

Г. АПРЕОТЕСЕЙ,¹ Д.Г. ДІМІТРІУ,² М. КУРМЕЙ,³ Д.О. ДОРОХОЙ²

¹ Технічний університет Ясс “Георге Асакі”,
факультет машинобудування та промислового менеджменту
(67, Бульв. Проф. Дімітрі Манжерона, Ясси 700050, Румунія;
email: gabriela.apreotesei@academic.tuiasi.ro)

² Яський університет Олександра Іоана Кузи, фізичний факультет
(11, Бульв. Керал І, Ясси 700506, Румунія)

³ Відділ фотоактивності, Інститут фізики НАН України
(Просп. Науки, 46, Київ 03028)

ОЦІНКА ЛІНІЙНОЇ ДИСПЕРСІЇ ДВОПРОМЕНЕЗАЛОМЛЕННЯ ОДНОВІСНОГО НЕОРГАНІЧНОГО КРИСТАЛА КАЛЬЦИТУ НА ОСНОВІ КАНАЛІЗОВАНИХ СПЕКТРІВ

УДК 539

За допомогою рефрактометра Аббе, оснащеного поляризаційним фільтром для видимого діапазону, визначено основні показники заломлення неорганічного одновісного природного кристала кальциту (CaCO_3). Для цього використовувалося джерело білого світла, оснащене сімома кольоровими фільтрами. Лінійне двоприменезаломлення кальциту обчислювалося як різниця між основними показниками заломлення. Для отримання додаткової інформації про залежність лінійного двоприменезаломлення кальциту від довжини хвилі світла використано метод каналізованих спектрів. Обчислене лінійне двоприменезаломлення для каналізованих спектрів є неперервною функцією довжини хвилі світла. На основі значень двоприменезаломлення розраховано деякі компенсаційні шари, що застосовуються в різних цілях, переважно для “жовтої” частини спектру натрієвої лампи.

Ключові слова: кальцит, одновісна симетрія, багаточвертьхвильові й багатопівхвильові компенсаційні шари.

1. Вступ

Анізотропні матеріали (неорганічні кристали, полімери, рідкі кристали) характеризуються різними фізичними властивостями в різних напрямках і мають широкий спектр застосувань у промисловості, науці та медицині. В оптиці прозорі анізотропні матеріали [1–3] використовуються для компенсації оптичного шляху, для отримання або зміни стану поляризації світла, або для дослідження внутрішніх сил, що виникають у прозорих літальних

апаратах, у суднах (через дію морських течій), або в механізмах для підтримання великих вантажів.

У головній системі координат $Oabc$ кожне анізотропне прозоре середовище має три значення показника заломлення. Анізотропні одновісні середовища [2] характеризуються співвідношеннями $n_a = n_b = n_o$ та $n_c = n_e$, де параметри n_o та n_e називаються звичайним і незвичайним показниками заломлення відповідно. Основні показники заломлення вимірюються за допомогою лінійно поляризованого випромінювання, напруженість електричного поля якого перебуває в площині aOb (звичайний показник заломлення) або паралельна осі Oc (незвичайний показник заломлення). Різниця

$$\Delta n = n_e - n_o \quad (1)$$

називається лінійним двоприменезаломненням [1, 2]. Двоприменезаломнення – це параметр матеріалу, що залежить від довжини хвилі світла.

Цитування: Апреотесей Г., Дімітріу Д.Г., Курмей М., Дорохой Д.О. Оцінка лінійної дисперсії двоприменезаломлення одновісного неорганічного кристала кальциту на основі каналізованих спектрів. *Укр. фіз. журн.* **71**, № 4, 310 (2026).

© Видавець ВД “Академперіодика” НАН України, 2026. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Оптична вісь анізотропних одновісних матеріалів – це напрямок поширення світла, коли світло не змінює свою поляризацію. Для будь-якого іншого напрямку поширення світла в анізотропних шарах світло безперервно змінює свій стан поляризації, оскільки його звичайна й незвичайна складові поширюються з різними швидкостями.

Коли три значення показника заломлення різні, анізотропний матеріал називається двоосовим [2], оскільки він має дві оптичні осі.

Серед анізотропних речовин відомий неорганічний кристал, який називається кальцит і має високі значення лінійного двоприменезаломлення у видимому діапазоні. Кальцит (CaCO_3) є одним з найбільш широко використовуваних матеріалів в анізотропній оптиці завдяки високому двоприменезаломленню, високій прозорості як у видимій, так і в ближній інфрачервоній (VIS-NIR) спектральних областях, а також чудовій оптичній стабільності [4]. Його тригональна кристалічна структура, пов'язана з просторовою групою $R - 3c$ (рис. 1), складається з площин, утворених іонами Ca^{2+} , які чергуються з площинами, утвореними тригональними планарними групами CO_3^{2-} , в яких центральний атом вуглецю зв'язаний з трьома атомами кисню під кутами приблизно 120° [5]. Ця архітектура визначає орієнтацію оптичної осі (осі c) і приводить до різко вираженої діелектричної анізотропії. Площини CO_3^{2-} приблизно перпендикулярні до осі Oc , тоді як іони Ca^{2+} займають міжвузлові локації, сприяючи механічній стабільності й розподілу внутрішнього електричного поля [4–7].

Кальцит – це негативний одновісний кристал, що характеризується співвідношенням $n_e < n_o$ і високими значеннями лінійного двоприменезаломлення (приблизно 0,172 у випадку 589 нм) [1, 4]. Ця властивість дає змогу розділяти й точно контролювати ортогонально поляризовані компоненти, і вона є важливою для проєктування оптичних елементів, що використовують різницю фаз між звичайними (o) та незвичайними (e) променями. Дисперсійні співвідношення типу Селмеєра можна використовувати для розрахунку показників заломлення як функцій довжини хвилі [4, 8]. Кальцит широко використовується в компенсаторах оптичного шляху, багатопорядкових хвильових пластинах, поляризаторах типу Вуда, а також в застосуваннях, де використовується вели-

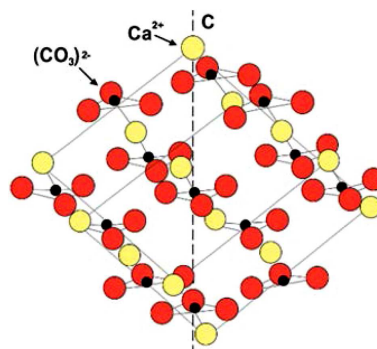


Рис. 1. Тригональна кристалічна структура кальциту (CaCO_3), що ілюструє розташування іонів Ca^{2+} і планарних груп CO_3^{2-} вздовж кристалографічної осі Oc

кий контраст між двома показниками заломлення одновісного середовища, що відповідають звичайному та незвичайному режимам поширення хвилі [4]. В оптичному приладобудуванні й поляризаційній мікроскопії кальцит є найкращим завдяки своїй стабільності та можливості виготовлення пластин з контрольованою кристалографічною орієнтацією. Він також використовується як стандарт для характеристики одновісних середовищ і визначення оптичних властивостей у спектральній області середнього інфрачервоного (MIR) діапазону для гранульованих матеріалів, геологічних і планетарних застосувань [9].

З фізико-хімічної точки зору, кальцит має щільність $2,71 \text{ г/см}^3$ і твердість 3 за шкалою Мооса, що дозволяє переробляти його у стабільні оптичні пластини з точними допусками [5]. Його низька розчинність у воді й чутливість до кислотного середовища вимагають захисних заходів під час обробки оптичних компонентів [4]. Практичні застосування підтверджують значення оптичного пропускання кальциту, що перевищують 90% у видимому діапазоні, і жорсткі допуски за товщиною для компонентів, що виробляються такими постачальниками, як Thorlabs та Edmund Optics [10, 11].

Через різні умови вирощування кристалів у природі існують відмінності в значеннях показників пропускання або заломлення кальциту. Тому необхідно перевірити застосовність рівнянь Селмеєра [4, 9] для точної оцінки основних показників заломлення мінералу. Оптична характеристика кальциту охоплює ідентифікацію його оптичної осі, визначення його показників заломлення n_e і

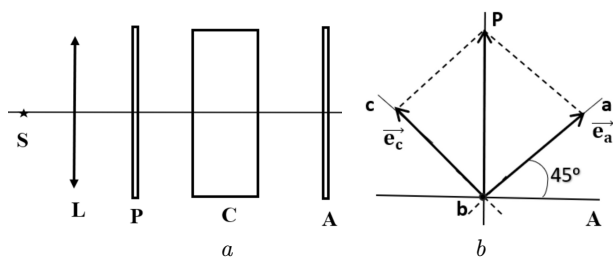


Рис. 2. Схематична діаграма приладу для отримання каналізованих спектрів: S – джерело, L – лінза, P і A – ідентичні поляризаційні фільтри, C – неорганічний кристал, розрізаний паралельно оптичній осі (а). Взаємна орієнтація головних осей кальциту Oa та Oc і напрямки пропускання поляризаційних фільтрів P та A (б)

n_o , а також оцінку лінійного двопронезаломлення [9, 12].

Основні показники заломлення одновісних кристалів можна обчислити за допомогою відомих рівнянь [4, 6, 9], але враховуючи, що ріст неорганічних кристалів залежить від природних умов [10], розрахунки можуть відрізнитися залежно від реальних даних. Дані, що використовуються під час проектування оптичних пристроїв, повинні бути дуже точними [13]; необхідні також експериментальні вимірювання.

Існує велика кількість оптичних методів [14, 15] для характеристики двопронезаломлення анізотропних шарів, таких як інтерферометрія [12, 16–18], коноскопія [19], еліпсометрія [20, 21], метод, заснований на каналізованих спектрах [22, 23], поляризаційна мікроскопія [16], рефрактометрія в поляризованому світлі [23, 24] тощо. Ці методи можна використовувати для всіх прозорих анізотропних одновісних шарів, що складаються з неорганічних кристалів [15–21], полімерів [22–27] або рідких кристалів [28–30].

Геометрія поверхонь показника заломлення підкреслює негативну одновісну природу кальциту: поверхня звичайного показника заломлення є сферичною (значення n_o постійне в усіх напрямках), тоді як поверхня незвичайного показника заломлення є еліпсоїдом, сплюсненим вздовж осі c , де n_e досягає свого мінімального значення [1, 4]. Це геометричне представлення дає змогу визначати напрямки поширення й фазові швидкості звичайних та незвичайних променів, що дає чітке пояснення подвійного заломлення й розділення променів в одновісних кристалах.

Завдяки поєднанню своєї чіткої кристалічної структури, добре визначених кількісно оптичних властивостей і фізико-хімічної стабільності, кальцит є еталоном у дослідженнях анізотропної оптики й незамінним компонентом у застосуваннях, що вимагають суворого контролю поляризації, дисперсії й поширення електромагнітного випромінювання в одновісних середовищах [4–14].

2. Теоретична частина

Для визначення лінійного двопронезаломлення кальциту було використано метод каналізованого спектра. Використаний пристрій схематично зображено на рис. 2, а. Джерело S розміщено у фокальній площині об'єкта лінзи L. Паралельний промінь поширюється вздовж головної осі Ob кальциту. Осі Oa та Oc містяться у вхідній поверхні неорганічного кристала C, який розташований між схрещеними поляризаційними фільтрами P та A.

Орієнтація електричного поля хвилі визначається напрямком пропускання першого поляризаційного фільтра P. Припустимо, що азимутальний кут між P та головною віссю Oc кристалічного шару становить $\alpha = 45^\circ$. Компоненти електричного поля вздовж головних осей Oa та Oc мають однакову амплітуду. Компонента поля вздовж осі Oa є звичайною компонентою і поширюється в кристалі зі швидкістю $v_o = c/n_o$, а компонента паралельна осі Oc , яка називається незвичайною, поширюється зі швидкістю $v_e = c/n_e$. У процесі поширення, між двома компонентами виникає різниця фаз

$$\Delta\Psi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L, \quad (2)$$

де Δn – лінійне двопронезаломлення, а L – товщина кристалічного шару.

Монохроматичне випромінювання, що задовольняє умові

$$\Delta\Psi = 2k\pi \quad (3)$$

на виході з кристалічного шару, є лінійно поляризованим та має азимут α (такий самий, як і на вході в анізотропний шар). Ці світлові компоненти не можуть проходити через аналізатор A, якщо напрямок пропускання останнього перпендикулярний до P. Якщо випромінювання задовольняє умові (4), азимут стає рівним $2\pi - \alpha$ і світло проходить

через аналізатор А з найвищою інтенсивністю потоку, то

$$\Delta\Psi = (2k + 1)\pi. \quad (4)$$

Інші випромінювання проходять крізь пристрій з проміжними інтенсивностями потоку. Якщо пристрій D вставити в спектрофотометр, то отримаємо каналізований спектр як послідовність максимумів і нульових мінімумів (коли кут азимута дорівнює $\alpha = 45^\circ$).

Лінійне двопронезаломлення прозорого анізотропного шару зменшується зі збільшенням довжини хвилі світла (рис. 3), і це впливає на положення каналів. Нехай δ – це зміна лінійного двопронезаломлення між послідовними компонентами світла, що дають мінімум та його сусідні максимуми. Запишемо рівняння, які необхідні для появи двох максимумів і мінімуму між ними:

$$\begin{cases} \frac{2\pi}{\lambda_{2k+1}} (\Delta n + \delta) L = (2k + 1)\pi, \\ \frac{2\pi}{\lambda_{2k}} \Delta n L = 2k\pi, \\ \frac{2\pi}{\lambda_{2k-1}} (\Delta n - \delta) L = (2k - 1)\pi. \end{cases} \quad (5)$$

Переходячи від довжин хвиль λ до хвильових чисел ν та розділивши на π , отримуємо

$$\begin{cases} \nu_{2k+1} (\Delta n + \delta) L = \frac{1}{2L} (2k + 1), \\ \nu_{2k} \Delta n L = \frac{2k}{2L}, \\ \nu_{2k-1} (\Delta n - \delta) L = \frac{1}{2L} (2k - 1). \end{cases} \quad (6)$$

Розв'язки рівнянь (6) можна записати у вигляді

$$\begin{cases} \Delta n = \frac{1}{2L} \frac{\nu_{2k+1} - \nu_{2k-1}}{2\nu_{2k+1}\nu_{2k-1} - \nu_{2k}(\nu_{2k-1} - \nu_{2k+1})}, \\ \delta = \frac{1}{2L} \frac{\nu_{2k-1} - \nu_{2k+1} - 2\nu_{2k}}{2\nu_{2k+1}\nu_{2k-1} - \nu_{2k}(\nu_{2k-1} - \nu_{2k+1})}, \\ k = \frac{1}{2} \frac{\nu_{2k}(\nu_{2k-1} - \nu_{2k+1})}{2\nu_{2k+1}\nu_{2k-1} - \nu_{2k}(\nu_{2k-1} - \nu_{2k+1})}. \end{cases} \quad (7)$$

З виразів (7) випливає, що двопронезаломлення Δn , зміна δ двопронезаломлення між каналом та його сусідом, а також порядок каналу k можна обчислити, якщо виміряти товщину кристалічного

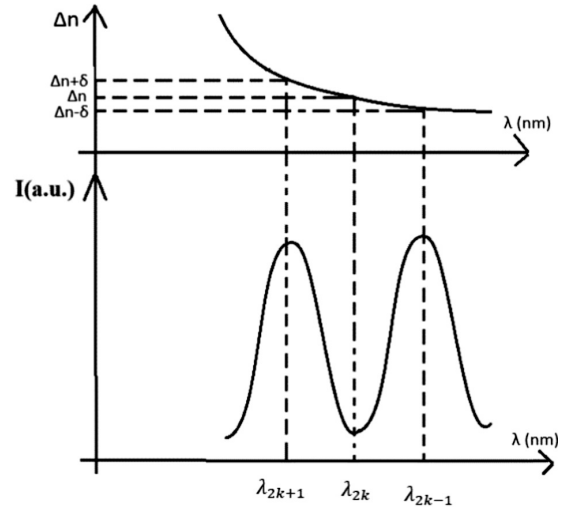


Рис. 3. Дисперсійна властивість кальциту (верхня панель) і частина каналізованого спектра (нижня панель)

шару та хвильові числа двох максимумів та мінімуму між ними.

Перевагою каналізованого методу є швидкість; значення лінійного двопронезаломлення та його зміни для всіх компонентів видимого діапазону можуть бути виміряні лише на основі одного каналізованого спектра.

3. Експериментальна частина

Першим кроком під час аналізу анізотропних матеріалів є встановлення головних напрямків у кристалі [31, 32]. Оптична вісь кальциту (умовно, вісь Oc) визначалася шляхом обертання кристала, розташованого між схрещеними поляризаційними фільтрами, навколо напрямку поширення світла, доки світло переставало проходити крізь систему. Дві інші головні осі [33] спрямовані перпендикулярно до оптичної осі й мають такі характеристики, що якщо світло поширюється паралельно до них, то воно не змінює свій стан поляризації. Ці осі також виявлялися для кристала, розташованого між схрещеними поляризаційними фільтрами [1, 34].

Спочатку деякі значення головних показників заломлення кальциту були визначені за допомогою рефрактометра Аббе [23] при монохроматичному випромінюванні у видимому діапазоні з використанням фільтрів з відомими довжинами хвиль.

Для вимірювання головних показників заломлення кальциту [23, 24] з кристала кальциту бу-

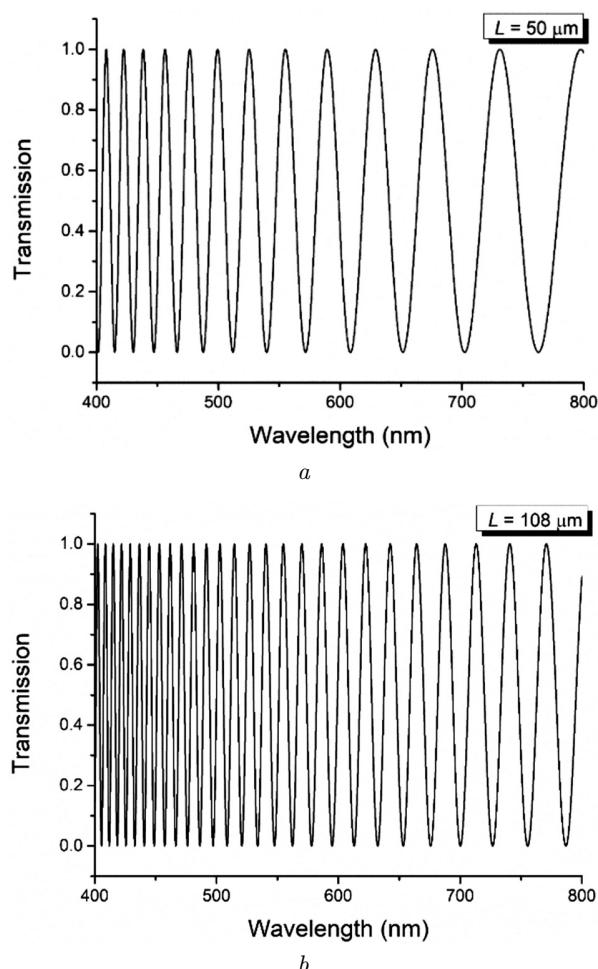


Рис. 4. Каналізовані спектри шарів кальциту товщиною 50 (а) і 108 мкм (b)

Таблиця 1. Основні показники заломлення і лінійне двопронезаломлення кальциту

λ , нм	n_o	n_e	$\Delta n = n_e - n_o$
400	1,6782	1,4936	0,1846
450	1,6685	1,4892	0,1793
500	1,6619	1,4875	0,1744
550	1,6580	1,4862	0,1718
600	1,6555	1,4847	0,1708
650	1,6533	1,4840	0,1693
700	1,6521	1,4833	0,1688

ло вирізано два тонкі зразки, обидва паралельні оптичній осі: один – паралельний площині aOc , а другий – паралельний площині bOc . Вони розмі-

щувалися між вимірювальними призмами рефрактометра Аббе, оснащеного поляризаційним фільтром. Для кожного зразка вимірювання проводилися для двох орієнтацій напрямку пропускання поляризаційного фільтра (паралельно головним осям кожного зразка). Звичайний показник заломлення n_o вимірювався для напрямку пропускання поляризаційного фільтра паралельного осі Oa для першого зразка та осі Ob для другого зразка, тоді як незвичайний показник заломлення n_e вимірювався в обох випадках з напрямком пропускання паралельним оптичній осі Oc . Вимірювання проводилися з використанням семи монохроматичних фільтрів (з відомими довжинами хвиль).

Для отримання інформації про зміну лінійного двопронезаломлення у вузькому спектральному діапазоні, каналізовані спектри зразків кальциту з двома відомими товщинами були зареєстровані за допомогою спектрофотометра Specord UV Vis Carl Zeiss Jena з системою накопичення даних. Лінійне двопронезаломлення і його зміна обчислювалися на основі співвідношень (7) з використанням значень сусідніх максимумів і мінімумів, отриманих з каналізованих спектрів.

4. Результати та їх обговорення

Результати, отримані в процесі вимірювання показників заломлення за допомогою рефрактометра Аббе, наведені в табл. 1, яка також містить значення лінійного двопронезаломлення, обчислені за співвідношенням (1). Дані з табл. 1 показують, що кальцит є матеріалом з високим значенням лінійного двопронезаломлення й значною дисперсією.

Для підвищення точності визначення лінійного двопронезаломлення було використано метод каналізованих спектрів, описаний у теоретичному розділі. Каналізовані спектри двох шарів кальциту товщиною 50 і 108 мкм проілюстровано на рис. 4. Як видно з цього рисунку, кількість каналів збільшується зі збільшенням товщини зразка кальциту, що сприяє підвищенню точності вимірювань.

Були виміряні довжини хвиль, що відповідають максимумам і мінімумам каналізованих спектрів з відомою товщиною зразка. Лінійне двопронезаломлення і його дисперсія обчислені на основі співвідношень (7). Лінійне двопронезаломлення

кальциту для видимого діапазону проілюстровано на рис. 5 для двох досліджуваних зразків кальциту. Як видно з цього рисунка, лінійне двопроменезаломлення кальциту зменшується зі збільшенням довжин хвиль світла у видимому діапазоні, і це зменшення більш виражене в діапазоні малих довжин хвиль.

Зміна двопроменезаломлення у видимому діапазоні хвиль зображена на рис. 6. Цей параметр збільшується зі збільшенням довжини хвилі світла.

Проведене дослідження продемонструвало можливість підвищити точність визначення лінійного двопроменезаломлення, а також його дисперсії, шляхом збільшення товщини анізотропного шару.

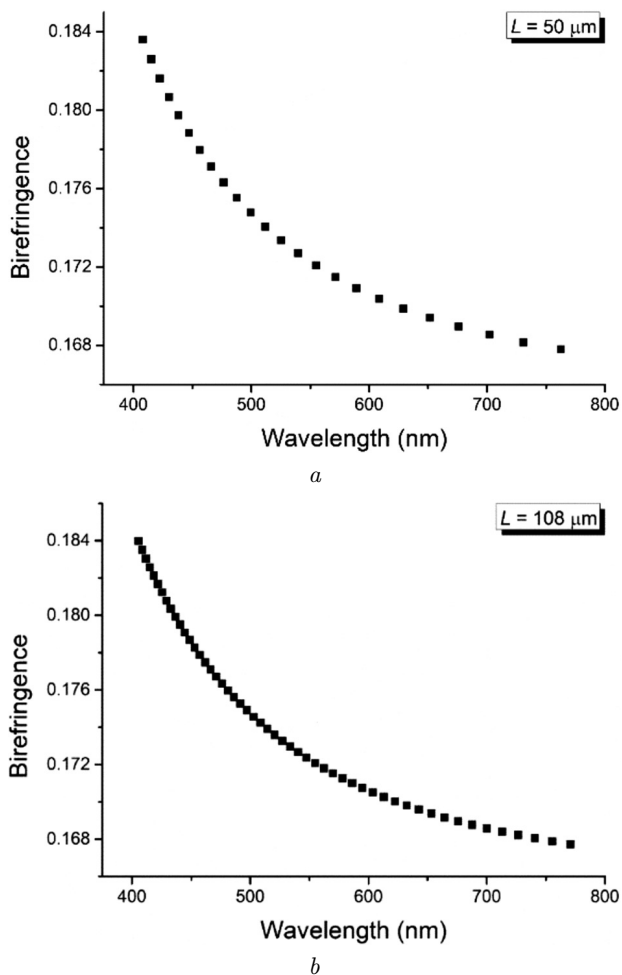


Рис. 5. Двопроменезаломлення шарів кальциту товщиною 50 (a) і 108 мкм (b)

5. Можливі застосування шарів кальциту, відколотих паралельно оптичній осі

Завдяки високому значенню лінійного двопроменезаломлення, кальцит у вигляді компенсаційних шарів має різні застосування. Анізотропні компенсаційні шари необхідно розраховувати для кожної монохроматичної складової видимого світла й відповідного значення двопроменезаломлення. Як поширений природний анізотропний матеріал, кальцит часто використовується в оптиці, особливо для шарів з плоскопаралельними поверхнями, що працюють як сповільнювачі.

Чвертьхвильові сповільнювачі перетворюють кругову/еліптичну поляризацію світла на лінійну,

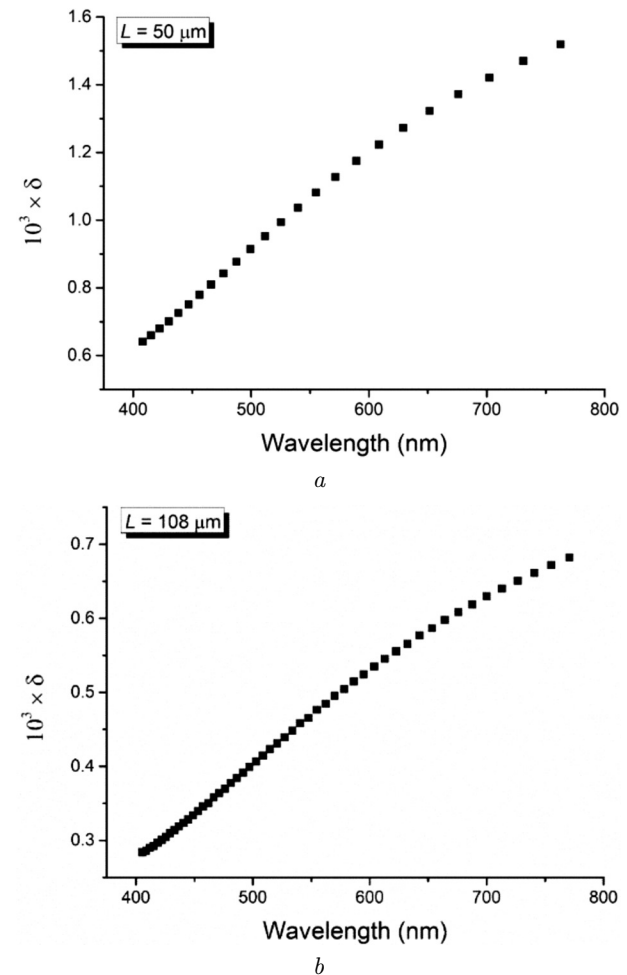


Рис. 6. Дисперсія двопроменезаломлення у видимому діапазоні для шарів кальциту товщиною 50 (a) і 108 мкм (b)

що легко визначається за допомогою поляризаційного фільтра. Цей тип світла з повною поляризацією можна відрізнити від неполяризованого світла. Чвертьхвильові сповільнювачі використовуються для аналізу стану поляризації світла. Товщина чвертьхвильового сповільнювача обчислюється за співвідношенням

$$L_{\frac{\lambda}{4}} = \frac{(2k+1)\lambda}{4\Delta n}. \quad (8)$$

Деякі значення товщини багаточвертьхвильових шарів наведено в табл. 2. Вони обчислені для великих значень k , оскільки кальцит можна різати товстими шарами.

Напівхвильові сповільнювачі використовуються в лабораторіях для аналізу оптично активних прозорих матеріалів. Товщину напівхвильових сповільнювачів можна обчислити за співвідношенням

$$L_{\frac{\lambda}{2}} = \frac{(2k+1)\lambda}{2\Delta n}. \quad (9)$$

Цей тип сповільнювачів змінює лінійно поляризоване випромінювання із заданим азимутом α на лінійно поляризоване випромінювання з азимутом $2\pi - \alpha$. Коли в центр поля зору поляриметра вводиться компенсатор напівхвилі, у полі зору виникають дві області, в яких орієнтація електричного поля світла відрізняється на 2π . Щоб вирівняти освітленість двох областей у полі зору аналізато-

Таблиця 2. Товщина чвертьхвильових шарів високого порядку

k	$L_{\frac{\lambda}{4}}$, мм	k	$L_{\frac{\lambda}{4}}$, мм
500	0,8565	2000	3,4269
750	1,2856	3000	5,1399
1000	1,7139	4000	6,8529

Таблиця 3. Товщина півхвильових шарів високого порядку

k	$L_{\frac{\lambda}{2}}$, мм	k	$L_{\frac{\lambda}{2}}$, мм
500	1,7147	2000	6,8537
750	2,5172	3000	10,2797
1000	3,4277	4000	13,7040

ра, бісектриса напрямку пропускання повинна бути рівною куту 2α . Коли активна речовина розміщується між двома поляризаторами, обертання світлового електричного поля на кут θ визначає різницю між освітленням у двох областях поля зору через різні кути електричного поля у двох областях поля зору поляриметра. Кут обертання аналізатора навколо напрямку поширення світла доки поле зору не стане рівномірно освітленим свідчить що кут обертання θ спричинений прозорим оптично активним шаром.

Відповідні товщини шарів кальциту для деяких значень k , що задовольняють умові (9) для багатопівхвильових сповільнювачів, наведені в табл. 3. Ці шари використовуються для компенсації оптичного шляху, що вводиться різними пристроями, які працюють з поляризованим світлом, або для вимірювання кутів обертання оптично активними прозорими шарами.

6. Висновки

Кальцит – це одновісний неорганічний кристал, який поширений у природі та характеризується високим лінійним двопронезаломленням. Завдяки його міцності й малій розчинності у воді, його рекомендується використовувати в різних пристроях для анізотропної оптики.

Лінійне двопронезаломлення кальциту у видимому діапазоні змінюється від 0,186 до 0,1688 у діапазоні 400–700 нм. Наше дослідження стосувалося визначення двопронезаломлення кальциту і його дисперсії у широкому діапазоні близько розташованих світлових компонентів з використанням методу каналізованого спектра.

Прозорі у видимому діапазоні, кристали кальциту можуть бути використані як компенсатори оптичних шляхів. Кристал розрізають паралельно головній площині, що містить його оптичну вісь, і використовують під кутом нормального падіння.

1. V. Pop. Crystal optics In: *Fundamentals of Optics* (Alexandru Ioan Cuza University Publishing House, 1989), p. 42 (in Romanian).
2. G. Cone. In: *Electromagnetic Optics of Anisotropic Media* (Tehnică, 1990), chapter I (in Romanian).
3. M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* (Cambridge University Press, 1999).

4. G. Ghosh. Dispersion-equation coefficients for the refractive index and birefringence of calcite and quartz crystals. *Opt. Commun.* **163**, 95 (1999).
5. J. Janovec, J.S. Dolado, A. Ayuela. Optical and excitonic properties of calcite CaCO_3 . *J. Mater. Chem. C* **13**, 6267 (2025).
6. M.D. Lane. Mid-infrared optical constants of calcite and their relationship to particle size effects. *J. Geophys. Res. Planets* **104**, 14099 (1999).
7. *Calcite Optical Crystals – Technical Datasheet* (Thorlabs Inc., 2025).
8. *Calcite Waveplates and Polarizers – Technical Datasheet* (Edmund Optics Inc., 2024).
9. F.M. Hossain, G.E. Murch, I.V. Belova, B.D. Turner. Electronic, optical and bonding properties of CaCO_3 (calcite) from first-principles calculations. *Solid State Commun.* **149**, 1201 (2009).
10. S. Fan, X. Zhang, H. Hou, Q. Liu, H. Guo. First-principles study of structural, elastic, and optical properties of trigonal CaCO_3 under pressure. *Crystals* **15**, 712 (2025).
11. G.E. Jellison, Jr., J.A. Woollam, J. Zhang *et al.* Crystallographic orientation of uniaxial calcite and measurement of refractive indices by generalized ellipsometry. *J. Appl. Phys.* **124**, 223102 (2018).
12. K. Kasmaee, M. Dehshiri, A. Khorsandi. Polarization-sensitive optical coherence tomography for birefringence measurement of calcite birefringent crystal. *Appl. Opt.* **63**, 2843 (2024).
13. D.A. Holmes. Exact theory of retardation plates. *J. Opt. Soc. Am.* **54**, 1115 (1964).
14. F.D. Bloss. *An Introduction to the Methods of Optics in Crystallography* (Hof, Reichart and Winson, 1961).
15. A.E. Tudose, I. Dumitrascu, L. Dumitrascu, D.G. Dimitriu, D.O. Dorohoi. Methods for determining the linear birefringence of some inorganic uniax crystals. In: *Proc. of the TIM 15–16 Physics Conference* **1796**, 030007 (2017).
16. L. Dumitrascu, I. Dumitrascu, D.O. Dorohoi, M. Toma. Interferometric method for birefringence determination with a polarizing microscope. *Opt. Express* **16**, 20884 (2008).
17. D.A.M. Androne, D.O. Dorohoi, D.G. Dimitriu, H.U. Kasper. Optical and chemical study of Quartz from granitic Pegmatites. *Rev. Chim.* **69**, 1846 (2018).
18. J.M. Medhat, N.I. Hendawy, A.A. Zaaki. Interferometric method to determine the birefringence for an anisotropic material. *Egypt. J. Solids* **26**, 231 (2003).
19. L. Dumitrascu, I. Dumitrascu, D.O. Dorohoi. Conoscopic method for determination of main refractive indices and thickness of a uniaxial crystal cut out parallel to its optical axis. *J. Appl. Crystallogr.* **42**, 878 (2009).
20. D.A.M. Androne, C.D. Nechifor, M. Postolache, D.G. Dimitriu, D.O. Dorohoi. Linear birefringence of uniaxial anisotropic inorganic crystals measured by ellipsometric means. *UPB Sci. Bull. A* **85**, 199 (2023).
21. D.O. Dorohoi, D.G. Dimitriu. Linear birefringence of Carpathian Quartz thin anisotropic layers estimated based on the light polarization ellipse. *Acta Chem. Iasi* **32**, 249 (2024).
22. V. Pop, D.O. Dorohoi, E.A. Cringeanu. New method for determining birefringence dispersion. *J. Macromol. Sci. B* **33**, 373 (1994).
23. D.O. Dorohoi, M. Postolache, D.C. Nechifor, D.G. Dimitriu, M.R. Albu, I. Stoica, I.A. Barzic. Review on optical methods used to characterize the linear birefringence of polymer materials for different applications. *Molecules* **28**, 2955 (2023).
24. E.L. Epure, I. Stoica, R.M. Albu, C. Hulubei, A.I. Barzic. New strategy for inducing surface anisotropy in polyimide films for nematics orientation in display applications. *Nanomaterials* **11**, 3107 (2012).
25. A.I. Barzic, R.M. Albu, C.D. Nechifor, M. Postolache, C. Logigan, D.O. Dorohoi. Surface processing of polyethylene terephthalate for orientation of nematics, in display devices. *Mater. Plast.* **57**, 1 (2020).
26. M. Postolache, D.G. Dimitriu, C.D. Nechifor, S. Bota-Condurache, V. Closca, D.O. Dorohoi. Birefringence of thin uniaxial polymer films estimated using the light polarization ellipse. *Polymers* **14**, 1063 (2022).
27. M.I. Avadanei, D.G. Dimitriu, D.O. Dorohoi. Optical anisotropy of polyethylene terephthalate films characterized by spectral means. *Polymers* **16**, 850 (2024).
28. S.T. Wu, U. Efron, L.D. Hess. Birefringence measurements of liquid crystals. *Appl. Opt.* **23**, 3911 (1984).
29. M. Postolache, M.L. Ivan, N. Puica-Melniciuc, G.G. Mariuciu, D.G. Dimitriu, D.O. Dorohoi. Birefringence of binary liquid crystals mixtures MBBA and PPMAECOB in TCM, interferometric assessment. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **698**, 78 (2020).
30. S. Picoş, G. Amarandei, I. Diaconu, D.O. Dorohoi. The birefringence of thin films of some nematic liquids. *J. Optoelectron. Adv. Mater.* **7**, 787 (2005).
31. W. Kaminski, K. Claborn, B. Kohr. Polarimetric imaging of crystals. *Chem. Soc. Rev.* **33**, 514 (2004).
32. D.C. Giancoli. *Physique Générale 3: Ondes, Optique et Physique Moderne* (Chenelière Inc., 2004).
33. D. Moisil, G. Moisil. Introduce in elipsometrie. In: *Theoretical and Practical Aspects of Ellipsometry* (Tehnică, 1973), Chapter 1 (in Romanian).
34. E.A. Angheluta, M.D. Angheluta. Methods for evaluation of light double refraction in transparent uniax anisotropic media. In: *Electromagnetic Radiation in Analysis and Design of Organic Materials*. Edited by D.O. Dorohoi, A.I. Barzic, M. Aflori (CRC Press, 2017), pp. 75–88.

Одержано 26.01.26.

Переклад на українську мову О. Войтенка

G. Apreotesei, D.Gh. Dimitriu,
M. Curmei, D.O. Dorohoi

LINEAR BIREFRINGENCE DISPERSION
OF UNIAXIAL INORGANIC CRYSTAL CALCITE
ESTIMATED BASED ON CHanneLED SPECTRA

The main refractive indices of natural inorganic uniaxial crystal CaCO_3 are determined using an Abbe refractometer equipped with a polarizing filter for the visible range. A source of white light equipped with seven colored filters was used for this purpose. The linear birefringence of calcite was computed as the difference between the main refractive indices. In order to ob-

tain more information about the dependence of calcite linear birefringence on light wavelength, the channeled spectra method was used. Computed linear birefringence for channeled spectra is a continuous function of the light wavelength. Based on the birefringence values, some compensatory layers working for different purposes were computed for the yellow radiation of a sodium lamp.

Keywords: calcite, uniaxial symmetry, multi-quarter wave and multi half-wave compensatory layers.