

УДК 535+537

## ЕЛЕКТРООПТИЧНА АКТИВНІСТЬ КРИСТАЛІВ КВАРЦУ

О. Г. Влох

Електрооптичні властивості кристалів кварцу особливо цікаві в зв'язку з наявністю в них природної оптичної активності (гірації). Як відомо, в напрямку оптичної осі цих кристалів оптична активність проявляється в повороті площини поляризації лінійно поляризованого світла, яке зумовлене циркулярним двозаломленням. Отже, електрооптичні ефекти при поширенні світла в напрямку оптичної осі можуть принципово відрізнитися від звичайних лінійного і квадратичного ефектів Поккельса і Керра, оскільки останні полягають у впливі електричного поля на лінійне двозаломлення (зміна дійсних показників заломлення під дією електричного поля) і не пов'язані з циркулярним двозаломленням (зміна під дією поля комплексних показників заломлення).

Перед тим, як перейти до викладення експериментальних досліджень, проведемо феноменологічний аналіз електрооптичних явищ в кристалах кварцу, не беручи до уваги оптичну активність. Обмежимося випадком поширення світла вздовж оптичної осі  $z$  і дії електричного

поля в напрямках  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$  (поле  $E_x$ ) і  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$  (поле  $E_y$ ). У відповідності з [1] лінійний електрооптичний ефект у напрямку оптичної осі при дії поля  $E_x$  описується рівнянням  $z$ -перерізу оптичної індикатрис, деформованої полем:

$$(\sigma^2 + r_{11}E_x)x^2 + (\sigma^2 - r_{11}E_x)y^2 = 1,$$

де  $\sigma^2$  — обернена величина звичайного показника заломлення,  $r_{11}$  — електрооптичний коефіцієнт. Отже, під дією поля  $E_x$  повинні змінюватись показники заломлення  $n_x$  і  $n_y$ , а величина двозаломлення вздовж оптичної осі повинна б визначатися співвідношенням

$$n_x - n_y = n_0^3 r_{11} E_x,$$

де  $n_0$  — звичайний показник заломлення. Тому інтенсивність світла, що проходить через поляризаційну систему, яка складається зі схрещених поляроїдів і  $z$ -зрізу кристала кварцу, не повинна б змінюватись під дією на нього поля  $E_x$ , якщо площини поляризації збігаються з кристалологічними осями  $x$  і  $y$ . Якщо ж схрещені поляроїди повернути на  $45^\circ$ , то кристал при наявності поля перебуватиме в діагональному положенні і пропускання системи в напрямку оптичної осі

$$J = \sin^2 \frac{\pi d_z n_0^3 r_{11} E_x}{\lambda}. \quad (1)$$

де  $d_z$  — товщина кристала в напрямку осі  $z$ . Звідси, підставляючи величину коефіцієнта  $r_{11}$  [2] і показника заломлення  $n_0$  [3], одержуємо, що для кристала товщиною  $d_z = 10$  см при кімнатній температурі максимум монохроматичного ( $\lambda = 632,8$  н.м) пропускання повинен спостерігатися при напруженості поля  $E_x = 15$  кВ/см.

Якщо ж електричне поле буде напрямлене вздовж осі  $y$ , то рівняння  $z$ -перерізу оптичної індикатриси, деформованої внаслідок лінійного електрооптичного ефекту, матиме вигляд

$$o^2(x^2 + y^2) - 2r_{11}E_y xy = 1.$$

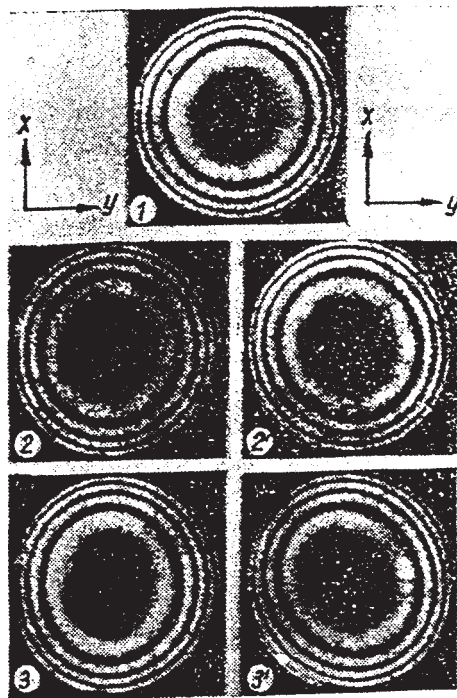
Отже, в даному випадку під дією поля  $E_y$  індикатриса повертається в площині  $xy$  завжди на кут  $\pm 45^\circ$  незалежно від величини поля. Двозаломлення в напрямку осі  $z$  вимірюватиметься зміною показників заломлення  $n_{x'}$  і  $n_{y'}$  по осях  $x'$  і  $y'$ , орієнтованих під кутом  $45^\circ$  до осей  $x$  і  $y$ . Причому

$$n_{x'} - n_{y'} = 2n_0^3 r_{11} E_y.$$

Таким чином, при співпаданні площин поляризації аналізатора і поляризатора з кристалофізичними осями  $x$  і  $y$  зміна пропускання поляризаційної системи під дією поля  $E_y$  повинна описуватись співвідношенням

$$J = \sin^2 \frac{2\pi d n_0^3 r_{11} E_y}{\lambda}. \quad (2)$$

Рис. 1. Зміна інтерференційних коноскопічних картин в пластинках  $z$ -зрізу кристалів кварцу під дією електричного поля: 1 — без поля, 2 —  $E_x = 10$  кВ/см, 3 —  $E_x = 18$  кВ/см, 2' —  $E_y = 8,3$  кВ/см, 3' —  $E_y = 14,8$  кВ/см.



З порівняння цього виразу з (1) випливає, що максимум пропускання повинен спостерігатися при напруженості поля  $E_y$ , вдвоє меншій  $E_x$ .

Експериментальні дослідження підтверджують справедливості викладених міркувань відносно орієнтації оптичних індикатрис під дією полів  $E_x$  або  $E_y$ , що видно з наведених на рис. 1 інтерференційних коноскопічних картин, одержаних у випромінюванні гелій-неонового лазера ( $\lambda = 632,8$  нм). Характер деформації інтерференційних кілець (ізохромат) якісно відповідає співвідношенням, що описують лінійний електрооптичний ефект. Однак, строго в напрямку оптичної осі не спостерігається просвітлення, яке слід було б чекати за рахунок цього ефекту. При полях, визначених вище із співвідношень (1) і (2), зміни інтенсивності світла в центрі коноскопічних картин надзвичайно малі порівняно з очікуваним 100-процентним просвітленням.

Отже, при наявності циркулярного двозаломлення вздовж оптичної осі спостережуване явище не можна розглядати як лінійний електрооптичний ефект. Його також неможливо пояснити, виходячи з припущення про існування в даному випадку квадратичного електрооптичного ефекту. Згідно з результатами роботи [4] квадратичний електрооптичний ефект при поширенні світла вздовж осі  $z$  приводить до аналогічних змін оптичної індикатриси для обох ( $E_x$  і  $E_y$ ) напрямків поля. Рівня-

ня еліпса  $z$ -перерізу оптичної індикатриси мають вигляд

$$(\sigma^2 + R_{11}E_x^2)x^2 + (\sigma^2 + R_{12}E_x^2)y^2 = 1.$$

$$(\sigma^2 + R_{12}E_y^2)x^2 + (\sigma^2 + R_{11}E_y^2)y^2 = 1.$$

Тому для обох напрямків поля показники заломлення повинні б змінюватись вздовж кристалофізичних осей  $x$  і  $y$  і відповідно до цього коноскопічні картини. Крім того, деформація індикатрис не змінювалася б (як це має місце) при зміні знака поля, а в системі схрещених поляроїдів з площинами поляризації, орієнтованими вздовж осей  $x$  і  $y$ , пропускання світла вздовж осі  $z$  під дією поля взагалі не повинно б змінюватись.

Отже, наявність некомпенсованого циркулярного двозаломлення в кристалах кварцу приводить до того, що при спостереженні строго вздовж оптичної осі  $z$  звичайний електрооптичний ефект не спостерігається. А зміни в пропусканні поляризаційної системи можуть бути зумовлені впливом електричного поля на циркулярне двозаломлення, тобто на оптичну активність. Під кутом до оптичної осі виникає еліптичне двозаломлення, яке можна представити як суперпозицію двозаломлення циркулярно і лінійно поляризованих хвиль. Тому загальний характер зміни коноскопічних картин під дією поля відповідає лінійному електрооптичному ефекту, однак дещо ускладненому еліптичного поляризацією. Спостереження «чистого» лінійного електрооптичного ефекту в гіраційних кристалах, очевидно, можливе при повній компенсації еліптичного або циркулярного двозаломлення. В раніше проведених дослідженнях [2] електрооптичного ефекту в кристалах кварцу під дією поля  $E_x$  і при поширенні світла вздовж осі  $y$  із застосуванням двох зразків, встановлених в положення компенсації, можна було визначити коефіцієнт  $r_{11}$  лінійного електрооптичного ефекту.

Вплив електричного поля на циркулярне двозаломлення кристалів може описуватись аксіальними тензорами третього, четвертого і вищих рангів. У відповідності з цим можливі лінійний, квадратичний і т. п. ефекти електрогірації (електрооптичної активності). В кристалах кварцу, що належить до точкової групи симетрії 32, вигляд аксіального тензора третього рангу [5] (аналогічний по полярного) такий (див. таблицю), що під дією поля  $E_x$  або  $E_y$  змін циркулярного двозаломлення (в загальному випадку еліптичного) вздовж оптичної осі не по-

Аксіальні тензори третього і четвертого рангів (матрична форма) для точкової групи симетрії 32

	$E_x$	$E_y$	$E_z$		$E_x^2$	$E_y^2$	$E_z^2$	$2E_y E_z$	$2E_z E_x$	$2E_x E_y$
$\Delta Q_1$	$\gamma_{11}$	0	0	$\Delta Q_1$	$\beta_{11}$	$\beta_{12}$	$\beta_{13}$	$\beta_{14}$	0	0
$\Delta Q_2$	$-\gamma_{11}$	0	0	$\Delta Q_2$	$\beta_{12}$	$\beta_{11}$	$\beta_{13}$	$-\beta_{14}$	0	0
$\Delta Q_3$	0	0	0	$\Delta Q_3$	$\beta_{31}$	$\beta_{31}$	$\beta_{33}$	0	0	0
$\Delta Q_4$	$\gamma_{11}$	0	0	$\Delta Q_4$	$\beta_{41}$	$-\beta_{41}$	0	$\beta_{44}$	0	0
$\Delta Q_5$	0	$-\gamma_{11}$	0	$\Delta Q_5$	0	0	0	0	$\beta_{44}$	$\beta_{41}$
$\Delta Q_6$	0	$-2\gamma_{11}$	0	$\Delta Q_6$	0	0	0	0	$\beta_{14}$	$\frac{1}{2}(\beta_{11} - \beta_{12})$

Примітка:  $\Delta Q_i$  — компоненти аксіального тензора другого рангу або приросту оптичної активності (питомого обернення площини поляризації),  $\gamma_{ij}$ ,  $\beta_{ij}$  — відповідно коефіцієнти лінійної і квадратичної електрогірації.

винно спостерігатись. Якщо ж виходити з вигляду аксіального тензора четвертого рангу [6], то вздовж оптичної осі кварцу під дією поля  $E_x$  і  $E_y$  повинні спостерігатися однакові зміни величини оптичної активності, пропорційнальні квадрату поля.

Дослідження змін інтенсивності світла в центрі коноскопічної картини показали, що вони можуть бути скомпенсовані поворотом аналізатора на деякий кут, який залежить від величини поля  $E_x$  і  $E_y$  (рис. 2).

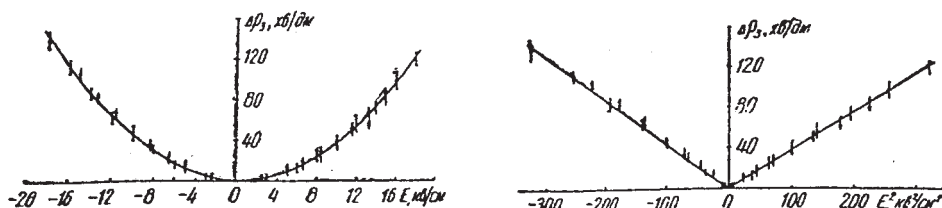


Рис. 2. Залежність приросту поворотної здатності  $\Delta\varphi_3$  кристалів кварцу від напруженості електричного поля  $E_x$  ( ) і  $E_y$  (I). На рис. 2 і 3 вказаний розкид точок при багатократних вимірюваннях в схрещених поляроїдах, встановлених в положення співпадання площин поляризації з осями  $x$  і  $y$ , під кутом  $\pm 45^\circ$  до  $x$  і  $y$ , а також при довільній орієнтації поляроїдів, яка забезпечує 50-процентне пропускання без поля.

Рис. 3. Зміна поворотної здатності  $\Delta\varphi_3$  кристалів кварцу в залежності від квадрата напруженості електричного поля.

Причому величина кута компенсації при даній напруженості поля не залежить від початкової орієнтації площини поляризації поляризатора або аналізатора і напрямок повороту аналізатора не змінюється при зміні напрямку поля на протилежний. Отже, можна припускати, що в даному випадку спостерігається зміна питомого обертання площини поляризації під дією електричного поля, пропорційнальна квадрату поля, тобто квадратичний електрогіраційний ефект. Це підтверджується представленням експериментально одержаних змін повороту площини поляризації як функції від квадрата напруженості електричного поля (рис. 3). Причому у відповідності з аксіальним тензором четвертого рангу для обох напрямків поля ( $E_x$  і  $E_y$ ) прирости питомого обертання площини поляризації однакові за величиною при однаковій напруженості поля. Отже,  $\Delta\varphi_3 = \beta_{31}E_x^2 = \beta_{31}E_y^2$ , звідки, враховуючи дані рис. 3 для довжини хвилі  $\lambda = 632,8$  нм, знаходимо коефіцієнт квадратичної електрогірації  $\beta_{31} = (0,40 \pm 0,04) \text{ хв} \cdot \text{дм} / \text{кВ}^2 = (1,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-6}$  од. CGSE.

Розкладаючи питома обертання площини поляризації (гірацію в напрямку оптичної осі) в ряд по парних степенях зовнішнього електричного поля  $E_x$  або  $E_y$  (перший непарний член у відповідності з виглядом тензора третього рангу для цього напрямку відсутній) і пов'язуючи його із звичайним показником заломлення  $n_0$ , у першому наближенні одержимо

$$e_3 = e_3^0 + \beta_{31}E_{x,y}^2 = \frac{\pi}{\lambda n_0} (g_{33} + \beta_{31}^* E_{x,y}^2), \quad \Delta\varphi_3 = \frac{\pi}{\lambda n_0} \beta_{31}^* E_{x,y}^2,$$

де  $e_3^0$  — гірація у відсутності поля,  $g_{33}$  — компонента аксіального тензора гірації другого рангу,  $\beta_{31}^*$  — компонента аксіального тензора квадратичної електрогірації з врахуванням показника заломлення. Отже, для  $\lambda = 632,8$  нм  $\beta_{31}^* = (40,6 \pm 3,1) \cdot 10^{-12}$  од. CGSE.

Таким чином, в кристалах кварцу виявлений принципово новий ефект — квадратичний ефект електрооптичної активності або електро-

гірації, який полягає в зміні під дією електричного поля природної оптичної активності, пропорціональній квадрату напруженості поля. У цих кристалах можна спостерігати і лінійний електрогіраційний ефект, вивчаючи зміну еліптичного двозаломлення в напрямках осей  $x$  або  $y$ , про що буде повідомлено окремо.

Автор вдячний М. І. Лобському за допомогу у вимірюваннях.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. О. Г. Влох, И. С. Желудев, Кристаллография, 5, № 3, 390, 1960.
2. О. Г. Влох, УФЖ, 11, № 11, 1184, 1966.
3. Landolt-Börnstein, Physikalische-chemische Tabellen, 11, 736, Berlin, 1931.
4. О. Г. Влох, УФЖ, 10, № 10, 1101, 1965.
5. И. С. Желудев, Кристаллография, 9, № 4, 501, 1964.
6. О. Г. Влох, Т. Д. Крушельницкая, Кристаллография, 15, № 3, 1970.

Львівський держуніверситет  
ім. Ів. Франка

Надійшла до редакції  
7.VII 1969 р.

## ELECTROOPTICAL ACTIVITY OF QUARTZ CRYSTALS

O. G. Vlokh

### Summary

The quadratic effect of the electrooptical activity (electrogyration) is found in the quartz-crystals. It consists in the change of the specific rotation of the polarization plane of the linear polarized light under the action of the electric field directed along the  $x$ - or  $y$ -axis during the light propagation from the helium-neon laser along the optical axis  $z$ . This effect is shown to differ in principle from the known electrooptical Pockels' and Kerr's effects and is described by the axial tensor of the fourth rank. The coefficient of the quadratic electrogyration  $\beta_{31} = (1.1 \pm 0.1) \cdot 10^{-6}$  OGSE units is determined with  $\lambda = 632.8$  nm.