ISSN 1024-588X. Вісник Львівського університету. Серія фізична. 2020. Випуск 57. С. 15-31
Visnyk of the Lviv University. Series Physics. 2020. Issue 57. P. 15-31

УДК 535.323; 535.53; 537.226; 548 https://doi.org/10.30970/vph.57.2020.15
PACS 78.20.Ek, 78.20.Fm, 42.25.Ja, 33.55+b

Фотопружний ефект у кристалах K_2SO_4 з домішкою міді

Р. Матвіїв[1], В. Стадник[1]

[1] *Львівський національний університет імені Івана Франка*
вул. Драгоманова, 19, 79005 Львів, Україна
e-mail: romanmatvijw@gmail.com

Досліджено спектральні (300–700 нм) залежності показників заломлення n_i та спектрально-баричні залежності двозаломлення Δn_i кристалів K_2SO_4 з домішками міді (1,7% і 3,0%) та розраховано їхні кристалооптичні параметри. Визначено величини комбінованих π^0_{im} і абсолютних π_{im} п'єзооптичних та пружнооптичних p_{im} коефіцієнтів домішкових кристалів. Встановлено їхнє незначне зменшення, порівняно з чистим кристалом, що свідчить про збільшення механічної жорсткості домішкових кристалів. Розраховано коефіцієнт акустооптичної якості M_2 і показано, що за величиною максимальних значень він є вищим ніж, у кристалах кварцу і борату стронцію. Задумано, беручи до уваги короткохвильову межу області прозорості кристалів сульфату калію (170 нм), використовувати їх для акустооптичної модуляції ультрафіолетового випромінювання.

Ключові слова: показники заломлення, двозаломлення, п'єзо- і пружнооптичні коефіцієнти, акустооптична ефективність

1. Вступ

Фотопружність – це об'єднувальна назва п'єзооптичного і пружнооптичного ефектів. П'єзооптичний (ПОЕ) і пружнооптичний (ПрОЕ) ефекти описують зміни оптичних властивостей матеріалу – показника заломлення n, двопроменезаломлення Δn та діелектричної проникливості ϵ на оптичних частотах — під впливом механічного навантаження σ. Ці ефекти найзручніше описувати індукованою зміною поляризаційних констант a_{ij}=$1/n^2_{ij}$=$1/\epsilon_{ij}$. Тензорний запис п'єзооптичного і пружнооптичного ефектів має такий вигляд:

$$\Delta a_{ij} = \pi_{ijkl}\sigma_{kl} \text{ і } \Delta a_{ij} = p_{ijkl}\chi_{kl}. \quad (1)$$

Тут Δa_{ij} – зміна поляризаційних констант, π_{ijkl} – п'єзооптичний тензор четвертого рангу, а p_{ijkl} – пружнооптичний тензор четвертого рангу, σ_{kl} – тензор другого рангу

механічного напруження, χ_{kl} – тензор другого рангу деформації. Оскільки σ_{kl} і χ_{kl} – симетричні тензори, то можна зробити згортку індексів за таким правилом $ij = ji \to k$ і $kl = lk \to m$. Тоді (1) запишемо так:

$$\Delta a_i = \pi_{im}\sigma_m \text{ і } \Delta a_i = p_{im}\chi_m. \tag{2}$$

Раніше фотопружний ефект досліджували в низці діелектричних кристалів [1–6], де було виявлено досить високі пружнооптичні коефіцієнти, їхню суттєву дисперсійну та температурну залежності. Особливо збільшилася кількість робіт, присвячених вивченню фотопружності в кристалах, що мають різні класи симетрії [7–14]. Це зумовлено пошуком нових оптичних матеріалів з високою акустооптичною (АО) ефективністю. Серед таких матеріалів вирізняються кристали K_2SO_4, які широко використовують в оптоелектроніці, кристалооптичній сенсориці (датчики температури, тиску і електромагнітного випромінювання), а також для акустооптичної модуляції ультрафіолетового випромінювання. Область їхнього використання постійно розширюється і умови експлуатації стають дедалі складнішими. Проблеми, які при цьому виникають, потребують прогнозування поведінки конструктивних матеріалів в екстремальних умовах, модифікації фізичних властивостей або створення нових матеріалів із специфічними характеристиками. Одним з найпростіших методів зміни оптичних і діелектричних властивостей кристалів є введення різних домішок заміщення або зовнішній вплив.

Кристали K_2SO_4 (СК) – типові представники діелектричних кристалів, у яких за температури 860 К має місце фазовий перехід (ФП) з центросиметричної параелектричної фази (просторова група симетрії D^6_{6h}-$P6_3/mmc$ (c_1 = 7,90 Å, b_1 = 10,12 Å, a_1 = 5,84 Å, Z = 2, при цьому $a_0 \parallel c_1$)) в орторомбічну сегнетоеластичну фазу (просторова група симетрії D^{16}_{2h}-$Pmcn$ (c_0 = 7,48 Å, b_0= 10,07 Å, a_0 = 5,76 Å, Z = 4 [1,2])). Сегнетоеластичний ФП в кристалах СК проходить крізь проміжну фазу (853–860 К), є фазовим переходом І-го роду з деяким внеском ФП ІІ-го роду і зумовлений пом'якшенням акустичних коливань, а також упорядкуванням груп SO_4^{2-} [15–18].

Вивчення пружнооптичного ефекту засвідчило, що коефіцієнти акустооптичної ефективності M_2 чистого кристала сульфату калію більш ніж на порядок вищі від коефіцієнтів у кристалах кварцу і бората стронцію, які придатні для акустооптичної модуляції світла в ультрафіолетовому спектральному діапазоні [19–21].

Одним із методів зовнішнього впливу на кристали і, відповідно, зміни їхніх фізичних властивостей, є механічне напруження. Ефективним механізмом зміни фізичних параметрів кристалів є також уведення домішок. В якості домішки останнім часом використовують іони перехідних металів, які мають незаповнену d-оболонку. Так дослідження спектрів поглинання, збудження і випромінювання люмінесценції кристалів СК з домішкою Tl^+ виявило появу нових смуг при 5,75 еВ і 7,35 еВ. Зі збільшенням концентрації іонів талію додатково виникають нові смуги поглинання [22].

Показано [23], що в кристалі K_2SO_4, активованого іонами Co^{2+}, за кімнатної температури простежують смуги поглинання при 4,57, 4,96 і 5,85 еВ, які не були виявлені в чистому кристалі. Оптична густина смуг поглинання збільшується зі збільшенням концентрації домішкових центрів. Зі спектрів ЕПР виявлено, що домішка Mn^{2+} [23, 24] в ґратці сульфату калію створює декілька типів парамагнітних центрів, що зумовлено варіацією положення катіонної вакансії, компенсує збитковий заряд гетеревалентної домішки. Під час внесення в кристал СК домішкових

іонів двовалентної міді Cu^{2+} у спектрах поглинання виникають дві смуги поглинання: інтенсивна короткохвильова смуга з максимумом при 5,17 еВ і менш інтенсивна широка безструктурна смуга в області 1,03–1,91 еВ.

З'ясовано [25, 26], що введення 1,7% домішки міді в кристалі сульфату калію приводить до змін абсолютної величини двозаломлення Δn_i, зменшення показників заломлення n_i приблизно на 0,001–0,002, зміщення положення центрів ультрафіолетових осциляторів λ_{01} у довгохвильову область спектра, зменшення сили відповідних осциляторів і електронної поляризованості.

Мета цієї роботи – вивчення впливу механічного напруження і домішки міді 1,7 і 3% на рефрактивні властивості кристалів сульфату калію з метою з'ясування можливості покращення їх властивостей і використання в оптоелектроніці.

2. Методика експерименту

Досліджувані кристали отримано методом повільного випаровування за кімнатної температури з водного розчину солей чистого сульфату калію K_2SO_4 і кристалогідрата сульфату міді $CuSO_4{\cdot}5H_2O$. Маса останнього становила 1,7 і 3% від загальної маси розчинених солей (9,83 г сульфату калію і 0,17 г кристалогідрата сульфату міді або 9,70 г сульфату калію і 0,30 г кристалогідрата міді). Відповідні солі розчиняли в дистильованій воді (100 мл) і перемішували протягом 3 годин. Для забезпечення максимальної якості отриманих кристалів проводили попередню багаторазову перекристалізацію і фільтрування розчину. Температура розчину становила 293 К і контролювалася термостатом з точністю 0,5 К. Вирощування проводили зі спонтанно утворених зародків з псевдо-гексагональною морфологією. Отримані таким способом упродовж 20 діб кристали володіли хорошою оптичною якістю, а також мали добре розвинену кристалографічну огранку у вигляді видовженої призми розміром приблизно $8{\cdot}8{\cdot}10$ мм^3.

У спектральному діапазоні 300–700 нм дисперсію показників заломлення вивчали відомим імерсійним методом Обреїмова [27,29] з точністю $2{\cdot}10^{-4}$. Для такого методу зникає необхідність вимірювання товщини або інших геометричних характеристик зразка, що загалом зменшує похибку вимірювань. Основна ідея методу – порівняння показника заломлення досліджуваного кристала з рідинами, показник заломлення яких відомий. Як імерсійну рідину використано суміш α-монобромнафталіну і чистої нафти. Для вимірювань використано рефрактометр ІРФ-23, оснащений системою термостатування і приставкою Обреїмова. Показник заломлення визначають зі співвідношення:

$$n_{\text{кр}} = n_{\text{ср}} + \frac{k\lambda}{d}, \tag{3}$$

де $n_{\text{кр}}$ і d – відповідно показник заломлення і товщина досліджуваного зразка, k – порядок інтерференційних смуг.

Двозаломлення Δn_i досліджували спектроскопічним методом, який дає можливість вивчати дисперсію Δn_i в широкому спектральному діапазоні, а також одночасно його температурні зміни в широкій спектральній області [27,29]. Досліджуваний зразок встановлювали в кріостат у діагональне положення між схрещеними ніколями. У випадку проходження через таку систему пучка білого світла в фокальній

площині спектрографа виникала інтерференційна картина. Умовою появи інтерференційних екстремумів у спектрі є рівність:

$$d(n_i - n_j) = k\lambda, \tag{4}$$

де k – порядок інтерференційного максимуму; d – товщина зразка вздовж ходу променів; n_i і n_j – показники заломлення в кристалофізичних напрямах i та j. Порядок інтерференційної картини визначали за відомими значеннями показника заломлення.

У досліджуваному спектральному діапазоні на основі КСВУ-23 записуєть спектральну залежність інтенсивності пропускання системи схрещених поляризаторів і зразка між ними в діагональному положенні, яку описують відомим співвідношенням [27]:

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\pi}{\lambda} \Delta n_i d_i, \tag{5}$$

де I_0 і I — інтенсивності падаючого та пройденого пучків; Δn_i – величина двозаломлення. За екстремумами інтерференційної картини знаходимо спектральну залежність різниці ходу (5) і Δn_i.

У випадку одновісного стискання зразка за допомогою спеціального пристосування, спостерігається спектральне зміщення інтерференційних смуг, що відповідає зміні двозаломлення. Баричні зміни Δn_i при цьому визначатимуться співвідношенням

$$\Delta n_i(\lambda, \sigma_i) = k\lambda / d(\sigma). \tag{6}$$

Вимірювання проводилися до тиску $\sigma_i \sim$200 бар. Точність вимірювання двозаломлення становила $\delta\Delta n_i = \pm 2 \cdot 10^{-5}$.

3. Результати і обговорення

Дослідження дисперсійних залежностей показників заломлення кристалів K_2SO_4 з домішкою міді за кімнатної температури засвідчили, що в спектральному діапазоні 300–700 нм дисперсія $n_i(\lambda)$ є нормальною і під час наближення до краю поглинання різко зростає (рис. 1).

Порівняння отриманих значень n_i для домішкових кристалів з відповідними для чистого кристала показує, що введення домішки призводить до зменшення n_i приблизно на 0,001–0,003. При цьому співвідношення між їх величинами і дисперсійними змінами $n_z > n_x > n_y$, $dn_z/d\lambda > dn_x/d\lambda > dn_y/d\lambda$ залишаються незмінними.

Оскільки під час введення домішки найбільше зменшується показник заломлення n_x (X – відповідає напрямку, перпендикулярному до площини оптичних осей), то це означає, що зменшується розмір оптичної індикатриси даних кристалів.

На підставі експериментальних результатів, використовуючи дисперсійні формули Зельмеєра:

$$n_i^2 = 1 + \frac{B_{1i}\lambda^2\lambda_{01}^2}{\lambda^2 - \lambda_{01}^2} + \frac{B_{2i}\lambda^2\lambda_{02}^2}{\lambda_{02}^2 - \lambda^2} \cong 1 + \frac{B_{1i}\lambda^2\lambda_{01}^2}{\lambda^2 - \lambda_{01}^2} - B_{2i}\lambda^2, \tag{7}$$

і Лорентц-Лоренца, які описують рефракцію R_i і електронну поляризованість α_i:

$$\alpha = \frac{3}{4\pi N}\frac{n^2-1}{n^2+2}, \qquad R = \frac{4\pi N\alpha}{3} = \frac{\mu}{\rho}\frac{n^2-1}{n^2+2}, \tag{8}$$

(де N – число частинок в одиниці об'єму; μ – молярна маса; ρ – густина кристала; λ_{01}, λ_{02} – довжини хвиль максимуму смуг поглинання ультрафіолетових (УФ) та інфрачервоних (ІЧ) осциляторів; B_{1i} та B_{2i} – відповідні їхні ефективні сили) розраховано кристалооптичні параметри домішкових кристалів СК. У табл. 1 представлені значення рефрактивних параметрів для чистого і домішкових кристалів. У цій самій таблиці наведені параметри кристалічної ґратки чистих і домішкових кристалів СК, які були використані для розрахунків.

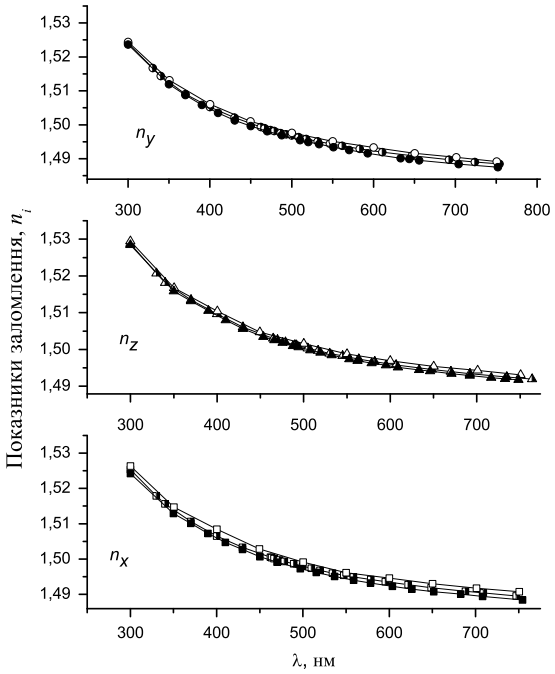

Рис. 1: Дисперсія показників заломлення чистого (світлі точки) і з домішками міді (1,7% (напівтемні точки) і 3% (темні точки)) кристалів K_2SO_4 за кімнатної температури

З таблиці видно, що введення домішки призводить до зміщення положення центрів УФ осциляторів λ_{01} в довгохвильову область спектра приблизно на 3,5 нм (чим більша концентрація, тим більше зміщення). При цьому зменшується сила відповідних осциляторів, величина електронної поляризованості кристала.

Табл. 1: Параметри оптичної індикатриси та кристалічної ґратки кристалів K_2SO_4 з домішками міді за кімнатної температури

	B_i, 10^{-6} нм$^{-2}$	B_i', 10^{-9} нм$^{-2}$	λ_{0i}, нм	R_i,10^{-6} м^3	α_i, 10^{-24} см^3
X (чистий)	148,033	6,738	90,322	19,217	7,622
X (Cu wt 1,7%)	142,961	4,610	91,734	19,185	7,609
X (Cu wt 3%)	135,432	2,195	94,046	19,158	7,599
Y (чистий)	147,527	6,137	90,329	19,164	7,601
Y (Cu wt 1,7%)	142,757	3,742	91,673	19,144	7,593
Y (Cu wt 3%)	134,921	1,504	94,096	19,125	7,586
Z (чистий)	146,175	4,576	91,130	19,295	7,653
Z (Cu wt 1,7%)	140,231	2,217	92,859	19,269	7,643
Z (Cu wt 3%)	134,597	0,608	94,657	19,263	7,640
	a, Å	b, Å	c, Å	V, Å^3	густина ρ, г/см^3
чистий	7,4776	5,7704	10,0712	434,56	2,66
Cu wt 1,7%	7,4773	5,7716	10,0738	434,74	2,649
Cu wt 3,0%	7,4777	5,7717	10,0735	434,76	2,641

Можна зробити висновок, що введення домішки підвищує анізотропію кристалів СК. Домішка міді збільшує структурні одиниці в елементарній комірці та зменшення рефракції хімічних зв'язків.

Для з'ясування зміни величини анізотропії в роботі було розраховано кількісний коефіцієнт A_{n-1}, який характеризує анізотропію електронної підсистеми кристала [28]:

$$A_{n-1} = \sum_{i,j=1\ i\neq j}^{3} \frac{|(n_i-1)-(n_j-1)|}{(n_i-1)+(n_j-1)} = \frac{|(n_y-1)-(n_x-1)|}{(n_y-1)+(n_x-1)} + \\ + \frac{|(n_z-1)-(n_y-1)|}{(n_z-1)+(n_y-1)} + \frac{|(n_x-1)-(n_z-1)|}{(n_x-1)+(n_z-1)}. \tag{9}$$

За розрахунками значення коефіцієнтів A_{n-1} за кімнатної температури: $A_{n-1} = 0,0074$ (чистий кристал); 0,0077 (K_2SO_4:Cu wt 1,7%) і 0,0081 (K_2SO_4:Cu wt 3,0%). Видно незначне збільшення величини анізотропії кристала під час введення в нього домішки.

Така зміна зумовлена тим, що у кристалах СК реалізується іонно-ковалентний зв'язок, ковалентний – у тетраедричних аніонних групах SO_4^{2-}, а іонний утворюють іони калію в вершинах тетраедра [30,31]. Іони K^+ знаходяться в кристалі сульфату калію в двох нееквівалентних положеннях K_1 і K_2, що відрізняються оточенням. Катіон K_1 має координацію – 10, катіон K_2 – 9 відносно атома кисню. Тетраедри SO_4 розташовані основами в кулі K_1O_3, а вершинами – в шарі K_2O. Оскільки шари K_2O майже плоскі і зміщені один відносно іншого в площині X-Y так, що в межах однієї елементарної комірки іони одного шару розташовані навпроти пустот наступного шару K_2O. Шар K_1O_3 є затиснутий між шарами K_2O, що мають зигзагоподібні щілини. Внаслідок цього, а також того, що плоскі шари K_1O_3 і K_2O не збігаються за розмірами під час накладення один на одного, то шари K_1O_3 деформуються, вони стають гофрованими. Так, розміри елементарної ромбічної комірки і, відповідно,

оптичні параметри, визначаються упакуванням іонів в шарі K_1O_3 без урахування і з урахуванням його гофрування та взаємного упакування шарів K_1O_3 і K_2O.

На рис. 2 показано дисперсію двозаломлення чистих і домішкових кристалів СК для різних значень одновісного тиску σ_m за кімнатної температури. Видно, що введення домішки незначно змінює абсолютну величину Δn_i, не змінюючи при цьому характеру дисперсії $|\frac{\partial \Delta n_x}{\partial \lambda}|>|\frac{\partial \Delta n_y}{\partial \lambda}|>|\frac{\partial \Delta n_z}{\partial \lambda}|$. Виявлено такі зміни абсолютної величини двозаломлення Δn_i: в X- і Y-напрямах збільшення приблизно на $5{,}2{\cdot}10^{-4}$ і $6{,}8{\cdot}10^{-4}$, в Z-напрямку зменшення на $1{,}4{\cdot}10^{-4}$ і $2{,}1{\cdot}10^{-4}$ для домішок 1,7% и 3,0%, відповідно. Окрім того, простежують зменшення величини $\partial \Delta n_i/\partial \lambda$: від $3{,}5{\cdot}10^{-6}$ (чистий кристал) до $3{,}2{\cdot}10^{-6}$ нм$^{-1}$ і $3{,}0{\cdot}10^{-6}$ нм$^{-1}$ для домішок 1,7 і 3,0%, відповідно.

З рисунка також видно, що напруження σ_x і σ_y ведуть до різних за величиною змін Δn_z: $\delta(\Delta n_z) = 1,10 \cdot 10^{-4}$ і $1,56 \cdot 10^{-4}$ (σ_x=100 бар) і $\delta(\Delta n_z) = -1,60 \cdot 10^{-4}$ і $-1,71 \cdot 10^{-4}$ (σ_y=100 бар) для домішок 1,7 і 3,0%, відповідно. Криві $\Delta n_z(\lambda)$ під дією напруження якісно не змінюються, проте їхня дисперсія зменшується для тиску σ_x, яке веде до збільшення Δn_z, і збільшується для σ_y, що призводить до зменшення Δn_z.

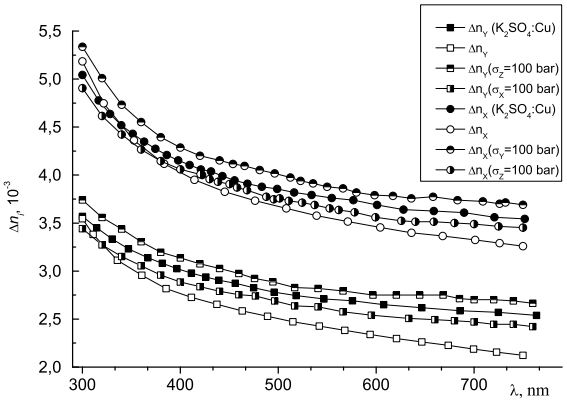

Рис. 2: Дисперсія двозаломлення кристалів K_2SO_4 за кімнатної температури: світлі точки – чистий кристал; темні точки – домішковий механічно вільний і затиснутий кристал

Аналогічні залежності виявлені для Δn_x і напруження σ_y і σ_z. Тут також маємо різні знаки, різні величини і дисперсійні зміни Δn_x, хоча, в цілому, вони дещо більше, ніж у випадку Δn_z: $\delta(\Delta n_x) = 1,38{\cdot}10^{-4}$ і $1,79{\cdot}10^{-4}$ для σ_y і $-1,62{\cdot}10^{-4}$ і $-1,97{\cdot}10^{-4}$ для тисків σ_z і домішок 1,7% і 3,0%, відповідно. При цьому також має місце зміна величини дисперсії $d\Delta n_i/d(\lambda)$.

Загалом, встановлено, що дія одновісного механічного тиску уздовж осі X призводить до збільшення Δn_z і зменшення Δn_y; вздовж осі Y – двозаломлення Δn_z зменшується, а Δn_x зростає і при тиску уздовж осі Z – Δn_x збільшується, а Δn_y – зменшується.

На основі отриманого експериментального матеріалу були розраховані комбіновані п'єзооптичні константи π^0_{im} (рис. 3).

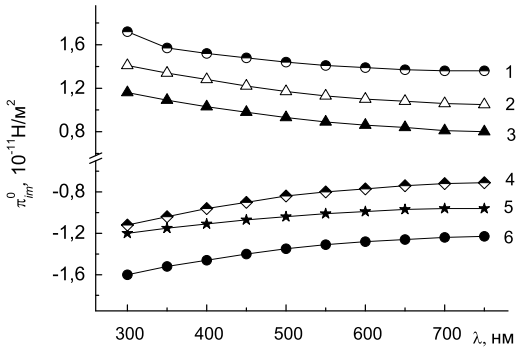

Рис. 3: Спектральні залежності комбінованих п'єзооптичних коефіцієнтів домішкових кристалів K_2SO_4 (Cu wt 3%) за кімнатної температури: 1 – π^0_{12}; 2 – π^0_{23}; 3 – π^0_{31}; 4 – π^0_{21}; 5 – π^0_{32}; 6 – π^0_{13}.

Порівняння коефіцієнтів π^0_{im} чистих і домішкових кристалів вказує на їх незначне зменшення ($\Delta\pi^0_{im} \sim 6-8$ Бр), що свідчить про збільшення механічної жорсткості домішкових кристалів. Особливістю поведінки π^0_{im} домішкових кристалів СК є їх значна дисперсійна залежність ($d\pi^0_{im}/d\lambda \approx 8-11$ Бр/нм), при цьому характер дисперсії $d\pi^0_{im}/d\lambda < 0$ відповідає дисперсії показників заломлення $dn_i/d\lambda < 0$.

Різні знаки і спектральні зміни π^0_{im} вказують на те, що вплив одновісного напруження вздовж кристалофізичних осей X, Z і Y приводить до різного характеру змін індукованого Δn_i кристала СК.

Використовуючи отримані експериментальні зміни $\pi^0_{im}(\lambda)$, а також відомі співвідношення Поккельса для п'єзодвозаломлення ромбічних кристалів [29]:

$$\begin{aligned}
n_1^3\pi_{11} - n_2^3\pi_{21} &= 2(\pi^0_{31} - S_{13}(n_2 - n_1)) \\
n_1^3\pi_{11} - n_3^3\pi_{31} &= 2(\pi^0_{21} - S_{12}(n_3 - n_1)) \\
n_2^3\pi_{22} - n_3^3\pi_{32} &= 2(\pi^0_{12} - S_{12}(n_3 - n_2)) \\
n_2^3\pi_{22} - n_1^3\pi_{12} &= 2(\pi^0_{32} - S_{23}(n_1 - n_2)) \\
n_3^3\pi_{33} - n_2^3\pi_{23} &= 2(\pi^0_{13} - S_{13}(n_2 - n_3)) \\
n_3^3\pi_{33} - n_1^3\pi_{13} &= 2(\pi^0_{23} - S_{23}(n_1 - n_3)) \\
n_1^3\pi_{11} - \frac{1}{2}n_{23}^3(\pi_{21} + \pi_{31}) &= 2\pi^0_{41} + (n_1 - n_{23})(S_{12} + S_{13}) \\
n_2^3\pi_{22} - \frac{1}{2}n_{13}^3(\pi_{32} + \pi_{22}) &= 2\pi^0_{52} + (n_2 - n_{13})(S_{12} + S_{23}) \\
n_3^3\pi_{33} - \frac{1}{2}n_{13}^3(\pi_{13} + \pi_{23}) &= 2\pi^0_{63} + (n_3 - n_{12})(S_{13} + S_{23})
\end{aligned} \tag{10}$$

ми оцінили абсолютні п'єзооптичні коефіцієнти π_{im} домішкових кристалів K_2SO_4 за кімнатної температури (рис. 3).

Поворотно-зсувні компоненти ПОК визначали так. Коефіцієнт π_{44} описує поворот оптичної індикатриси навколо осі X у разі дії зсувної компоненти σ_4 тензора механічних напружень. Коефіцієнт π_{44} визначався зі співвідношення

$$\pi_{22}+\pi_{23}+\pi_{32}+\pi_{33}+2\pi_{44}=-\frac{4\lambda}{n_4^3\sigma_{44}^0}+2(S_{22}+2S_{23}+S_{33}-S_{14})\frac{n_4-1}{n_4^3}. \qquad (11)$$

Коефіцієнт π_{55} описує поворот оптичної індикатриси навколо осі Y при дії зсувної компоненти σ_5 тензора механічних напружень, а коефіцієнт π_{66} описує поворот навколо осі Z у разі дії зсувної компоненти σ_6 тензора механічних напружень. Коефіцієнти π_{55} і π_{66} розраховували на основі таких співвідношень:

$$\pi_{11}+\pi_{13}+\pi_{31}+\pi_{33}+2\pi_{55}=-\frac{4\lambda}{n_5^3\sigma_{55}^0}+2(S_{11}+2S_{13}+S_{33}-S_{55})\frac{n_5-1}{n_5^3}, \qquad (12)$$

$$\pi_{11}+\pi_{12}+\pi_{21}+\pi_{22}+2\pi_{66}=-\frac{4\lambda}{n_6^3\sigma_{66}^0}+2(S_{11}+2S_{12}+S_{22}-S_{66})\frac{n_6-1}{n_6^3}. \qquad (13)$$

Для розрахунку абсолютних значень ПОК π_{im} використано значення показників заломлення цих кристалів (табл. 2). Значення показників заломлення уздовж напрямків 4, 5, і 6 розраховані на основі відомих виразів [29, 30]:

$$n_4=n_{\overline{4}}=\frac{\sqrt{2}n_2n_3}{\sqrt{n_2^2+n_3^2}}, n_5=n_{\overline{5}}=\frac{\sqrt{2}n_1n_3}{\sqrt{n_1^2+n_3^2}}, n_6=n_{\overline{6}}=\frac{\sqrt{2}n_1n_2}{\sqrt{n_1^2+n_2^2}}. \qquad (14)$$

Вирази (14) отримано методом перетину оптичної індикатриси кристала прямими $x_2=x_3$ (для $m=4$), $x_1=x_3$ (для $m=5$) і $x_1=x_2$ (для $m=6$). Відповідні показники наведено у таблиці 2.

Табл. 2: Показники заломлення чистих і домішкових кристалів K_2SO_4

	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6
Чистий кристал	1,4959	1,4922	1,4934	1,4928	1,4946	1,4940
Cu wt = 1,7%	1,4950	1,4913	1,4924	1,4918	1,4937	1,4931
Cu wt = 3,0%	1,4944	1,4902	1,4913	1,4907	1,4928	1,4923

Значення коефіцієнтів матриці пружних жорсткостей C_{mk} взято з дослідження [31]. Значення констант C_{mk} і S_{km} також були використані для розрахунку компонент матриці пружних коефіцієнтів p_{in}.

У табл. 3 показано значення абсолютних п'єзооптичних констант π_{im} кристалів СК за кімнатної температурі для довжини хвилі 632,8 нм, отриманих на основі наведених співвідношень (10)–(13). Видно, що вони слабо залежать від довжини хвилі, в середньому $d\pi_{im}/d\lambda\sim 0{,}02$ Бр/нм. Загалом п'єзооптичний ефект домішкових кристалів сульфату калію за величиною головних ПОК π_{11}, π_{22}, і π_{12} досить великий і співрозмірний з п'єзооптичним ефектом таких унікальних фотопружних матеріалів, як Tl_3AsS_4 [32] і тригліцинсульфату [17]. У табл. 3 також наведені пружнооптичні коефіцієнти p_{in}, розраховані на основі відомого матричного виразу

$$p_{in}=\pi_{im}C_{mn}, \qquad (15)$$

який для кристала СК можна деталізувати так:

$$\begin{aligned} p_{11} &= \pi_{11}C_{11} + \pi_{12}C_{12} + \pi_{13}C_{13}, \\ p_{12} &= \pi_{11}C_{12} + \pi_{12}C_{22} + \pi_{13}C_{32}, \\ p_{13} &= \pi_{11}C_{13} + \pi_{12}C_{23} + \pi_{13}C_{33}, \\ p_{44} &= \pi_{44}C_{44} \end{aligned} \tag{16}$$

і так далі. Підставляючи у вирази типу (16) значення ПОК π_{im} з табл. 2 і значення коефіцієнтів пружної жорсткості C_{mm}, отримаємо всі компоненти p_{in} тензора ПрОЕ (табл. 3).

Табл. 3: П'єзооптичні π_{im} (в Бр) та пружнооптичні π_{in} коефіцієнти домішкових кристалів сульфату калію

	π_{11}	π_{12}	π_{13}	π_{21}	π_{22}	π_{23}	π_{31}	π_{32}	π_{33}	π_{44}	π_{55}	π_{66}
1,7%	2,1	2,7	0,7	–0,8	1,0	–1,8	2,0	3,2	2,6	7,3	1,8	–2,6
3,0%	2,0	2,6	0,7	–0,7	1,0	–1,7	2,0	3,1	2,5	7,3	1,7	–2,4
	p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{21}	p_{22}	p_{23}	p_{31}	p_{32}	p_{33}	p_{44}	p_{55}	p_{66}
1,7%	0,13	0,21	0,13	0,05	0,17	0,04	0,22	0,28	0,15	0,02	0,03	–0,07
3,0%	0,12	0,20	0,11	0,04	0,15	0,03	0,20	0,26	0,14	0,01	0,02	–0,06

З табл. 3 видно, що пружнооптичний ефект, як і п'єзооптичний ефект, в домішкових кристалах сульфату калію досить відчутний – найбільші значення ПрОЕ p_{in} є у межах від 0,20 до 0,30. Відповідно, і акустооптична ефективність цих кристалів також повинна бути значною.

Оцінимо акустооптичну ефективність домішкового кристала сульфату калію на основі пружнооптичних коефіцієнтів, керуючись відомим виразом для АО якості:

$$M_2 = \frac{n_i^6 p_{in}^2}{\rho V_n^3}, \tag{17}$$

де ρ=2660 кг/м^3 [33] і V_n – це густина кристала і швидкість акустичної хвилі, відповідно.

Найбільші значення має коефіцієнт p_{32}, тому в умові для АО взаємодії в цьому випадку треба підставляти значення n_3=1,4934. Швидкість поздовжньої акустичної хвилі, яка проходить уздовж кристалофізичної осі Y, розраховували на основі рівнянь Крістофеля [34, 35]:

$$C_{ijkl}m_j m_k = \rho V^2 g_l. \tag{18}$$

Тут C_{ijkl} – компоненти тензора пружної жорсткості; m_j, m_k – компоненти одиничного вектора нормальної складової хвилі; g_l – компоненти одиничного вектора хвилі зсуву. З рівняння (18) робимо висновок, що вздовж цього напрямку може поширюватись три акустичних хвилі зі взаємно перпендикулярними векторами зсуву. Оцінена таким чином швидкість становила V_2=4292 м/с. Підставляючи отримані значення ρ, n_3, p_{32}, v_2 в рівняння (17), отримаємо M_2=4,8·10^{-15} с^3/кг. Інші геометрії АО взаємодії мають меншу АО ефективність. Зазначені максимальні значення M_2

є співмірними з M_2 таких відомих АО матеріалів, як ніобат літію, молібдат свинцю, вольфрамат кальцію і майже на порядок більше від M_2 кварцу і борату стронцію [36–38], придатних для АО модуляції світла в ультрафіолетовому спектральному діапазоні. Тому кристали сульфату калію, беручи до уваги їх короткохвильову межу області прозорості ∼170 нм [39] можуть бути використані для АТ модуляції ультрафіолетового випромінювання.

Висновки

У статті досліджено дисперсійні (300–700 нм) залежності показників заломлення $n_i(\lambda)$ і двозаломлення $\Delta n_i(\lambda)$ кристалів K_2SO_4 з домішкою міді за кімнатної температури. З'ясовано, що введення домішки приводить до зменшення n_i приблизно на 0,001–0,003, зміщення положення центрів ультрафіолетових осциляторів в довгохвильову ділянку спектрау, зменшення сили відповідних осциляторів і величини електронної поляризованості кристала. Вивчено дисперсію $\Delta n_i(\lambda)$ чистих і з домішкою кристалів для різних напрямів одновісного тиску σ_m. З'ясовано, що введення домішки трохи змінює абсолютну величину Δn_i, не змінюючи при цьому характеру дисперсії $|\frac{\partial \Delta n_x}{\partial \lambda}| > |\frac{\partial \Delta n_y}{\partial \lambda}| > |\frac{\partial \Delta n_z}{\partial \lambda}|$, дія одновісного механічного тиску вздовж різних кристалофізичних осей зумовлює різні за величиною і знаком зміни Δn_i.

Визначено величини комбінованих π^0_{im} і абсолютних п'єзооптичних коефіцієнтів π_{im} домішкових кристалів і встановлено їх незначне зменшення ($\Delta\pi^0_{im} \sim 6 \ldots 8$ Бр), порівняно з чистим кристалом, що свідчить про збільшення механічної жорсткості домішкових кристалів. Використовуючи отримані значення π_{im}, а також коефіцієнти пружної жорсткості, ми заповнили матрицю пружнооптичних коефіцієнтів p_{in} даних кристалів. Встановлено, що пружнооптичний ефект у домішкових кристалах сульфату калію досить відчутний – найбільші значення коефіцієнтів p_{in} знаходяться в межах від 0,20 до 0,30.

Оцінена акустооптична ефективність M_2 домішкового сульфату калію на основі отриманих значень пружнооптичних коефіцієнтів і швидкості акустичних хвиль, а також відомих значень густини кристала і показників заломлення. Встановлено, що величина максимальних значень коефіцієнта акустооптичної взаємодії домішкових кристалів сульфату калію вища, ніж M_2 у кристалах кварцу і борату стронцію, придатних для АО модуляції світла в ультрафіолетовому спектральному діапазоні. Надумано, враховуючи їх короткохвильову межу області прозорості ∼170 нм, використовувати дані кристали для АО модуляції ультрафіолетового випромінювання.

---

1. Mytsyk B. Piezooptical coefficients of $CaWO_4$ crystals / B. Mytsyk, Ya. Kost, N. Demyanyshyn, A. Andrushchak, I. Solskii // Crystallographiya. – 2015. – Vol. 60. – P. 130–138. doi:10.1134/S1063774514050125.
2. Buryy O. Method of extreme surfaces for optimizing geometry of acousto-optic interactions in crystalline materials: Example of $LiNbO_3$ crystals / O. Buryy, A. Andrushchak, S. Ubizskii, D. Vynnyk, O. Yurkevych, A. Larchenko, K. Chaban, O. Gotra, O. Kushnir, A. Kityk // J. Applied Physics. – 2013. – Vol. 113. – P. 083103(1–12). doi:10.1063/1.4792304.

3. Mytsyk B. Static photoelasticity of gallium phosphide crystals / B. Mytsyk, A. Andrushchak, Ya. Kost' // Crystallography Reports. – 2012. – Vol. 57. – P. 124–130. doi:10.1134/S1063774512010075.
4. Андрущак А. Просторова анізотропія фотопружного ефекту в кристалах кварцу / А. Андрущак, О. Юркевич, Н. Андрущак, О. Кушнір, А. Кітик // Електроніка та інформаційні технології. – 2011. – №. 1. – С. 98–109.
5. Andrushchak A. Spatial anisotropy of the acousto-optical efficiency in lithium niobate crystals / A. Andrushchak, E. Chernyhivsky, Z. Gotra, M. Kaidan, A. Kityk, N. Andrushchak, T. Maksymyuk, B. Mytsyk , W. Schranz // J. Applied Physics. – 2010. – Vol. 108. – P. 103118(1–5). doi:10.1063/1.3510518.
6. Mytsyk B. Piezooptical coefficients of $La_3Ga_5SiO_14$ and $CaWO_4$ crystals: A combined optical interferometry and polarization-optical study / B. Mytsyk, N. Demyanyshyn, A. Andrushchak, Ya. Kost', O. Parasyuk, A. Kityk // Optical Material. – 2010. – Vol. 33. – P. 26–30. doi:10.1016/j.optmat.2010.07.013.
7. Mahmoud A. Low-temperature phase of $BaTiO_3$: Piezoelectric, dielectric, elastic, and photoelastic properties from ab initio simulations / A. Mahmoud, A. Erba, Kh. El-Kelany, M. Rerat, R. Orlando // Phys. Rev. B. – 2014. – Vol. 89. – P. 045103 (1–9). doi:10.1103/PhysRevB.89.045103.
8. Erba A. Photoelasticity of crystals from theoretical simulations / A. Erba, R. Dovesi // Phys. Rev. B. – 2013. – Vol. 88. – P. 045121. doi:10.1103/PhysRevB.88.045121.
9. Mollaee M. IR-induced laser operated PbTe:Ca crystals / M. Mollaee, M. Roknabad, M. Razavi, M. Mollai // Optical and Quantum Electronics. – 2013. – Vol. 45. – P. 919–924. doi:10.1007/s11082-013-9698-9.
10. Xia S. Phase-Multiplied Photoelastic and Series Interferometer Arrangement for Full-Field Stress Measurement in Single Crystals / S. Xia, M. Mello // Experimental Mechanics. – 2011. – Vol. 51. – P. 653–666. doi:10.1007/s11340-010-9448-x.
11. Pfeiffer J. Measuring photoelastic coefficients with Schaefer–Bergmann diffraction / J. Pfeiffer, K. Wagner // Applied Optics. – 2018. – Vol. 57. – P. C26–C35. doi:10.1134/S1063774514050125.
12. Natali P. Theoretical and experimental evaluation of piezo-optic parameters and photoelastic constant in tetragonal PWO / P. Natali, L. Montalto, F. Davi, P. Mengucci, A. Ciriaco, N. Paone, D. Rinaldi // Applied Optics. – 2018. – Vol. 57. – P. 730–737. doi:10.1364/AO.57.000730.
13. Mytsyk B. Study of piezo-optic effect of calcium tungstate crystals by the conoscopic method / B. Mytsyk, Ya. Kost', N. Demyanyshyn, V. Gaba, O. Sakharuk // Optical Materials. – 2015. – Vol. 39. – P. 69–73. doi:10.1016/j.optmat.2014.10.066.
14. Mytsyk B. Photoelasticity of ammonium sulfate crystals / B. Mytsyk, V. Stadnyk, N. Demyanyshyn, Ya. Kost, P. Shchepanskyi // Optical Materials. – 2019. – Vol. 88. – P. 723–728. doi:10.1016/j.optmat.2018.12.005.
15. Jonh A. Redetermination of the structures of potassium sulphate and potassium chromate: the effect of electrostatic crystal forces upon observed bond lengths / A. Jonh, M. McGinnety // Acta Cryst. B. – 1972. – Vol. 28. – P. 2845–2852. doi:10.1107/S0567740872007022.
16. Berg A. The space group and structure of α-K_2SO_4 / A. Berg, F. Tuinstra // Acta Cryst. B. – 1978. – Vol. 34. – P. 3177–3181. doi:10.1107/S0567740878010432.
17. Miyake M. Phase transition of potassium sulfate, K_2SO_4 (III); thermodynamical and

phenomenological study / M. Miyake, S. Iwai // Phys. Chem. Minerals. – 1981. – Vol. 7. – P. 211–215. doi:10.1007/BF00311891.
18. Arnold H. Longitudinal-acoustic soft mode in the phase transition of K_2SO_4 at 604°C / H. Arnold, W. Kurtz // Ferroelectrics. – 1980. – Vol. 25. – P. 557–560. doi:10.1080/00150198008207069.
19. Stadnyk V. Photoelastic Properties of Potassium Sulfate Crystals / V. Stadnyk, R. Matviiv, P. Shchepanskii, M. Rudysh, Z. Kogut // Physics of the Solid State. – 2019. – Vol. 61. – P. 2130–2133. doi:10.1134/S1063783419110374.
20. Mytsyk B. Photoelasticity of ammonium sulfate crystals / B. Mytsyk, V. Stadnyk, N. Demyanyshyn, Ya. Kost, P. Shchepanskyi // Optical Materials. – 2019. – Vol. 88. – P. 723–728. doi:10.1016/j.optmat.2018.12.005.
21. Andriyevsky B. Simulation of elasto optical properties of K_2SO_4 crystals / B. Andriyevsky, M. Romanyuk, V. Stadnyk // J. of Physics and Chemistry of Solids. – 2009. – Vol. 70. – P. 1109–1112. doi:10.1016/j.jpcs.2009.06.007.
22. Radhakrishna S. Optical and electrical properties of some sulphates doped with cobalt / S. Radhakrishna, K. Pande // Phys. Chem. Sol. – 1973. – Vol. 34. – P. 2037–2044. doi:10.1016/S0022-3697(73)80052-6.
23. Абдусабиров Р. Электронный парамагнитный резонанс ионов Cu^{2+} в K_2SO_4 / Р. Абдусабиров, Ю. Грязнов, М. Зарипов // ФТТ. – 1970. – Т. 12. – С. 657–659.
24. Chowdari B. Electron Paramagnetic Resonance of Mn^{2+} in K_2SO_4 Single Crystal / B. Chowdari, P. Venkateswarlu // J. Chem. Phys. – 1968. – Vol. 48. – P. 318–327. doi:10.1063/1.1667923.
25. Stadnyk V. Refractive Parameters and Band Energy Structure of K_2SO_4 Crystals Doped with Copper / V. Stadnyk, R. Matviiv, M. Rudysh, R. Brezvin, P. Shchepanskyi, B. Andrievskii // J. Appl. Spectrosc. – 2020. – Vol. 87. – P. 143–149. doi:10.1007/s10812-020-00975-7.
26. Матвіїв Р. Структура та рефрактивні параметри домішкових кристалів K_2SO_4 / Р. Матвіїв, М. Рудиш, В. Стадник, Р. Брезвін, І. Матвіїшин, Л. Карплюк // Вісник ЛНУ, сер. фіз. – 2018. – Вип. 55. – С. 50–61. doi:10.30970/vph.55.2018.50.
27. Романюк М. О. Кристалооптика: навч. посібник. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2017. 456 с.
28. Podsiadla D. Dilatometric and optical properties of $(CH_3)_2NH_2Ga(SO_4)_2{\cdot}6H_2O$ crystals in paraelectric and ferroelectric phases / D. Podsiadla, Z. Czapla, B. Andriyevsky, O. Myshchyshyn // Phys. Status Solidi (B). – 2001. – Vol. 223. – P. 729–736. doi:10.1002/1521-3951(200102)223:3<729::AID-PSSB729>3.0.CO;2-4.
29. Нарасимхамурти Т. С. Фотоупругие и электрооптические свойства кристаллов. Москва : Мир, 1984. 684 с.
30. Stadnyk V. Optical and electronic parameters of $RbNH_4SO_4$ crystals / V. Stadnyk, M. Romanyuk, R. Brezvin // Ferroelectrics. – 1997. – Vol. 192. – P. 203–207. doi:10.1080/00150199708216190.
31. Александров К. С., Безносиков Б. В. Структурные фазовые переходы в кристаллах (семейства сульфата калия). Новосибирск : Наука, 1993. 286с.
32. Александров К. С., Безносиков Б. В. Кристаллохимические закономерности изменения структур, родственных типу α-K_2SO_4 [препринт]. Красноярск : АН СССР, сиб. отд., ин-т физики им. Л.В. Киренского, 1985. 44 с.
33. Stadnyk V. The baric changes of the refractive properties of K_2SO_4 crystals /

V. Stadnyk, M. Romanjuk, O. Chyzh, V. Vachulovych // Condensed Matter Physics. – 2007. – Vol. 10. – P. 45–50. doi:10.5488/CMP.10.1.45.

34. Gaillac R. ELATE: an open-source online application for analysis and visualization of elastic tensors / R. Gaillac, P. Pullumbi, F.-X. Coudert // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2016. – Vol. 28. – P. 275201. doi:10.1088/0953-8984/28/27/275201.
35. Винчелл А. Н., Винчелл Г. Оптические свойства искуственных минералов. Москва : Мир, 1967. 526с.
36. Сиротин Ю. И., Шаскольская М. П. Основы кристаллофизики. Москва : Наука, 1979. 640с.
37. Weber M. J. Handbook of optical materials. Boca Raton, London, New York, Washington : CRC PRESS, 2002. 536с.
38. Шаскольская М. П. Акустические кристаллы. Москва : Наука, 1982. 632с.
39. Андриевский Б. Поляризационно-оптические свойства кристаллов K_2SO_4 в области собственного поглощения / Б. Андриевский, В. Курляк, Н. Романюк // Изв. АН СССР, серия физическая. – 1989. – Т. 53. – С. 1335–1338.

References

1. B. Mytsyk, Ya. Kost, N. Demyanyshyn, A. Andrushchak and I. Solskii, Crystallographiya. **60**, 130–138 (2015). doi:10.1134/S1063774514050125.
2. O. Buryy, A. Andrushchak, S. Ubizskii, D. Vynnyk, O. Yurkevych, A. Larchenko, K. Chaban, O. Gotra, O. Kushnir and A. Kityk, J. Applied Physics. **113**, 083103(1–12) (2013). doi:10.1063/1.4792304.
3. B. Mytsyk, A. Andrushchak and Ya. Kost', Crystallography Reports. **57**, 124–130 (2012). doi:10.1134/S1063774512010075.
4. A. Andrushchak, O. Yurkevych, V. Andrushchak, O. Kushnir and A. Kityk, Electronics and information technologies. **1**, 98–109 (2011).
5. A. Andrushchak, E. Chernyhivsky, Z. Gotra, M. Kaidan, A. Kityk, N. Andrushchak, T. Maksymyuk, B. Mytsyk and W. Schranz, J. Applied Physics. **108**, 103118(1–5) (2010). doi:10.1063/1.3510518.
6. B. Mytsyk, N. Demyanyshyn, A. Andrushchak, Ya. Kost', O. Parasyuk and A. Kityk, Optical Material. **33**, 26–30 (2010). doi:10.1016/j.optmat.2010.07.013.
7. A. Mahmoud, A. Erba, Kh. El-Kelany, M. Rerat and R. Orlando, Phys. Rev. B. **89**, 045103(1–9) (2014). doi:10.1103/PhysRevB.89.045103.
8. A. Erba and R. Dovesi, Phys. Rev. B. **88**, 045121 (2013). doi:10.1103/PhysRevB.88.045121.
9. M. Mollaee, M. Roknabad, M. Razavi and M. Mollai, Optical and Quantum Electronics. **45**, 919–924 (2013). doi:10.1007/s11082-013-9698-9.
10. S. Xia and M. Mello, Experimental Mechanics. **51**, 653–666 (2011). doi:10.1007/s11340-010-9448-x.
11. J. Pfeiffer and K. Wagner, Applied Optics. **57**, C26–C35 (2018). doi:10.1134/S1063774514050125.
12. P. Natali, L. Montalto, F. Davi, P. Mengucci, A. Ciriaco, N. Paone and D. Rinaldi, Applied Optics. **57**, 730–737 (2018). doi:10.1364/AO.57.000730.

13. B. Mytsyk, Ya. Kost', N. Demyanyshyn, V. Gaba and O. Sakharuk, Optical Materials. **39**, 69–73 (2015). doi:10.1016/j.optmat.2014.10.066.
14. B. Mytsyk, V. Stadnyk, N. Demyanyshyn, Ya. Kost and P. Shchepanskyi, Optical Materials. **88**, 723–728 (2019). doi:10.1016/j.optmat.2018.12.005.
15. A. Jonh and M. McGinnety, Acta Cryst. B. **28**, 2845–2852 (1972). doi:10.1107/S0567740872007022.
16. A. Berg and F. Tuinstra, Acta Cryst. B. **34**, 3177–3181 (1978). doi:10.1107/S0567740878010432.
17. M. Miyake and S. Iwai, Phys. Chem. Minerals. **7**, 211–215 (2009). doi:10.1007/BF00311891.
18. H. Arnold and W. Kurtz, Ferroelectrics. **25**, 557–560 (1980). doi:10.1080/00150198008207069.
19. V. Stadnyk, R. Matviiv, P. Shchepanskii, M. Rudysh and Z. Kogut, Physics of the Solid State. **61**, 2130–2133 (2019). doi:10.1134/S1063783419110374.
20. B. Mytsyk, V. Stadnyk, N. Demyanyshyn, Ya. Kost and P. Shchepanskyi, Optical Materials. **88**, 723–728 (2019). doi:10.1016/j.optmat.2018.12.005.
21. B. Andriyevsky, M. Romanyuk and V. Stadnyk, J. of Physics and Chemistry of Solids. **70**, 1109–1112 (2009). doi:10.1016/j.jpcs.2009.06.007.
22. S. Radhakrishna and K. Pande, Phys. Chem. Sol. **34**, 2037–2044 (1973). doi:10.1016/S0022-3697(73)80052-6.
23. R. Abdusabirov, Yu. Grjaznov and M. Zaripov, Physics of the solid state. **12**, 657–659 (1970).
24. B. Chowdari and P. Venkateswarlu, J. Chem. Phys. **48**, 318–327 (1968). doi:10.1063/1.1667923.
25. V. Stadnyk, R. Matviiv, M. Rudysh, R. Brezvin, P. Shchepanskyi and B. Andrievskii, J. Appl. Spectrosc. **87**, 143–149 (2020). doi:10.1007/s10812-020-00975-7.
26. R. Matviiv, M. Rudysh, V. Stadnyk, R. Brezvin, I. Matvii'shyn and L. Karpljuk, Visnyk of the Lviv University, series physics. **55**, 50–61 (2018). doi:10.30970/vph.55.2018.50.
27. M. O. Romanyuk, Crystalooptics: tutorial (Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, 2017).
28. D. Podsiadla, Z. Czapla, B. Andriyevsky and O. Myshchyshyn, Phys. Status Solidi (B). **223**, 729–736 (2001). doi:10.1002/1521-3951(200102)223:3<729::AID-PSSB729>3.0.CO;2-4.
29. T. S. Narasimhamurti, Photoelastic and electrooptical properties of crystals (Mir, Moscow, 1984).
30. V. Stadnyk, M. Romanyuk and R. Brezvin, Ferroelectrics. **192**, 203–207 (1997). doi:10.1080/00150199708216190.
31. K. S. Aleksandrov, B. V. Beznosikov, Structural phase transitions in crystals (potassium sulfate family) (Nauka, Novosibirsk, 1993).
32. K. S. Aleksandrov, B. V. Beznosikov, Crystalochemical regularity of structural change related to the type of α-K_2SO_4 [preprint] (AN SSSR, sib. otd., in-t fiziki im. L.V. Kirenskogo, Krasnoyarsk, 1985).

33. V. Stadnyk, M. Romanyuk, O. Chyzh and V. Vachulovych, Condensed Matter Physics. **10**, 45–50 (2007). doi:10.5488/CMP.10.1.45.
34. R. Gaillac, P. Pullumbi and F.-X. Coudert, Journal of Physics: Condensed Matter. **28**, 275201 (2016). doi:10.1088/0953-8984/28/27/275201.
35. A. N. Vinchell, G. Vinchell, Optical properties of artificial minerals (Mir, Moscow, 1967).
36. Ju. I. Sirotin, M. P. Shaskol'skaja, Fundamentals of Crystalophysic (Nauka, Moscow, 1979).
37. M. J. Weber, Handbook of optical materials (CRC PRESS, Boca Raton, London, New York, Washington, 2002).
38. M. P. Shaskol'skaja, Acoustic crystals (Nauka, Moscow, 1982).
39. B. Andrievskij, V. Kurljak and M. Romanyuk, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. **53**, 1335–1338 (1989).

Статтю отримано: 11.05.2020
Прийнято до друку: 01.10.2020

Photoelastic effect of K_2SO_4 crystals doped by copper

R. Matviiv[1], V. Stadnyk[1]

[1] *Ivan Franko National University of Lviv*
Dragomanova St, 19, 79005 Lviv, Ukraine
e-mail: romanmatvijw@gmail.com

The spectral dependences (300–700 nm) of the refractive indices n_i and the spectral-baric dependences of the birefringence $\Delta n_i(\lambda)$ of K_2SO_4 crystals with copper impurities (1,7% and 3,0%) have been investigated and their crystal-optical parameters have been calculated. The introduction of impurity leads to a decrease in n_i values and causes a shift of the position of the ultraviolet oscillators centers to the long-wavelength spectrum region along with a decrease in the strength of the corresponding oscillators. The values of the electronic polarizability also decrease. The dispersion $\Delta n_i(\lambda)$ of pure and doped crystals for different directions of uniaxial pressure σ_m have been studied. The introduction of impurity slightly changes the absolute value of $\Delta n_i(\lambda)$, without changing the nature of the dispersion. It is shown that uniaxial mechanical pressure along different crystalophysics axes leads to changes in magnitude and sign of $\Delta n_i(\lambda)$. The values of the combined π^0_{im} and absolutely π_{im} piezooptical and elastic-optical p_{im} coefficients of doped crystals have been determined. Their insignificant decrease in comparison with a pure crystal have been established that testifies about increase of mechanical rigidity of doped crystals. The matrix of elastic-optical coefficients p_{in} of these crystals have been filled. It is established that the elastic-optical effect in doped crystals of potassium sulfate is quite noticeable. The coefficient of acousto-optical efficiency M_2 was calculated and it is shown that in the magnitude of the maximum values he is commensurate for crystals of quartz and strontium borate. It is proposed , considering the short wave-length limit of the transparency region of potassium sulfate crystals ($\sim$170 nm), use they for acousto-optical modulation of ultraviolet radiation.

Key words: refractive indices, birefringence, piezooptical and elastic-optical coefficients, acousto-optical efficiency