

УДК 535.32+535.51+535.542+535.56
PACS 78.20. Нр, 77.80. Вн, 77.84.Fa, 78.20 Ci

РЕФРАКЦІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФЕРОЇКІВ У ЛЬВІВСЬКОМУ УНІВЕРСИТЕТІ

М. Романюк

*Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Кирила і Мефодія, 8, 79005 Львів, Україна*

Наведено перелік головних результатів досліджень електронної поляризованості фероїків та їхніх застосувань на фізичних кафедрах ЛНУ імені Івана Франка, здобутих у дослідженнях фазових переходів за оптичними методами. Використано інтерференційні методики вимірювання спектральних (2200–8000 Å), температурних (80–1000 K) і польових змін показників заломлення та двопронезаломлення, спектри поглинання в фундаментальній області частот, а також вимірювання циркулярного двопронезаломлення за наявності лінійного. Відкрито явище електрогірації в кристалах, виявлено та досліджено інверсію знаку двопронезаломлення двоіскристалів, термохромний ефект, встановлено закономірності руху доменів у полярних фазах і солітонів у несумірних, упорядкування та критичну поведінку структури підчас фазових переходів. Одержано багатий фактичний матеріал для десятків кристалів (групи сегнетової солі, тригліцинсульфату, KDP, A_2BX_4 та ін.), який використано (або обґрунтовано його застосування) для керування світловими пучками, в термометрії, дозиметрії та в метрології.

Ключові слова: електронна поляризованість, показники заломлення, двопронезаломлення, параметричні оптичні ефекти, спектри поглинання, фазові переходи, несумірні фази, оптичні методики досліджень, застосування електронної поляризованості.

Загальна інформація про рефракцію речовини. Відомо, що показники заломлення речовини визначаються її електронною поляризованістю і мають вагоме пізнавальне та практичне значення. Досить згадати, що зовнішні електрони атомів визначають хімічні зв'язки між ними, а розрахунки показників заломлення давно використовують у проектуванні класичних оптичних систем та оцінці їхніх аберацій, у метрології, а останнім часом — у лініях волоконно-оптичного зв'язку, засобах керування оптичними пучками, запам'ятовування, збереження, відтворення та індикації інформації, синхронізації фаз світлових та акустичних пучків у схемах нелінійної оптики та акустооптики.

Світлова хвиля з напруженістю E електричного поля індукує або змінює дипольний момент p осцилятора, що веде до поляризації освітленої ділянки речовини, індукція D якої у найпростішому випадку описується таким виразом

$D = \varepsilon E = E + 4\pi p$ [1], з якого знаходиться її діелектрична стала ε та показник заломлення n :

$$\varepsilon = n^2 = 1 + \frac{4\pi p}{E}. \quad (1)$$

Частотна залежність показника заломлення в районі одного резонансу осцилятора на частоті ω_0 при нехтуванні загасанням його коливань описується такою формулою:

$$n^2(\omega) = 1 + \frac{4\pi N e^2 f}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}, \quad (2)$$

де N — кількість осциляторів в одиниці об'єму, e та m — заряд і маса електрона, f — сила осцилятора. Подібну залежність отримуємо й на основі квантової механіки [2].

За наявності кількох осциляторів розглядається сума виразів типу (2). У випадку конденсованого стану речовини окремі вузькі лінії розширюються у смуги і вираз (2) формально перетворюється у набір величезної кількості доданків з різними частотами ω_{0i} і силами осциляторів f_i . Врахування взаємодії (впливу) сусідніх осциляторів, у випадку ізотропних середовищ призводить до появи додаткового поля, рівного $4/3 \cdot \pi p$, так що дипольний момент насправді індукується результуючим полем $E' = E + 4/3 \cdot \pi p$, що приводить до наступного співвідношення

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \frac{1}{N} = \frac{4\pi e^2 f}{(\omega_0^2 - \omega^2)} = r, \quad (3)$$

відомого як формула Лорентц-Лоренца, яка визначає питому рефракцію речовини r . Рефракція хімічної сполуки або суміші речовин описується наближено такою формулою:

$$MR = \sum m_i g_i r_i, \quad (4)$$

де M та R стосуються сполуки або суміші, m_i, g_i, r_i — маса, рефракція та процентний склад i -ї компоненти суміші або індекс відповідного елемента у хімічній формулі розглядаєної молекули.

Питомі, атомні та молекулярні рефракції спочатку були встановлені на основі вимірювань показників заломлення та густин відповідних простих та складних речовин. Згодом було враховано тип хімічного зв'язку (ковалентний чи іонний), рефракції стійких груп атомів (наприклад, SO_4^{2-}), далі — симетрію таких груп (наприклад, тетраedr кубічний, ромбічний, триклинний), анізотропію поляризованості зв'язків (наприклад, C=O, C-O, O-H). Таку інформацію можна знайти у літературі [3] і на її основі оцінювати рефракції нових речовин. Зрозуміло, що наведений ряд різних рефракцій вводився для наближення результатів розрахунків та експерименту. Отже, по суті враховується характер і ступінь взаємодій частинок та вплив оточення.

Електронну поляризованість частинки α визначають на основі (3) та рівності $P = Np = N\alpha E$ так:

$$\alpha = \frac{3}{4} \frac{M}{\rho A} \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}, \quad (5)$$

де M та ρ — молекулярна вага і густина речовини, A — число Авогадро.

Відомі досконалі методики безпосереднього вимірювання показників заломлення з похибкою порядку $10^{-3} - 10^{-4}$ процента [4].

Інший шлях отримання оптичних функцій ґрунтується на посередньому експерименті. Для цього отримують спектр відбивання зразка і за формулами Крамерса–Кроніґа розраховують оптичні константи речовини, в тому числі й показники заломлення [5]. Надійність результатів тут залежить від якості отриманих спектрів відбивання (на яку серед інших факторів впливає якість полірування поверхні та її взаємодія з оточуючою атмосферою) та від вдалої їхньої екстраполяції у ділянки спектру, які не були охоплені на експерименті. Нагадаємо, що при цих розрахунках інтегрування проводиться в широкій області частот $0 < \omega \leq \infty$, а експеримент охоплює переважно тільки частоти, що відповідають найменшим довжинам хвиль до $\lambda \geq 200 \text{ \AA}$.

Останнім часом оптичні характеристики матеріалів розраховують, а узгодження з експериментом досягають підбором відповідних коефіцієнтів. Наявні пакети програм дають змогу проводити відповідні розрахунки з перших принципів. Для цього потрібно вказати хімічний склад кристала та координати відповідних атомів в елементарній комірці.

Зміни показників заломлення δn та їхніх різниць $\delta(n_1 - n_2)$, відомих як двопронезаломлення, у лінійному наближенні описують наступними феноменологічними співвідношеннями через відповідні зміни поляризаційних констант $a_{ij} = 1/n_{ij}^2$, які описують оптичну індикатрису зразка $a_{ij}x_ix_j = 1$:

$$\Delta a_{ij} = \pi_{ijkl}\sigma_{kl} = r_{ijk}E_k, \quad (6)$$

Тут π_{ijkl} та r_{ijk} — елементи матриць п'єзооптичних та електрооптичних ефектів, σ_{kl} та E_k — механічні напруги та електричні поля.

Такий шлях пройшли дослідження електронної поляризованості за століття.

Роботи у Львівському університеті. Експериментальні дослідження показників заломлення у Львівському університеті проводили переважно методом Обреїмова [4, 6], двопронезаломлення — інтерференційними методами [4], тонкі ефекти, викликані просторовою дисперсією світла, температурною еволюцією неспівмірних фаз та флуктуаційними ефектами поляризації в районі фазових переходів — модифікованими методами Сенармона [4, 7] та високоточної та відео поляриметрії [8, 9].

Методики дослідження гіраційних ефектів в анізотропних напрямках кристалів описано в [4, 10–14].

Непрямий метод визначення оптичних констант ґрунтувався на вимірюванні спектрів відбивання світла у вакуумному ультрафіолеті та розрахунках за методикою Крамерса–Кроніґа [17, 19].

Останнім часом проводяться розрахунки таких констант із перших принципів, користуючись відомими пакетами програм [20–23].

Характеристика використаних методик експерименту. Показники заломлення розраховують на базі результатів трьох методик вимірювань: за кутом мінімального відхилення променів призмою, за граничним кутом повного внутрішнього відбивання та за різницею ходу, яка виникла між частинами пучка,

одна з яких перейшла через досліджуваний зразок відомої товщини, а друга — через повітря або інший зразок, товщина і показник заломлення якого відомі.

Перший з названих методів широко відомий, він дозволяє отримати прецизійні результати (похибка 0,001 % і менше), однак вимагає призми великих розмірів (ребро кілька сантиметрів), прецизійної обробки поверхонь (відхилення від площини не більші за $\lambda/20$) та й гарантії відповідної однорідності, що не завжди легко забезпечити. На таких призмах, зрозуміло, важко або й неможливо проводити вимірювання у широкій області температур. Для реалізації цього методу промисловість випускає прецизійні і поширені гоніометри (наприклад, ГС-5). Метод придатний переважно для видимої області спектру.

Метод повного внутрішнього відбивання добре забезпечений апаратурою (рефрактометри ИРФ-23 та ін.), придатний для видимої області спектру та близьких до кімнатної температур. Він використовувався переважно для отримання реперних значень показників заломлення в імерсійному методі Обреїмова [4].

Серед інтерференційних методів виділяється фотографічний метод Обреїмова [4, 6], у якому по суті немає інтерферометра як приладу. Тут інтерферують пучки, які пройшли через досліджуваний зразок і сусідній з ним шар повітря. Позитивні сторони методу: малі розміри зразка (порядку $5 \times 5 \times 0,2$ мм), можливість використання криостатів та високотемпературних печей, можливість працювати у невидимих областях спектру, малі градієнти температур у зразку.

У цьому методі отримують інтерференційну картину у формі похилених еліптичних фігур, порядок k і спектральне положення екстремумів яких задається наступним виразом:

$$d[n(\lambda)_k - 1] = k(\lambda)\lambda, \quad (7)$$

на основі якого при відомій товщині зразка d та порядку інтерференції k знаходимо спектральну залежність показника заломлення. З метою встановлення числового значення k потрібно знати показник заломлення для відповідної довжини хвилі, що встановлюється за допомогою рефрактометра або імерсійним методом Обреїмова [4]. Це не зовсім проста задача, але над її розв'язанням тут не варто зупинятись. Знаючи k для певного екстремума, всі інші екстремуми нумеруємо як набір послідовних чисел, які зростають при переході від k в ультрафіолетову область спектра та зменшуються при переході в область довгих хвиль. За відомими значеннями d та $k(\lambda)$ і виміряними довжинами хвиль екстремумів розраховується спектральна залежність показника заломлення $n(\lambda)$. У разі потреби змінюємо температуру зразка, стежимо при цьому, наскільки і в який бік змістився певний екстремум, фотографуємо спектр, нумеруємо екстремуми і по ньому розраховуємо $n(\lambda)$ для нової температури. Похибка вимірювань становить $\pm 2 \cdot 10^{-4}$. Перші такі вимірювання і їх можливі застосування описані в роботі [24].

Аналогічно досліджують двопронезаломлення $\delta n = n_1 - n_2$:

$$d(n_1 - n_2) = k\lambda. \quad (8)$$

У цьому випадку зразки можуть бути товстішими, а інтерференційні смуги мають форму не похилих еліпсів, а прямих вертикальних смужок (якщо зразок

не строго плоскопаралельний, то ці смужки відповідно викривляються). Одні з перших таких вимірювань описані у [25].

Невеличкі зміни двопронезаломлення $\Delta n \geq 10^{-6} - 10^{-7}$, викликані ефектами просторової дисперсії світла, слабкими параметричними або флуктуаційними ефектами та критичними явищами в районі фазового переходу, досліджують методами Сенармона [4], високоточної поляриметрії [8] та відео поляриметрії [10,13]. У методі Сенармона вимірюється кута повертання аналізатора α від положення схрещення з поляризатором без зразків між ними до затемнення поля зору при наявності зразка в діагональному положенні та чверть хвильової пластинки в положенні погасання. Шукана різниця фаз δ дорівнює 2α . Оскільки кут можна виміряти у межах порядку одної секунди, то це відповідає різниці ходу порядку одного ангстрема. Недолік методу полягає у складності спектральних вимірювань через потребу відповідного набору чверть хвильових пластинок.

Згадані методики на сьогодні автоматизовані, вони враховують можливі недосконалості оптичних елементів схем, поглинання та багатократне відбивання світла зразками, що усуває відповідні систематичні помилки вимірювань, спрощує процес вимірювань та аналіз його результатів, дає змогу отримати просторовий розподіл фазових затримок у зразку.

Суттєво удосконалено методику вимірювання компонент тензора гірації за наявності лінійного двопронезаломлення [10–16].

Основні напрями досліджень. Дослідження електронної поляризованості у ЛНУ імені Івана Франка можна поділити на такі основні групи:

1. Температурні, спектральні і баричні залежності показників заломлення та двопронезаломлення в області прозорості номінально чистих, домішкових та опромінених кристалів [24,26–29].

2. Температурні, спектральні та польові (параметричні) зміни двопронезаломлення номінально чистих, домішкових та опромінених кристалів (частина з яких виміряна на одній довжині хвилі) [12,25–29].

3. Температурні та спектральні дослідження поглинання в області вакуумного і кварцового ультрафіолету, розрахунки оптичних характеристик матеріалу методом Крамерса–Кроніга та характеристик його краю поглинання [17–19,30,31], активізація досліджень в інфрачервоній області спектру [34].

4. Розрахунки енергетичної структури електронів, встановлення генетичного походження смуг поглинання та симуляція баричних змін оптичних параметрів матеріалу [20–23].

5. Розробка та удосконалення методик вимірювань: підвищення їх чутливості, врахування можливої недосконалості використовуваних оптичних деталей, вимірювання циркулярного двопронезаломлення на фоні лінійного, автоматизація експерименту [4,7–15].

6. Використання методик оптичної рефрактометрії для дослідження двійникової будови і динаміки доменів упорядкованих фаз [32,33], еволюції солітонів неспівмірних фаз [9,34–37] та процесів упорядкування і критичної поведінки структури в районі фазових переходів [9,38,39].

7. Дослідження процесів, пов'язаних з неоднорідністю зразків: дифракція світла на доменах, свічення зразків при поляризації [40], поглинання світла у

наслідок опромінення і температурної деструкції зразків [41], фоторефракція [42] та просторовий розподіл різниці ходу.

8. Обґрунтування рекомендацій отриманих результатів до практичного застосування.

Основні результати досліджень.

1. Експериментальні дослідження температурної ($\sim 76\text{--}1000\text{ K}$) та спектральної ($2200\text{--}8000\text{ \AA}$) (в окремих випадках — до $\sim 6\text{ K}$ та 500 \AA , відповідно) залежності показників заломлення та двоприменезаломлення десятків фероїків груп тригліцинсульфату (ТГС), сегнетової солі (СС), кристалів сімейства KDP, A_2BX_4 та інших дали можливість розрахувати рефракцію, параметри ефективних осциляторів та електронну поляризованість цих матеріалів та їхніх змін при фазових переходах, а також залежність електронної поляризованості від одновісного тиску, хімічного та ізотопного складу кристалів. Зміни електронної поляризованості при фазових переходах трактуються як параметричні ефекти.

2. За польовими змінами двоприменезаломлення встановлено важливі для практики коефіцієнти відповідних параметричних ефектів десятків кристалів. На цій основі на кафедрі експериментальної фізики відкрито “явище електрогірації у кристалах” [12], викладачі кафедри теоретичної фізики описали це явище та інші параметричні ефекти на основі перших принципів [4, 43, 44] та отримали співвідношення, на основі яких удосконалено експериментальну методику досліджень ефектів просторової дисперсії світла.

3. Виявлено і досліджено інверсію знаку двоприменезаломлення двовісних кристалів, встановлено температурно-спектральні діаграми точок інверсії знака двоприменезаломлення, дано феноменологічний опис явища.

4. Принципово удосконалена методика розділення ефектів лінійного і циркулярного двоприменезаломлення дала можливість дослідження ефектів просторової дисперсії світла у довільних напрямках анізотропних кристалів [10–15]. Удосконалюється методика вимірювання слабких змін двоприменезаломлення [7–9], що дає можливість вивчати тонкі параметричні ефекти.

5. У пошуках матеріалів з високими відгуками на зовнішні впливи в поле зору дослідників попали рідкі кристали та кристали групи A_2BX_4 з складними органічними катіонами та різними тетраедричними аніонами груп BX_4 . Ці кристали мають складну сітку фазових переходів, серед яких є і неспівмірні фази.

6. Оптичними методами досліджено неспівмірні фази кристалів цієї групи, визначено такі фази у рідких кристалах. Отримано багату інформацію про нові явища у діелектриках за наявності неспівмірних фаз та взаємодії солітонів з дефектами структури — глобальний гістерезис діелектричної проникності, температурні цикли, діелектрична пам'ять, гістерезис температур фазових переходів неспівмірна–співмірна фази та ін. [9, 34–37].

7. Більшість досліджень виконано на прозорих кристалах, хоч давно з'явилися праці, в яких досліджено забарвлені фероїки [45]. У групі кристалів типу A_2BX_4 є чимало забарвлених зразків, що дало можливість порівняно просто застосувати апарат оптичної спектроскопії для дослідження локальної симетрії відповідного іона та її змін при фазовому переході [46]. Розпочалися дослідження молекулярних спектрів цих матеріалів [34].

8. Поряд із температурними та спектральними змінами дійсної частини комплексного показника заломлення та двопронезаломлення номінально чистих, домішкових та опромінених кристалів досліджували їх уявну частину: спектри фундаментального відбивання (у вакуумному ультрафіолеті) [17–19], край власного поглинання та його зміни під дією жорсткої радіації [47]. Виявлено та пояснено природу радіаційних смуг поглинання на довгохвильовому краї фундаментальної смуги кристалів ТГС та СС, їх чітку поляризаційну залежність, аномалії поглинання в районі фазових переходів номінально чистих кристалів цієї групи [26, 30, 31, 34] та температурно-хроматичний ефект [34].

Основні застосування результатів досліджень.

1. Отримані фундаментальні характеристики багатьох фероїнів в електронній області частот, частково описані у [26–28], інформували про зміни електронної підсистеми у фазових переходах, поясненні параметричних ефектів, зокрема, відкритті “явища електрогірації у кристалах” [12], виявленні та поясненні аномалій п’єзооптичних коефіцієнтів при фазових [26, 48], виявленні та дослідженні температурно-спектральних діаграм інверсії знака двопронезаломлення [4, 26, 27], радіаційних змін показників заломлення та інверсії знака їх відповідних приростів [49].

2. На основі отриманих результатів стало можливим вимірювати спонтанну антиполяризацію, польові зміщення точок фазових переходів, визначати безконтактним методом рід і температуру фазових переходів.

3. Отримані числові значення показників заломлення та двопронезаломлення багатьох фероїків, їх температурної і спектральної залежності використані або можуть бути використані при розрахунках модуляторів світла, блоків синхронізації світлових та звукових хвиль в акустооптиці, синхронізації гармонік світлових хвиль у нелінійній оптиці та інших оптичних елементів на анізотропних кристалах.

4. Характеристики оптичної індикатриси фероїків були використані для дослідження геометрії та динаміки доменів під впливом зовнішніх полів [32, 33], доведення зв’язку великих значень окремих їх п’єзоелектричних та електрооптичних коефіцієнтів з рухом доменів [32].

5. Обґрунтування можливості створення шкали температур на базі інверсії знака двопронезаломлення кристалів [4, 49].

6. Обґрунтування методики вимірювання температури на базі оптичного сенсора з внутрішнім репером температури [50] та за зміною забарвлення сенсора [34].

7. Обґрунтування методики вимірювання тиску на базі інверсії знака двопронезаломлення кристалів [51].

8. Обґрунтування методик вимірювання малих [34] та великих [52] доз жорсткої радіації.

9. Створення оптичних фільтрів [9].

10. Дослідження характеристик неспівмірних фаз та їх температурної еволюції (глобальний гістерезис, оптична пам’ять, температурні цикли та ін.) [9, 34–37] та їх залежності від досконалості кристала.

11. Дослідження динаміки солітонів, флюктуаційних ефектів та критичної поведінки оптичних параметрів в околі фазових переходів [9, 38, 39].

12. Рекомендації технологам для отримання кристалів з певними характеристиками оптичної індикатриси, передусім — матеріалів з інверсією знака двопронезаломлення.

13. На базі описаних робіт на початку 90-х років було створено Інститут фізичної оптики МОН України, однак це не вплинуло на тематику, а згодом і на об'єм рефрактометричних досліджень у Львівському університеті.

14. Видання літератури, професійний ріст кадрів.

За результатами цих досліджень було видано низку навчальних посібників [4, 53–55] та монографій [12, 27, 28, 34, 35, 37], захищено 11 докторських та кілька десятків кандидатських дисертацій, отримано десятки авторських свідоцтв на винаходи.

Огляд написано з ініціативи одного з професорів фізичного факультету, як деякий підсумок тривалої роботи великого колективу фізиків Львівського університету до його Ювілею.

Зрозуміло, виклад ескізний, стисліший, ніж матеріал цього заслуговує, можливо, деякі результати випадково тут не згадані, як і багато прізвищ активних дослідників, однак чимало деталей і прізвищ наведено у цитованих тут монографіях, що до певної міри виправляє ситуацію. Автор вибачається за такий огріх і сподівається, що він буде виправлений іншими у майбутніх повніших оглядах, цитуваннях чи й монографіях.

-
1. *Борн М.* Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф – М. : Наука, 1979 – 855 с.
 2. *Вакарчук І. О.* Квантова механіка / І. О. Вакарчук. – ЛНУ ім. Івана Франка, 2007. – 847 с.
 3. *Бацанов С. С.* Структурная рефрактометрия / С. С. Бацанов. – М. : Изд. Московского ун-та, 1959. – 244 с.
 4. *Романюк М. О.* Кристалооптика / М. О. Романюк. – Київ : ІЗМН, 1997. – 432 с.
 5. *Довгий Я. О.* Електронна будова і оптика нелінійних кристалів / Я. О. Довгий, І. В. Кітик. – Львів : Світ, 1996. – 172 с.
 6. *Обреимов И. В.* О приложении френелевой дифракции для физических и технических измерений / И. В. Обреимов. – М. : Изд-во АН СРСР, 1945. – 81 с.
 7. *Половинко І.* Автоматизація температурних досліджень приросту оптичного двозаломлення методом Сенармона / І. Половинко, О. Рузак, С. Свелєба, І. Катеренчук, О. Сематюк, О. Фіцич // Вісник Львів. ун-ту. Сер. фіз. – 2002. – Вип. 35. – С. 48–53.
 8. *Shopa J.* High accuracy polarimetry and its application / J. Shopa // Ukr. J. Phys. Opt. – 2001. – Vol. 2, № 2. – P. 58–75.

9. *Кушнір О. С.* Кристалооптичні властивості просторово модульованих і дихроїчних кристалів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра фіз.-мат. наук / О. С. Кушнір. – Львів, 2005.
10. *Шопа Я. І.* Вимірювання оптичної активності на відеополяриметри / Я. І. Шопа, М. І. Боднар // Журн. фіз. досл. – 2004. – Т. 8, № 2. – С. 122–126.
11. *Константинова А. Ф.* Оптическая активность кристаллов в направлениях, отличных от направления оптической оси. I. Одноосные кристаллы / А. Ф. Константинова, Н. Р. Иванов, Б. Н. Гречушников // Кристаллография – 1969. – Т. 14. – С. 283–292.
12. *Влох О. Г.* Явления пространственной дисперсии в параметрической кристаллооптике / О. Г. Влох. – Львів : Вища школа. – 1984. – 152 с.
13. *Шопа Я. І.* Високоточна поляриметрия в параметричній кристалооптиці : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра фіз.-мат. наук / Я. І. Шопа. – Львів, 2004.
14. *Влох О. Г.* О дисперсионных и температурных зависимостях электрогирации в кристаллах типа германата и молибдата свинца / О. Г. Влох, И. В. Стасюк, Ю. С. Коробий, С. С. Коцур, Л. А. Лазько, Я. И. Шопа // Изв. АН СРСР. Сер. физ. – 1983. – Т. 47, № 4. – С. 665–668.
15. *Влох О. Г.* Интерференция света в одноосных гиротропных кристаллах та її застосування для визначення компонент тензора гірації / О. Г. Влох, В. Б. Кобилянський, Л. А. Лазько // Укр. фіз. журн. – 1974. – Т. 19, № 10. – С. 1631–1638.
16. *Влох О. Г.* Об эллиптической поляризации монохроматических волн в одноосных гиротропных кристаллах / О. Г. Влох, И. М. Климов, В. Б. Кобилянський // Укр. фіз. журн. – 1973. – Т. 18, № 12. – С. 2060–2063.
17. *Романюк Н. А.* Оптика фазовых переходов в кристаллах сегнетовой соли и триглицинсульфата : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра фіз.-мат. наук / Н. А. Романюк – Ростов-на-Дону, 1983. – 45 с.
18. *Андрієвський Б. В.* Оптико-електронні спектри кристалів з фазовими переходами в областях прозорості та фундаментального поглинання : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра фіз.-мат. наук / Б. В. Андрієвський. – Львів, 1996.
19. *Курляк В. Й.* Параметры фотон-электронного взаимодействия и применение кристаллов сульфата калия : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. фіз.-мат. наук / В. Й. Курляк. – Львов, 1990.
20. *Andriyevsky B.* Band structure and optical spectra of ferroelectric triglycine sulphate / B. Andriyevsky, W. Ciepluch-Trojanek, A. Patryn, M. Romanyuk // Phase Transitions. – 2007. – Vol. 80. – P. 31–37.
21. *Bovgyra O. V.* The band energy structure of RbKSO₄ crystals / O. V. Bovgyra, V. Yo. Stadnyk, A. V. Franiv et. al. // Condensed Matter Physics. – 2007. – Vol. 10, № 1 (49). – P. 39–43.
22. *Andryevsky B.* Simulation of elasto optical properties of KSO₄ crystals / B. Andryevsky, M. Romanyuk, V. Stadnyk // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2009. – Vol. 70. – P. 1109–1112.

23. *Andriyevsky V.* Band structure and optical function of K_2ZnCl_4 crystals in ferroelectric phase / В. Andriyevsky, V. Stadnyk, Z. Kohut, M. Romanyuk, M. Jaskolski // *Materials Chemistry and Physics*. – 2010. – Vol. 124. – P. 845–850.
24. *Вишневский В. Н.* Монохроматор с призмой из дигидрофосфата аммония / В. Н. Вишневский, Н. А. Романюк // *Оптика и спектроскопия*. – 1960. – Т. 8. – Вып. 5. – С. 736–738.
25. *Влох О. Г.* Спонтанный электрооптический эффект в кристаллах кварцу / О. Г. Влох, Л. Ф. Луців-Шумский // *Укр. фіз. журн.* – 1966. – Т. 11, № 9. – С. 1003–1010.
26. *Романюк М. О.* Спектральна рефрактометрія кристалів сегнетової солі, тригліцинусульфату та групи A_2BX_4 / М. О. Романюк // *Журн. фіз. досліджень*. – 2006. – Т. 10, № 4. – С. 358–380.
27. *Габа В.* Спектрально-температурні деформації оптичних індикативів в іонних кристалах та аспекти їх практичного застосування / Габа В. – Львів : Ліга-Прес, 2006. – 227 с.
28. *Стадник В.* Рефрактометрія діелектричних кристалів з неспівмірними фазами / В. Стадник, В. Габа. – Львів : Ліга-Прес, 2010. – 249 с.
29. *Романюк Н. А.* Дисперсия и температурная зависимость показателей преломления чистых кристаллов триглицинсульфата / Н. А. Романюк, А. М. Костецкий, И. Ф. Виблый // *Укр. физ. журн.* – 1976. – Т. 21, № 2. – С. 207–209. [1]. В. М. Габа, З. М. Урсул, Н. А. Романюк // *Кристаллография*. – 1989. – Т. 34. – Р. 1038. [2]. Н. А. Романюк, В. Й. Стадник, Р. С. Брезвин, В. И. Кардаш // *Кристаллография*. – 1996. – Т. 41. – Р. 882. [3].
30. *Романюк Н. А.* О форме края собственного поглощения кристаллов сегнетовой соли / Н. А. Романюк, И. Ф. Виблый // *Оптика и спектроскопия*. – 1976. – Т. 41, № 6. – С. 1011–1014.
31. *Романюк Н. А.* Температурные изменения края поглощения кристаллов группы триглицинсульфата / Н. А. Романюк, И. И. Половинко, И. Ф. Виблый // *Оптика и спектроскопия*. – 1977. – Т. 43, № 4. – С. 793–795.
32. *Желудев И. С.* Изучение процессов пьезоэлектрической поляризации кристаллов сегнетовой соли по наблюдениям доменной структуры / И. С. Желудев, Н. А. Романюк // *Кристаллография*. – 1960. – Т. 5, № 3. – С. 403–408.
33. *Romanyuk M. O.* The final stages of polarization and monodomain state stability of the Rochelle salt crystals / M. O. Romanyuk, M. M. Romanyuk // *Condensed Matter Physics*. – 2002. – Vol. 5, № 4. – P. 32.
34. *Капустяник В. Б.* Фізика кристалічних фероіків з органічними катіоном / В. Б. Капустяник – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2006. – 438 с.
35. *Polowinko I.* Optyczne właściwości faz niewspolmiernych kryształów typu A_2MX_4 / I. Polowinko, S. Kaluza // *Kielce : Politechnika Świętokrzyska*, 1998. – 320 p.
36. *Свелеба С. А.* Просторово модульовані стани в діелектричних кристалах з неспівмірними фазами : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра фіз.-мат. наук / С. А. Свелеба. – Харків, 2006.
37. *Влох О. Г.* Кристалічні діелектрики з неспівмірно модульованою структурою / О. Г. Влох, А. В. Кітик. – Львів : вид-во НУ “Львівська політехніка”, 2002.

38. *Кушнір О. С.* Аналіз флуктуацій в разі фазових переходів у кристалах $(\text{NH}_3\text{C}_3\text{H}_7)_2\text{MnCl}_4$ / О. С. Кушнір, Р. Я. Шопа, Ю. М. Фургала // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. фіз. – 2004 – Вип. 37. – С. 248–253.
39. *Кушнір О. С.* Аналіз критичної поведінки гіротропії при ФП у кристалах / О. С. Кушнір, Р. Я. Шопа // Наук. вісник Ужгородського ун-ту. Сер. Фізика. – 2003 – Вип. 14. – С. 142–148.
40. *Желудев И. С.* Излучение света при пьезоэлектрической поляризации кристаллов сегнетовой соли / И. С. Желудев, М. А. Вацеба, Н. А. Романюк // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1987. – Т. 51, № 12. – С. 2222–2224.
41. *Набитович Й. Д.* О природе термических аномалий физических свойств кристаллов группы триглицинсульфата / Й. Д. Набитович, Н. А. Цаль, Н. Н. Романюк // Укр. фіз. журн. – 1987. – Т. 32, № 1, С. 122–125.
42. *Gnatenko Yu.* Optical and photoelectric spectroscopy of photorefractive / Yu. Gnatenko, R. V. Gamernyk, P. M. Bukivskij, A. G. Slivka // J. Phys. Condens. Matter. – 2006. – Vol. 18. – P. 5323–5331.
43. *Стасюк И. В.* К микроскопической теории электрогирации в диэлектрических кристаллах со структурой шеелита / И. В. Стасюк, С. С. Коцур // Киев : ИТФ, 1984. – 24 с. [1]. *Попель О. М.* Стасюк И. В. Теорія електрооптичного ефекту в дейтерованих кристалах KN_2PO_4 (DKDP) / О. М. Попель, І. В. Стасюк // Укр. фіз. журн. – 1975. – Т. 20, № 4. – С. 598–607 [2].
44. *Stankovska J.* Optical properties of iron-doped TGS crystals and their aqueous solutions / J. Stankovska, I. Polovinko, M. Romanyuk // Acta phys. Pol. A. – 1978. – Vol. A 55, № 6. – P. 803–809.
45. *Болеста И. М.* Люминесценция и фазовые переходы в кристаллах $[\text{N}(\text{CH}_3)_4]_2\text{MnCl}_4$ / И. М. Болеста, Ю. М. Фургала, С. А. Свелеба // Журн. прикл. спекр. – 1991. – Т. 45, № 6. – С. 1007–1009.
46. *Романюк Н. А.* Изменение некоторых оптических и диэлектрических свойств кристаллов сегнетовой соли под воздействием жесткой радиации / Н. А. Романюк, Н. С. Пидзырайло // Кристаллография. – 1964. – Т. 9, № 6. – С. 870–875.
47. *Романюк Н. А.* Пьезооптические свойства кристаллов триглицинсульфата / Н. А. Романюк, Б. Г. Мицик, В. М. Варикаш // Изв. АН БССР. Сер. физ.-мат. наук. – 1980. – Т. 6. – С. 105–110.
48. *Романюк М. О.* Радіаційні зміни двозаломлення кристалів триглицинсульфату / М. О. Романюк, О. М. Костецький // Укр. фіз. журн. – 2000. – Т. 45, № 12. – С. 1465–1468.
49. *Романюк Н. А., Костецький А. М.* Поляризационно-оптическое устройство для измерения температуры // А. С. № 807079 (СССР). Опубл. 23.02.1981. Бюл. № 7. [1]. *Романюк Н. А., Костецький А. М.* Способ измерения абсолютной температуры в прозрачных изотропных средах // А. С. № 742725 (СРСР). Опубл. 25.06.1980. Бюл. № 23 [2].
50. *Romanyuk M. O.* Inversion of the Sign of Birefringence and its Application of Thermometry / M. O. Romanyuk, M. M. Romanyuk // Ferroelectrics. – 2005. – Vol. 317. – P. 57–61.

51. Стадник В. Й. Измерение давления с использованием инверсии дупреломления кристаллов $(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$ / В. Й. Стадник, Н. А. Романюк, Р. С. Брезвин // Журн. прикл. спектр. – 1997. – Т. 64, № 4. – С. 551–554.
52. Романюк М. О., Костецький О. М., Кравців Р. Й. Спосіб вимірювання великих доз іонізуючого випромінювання // Патент МПК 6 G01T1/202. Рішення від 11.01.2000.
53. Романюк М. О. Кристалооптика (конспект лекцій). – Львів : Вид-во Львів. ун-ту, 1971. – 116 с.
54. Романюк М. О. Акустооптика. – К. : УМК ВО, 1989. – 88 с.
55. Романюк М. О. Практикум з кристалооптики і кристалолофізики. – 275 с. (у друці).

STUDIES OF REFRACTION IN FERROICS AT THE IVAN FRANKO NATIONAL UNIVERSITY OF LVIV

M. Romanjuk

*Ivan Franko National University of Lviv
Kyrylo and Mefodiy St., 8, 79005 Lviv, Ukraine*

We present a list of main investigation results for the electron polarizability of ferroics and their applications, obtained in the course of optical studies of phase transitions at the physics-related departments of the Ivan Franko National University of Lviv. The experimental techniques used include the interference methods used to study spectral (2200–8000 Å), temperature (80–1000 K) and field-induced changes in the refractive indices and the birefringence, the absorption spectra in the region of fundamental absorption, and the circular birefringence measured in the presence of the linear one. An electrogyration effect in crystals has been discovered, and a birefringence sign reversal in optically biaxial crystals and a thermochromic effect have been revealed and investigated. The regularities of domain motion in the polar phases and soliton motion in incommensurate ones have been revealed, together with the ordering and critical behaviour of crystalline structures at the phase transitions. Rich experimental data sets have been obtained for dozens of crystals (including the crystal families such as Rochelle salt (RS), triglycine sulphate (TGS), KDP, A_2BX_4 and others). They have been successfully applied for controlling light beams, in thermometry, dosimetry and metrology, or the relevant practical applications have been thoroughly grounded.

Key words: plastic deformation, crystallographic slip, crystal lattice rotation, electronic polarizability, refractive indices, birefringence, parametric optical effects, absorption spectra, phase transitions, incommensurate phases, optical techniques, applications of electronic polarizability.

РЕФРАКЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЕРРОИКОВ ВО ЛЬВОВСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Н. Романюк

*Львовский национальный университет имени Ивана Франко
ул. Кирилла и Мефодия, 8, 79005 Львов, Украина*

Приведен перечень главных результатов исследований электронной поляризуемости ферроиков и их использования на физических кафедрах ЛНУ имени Ивана Франко, полученных при исследованиях фазовых переходов оптическими методами. Используются интерференционные методики измерения спектральных (2200–8000 Å), температурных (80–1000 К) и полевых изменений показателей преломления и двулучепреломления, спектры поглощения в фундаментальной области частот, а также измерение циркулярного двулучепреломления при наличии линейного. Открыто явление электрогирации в кристаллах, обнаружена и исследована инверсия знака двулучепреломления двухосных кристаллов, термохромный эффект, установлены закономерности движения доменов в полярных фазах и солитонов в несоразмерных, упорядочение и критическое поведение структуры при фазовых переходах. Получен богатый фактический материал для десятков кристаллов (группы сегнетовой соли, триглицинсульфата, KDP, A_2BX_4 и др.), который использован (или обосновано его применение) для управления световыми пучками, в термометрии, дозиметрии и метрологии.

Ключевые слова: электронная поляризуемость, показатель преломления, двулучепреломление, параметрические оптические эффекты, спектры поглощения, фазовые переходы, несоразмерные фазы, оптические методики исследований, применение электронной поляризуемости.

Статтю отримано: 11.03.2011
Прийнято до друку: 14.07.2011