особливо вперше синтезованих, вимагає знання значень їх пружних коефіцієнтів та показників заломлення. Технічні рішення, запропоновані в роботі, дозволяють виміряти необхідні параметри на тій же інтерферометричній основі. Розглянемо їх.

Імерсійно-інтерферометричний метод незалежних вимірювань п'єзооптичних та пружних коефіцієнтів.

Цей метод базується на принципі вимірювання індукованої зміни оптичних шляхів зразка для двох середовищ: спочатку в повітрі  $\Delta\lambda_{1km}^*$ , а потім в імерсійній рідині  $\Delta\lambda_{1km}^*$ . Сумісний розв'язок рівнянь щодо личин  $\Delta\lambda_{1km}^*$  та  $\Delta\lambda_{1km}^*$  приходить остаточно до знаходження як п'єзооптичних, так і діючих пружних коефіцієнтів.

Запропонований метод розширює область вимірювання відомих імерсійно-інтерферометричних методів і дозволяє досліджувати температурні та дисперсійні залежності показників заломлення в широких межах змін температури чи довжини хвилі світла.

Інтерферометричний метод вимірювання показників заломлення кристалів. Цей метод базується на вимірюванні зміни оптичного шляху  $\Delta$  плоскопаралельної пластини із досліджуваного кристала при її повороті на кут  $\phi$  в одному із плеч інтерферометра. Так для інтерферометра Майкельсона знайдено співвідношення для безпосереднього розрахунку показника заломлення досліджуваної пластини:

$$n = \frac{\sin^2 \phi + (1 - \cos \phi - \Delta)^2}{2(1 - \cos \phi - \Delta)} \quad (14)$$

Положення пластини на установці визначає, який із показників заломлення одно- чи двовісних кристалів вимірюється в даній гесметрії експерименту. Для цього методу пораховано з допомогою ЕОМ значення похибки  $\delta n$  вимірювання показника заломлення в залежності від кута повороту пластини та її показника заломлення. Так для реально прийнятних значень похибок вимірювання  $\phi$  та  $\Delta$  мінімальне значення  $\delta n$  становило  $\approx 4 \cdot 10^{-6}$  при  $\phi = 75^\circ$ . Останнє вказує на прецизійність методу та дозволяє рекомендувати його, крім п'єзооптичних досліджень, і для інших наукових чи практичних застосувань.

Відмітимо ще один метод п'єзооптичних досліджень, який дозволяє з висою точністю визначати поворотні та поворотно-зсувні ПОК низькосиметричних кристалів, які інтерферометричним методом визначаються з найбільшою похибкою. Останній базується на принципі реєстрації п'єзозміни просторового положення оптичної індикатрисы. Так при дії нормального механічного напруження, наприклад вздовж осі Z моноклінного кристала, його оптична вісь повернеться на кут  $\alpha$  навколо осі Y. Експериментальна реєстрація зсувів на кути  $\beta_z^0$  (вздовж вертикальної осі Z) та  $\beta_1^0$  (в перпендикулярному напрямі) просторової орієнтації оптичної осі дозволяє на основі знайдених формул (при малих кутах  $\alpha$ )

$$\alpha = \arcsin((\sin \beta_z^0) / n_z \sin V) \quad (15)$$

та 
$$\Delta V = \arcsin((\sin \beta_1^0) / n_z) \quad (16)$$

розрахувати відповідно кут повороту оптичної індикатрисы  $\alpha$  та зміну  $\Delta V$  кута V між оптичними осями. Кут  $\alpha$  однозначно визначає поворотний коефіцієнт  $\kappa_{5m}$  (в даному випадку  $\kappa_{53}$ ), згідно відомого співвідношення  $\kappa_{5m} = (a_1 - a_2) \operatorname{tg} \alpha / c_m$  ( $m=1,2,3$ ).

Апробований на прикладі кристалів ТГС+L- $\alpha$ -аланін цей метод забезпечував досить високу точність реєстрації кута  $\Delta \beta = 0,002$  град та відповідно поворотни  $\sim 3-4\%$ .

Розрахунок п'єзозміни  $\kappa_{5m}$  між оптичними осями, згідно відомого співвідношення  $\operatorname{tg} V = (N_g / N_p) \{ (N_m^2 - N_p^2) / (N_g^2 - N_m^2) \}^{1/2}$ , дав значення  $\Delta V_{\text{розра}}^0 = 0,014$  град, що в границях похибки експерименту добре співпадає із вимірним значенням цього кута  $\Delta V_{\text{експ}}^0 = 0,016$  град.

Завершує главу опис методики побудови загального виду кватерних поверхонь та їх стереографічних проєкцій. Запропоновано зображення об'ємного виду ВП створювати з допомогою ЕОМ *методом меридіональних* ( $\varphi = \text{const}$ ) *та екваторальних* ( $\theta = \text{const}$ ) *перерізів* із наступним відображенням їх на площину рисунка. Розроблена для цього програма дозволяла задавати початкове значення, крок та границі змін кутів  $\theta$  та  $\varphi$ , тим самим підбираючи найкраще її зображення із чітко видимими на рисунку особливостями для двох видів відображень: ізометричному та фронтально-діаметричному. Розглянуто також особливості побудови на ЕОМ стереографічних проєкцій ВП та переваги аналізу анізотропії ПОЕ на їх основі.

В четвертій главі приведені основні результати дослідження ПОЕ в кристалах, вибраних для апробації розвиненої в роботі методики повного вивчення п'єзооптичного ефекту.

Ніобат літію (НЛ). Для виключення неоднозначності за знаком, властивої неголовним коефіцієнтам  $\kappa_{14}$  та  $\kappa_{41}$  цього класу симетрії,

Таблиця I. П'єзооптичні коефіцієнти ніобату літію (в од.  $10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$ ).

Умови експерименту	$\kappa_{im}$	Внесок $\kappa_{im}^B$ $\Delta \delta \kappa^B$	Внесок $S_{\kappa m}^B$ $\Delta \delta S_{\kappa m}^B$	$\kappa_{km}^*$ розраховані із $\kappa_{im}$	$\kappa_{km}^*$ розраховані із $\kappa_{km}^0$		
					$\kappa_{km}^0$	Внесок пружності	$\kappa_{km}^*$
1 2 1	$\kappa_{11} = -0,45 \pm 0,02$	227	-127	$\kappa_{21}^* = \kappa_{31} n_3^3$	+10,2	+0,20	+10,4 ± 0,5
1 2 3	$\kappa_{31} = +0,49 \pm 0,03$	65	35	$-\kappa_{11} n_1^3 = -10,6$			
1 3 1	$\kappa_{11} = -0,48 \pm 0,02$	238	-138	$\kappa_{31}^* = \kappa_{11} n_1^3$	-6,9	0	-6,9 ± 0,3
1 3 2	$\kappa_{21} = 0,11 \pm 0,016$	28	72	$-\kappa_{21} n_2^3 = -7,0$			
2 1 2	$\kappa_{22} = -0,46 \pm 0,02$	227	-127	$\kappa_{12}^* = \kappa_{22} n_2^3$	-10,5	-0,20	-10,7 ± 0,5
2 1 3	$\kappa_{32} = 0,45 \pm 0,03$	63	37	$-\kappa_{32} n_3^3 = -10,3$			
2 3 1	$\kappa_{12} = 0,11 \pm 0,016$	28	72	$\kappa_{32}^* = \kappa_{12} n_1^3$	+6,7	0	+6,7 ± 0,3
2 3 2	$\kappa_{22} = -0,49 \pm 0,02$	238	-138	$-\kappa_{22} n_2^3 = +7,0$			
3 1 2	$\kappa_{23} = +2,0 \pm 0,1$	88	12	$\kappa_{13}^* = \kappa_{23} n_2^3$	+6,2	-0,22	+6,0 ± 0,3
3 1 3	$\kappa_{33} = +1,7 \pm 0,07$	85	15	$-\kappa_{33} n_3^3 = +5,7$			
3 2 1	$\kappa_{13} = +1,9 \pm 0,1$	87	13	$\kappa_{23}^* = \kappa_{33} n_3^3$	-5,3	+0,22	-5,1 ± 0,3
3 2 3	$\kappa_{33} = +1,5 \pm 0,07$	83	17	$-\kappa_{13} n_1^3 = -5,9$			
4 4 1	$\kappa_{14} = +0,7 \pm 0,14$						
1 4 4	$\kappa_{41} = -1,9 \pm 0,07$						
4 4 4	$\kappa_{44} = +0,23 \pm 0,10$						

напрями осей  $X_2$  та  $X_3$  задавалися на основі коефіцієнтів  $d_{22}$  і  $d_{33}$  поздовжнього п'єзоелектричного ефекту, чітко реєстрованого на зразках із НИ індикатором полярності або ж осцилографом.

Як приклад приведено таблицю I, в якій представлені основні результати вимірювань та розрахунків п'єзооптичних коефіцієнтів кристалів ніобату літію. Виміряні та розраховані на основі абсолютних ПОК п'єзооптичні коефіцієнти індукованого двозаломлення  $\kappa_{km}^*$  корелюють за знаками та співпадають із задовільною точністю за абсолютними величинами. Достовірність отриманих результатів підтверджується, крім того, рівністю як абсолютних ПОК, так і ПОК індукованого двозаломлення, виміряних в різних геометріях п'єзооптичного експерименту (див. табл. I).

Відмітимо, що аналогічні вимірювання та розрахунки, згідно таблиці I, проведені і для всіх інших досліджених кристалів.

На основі побудованих вказівних поверхонь та їх стереографічних проєкцій для поздовжньої  $\kappa_{11}^{(m)}$  (див., як приклад, рис.1) та двох поперечних  $\kappa_{1m}^{(1)}$ ,  $\kappa_{1m}^{(m)}$  компонент тензора  $\kappa_{1m}$  проведено аналіз анізотропії п'єзооптичного ефекту в кристалах ніобату літію. А саме. Як поздовжній, так і поперечний ПОВ володіє контрастно анізотропією, включаючи інверсію знака ефекту. П'єзооптичні ВП для НЛ не є фігурами обертання, що відповідає відомій теоремі Германа. На стереографічних проєкціях ВП чітко проявляється їх анізотропія та симетрія: наявність осі симетрії третього порядку і трьох площин симетрії, перпендикулярних до площини рисунка. Максимальні значення для  $\kappa_{1m}^{(1)}$  та  $\kappa_{1m}^{(m)}$  розраховані із умови  $\partial\kappa/\partial\theta=0$ ,  $\partial\kappa/\partial\varphi=0$  і становили 2,2 та 2,1Ер, що відповідає кутам  $\theta=0, \arctg(2\kappa_{41}/(\kappa_{12}-\kappa_{31}))\approx 42^\circ$ ,  $\varphi=30^\circ, 150^\circ, 270^\circ$  та  $\theta=0,5-\arctg(\kappa_{14}/(\kappa_{13}-\kappa_{12}))\approx 10^\circ$ ,  $\varphi=90^\circ, 210^\circ, 330^\circ$  відповідно. Це співпадає із відповідними значеннями, визначеними експериментально на основі стереографічних проєкцій. Для поздовжнього ПОВ максимальні значення ефекту, визначені за допомогою ЕОМ, становили 1,9Ер при таких значеннях аргументів:  $\theta\approx 40^\circ$ ,  $\varphi=90^\circ, 210^\circ, 330^\circ$ .

Відмітимо, що будувались (див.рис.1,2) лише верхні частини вказівних поверхонь, а їх повний вигляд можна представити, здійснивши уявне відображення побудованих поверхонь в центрі координат.

З метою можливого практичного використання кристалів ніобату літію були побудовані вказівні поверхні із врахуванням пружності та індукованої зміни різниці ходу, виходячи із рівнянь ВП для кристалів класу симетрії 3m. Проаналізовано отримані поверхні, оцінено їх анізотропію та симетрію, для кожної поверхні визначено з допомогою ЕОМ екстремальні значення та відповідні їм кутові координати напрямів тиску, поширення світла та його поляризації.

**Танталат літію (ТЛ).** Аналіз результатів п'єзооптичних досліджень кристалів ТЛ проведено в порівнянні із кристалами НЛ. Порівняно значення ПОК, отриманих нами статичним методом і розрахованих за співвідношенням  $\kappa_{1m} = P_{1m} S_{pm}$  на основі виміряних в літературі динамічним методом пружнооптичних коефіцієнтів  $P_{1m}$  танталату літію. Відсутність відповідності для  $\kappa_{33}$ ,  $\kappa_{14}$ ,  $\kappa_{41}$  і  $\kappa_{44}$  пояснено на основі ймовірної неточності у визначенні знаків коефіцієнтів  $S_{14}$  і  $P_{14}$ ,  $P_{41}$ , які визначаються з точністю до знака внаслідок неоднозначності вибору кристалофізичної системи координат, описаної в другій главі.

Аналогічно в порівнянні із НЛ проведено аналіз анізотропії ПОВ. Відмічено, що відмінність лише двох ПОК  $\kappa_{33}$  і  $\kappa_{41}$  при решті всіх

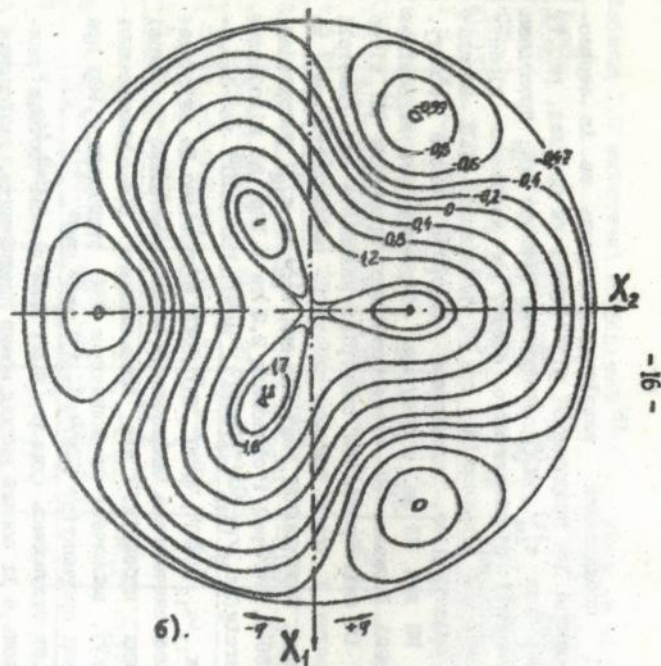
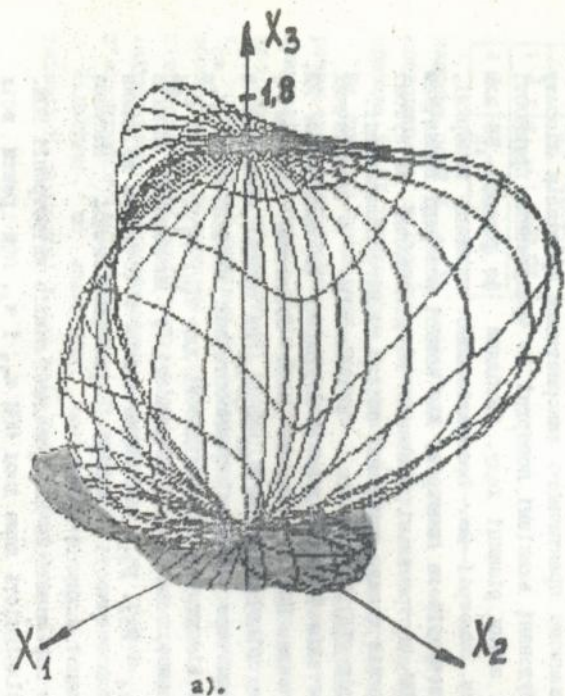


Рис.1. Загальний вигляд (а) вказівної поверхні поздовжнього ПСЕ  $\pi_{11}^{(m)}$  та її стереографічна проєкція (б) для кристалів ніобату літій ( $\lambda=0,6328\mu\text{м}$ ,  $T=20^\circ\text{C}$ , всі цифри - в од.Бр= $10^{-12}$  м<sup>2</sup>/Н).

співмірних коефіцієнтах приводить до суттєвих змін як за формою так і за величиною вказівних поверхонь. Розраховані максимальні значення для п'єзооптичних ВП поляризації світла та механічного напруження становили 0,71 та 0,74 Бр для кутових координат відповідно  $\theta=41^\circ$ ,  $\varphi=90^\circ$ ,  $210^\circ$ ,  $330^\circ$  та  $\theta \approx 26^\circ$  при тих же значеннях  $\varphi$ . Знайдено, що екстремальне значення для поздовжньої ВП становить 0,62 Бр і відповідає ізолінії, яка співпадає із коловим перерізом на стереографічній проекції. Таким чином, максимальна чутливість щодо ПОВ для кристалів ТЛ майже в 3 рази менша, ніж для кристалів НІ.

Проведено також комплексне вивчення ПОВ із аналізом його анізотропії для кристалів стронцій-барієвого ніобату (НЕС) або, як їх ще називають, бастрону (хімічна формула  $Ba_x Sr_{1-x} Nb_2 O_6$  для  $x=0,39$ , клас симетрії 4mm).

Проаналізовано отримані результати. Всі розраховані абсолютні ПОК відповідають один одному згідно структури матриці ПОК класу симетрії 4mm, а також добре корелюють із ПОК індукованого двоазаломлення, що являється хорошою експериментальною апробацією імерсійно-інтерферометричного методу, на основі якого визначались невідомі значення пружних коефіцієнтів  $S_{km}$  бастрону.

Проведено аналіз анізотропії поздовжнього і поперечного ПОВ в кристалах НЕС. Вказівна поверхня  $\kappa_{11}^{(m)}$  вказує на суттєву анізотропію поздовжнього ПОВ, на відміну якому поперечний ПОВ кристалів НЕС проявляє дуже слабкі анізотропні властивості. Відсутність осі обертання в побудованих ВП експериментально підтверджує строгість теореми Германа. А це означає, що лише кристали гексагональних класів симетрії будуть мати такі п'єзооптичні ВП, що є поверхнями обертання навколо осі шостого порядку. Відмічається, що всі ВП бастрону за своєю симетрією відповідають класу симетрії 4mm, тобто володіють віссю симетрії 4-го порядку, чотирма площинами симетрії, що проходять через цю вісь, та площиною симетрії, перпендикулярною осі симетрії. Максимальний п'єзооптичний ефект, рівний 4,7Бр, для ВП поздовжнього ПОВ реалізується при умові  $\theta=90^\circ$ ,  $\varphi=45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ .

Аналіз анізотропії ПОВ в кубічних кристалах. Для порівняння проведений аналіз анізотропії п'єзооптичних властивостей кристалів двох різних фотопружних груп кубічної симетрії: алюмокалієвих квасців класу симетрії m3 та кристалів фториду барію і хлориду натрію класу симетрії m3m.

Для цього було проведено вимірювання всіх членів матриці ПОК кристалів  $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$  та  $0,6\%Cr^{3+}$  імерсійно-інтерферометричним

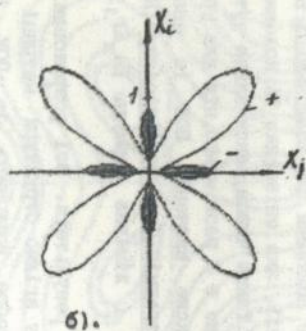
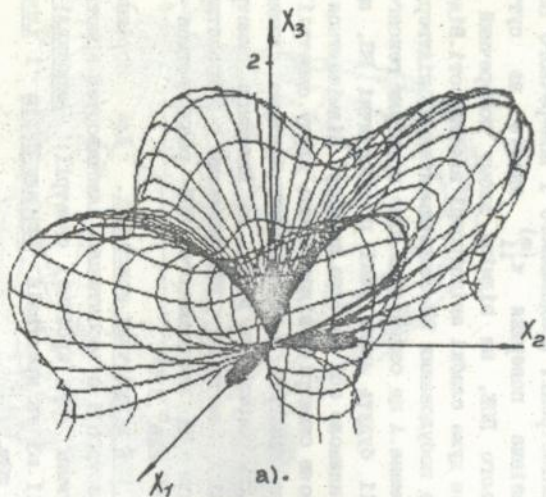


Рис.2. Загальний вигляд (а) вказівної поверхні поздовжнього ПОВ  $\kappa_{11}^{(m)}$  та 11 перерізи (б) головними площинами  $X_i X_j$  ( $1 \neq j=1, 2, 3$ ) для кристалів  $\text{BaF}_2$  ( $\lambda=0,633\text{мкм}$ ,  $T=20^\circ\text{C}$ , всі цифри-в од. Бр)

методом. Значення ПОК для кристалів фториду барію і хлориду натрію вяті із літературних джерел.

Для поперечного ПОЕ кристалів класу симетрії  $m\bar{3}2/m$  ВП поляризації світла і механічного напруження є однакові, лише повернуті на кут  $90^\circ$  навколо осі  $X_3$ , тобто  $\kappa_{im}^{(m)} = \kappa_{im}^{(i)}(\varphi + 90^\circ)$ , на протизагу яким відповідні ВП для кристалів класу симетрії  $m\bar{3}m$  є повністю тотожні. На основі побудованих ВП показано, що поздовжній і поперечний ПОЕ в оптично-ізотропних кристалах кубічної симетрії проявляють суттєву анізотропію (яскравим доказом є ВП поздовжнього ПОЕ кристалів  $BaF_2$ , приведена, як приклад, на рис.2). Відмічається цікава особливість: для всіх кристалів кубічної системи поздовжній ПОЕ приймає максимальне значення при однакових значеннях кутів обертання координат  $\theta = \arctg 2 \approx 54,7^\circ$  і  $\varphi = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ . Це аналітично розраховано та експериментально перевірено на трьох вивчених кубічних кристалах і має важливе практичне значення з точки зору знаходження максимальної чутливості при поздовжньому ПОЕ для всіх кубічних кристалів.

В п'ятій главі розглядається один із можливих напрямів практичного використання явища квазістатичної фотопружності, а саме, для вимірювання статичного тиску. Описуються розроблені пристрої на базі нових розрахованих матричним методом Джонса поляризаційно-оптичних схем, захищених авторськими свідоцтвами і спрямованих на розширення діапазону визначення тиску, підвищення його точності та спрощення і автоматизацію процесу вимірювань. Описані відповідні принципи роботи в автоматичному режимі одноканалних та двоканальних вимірювачів тиску із однопорядковою та багатопорядковою реєстрацією вихідного сигналу, двоканального однопорядкового перетворювача статичного тиску із температурною компенсацією та одночасним її вимірюванням.

На прикладі прозорі п'єзокераміки ПТСМ 9,5/65/35 було вивчено релаксаційні закономірності фотопружності, що проявляються в часовій зміні індукованої величини різниці ходу після прикладання фіксованого навантаження чи його зняття. Проаналізовано залежності величин релаксаційних різниць ходу та часів релаксацій при зміні тиску. Такі дослідження мають важливе значення при фотопружних застосуваннях оптичних матеріалів.

В додатках приведені необхідні таблиці матриць п'єзотичних та пружних коефіцієнтів і співвідношення для визначення ПОК кристалів триклінної симетрії, знайдені тензорним методом, приводяться спрощені робочі формули для безпосереднього визначення

всіх існуючих абсолютних ПОК кристалів будь-якого класу симетрії, а також даються рівняння вказівних поверхонь поздовжньої і поперечної компонент тензора ПОЕ та необхідних вказівних поверхонь поперечної компоненти тензора пружної податливості для кристалів середньої та вищої категорій.

#### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Тензорним методом проведено феноменологічний опис ПОЕ в кристалах триклінної симетрії. Показано переваги цього методу в порівнянні з громіздким методом перерізів характеристичних поверхонь. Виходячи із знакової дуальності співвідношень для розрахунку неголовних ПОК, значно спрощені робочі формули для вимірювання всіх членів матриці ПОК, включаючи найбільш анізотропні кристали триклінної симетрії.

2. Встановлено неоднозначність визначення неголовних ПОК за знаком, а в ряді випадків і за абсолютною величиною, яка характерна для ряду інших фізичних ефектів, що описуються тензорами 3-го і вище рангів. Ця неоднозначність може бути усунена при однозначному виборі додатніх напрямів осей кристалофізичної системи координат. Приводяться відповідні практичні рекомендації на основі п'єзоелектричного (для полярних) та п'єзооптичного (для центросиметричних кристалів) ефектів.

3. Проведено аналітичний опис анізотропії ПОЕ в кристалах та на основі експериментально заповнених матриць ПОК для ряду конкретних кристалів побудовано п'єзооптичні вказівні поверхні, вивчені їх особливості, а саме:

а) в сферичній системі координат отримані рівняння вказівних поверхонь для поздовжнього та поперечного ПОЕ кристалів усіх класів симетрії середньої та вищої категорій;

б) анізотропія ПОЕ в частині змін показників заломлення при дії нормальних механічних напружень повністю описується трьома якісно відмінними п'єзооптичними поверхнями: однією вказівною поверхнею для поздовжнього та двома поверхнями для поперечного ПОЕ. Це якісно відрізняє ПОЕ від ряду інших фізичних ефектів, які описуються, як правило, безмежним числом вказівних поверхонь;

в) виведені рівняння вказівних поверхонь ПОЕ із врахуванням пружності та на основі індукованої зміни різниці ходу, придатні для побудови вказаних поверхонь в сферичній системі координат. Для цього додатково отримані необхідні рівняння вказівних поверхонь поперечних компонент пружного ефекту для одновісних та кубічних кристалів всіх класів симетрії;

г) для кристалів ніобату літію, танталату літію, бастрону, алюмокалієвих квасців на основі експериментально заповнених їх матриць ПОК, а також для кубічних кристалів фтористого барію і хлористого натрію, побудовані з допомогою ЕОМ вказівні поверхні для поздовжнього та поперечного ПОЕ, їх головні перерізи та стереографічні проєкції, для яких:

- п'єзооптичний ефект навіть у випадку найбільш високосиметричних кристалів кубічної системи, проявляє значну анізотропію, включаючи зміну знака ефекту;

- жодна з побудованих поверхонь, в т.ч. для кубічних кристалів, не є фігурою обертання;

- аналітичним методом, якщо це вдавалось, із співвідношень  $\partial\kappa/\partial\varphi=0$  і  $\partial\kappa/\partial\theta=0$  та експериментально за допомогою ЕОМ на основі стереографічних проєкцій визначено екстремальні значення ПОЕ для всіх досліджених кристалів та відповідні їм геометрії експерименту;

- неочікуваним виявилось те, що для всіх без винятку кристалів кубічної системи максимальне значення поздовжнього ПОЕ відповідає однаковим кутовим координатам напрямів поляризації світла чи прикладання тиску, рівним  $\theta_m = \arctg 2^{1/2} \approx 54,7^\circ$ ,  $\varphi_m = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$  чи  $315^\circ$ ;

е) на прикладі кристалів ніобату літію проаналізовано анізотропію просторового розподілу індукованих змін оптичного шляху та різниці ходу, величини яких є важливими в практиці. Знайдені такі геометрії експерименту, при яких п'єзозіна вказаних величин є максимальна.

4. Запропоновано і експериментально апробовано такі методи ПОЕ:

- модифікований імерсійно-інтерферометричний метод, який дозволяє визначати як абсолютні ПОК, так і коефіцієнти пружної податливості, необхідні при розрахунках п'єзооптичних коефіцієнтів;

- метод вимірювань поворотних та поворотно-зсувних ПОК шляхом реєстрації п'єзозіни просторового положення оптичної осі;

- інтерферометричний метод визначення необхідних при розрахунках ПОК показників заломлення ізотропних та анізотропних матеріалів.

5. Описано ряд технічних рішень фотопружних однопорядкових та багатопорядкових перетворювачів статичного тиску, які дозволяють суттєво підвищити точність вимірювання тиску при збереженні діапазону його змін. Розглядається пристрій для одночасного вимірювання тиску і температури з компенсацією температурних похибок п'єзооптичного каналу.

6. На прикладі прозорої кераміки ЦТСМ аналізуються особливості релаксаційних процесів фотопружності, важливих в практичних застосуваннях фотопружних матеріалів.

РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ВИКЛАДЕНІ В НАСТУПНИХ ПУБЛІКАЦІЯХ:

1. Мищик Б.Г., Андрушак А.С. Особенности выбора системы координат при изучении пьезооптического эффекта. Пьезооптические поверхности // Препр.ИТФ АН УССР. Киев, 1990.ИТФ-90-32Р. 9с.
2. Mytsyuk B.G., Pryuziz Ya.V., Andrushchak A.S. The lithium niobate piezooptical features // Cryst. Res. Technol. 1991. V.26. N7. P.931-940.
3. Мищик Б.Г., Андрушак А.С., Пририз Я.В. П'єзооптичний ефект в кристалах танталату літію // УЗЖ. 1992. Т.37. №3. С.1240-1244.
4. Мищик Б.Г., Осика Б.В., Андрушак А.С., Петрушко Р.С. Новый метод определения вращательных пьезооптических коэффициентов на примере кристаллов  $TiC+L-\alpha$ -аланин // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1990. Т.54. №6. С.1150-1154.
5. Мищик Б.Г., Андрушак А.С. Вибір позитивних напрямів кристаллофізичних осей при повному вивченні п'єзооптичного ефекту // УЗЖ. 1993. Т.38. №7. С.49-55.
6. Андрушак А.С., Мищик Б.Г., Осика Б.В., Петрушко Р.С. Пьезоизменение угла между оптическими осями в кристаллах  $TiC+L-\alpha$ -аланин // Кристаллография. 1992. Т.37. №2. С.533-535.
7. Андрушак А.С., Мищик Б.Г., Лыбич О.В. П'єзооптичні вказівні поверхні кристалів ніобату літію // УЗЖ. 1992. Т.37. №3. С.1217-1224.
8. Андрушак А.С., Мищик Б.Г. Измерение показателей преломления изотропных и кристаллических материалов интерферометрическим методом // Измерительная техника. 1992. №7. С.33-34.
9. Мищик Б.Г., Андрушак А.С. Сечения указательных поверхностей пьезооптического эффекта // Кристаллография. 1992. Т.38. №1. С.242-245.
10. Мищик Б.Г., Демьянышин Н.В., Яковлева Л.М., Андрушак А.С. Пьезооптический эффект в кристаллах алюмокалиевых квасцов // Кристаллография. 1993. Т.38. №1. С.239-241.
11. Мищик Б.Г., Андрушак А.С. Неоднозначность выбора кристаллофизической системы координат при изучении пьезооптического эффекта на примере кристаллов  $LiNbO_3$  // Кристаллография. 1990. Т.35. №6. С.1574-1575.
12. Андрушак А.С., Мищик Б.Г., Ромашко В.А., Сеглінь Я.А. П'єзооптичний ефект в кристалах  $Ba_xSr_{1-x}Nb_2O_6$  // УЗЖ. 1991. Т.36. №4. С.618-622.
13. Андрушак А.С., Коваленко Л.Ф., Мищик Б.Г., Осика Б.В. П'єзооптичні вказівні поверхні кристалів  $Ba_xSr_{1-x}Nb_2O_6$  // Фізична електроніка. Львів, 1991. №42. С.105-111.
14. Андрушак А.С., Коваленко Л.Ф., Мищик Б.Г., Осика Б.В., Ромашко В.А., Сеглінь Я.П. П'єзооптичні властивості кристалів бастрону // Республ. конференція: Параметрична кристалооптика та її застосування. Тези допов. Львів, 1990. С.31.

15. А.с. I545121 СССР. Дифференциальный измеритель давления // Осыка Б.В., Мызык Б.Г., Андрушак А.С., Землинский Р.Л. Оpubл. БИ №7. 1990.
16. Андрушак А.С., Мызык Б.Г., Осыка Б.В. Фотоупругий преобразователь давления // Положит. рещ. ВНИИПТЭ №4852979/10 от 28.06.1991.
17. А.с. I654700 СССР. Устройство для измерения давления // Андрушак А.С., Мызык Б.Г., Осыка Б.В. Оpubл. БИ №21. 1991.
18. Андрушак А.С., Мызык Б.Г., Осыка Б.В. Оптический преобразователь давления и температуры // Положит. рещ. ВНИИПТЭ №4724898/10 от 4.01.1992.
19. А.с. I716344 СССР. Устройство для измерения давления // Мызык Б.Г., Осыка Б.В., Андрушак А.С. Оpubл. БИ №3. 1992.
20. Андрушак А.С., Мызык Б.Г., Осыка Б.В. Поляризационно-оптический измеритель давления // ПТЭ. 1990. №3. С.241.
21. Мызык Б.Г., Осыка Б.В., Андрушак А.С. Оптический измеритель давления // ПТЭ. 1991. №2. С.240-241.
22. Андрушак А.С., Мызык Б.Г., Осыка Б.В., Петрушко Р.С. // Республ. конференция: Оптические датчики физических величин. Тезисы докл. Бельцы/Молдова/. 1990. С.10.
23. Андрушак А.С., Мызык Б.Г., Осыка Б.В., Прыриз Я.В. Пьезооптический эффект в кристаллах ниобата лития // 12-я Всесоюзная конференция по физике сегнетоэлектриков. Тезисы докл. Ростов н/Д, 1989. Т.2. С.78.
24. Андрушак А.С., Мызык Б.Г., Осыка Б.В. Оптоэлектронный многопорядковый преобразователь давления // Международное совещание: Оптоэлектроника-89. Тезисы докл. Баку. 1989. С.207.
25. Mytsyk B.G., Andrushchak A.S., Romashko V.A. The crystal phase transition photoelasticity and its practical use in pressure pickups, level ganges and flowmeters // Ukrainian-french symposium "Condensed matter: science and industry". Abstracts. Lviv, 1993.
26. Мызык Б.Г., Андрушак А.С., Дем'янишин Н.В., Ромашко В.А. Багатопорядкові дистанційні вимірювачі температури // 7-а Міжнародна наук.-техн. конф. "Електричні методи та засоби вимірювання температури". Тези допов. Львів, 1992. С.77.
27. Mytsyk B.G., Andrushchak A.S., Osyka B.V., Ozolinsh M., Paulins P. Relaxation of piezooptic effect in PZLT-ceramics // Intern. scient. confer. Electronic ceramics - Production and Properties: Abstr. Riga, 1990.

АВ 28.382

Підписано до друку 22.10.93. Формат 60×84/16. Друк. офсет. Папір д/мас.  
вироб. Умов. др. арк. 1,17. Умов. фарб.-відб. 1,4. Обл. вид. арк. 1,0. Тираж  
100 прим. Зам. 3205.

---

Обласна книжкова друкарня, 290000, Львів, вул. Стефаника, 11.