

УДК 537.94

PACS number(s): 77.80Bh, 78.20Fm

АВТОМАТИЗОВАНА УСТАНОВКА З ВИМІРЮВАННЯ ВЕЛИЧИНИ ПОВОРОТУ ОПТИЧНОЇ ІНДИКАТРИСИ

С. Свелеба, І. Куньо, І. Катеринчук,
О. Семотюк, І. Карпа, В. Куньо,
Ю. Панківський¹

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
факультет електроніки, кафедра нелінійної оптики
вул. ген. Тарнавського 107, 79017 Львів, Україна
e-mail: sveleba@electronics.wups.lviv.ua*

¹*Національний лісотехнічний університет України, кафедра екології
вул. О. Кобилянської 1, 79005 Львів, Україна
e-mail: pankivyyu@lvivonline.com*

Описано автоматизовану поляризаційно-оптичну установку з вимірювання величини кута повороту оптичної індикатрисы. Показано, що експериментальне дослідження величини повороту оптичної індикатрисы за величиною інтенсивності світлового променя характеризується незначною похибкою експерименту $\sim 1\%$ (при $\frac{\lambda}{8d} \leq \Delta n \leq \frac{3\lambda}{8d}$) та високою швидкістю вимірювання (3 точки/с).

Ключові слова: оптична індикатриса, двопроменезаломлення, залишкова інтенсивність, фазові переходи, неспівмірна фаза.

У низці праць [1–3] простежували появу в неспівмірній фазі повороту оптичної індикатрисы. Однак при цьому автори не зазначили тієї обставини, що точкова група неспівмірної фази збігається з точковою групою високотемпературної – вихідної фази, яка забороняє виникнення повороту оптичної індикатрисы. Отже, спостереження, які зроблені в [1–3], не збігаються з відомим положенням макроскопічної кристалофізики, згідно з яким симетрія тензорних властивостей кристала визначається його точковою групою [4, 5]. В умовах розгляду неспівмірної фази, як послідовності метастабільних станів (довгоперіодичних фаз), точкова група симетрії цих станів не збігається з точковою групою вихідної фази [6], а є її підгрупою [7]. За цих умов у неспівмірній фазі потрібно очікувати повороту оптичної індикатрисы, зокрема його немонотонну залежність.

Прецизійні оптичні дослідження, які проведені в роботі [8] для кристалів ВССД, дали підстави виявити незначний поворот оптичної індикатрисы ($\sim 1'-2'$) навколо осі b , який виникає зразу після T_1 і існує як в НС фазі, так і в співмірних довгоперіодичних фазах.

Вклад повороту оптичної індикатрисы в приріст двозаломлення виміряний з допомогою компенсатора Сенармона.

На рис. 1. показано температурну залежність приросту оптичного лінійного двоприменезаломлення $\delta(\Delta n_i)$ для кристалів $[\text{N}(\text{CH}_3)_4]_2\text{ZnCl}_4$ в діапазоні, що охоплював НС фазу та температурну область вихідної фази, де є скорельований рух тетраедричних груп [9]. На температурній поведінці $\delta(\Delta n_i)$ у вихідній фазі спостерігається зміна нахилу залежності $\delta(\Delta n_c) \sim f(T)$ при $T^* = 345\text{K}$. Далі з пониженням температури $\delta(\Delta n_c) \sim f(T)$ є нелінійною аж до фазового переходу в НС фазу. Про внесок у $\delta_s(\Delta n_c) \sim f(T)$ повороту індикатрисы засвідчує температурна залежність залишкової інтенсивності (див. рис. 1.). Згідно з рис. 1 величина залишкової інтенсивності зростає у разі наближення до T_i . Для обґрунтування цього розглянемо вклад повороту оптичної індикатрисы у двозаломлення.

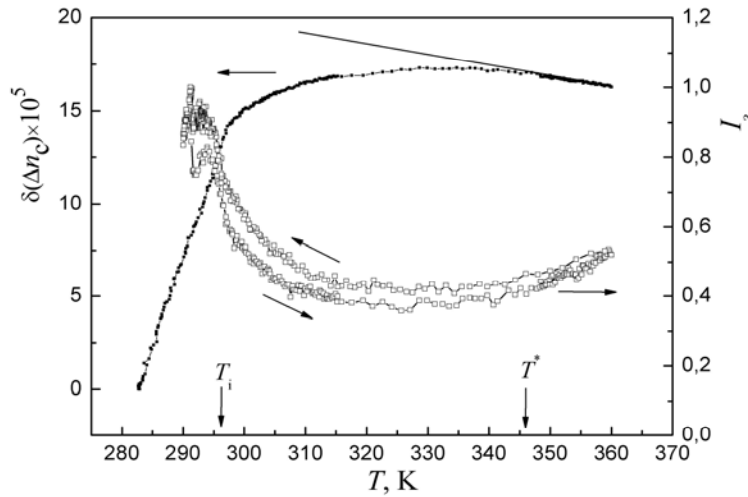


Рис. 1. Температурна залежність двозаломлення $\delta(\Delta n_c)$ і залишкової інтенсивності I_3 для кристалів $[\text{N}(\text{CH}_3)_4]_2\text{ZnCl}_4$ попередньо відпалених у діапазоні температур 340–360K, де й відбувалось юстування системи

Метод Сенармона забезпечує високу точність вимірювання приростів оптичного двозаломлення $\delta(\Delta n)$ і ґрунтується на аналізі еліптичної поляризації світла, що виходить з досліджуваного зразка. Загалом, еліптично поляризоване коливання отримують унаслідок складання двох лінійно поляризованих коливань з амплітудами a і b , між якими є певна різниця фаз δ_ϕ і взаємно перпендикулярні напрямки поляризації.

Зв'язок різниці фаз з величиною кута повороту нової системи координат у цьому методі можна подати у вигляді:

$$\text{tg } 2\tilde{r} = \frac{\text{tg } 2r \cos \delta_\phi}{1 - \text{tg } 2r \sin \delta_\phi}. \quad (1)$$

Остання рівність не залежить від δ_ϕ при значеннях величини кута між лінійно-поляризованим світлом та кристалооптичними осями досліджуваного зразка $\beta = 45^\circ$, тоді і $\theta = 45^\circ$ (рис. 2).

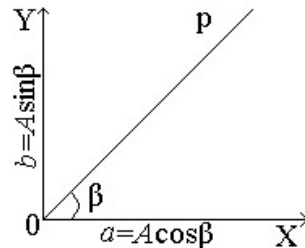


Рис. 2. Складання двох коливань, лінійно поляризованих у взаємоперпендикулярних напрямках з деякою різницею фаз

У реальному експерименті повного погасання, передбаченого умовами (1), досягнути не вдається. Просвітлення системи, що виникло в процесі зміни температури зразка – залишкову інтенсивність (I_z), виходячи з виразу (1), можна пояснити випадком, коли $\beta \neq 45^\circ$. Це свідчить про поворот оптичної індикатриси досліджуваного кристала.

Незначна величина повороту оптичної індикатриси у неспівмірній фазі ставить вимоги до методики її дослідження та точності вимірювань кута повороту (φ). З огляду на це розглянемо поляризаційно-оптичний метод досліджень φ , оскільки цей метод при врахуванні похибок (конструктивних, якості обробки зразка) дозволяє проводити прецизійні дослідження φ .

Даний метод забезпечує високу точність вимірювання кута повороту оптичної індикатриси, він ґрунтується на аналізі інтенсивності світла, який пройшов через систему: поляризатор–кристал–аналізатор, виставлених у схрещене положення.

З метою проведення досліджень було створено автоматизовану поляриметричну установку, що зображена на рис. 3.

Як джерело світла використовують малопотужний газовий лазер ЛГН-105 з довжиною хвилі генерації $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ та з високим ступенем монохроматичності світла $\Delta\lambda \approx 10^{-2} \text{ \AA}$. Поляризуючими пристроями є призми Глана–Томсона, ступінь поляризації світла яких становить 99,999%. Як відлікового пристрою (не в автоматичному режимі роботи) використовували лімб теодоліта, який має розрахунок кутової координати з точністю 20 кут.сек. Напряму на пічці задають програмно, що дало змогу отримати різні закони зміни температури. Відлік проводять так: при запуску обладнання встановлюють нульову точку інтенсивності. Для цього вручну оптичну схему ставлять у положення повного погасання поля зору. Потім починається автоматичне керування установкою, яка знаходить мінімум оптичного сигналу, що потрапив крізь аналізатор. Цей процес відбувається так: протягом 40 кроків вимірюють кут повороту індикатриси та амплітуди сигналу на контрольному виході ППВП. Гармонічний сигнал з контрольного виходу ППВП за допомогою амплітудного детектора перетворюється в постійну напругу, значення якої визначаються АЦП. Ці дані

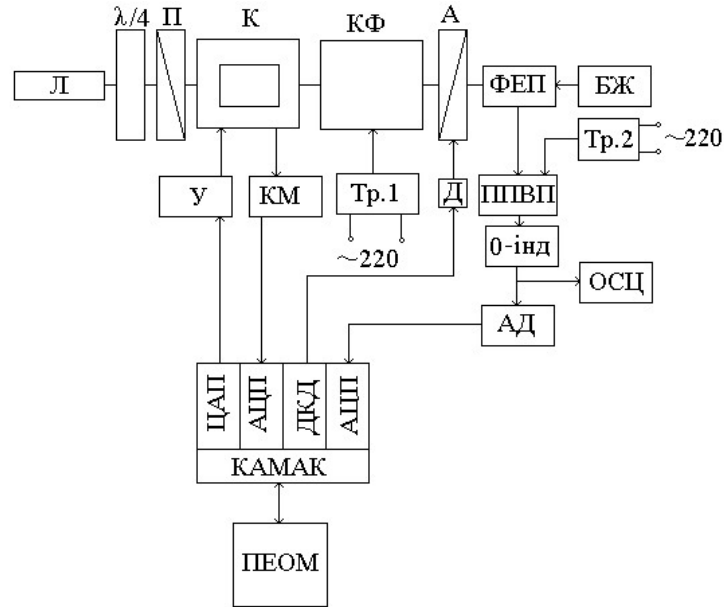


Рис. 3. Функціональна схема автоматизованої поляризаційної установки для вимірювання повороту оптичної індикатриси. П - поляризатор, К - кристат з досліджуваним кристалом, комірка Фарадея, А - аналізатор, БЖ - блок живлення, У - система керування «Утрекс», КМ-компаратор, М - двигун, ППВП - підсилювач перетворювач вимірювального пристрою, Тр.1 і Тр.2 - трансформатори. ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; ДКД драйвер крокового двигуна; ПЕОМ – персональна електронно-обчислювальна машина

разом із значенням інтенсивності світла у мінімумі погасання поміщаються в масив. Після цього вимірюють величину інтенсивності світла зі швидкістю 3 точки за секунду при зміні температури зразка. Для підвищення точності вимірювань φ_s юсування системи проводили у вихідній фазі поза температурним інтервалом існування скорельованого руху тетраєдричних груп [10, 11] (для кристала $[N(CH_3)_4]_2ZnCl_4$ $T > T^* = 370$ К). З метою підвищення швидкодії відшукання експериментальних результатів ($dT/dt = 3$ точки/с) проводили температурне дослідження інтенсивності світла. Під час перерахунку величини залишкової інтенсивності світла (I) у поворот оптичної індикатриси φ_s використовували експериментальну залежність $I \sim f(\varphi_s)$ (рис. 4), отриману за кількох температур (яка охоплювала як вихідну, неспівмірну і співмірні фази). Цю залежність описували поліномом другого рангу, а величини отриманих коефіцієнтів використовувались під час перерахунку I в φ_s :

$$I = I_0 B_1 \sin^2 \varphi, \quad (2)$$

де B_1 – коефіцієнт перерахунку.

За умови малих величин кута повороту оптичної індикатриси ($\varphi < 5^\circ$), вираз (2) можна подати у вигляді:

$$I = I_0 B_1 \varphi^2. \quad (3)$$

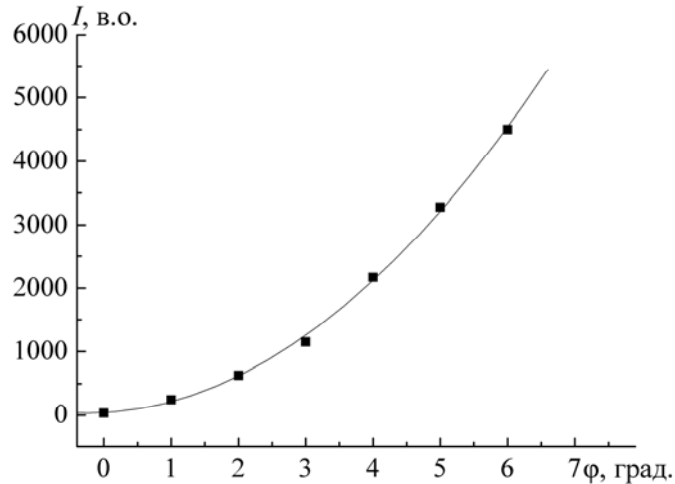


Рис. 4. Залежність інтенсивності світлового променя від величини повороту оптичної індикатриси при $T=300\text{K}$ для кристала $[\text{N}(\text{CH}_3)_4]_2\text{ZnCl}_4$ навколо осі b

Точність вимірювання зазначеним методом залежить від монохроматичності світла, якості поляризаційних призм і точності вимірювання інтенсивності світла.

За умови забезпечення перелічених вище умов відносно похибку експерименту можна отримати, провівши послідовне логарифмування та диференціювання виразу (3):

$$\frac{d\phi}{\phi} = \frac{dI}{I}, \quad (4)$$

де $I = I_0 \sin^2 \xi \sin^2 \frac{2\pi\Delta nd}{\lambda}$. Згідно з виразом (4) відносна похибка експерименту становить 0,01–0,05 град.

Також для підвищення точності вимірювання мінімального значення залишкової інтенсивності світла використовують комірку Фарадея з магнітооптичним модулятором, виготовленим зі скляного стержня (марка скла ТФ – 5) завдовжки 10 см. На комірку через трансформатор ТР-1 від мережі подають змінну напругу 60–100 В і частотою $f=50$ Гц. Сигнал тієї ж частоти величиною напруги $\sim 1\text{В}$ з трансформатора ТР-2 подають як опорний сигнал на вхід підсилювача–перетворювача вимірювального пристрою УПІ-1, що працює у режимі синхронного детектора. Під час неповного довороту аналізатора до положення повного погасання промодульований частотою 50 Гц світловий потік потрапляє на фотоприймач ФЕП-62, заживлений блоком БЛБНР-23-05, де світловий сигнал перетворюється в електричний сигнал тієї ж частоти, підсилюється і аналізується за допомогою УПІ-1 і візуально контролюється на осцилографі СІ-68 і нуль індикаторі УПІ-1.

На екрані осцилографа простежено синусоїд з частотою ω (50 Гц), а стрілка мікроамперметра нуль-індикатора УПІ-1 відхилена від центрального положення. Під час наближення до положення повного погасання на екрані осцилографа простежено лише другу гармоніку з частотою 2ω і стрілка нуль-індикатора УПІ-1

встановлюється в центральне положення. У цей момент вимірюють мінімальне значення залишкової інтенсивності.

Керування установкою здійснюють за допомогою системи КАМАК під управлінням спеціально розробленої мовою Turbo Pascal v.7.0 програми. У написанні використано принцип структурного програмування: програма будується на основі спеціально розроблених процедур, які дозволяють виконувати одну з елементарних функцій. Процедури розроблені на основі стандартних процедур управління блоками КАМАК.

Розраховують кутову координату з точністю 20 кутових секунд.

Нестабільності температури, інтенсивності лазерного пучка та інші випадкові чинники [12] кожний момент часу по-різному впливатимуть на положення експериментальної точки, отже реалізується рандомізація, тобто переведення систематичної похибки у випадкову.

Відомо [9], що інтенсивність світлового сигналу, який пройшов через систему поляризатор–кристал–аналізатор, можна описати виразом:

$$I = I_0 \sin^2 \xi \sin^2 \frac{2\pi\Delta nd}{\lambda}, \quad (5)$$

За умови $\frac{2\pi\Delta nd}{\lambda} \ll 2\pi$ малості деформації еліпса поляризаційних констант вираз (5) можна подати у вигляді:

$$I = I_0 \xi \frac{2\pi\Delta nd}{\lambda}, \quad (6)$$

тобто $I = \text{const}\Delta nd$, де $\text{const} = I_0 \xi \frac{2\pi}{\lambda}$. Відносну похибку експерименту можна отримати, провівши послідовне логарифмування та диференціювання виразу (6):

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{(\text{const}\Delta nd)'}{\text{const}\Delta nd} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta(\Delta n)}{\Delta n}. \quad (7)$$

При $\Delta d=10^{-5}$, $d=2 \times 10^{-3}$, $\Delta(\Delta n) \approx 10^{-7}$, $\Delta n \approx 10^{-4}$ отримаємо, що відносна похибка експерименту становить близько 1%.

За умови, коли $\frac{2\pi\Delta nd}{\lambda} > 2\pi$, то $I = \text{const} \sin \frac{2\pi\Delta nd}{\lambda}$. Відносну похибку експерименту можна оцінити як:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{4\pi}{\lambda} \text{ctg}\left(\frac{2\pi\Delta nd}{\lambda}\right)(d\Delta(\Delta n) + \Delta n\Delta d). \quad (8)$$

При $\Delta n \approx 10^{-4}$, $d=2 \times 10^{-3}$, $\lambda=6,33 \times 10^{-7}$ величина $d\Delta(\Delta n) + \Delta n\Delta d \approx 1,2 \times 10^{-9}$.

Аналізуючи вираз (8), за умови, коли $-1 \leq \text{ctg}\left(\frac{2\pi\Delta nd}{\lambda}\right) \leq 1$, тобто

$\frac{\lambda}{8d} \leq \Delta n \leq \frac{3\lambda}{8d}$ величина відносної похибки є порядку 1%.

Показано, що поляризаційно-оптичний метод досліджень забезпечує високу точність вимірювання кута повороту оптичної індикатрисы і ґрунтується на аналізі інтенсивності світла, яке пройшло через систему: поляризатор–кристал–аналізатор, виставлених у схрещене положення.

З метою підвищення швидкодії вимірювання експериментальних результатів ($dT/dt = 3$ точки/с) проводили температурне дослідження інтенсивності світла з допомогою автоматизованої установки. Для підвищення точності вимірювань φ_s у неспівмірній фазі, юстування системи проводилось у вихідній фазі поза температурним інтервалом існування скорельованого руху тетраедричних груп ($T=370$ К). Під час перерахунку величини інтенсивності світла (I) у поворот оптичної індикатриси φ_s використовували експериментальну залежність $I \sim f(\varphi_s)$, отриману при кількох температурах. Цю залежність описували поліномом другого рангу, а величини отриманих коефіцієнтів застосовували при перерахунку I в φ_s . Точність вимірювання величини кута повороту оптичної індикатриси становила 0,01–0,05 град.

1. *Sveleba S., Kapustianik V., Polovinko I., Bublyk M., Zhmurko V.* Behaviour of the optical indicatrix and small-angle light scattering in the case of “devil’s staircase” // *Phys. Status Solidi (B)*. 1994. Vol. 183. P. 291–298.
2. *Санников Д.Г.* Последовательность двух непрерывных переходов, ограничивающие одну несоизмерную фазу // *Физика тв. тела*. 1987. Т. 29. Вып.1. С. 23–27.
3. *Kamba S., Petzelt J., Dvorak V., Goncharov Yu.G., Volkov A.A., Kozlov G.V., Albers J.* Far infrared spectroscopy of the phase-transition sequence in BCCD // *Ferroelectrics*. 1990. Vol. 105. P. 351–356.
4. *Kushnir O.S.* Crystal optical properties of incommensurate phases in the plane-wave modulation region // *J. Phys.: Condens. Matter*. 1997. Vol. 9. P. 9259–9273.
5. *Куньо І., Карна І., Свелєба С., Катеринчук І.* та ін. Поворот оптичної індикатриси в неспівмірній фазі кристалів $[N(CH_3)_4]_2ZnCl_4$ // *Вісн. Львів. ун-ту. Сер. фіз.* 2007. Вип. 40. С. 42–48.
6. *Свелєба С., Куньо І., Катеринчук І., Семотюк О.* та ін. Вплив напруженості електричного поля на модульовану структуру кристалів $[N(CH_3)_4]_2ZnCl_4$ // *Вісн. Львів. ун-ту. Сер. фіз.* 2007. Вип. 40. С. 122–129.
7. *Sveleba S., Kapustianik V., Polovinko I., Krochuk A., Bublyk M.* Scattering of light on small angles in the conditions of devil’s staircase existence within the incommensurate phase. // *Phys. Status Solidi (B)*. 1994. Vol. 186. P. 289–302.
8. *Kroupa J., Albers J., Ivanov N.R.* Birefringence and indicatrix rotation in BCCD // *Ferroelectrics*. 1990. Vol.105. P. 345–349.
9. *Polovynko I., Kaluza S.* “Оптычне власцівосці фаз niewspolmiernych crystalow typu A_2MX_4 ”. Kielce, 1998. 320 с.
10. *Гладкий В.В., Каллаев С.Н., Кириков В.А., Иванова Е.С.* и др. Подавление сегнетоэлектричества малым механическим напряжением в кристаллах $[N(CH_3)_4]_2ZnCl_4$ и $[N(CH_3)_4]_2CoCl_4$ // *Кристаллография*. 1991. Т. 36. № 2. С. 458–462.
11. *Свелєба С.А., Семотюк О.В., Катеринчук І.М., Фіцич О.І.* Співіснування промодульованих фаз в кристалі $[N(CH_3)_4]_2ZnCl_4$ // *Вісн. Львів. ун-ту. Сер. фіз.* Вип. 34. 2001. С. 56–60.
12. *Зайдель А.Н.* Ошибки измерений физических величин. Л., 1974. 108 с.

**THE AUTOMATIZED SETUP OF THE OPTICAL INDICATRIX ANGLE
ROTATION MEASUREMENT****S. Sveleba, I. Kunyo, I. Katerynychuk, O. Semotyuk, I. Karpa, V. Kunyo,
Y. Pankivskiy¹**

*Ivan Franko Lviv National University
Department of Electronics, Non-linear Optics Chair
gen. Tarnavskogo, 107, 79017 Lviv, Ukraine
e-mail: sveleba@electronics.wups.lviv.ua*

*¹National Ukrainian University of Forestry, Department of Ecology
O. Kobylyanskoi 1, 79005 Lviv, Ukraine
e-mail: pankivyu@lvivonline.com*

The automatized optical-polarization setup of the optical indicatrix angle rotation measurement is studied. It has been shown, that the error of the experimental investigation of the optical indicatrix rotation, based on the light beam intensity measurement, is takes insignificant value ~1% (in the case of $\frac{\lambda}{8d} \leq \Delta n \leq \frac{3\lambda}{8d}$). The measurement rate is high - 3 points per second.

Key words: optical indicatrix, birefringence, residual intensity, incommensurate phase.

Стаття надійшла до редколегії 22.10.2007
Прийнята до друку 09.06.2008