УДК 537.228:535.51+535.56

О. Г. Влох, А. В. Царик

ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НА ПОЛЯРИЗАЦІЮ СВІТЛА В КРИСТАЛАХ $Bi_{12}SiO_{20}$, $Bi_{12}GeO_{20}$, $NaBrO_3$

Вдале поєднання електрооптичних і фотопровідних властивостей у кристалах силікату і германату вісмуту зумовило ефективне їх застосування в оптичних запам'ятовуючих пристроях [1—4]. Проте оптичні явища, які виникають у цих кристалах під дією електричного поля, вивчені далеко не повністю і їх трактування часто суперечливе. Взаємозв'язок електрооптичного ефекту з природною оптичною активністю не з'ясований, а як один з можливих механізмів обертання еліпса поляризації світла під дією електричного поля помилково прийнято циркулярне двопроменезаломлення [5—7], тобто в термінах [8, 9] — електрогірацію. Порушені питання можна вирішити при дослідженні кристалів $Bi_{12}SiO_{20}$, $Bi_{12}GeO_{20}$ і $NaBrO_3$ класу симетрії 23, які відрізняються електропровідністю і величиною оптичної активності.

У кубічних гіротропних кристалах у загальному випадку зміна питомого азимута поляризації світла під дією електричного поля зумовлена електрооптичним і електрогіраційним ефектами: $\Delta\rho=\Delta\rho_{eo}+\Delta\rho_{eg}$ [10]. У відповідності з формою аксіального тензора третього рангу [8] для класу симетрії 23 при поширенні світла вздовж напрямку $<\bar{1}10>$ і дії електричного поля вздовж напрямку $<110>$ величина $\Delta\rho_{eg}=0$. Отже, при геометрії експерименту, яка використовується в [6, 7], виникнення лінійної електрогірації принципово неможливе. За цих умов зміну азимута поляризації світла можна пояснити виключно лінійним електрооптичним ефектом, характер якого визначається взаємозв'язком з природною оптичною активністю:

$$\Delta\rho_{eo}=\frac{\pi}{\lambda}n^7\frac{(E_{\langle 110\rangle}r_{41})^2}{2g_{33}}, \qquad (1)$$

де n — показник заломлення, $g_{33}=\dfrac{\rho\lambda n}{\pi}$ — компонента тензора гірації, r_{41} — електрооптичний коефіцієнт, $E_{\langle 110\rangle}$ — напруженість електричного поля вздовж напрямку $<110>$, λ — довжина хвилі.

З (1) випливає метод визначення електрооптичних коефіцієнтів оптично активних кристалів, суть якого полягає у вимірюванні азимута еліпса поляризації монохроматичної лінійно-поляризованої хвилі, яка пройшла крізь кристал. Перевага цього методу порівняно з описаним в [11] полягає в тому, що замість числового коефіцієнта, постійного для всіх оптично активних кристалів, тут безпосередньо враховується величина компоненти тензора гірації. Цим методом нами досліджено залежності питомого азимута еліпса поляризації світла в кристалах $Bi_{12}SiO_{20}$ і $Bi_{12}GeO_{20}$ від освітленості. Вимірювання провадились на поляриметричній установці з використанням гелій-неонового лазера ($\lambda=633$ *нм*) під дією на кристал постійного електричного поля, прикладеного через

запірні контакти з тонкого скла. Попередньо було виміряно дисперсії показників заломлення і питомого обертання площини поляризації всіх досліджуваних кристалів. У таблиці наведено результати вимірювань при $\lambda = 633$ *нм*.

Кристал	n	$\rho \cdot 10^{-3}$, *град/м*	$g_{33} \cdot 10^{4}$
$Bi_{12}SiO_{20}$	2,5288	22,02	19,61
$Bi_{12}GeO_{20}$	2,5450	20,14	18,1
$NaBrO_3$	1,6128	1,74	1,0

Як видно з рис. 1, у випадку кристалів $Bi_{12}SiO_{20}$ крім параболічної залежності $\Delta\rho(E)$ спостерігається зміщення мінімуму $\Delta\rho$ відносно початку координат. Це пояснюється наявністю фотоіндукованого двопро-

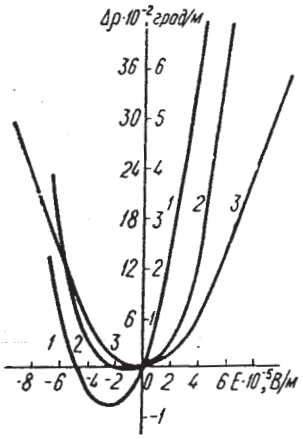

Рис. 1. Залежність питомого азимута еліпса поляризації світла від напруженості електричного поля в кристалах $Bi_{12}SiO_{20}$ і $Bi_{12}GeO_{20}$: *1*, *2* — $Bi_{12}SiO_{20}$ (права шкала), відповідно, попередньо освітлений «білим» світлом і неосвітлений ($d_{\langle\bar{1}10\rangle} = 6{,}62$ *мм*, $d_{\langle 110\rangle} = 8{,}70$ *мм*), *3* — $Bi_{12}GeO_{20}$ (ліва шкала), $d_{\langle\bar{1}10\rangle} = 6{,}23$ *мм*, $d_{\langle 110\rangle} = 7{,}78$ *мм*.

менезаломлення, яке повністю компенсується зовнішнім електричним полем, що відповідає вершинам парабол. Величина зміщення мінімуму $\Delta\rho$ у випадку кристала, попередньо освітленого «білим» світлом, значно більша, ніж при освітленні тільки лазерним випромінюванням в процесі вимірювань, оскільки кристал більш фоточутливий в короткохвильовій області спектра [2]. Збіг вершини параболи з початком координат у випадку кристалів $Bi_{12}GeO_{20}$ свідчить про відсутність в них фотоіндукованого двопроменезаломлення.

Крім того, в освітленому кристалі $Bi_{12}SiO_{20}$ електричному полю $E = \text{const}$ відповідає більше $\Delta\rho$, яке відраховується від вершини параболи, що пов'язане з підсиленням ефекту за рахунок фотополяризації. Так можна пояснити результати, які одержані в [6, 7] і трактуються як «фотоактивність». У випадку кристалів $Bi_{12}GeO_{20}$ тривалість стабільної фотополяризації значно менша, ніж у випадку кристалів $Bi_{12}SiO_{20}$ і тому освітлення кристала не позначається на залежності $\Delta\rho(E)$, одержаній статичним методом. Спостережуване ж збільшення $\Delta\rho$ при освітленні [6, 7], можливо, в більшій мірі пов'язане з наявністю домішок, яких у досліджуваних нами кристалах, судячи з нормального характеру дисперсії питомого обертання площини поляризації в області $\lambda = 450 \div 500$ *нм*, не було.

Переміщуючи вершини парабол у початок координат і зображуючи відповідні залежності функціями $\Delta\rho(E^2)$, можна перевірити застосов-

ність для пояснення одержаних результатів формули (1). З рис. 2 випливає, що співвідношення (1) задовольняється при $E \lesssim 3 \cdot 10^5$ *В/м* для $Bi_{12}SiO_{20}$ і $E \lesssim 5 \cdot 10^5$ *В/м* для $Bi_{12}GeO_{20}$. Останнє узгоджується з умовою $|E_{\langle 110\rangle} r_{41}| \ll |g_{33} n^{-5}|$, за якою еліптичністю хвилі, що пройшла крізь кристал, можна знехтувати. Відмінність тенденцій до відхилення експери-

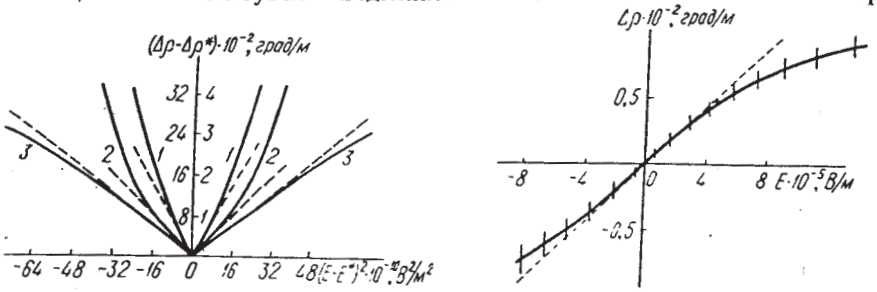

Рис. 2. Залежність питомого азимута еліпса поляризації світла від квадрата напруженості електричного поля. $\Delta\rho^*$, E^* — координати вершин парабол, зображених на рис. 1. Штрихові лінії — екстраполяція лінійних ділянок. Позначення кривих ті самі, що й на рис. 1.

Рис. 3. Зміна питомого обертання площини поляризації світла в кристалі $Bi_{12}SiO_{20}$ під дією електричного поля.

ментальних залежностей $\Delta\rho(E^2)$ від лінійної для кристалів $Bi_{12}SiO_{20}$ і $Bi_{12}GeO_{20}$ визначається величиною початкової різниці фаз ($\varphi_0 = 2\rho d$), знак відхилення чергується кратно π. На підставі одержаних даних за формулою (1) розраховано електрооптичні коефіцієнти обох кристалів. Для освітленого кристала $Bi_{12}SiO_{20}$ $r_{41} = 1{,}60 \cdot 10^{-12}$ *м/В*, для неосвітленого $r_{41} = 1{,}08 \times 10^{-12}$ *м/В*, а для $Bi_{12}GeO_{20}$ $r_{41} = 2{,}72 \cdot 10^{-12}$ *м/В*. Таким чином, стають зрозумілими причини відмінності значень r_{41}, одержаних різними авторами [2, 5, 6, 7, 12].

Питання про наявність лінійної електрогірації в досліджуваних кристалах можна вирішити при поширенні світла і дії поля в напрямку $\langle 111\rangle$. Саме при такій геометрії експерименту

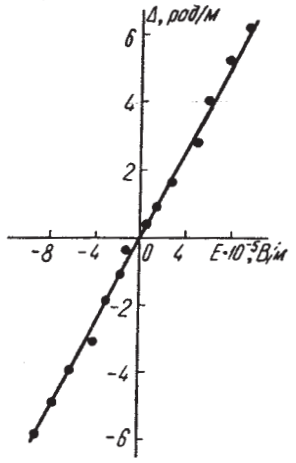

Рис. 4. Зміна питомої фази світла в кристалі $NaBrO_3$ під дією електричного поля ($d_{\langle \bar{1}10\rangle} = 5{,}48$ *мм*, $d_{\langle 110\rangle} = 7{,}65$ *мм*).

в кристалах симетрії 23 електрооптичне двопроменезаломлення не виникає і зміна повороту площини поляризації визначається співвідношенням

$$\Delta\rho_{eg} = \frac{\pi}{\lambda n} \gamma_{41} E_{\langle 111\rangle}, \qquad (2)$$

γ_{41} — компонента аксіального тензора електрогірації.

В результаті експериментальних досліджень такого ефекту в кристалах $Bi_{12}SiO_{20}$ показано (рис. 3), що при $|E_{\langle 111\rangle}| \lesssim 3 \cdot 10^5$ *В/м* $\Delta\rho_{eo}$ пропорціональне полю і при переполяризації знак його змінюється. Цим спостережуваний ефект істотно відрізняється від зміни азимута поляризації світла внаслідок лінійного електрооптичного ефекту. Однак у силь-

ність для пояснення одержаних результатів формули (1). З рис. 2 випливає, що співвідношення (1) задовольняється при $E \lesssim 3 \cdot 10^5$ *В/м* для $Bi_{12}SiO_{20}$ і $E \lesssim 5 \cdot 10^5$ *В/м* для $Bi_{12}GeO_{20}$. Останнє узгоджується з умовою $|E_{\langle 110\rangle} r_{41}| \ll |g_{33} n^{-5}|$, за якою еліптичністю хвилі, що пройшла крізь кристал, можна знехтувати. Відмінність тенденцій до відхилення експери-

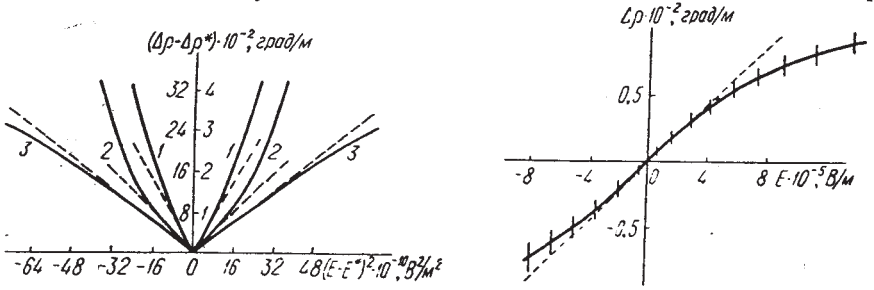

Рис. 2. Залежність питомого азимута еліпса поляризації світла від квадрата напруженості електричного поля. $\Delta\rho^*$, E^* — координати вершин парабол, зображених на рис. 1. Штрихові лінії — екстраполяція лінійних ділянок. Позначення кривих ті самі, що й на рис. 1.

Рис. 3. Зміна питомого обертання площини поляризації світла в кристалі $Bi_{12}SiO_{20}$ під дією електричного поля.

ментальних залежностей $\Delta\rho(E^2)$ від лінійної для кристалів $Bi_{12}SiO_{20}$ і $Bi_{12}GeO_{20}$ визначається величиною початкової різниці фаз ($\varphi_0 = 2\rho d$), знак відхилення чергується кратно π. На підставі одержаних даних за формулою (1) розраховано електрооптичні коефіцієнти обох кристалів. Для освітленого кристала $Bi_{12}SiO_{20}$ $r_{41} = 1{,}60 \cdot 10^{-12}$ *м/В*, для неосвітленого $r_{41} = 1{,}08 \times 10^{-12}$ *м/В*, а для $Bi_{12}GeO_{20}$ $r_{41} = 2{,}72 \cdot 10^{-12}$ *м/В*. Таким чином, стають зрозумілими причини відмінності значень r_{41}, одержаних різними авторами [2, 5, 6, 7, 12].

Питання про наявність лінійної електрогірації в досліджуваних кристалах можна вирішити при поширенні світла і дії поля в напрямку <111>. Саме при такій геометрії експерименту

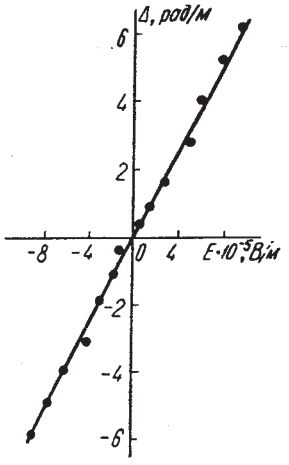

Рис. 4. Зміна питомої фази світла в кристалі $NaBrO_3$ під дією електричного поля ($d_{\langle \bar{1}10\rangle} = 5{,}48$ *мм*, $d_{\langle 110\rangle} = 7{,}65$ *мм*).

в кристалах симетрії 23 електрооптичне двопроменезаломлення не виникає і зміна повороту площини поляризації визначається співвідношенням

$$\Delta\rho_{eg} = \frac{\pi}{\lambda n} \gamma_{41} E_{\langle 111\rangle}, \qquad (2)$$

γ_{41} — компонента аксіального тензора електрогірації.

В результаті експериментальних досліджень такого ефекту в кристалах $Bi_{12}SiO_{20}$ показано (рис. 3), що при $|E_{\langle 111\rangle}| \lesssim 3 \cdot 10^5$ *В/м* $\Delta\rho_{eo}$ пропорціональне полю і при переполяризації знак його змінюється. Цим спостережуваний ефект істотно відрізняється від зміни азимута поляризації світла внаслідок лінійного електрооптичного ефекту. Однак у силь-

них полях проявляється тенденція до встановлення сталої величини електрогірації, яка зумовлена, очевидно, сталістю поляризації. З одержаних даних за формулою (2) визначено коефіцієнт електрогірації $\gamma_{41}=9{,}52\cdot10^{-13}$ *м/В*. У кристалах $Bi_{12}GeO_{20}$ і $NaBrO_3$ електрогірації не виявлено, що свідчить про її електретне походження в кристалах $Bi_{12}SiO_{20}$.

Для оцінки впливу фотопровідності і величини гірації на електрооптичні властивості кристалів симетрії 23 нами при тій самій геометрії експерименту досліджено кристали $NaBrO_3$ — лінійного діелектрика з незначною оптичною активністю. Співвідношення між оптичними параметрами цих кристалів в (1) такі, що $\Delta\rho_{eo}$ змінюється в межах точності експерименту і тому для визначення коефіцієнта r_{41} краще використовувати компенсаційний метод Сенармона [13]. Одержана таким чином залежність питомої фази світла від напруженості електричного поля наведена на рис. 4. З цієї залежності, користуючись співвідношенням

$$\Delta=\sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}n^3r_{41}E_{\langle110\rangle}\right)^2+(2\rho)^2}, \qquad (3)$$

визначаємо електрооптичний коефіцієнт $r_{41}=0{,}14\cdot10^{-12}$ *м/В*. Як видно, величина коефіцієнта r_{41} діелектричних кристалів $NaBrO_3$ на порядок менша, ніж фотопровідних кристалів $Bi_{12}SiO_{20}$ і $Bi_{12}GeO_{20}$.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Hou S. L., Oliver D. S.* Pockels readout optical memory using $Bi_{12}SiO_{20}$.—Appl. Phys. Lett., 1971, 18, No 8, p. 325—328.
2. *Feinleib J., Oliver D. S.* Reusable optical image storage and processing device.— Appl. Opt., 1972, 11, No 12, p. 2752—2759.
3. *Бережной А. А., Гуревич В. З., Морозов С. В., Попов Ю. В.* Запись оптической информации в кристаллах силиката висмута. — Письма в ЖТФ, 1976, 2, № 5, с. 198—200.
4. *Грехов Ю. Н., Котляр П. Е., Нежевенко Е. С. и др.* Пространственно-временной модулятор света на монокристалле $Bi_{12}GeO_{20}$.— Письма в ЖЭТФ, 1976, 2, № 10, с. 457—462.
5. *Lenzo P. V., Spencer E. G., Ballman A. A.* Optical activity and electrooptic effect in bismuth germanium oxide ($Bi_{12}GeO_{20}$).— Appl. Opt., 1966, 5, No 10, p. 1688—1689.
6. *Lenzo P. V., Spencer E. D., Ballman A. A.* Photoactivity in bismuth germanium oxide.— Phys. Rev. Lett., 1967, 19, No 11, p. 641—644.
7. *Moore G. F., Lenzo P. V., Spenser E. G., Ballman A. A.* Photoactivity and field induced changes in optical rotation in bismuth silicon oxide ($Bi_{12}SiO_{20}$).— J. Appl. Phys., 1969, 40, No 5, p. 2361—2362.
8. *Желудев И. С.* Аксиальные тензоры 3-го ранга и описываемые ими физические явления.— Кристаллография, 1964, 9, № 4, с. 501—505.
9. *Влох О. Г.* Электрогирационный эффект в кристаллах кварца.— Письма в ЖЭТФ, 1971, 13, с. 118—121.
10. *Влох О. Г., Кобылянский В. Б.* Влияние параметров гиротропных кристаллов на характер поляризации света.— УФЖ, 1974, 19, № 7, с. 1129—1135.
11. *Иванов Н. Р., Коняк Ч.* Оптическая активность и электрооптический эффект в кристаллах лангбейнитов $Cd_2(NH_4)_2(SO_4)_3$.— Кристаллография, 1974, 19, № 6, с. 1216—1219.
12. *Рез И. С., Мейснер Л. Б., Сафонов А. И. и др.*— Оптические свойства монокристаллов типа силенита.— Кристаллография, 1970, 15, № 6, с. 1168—1170.
13. *Меланхолин Н. М.* Методы исследования оптических свойств кристаллов. М., «Наука», 1970. 155 с.

Львівський держуніверситет
ім. Ів. Франка

Надійшла до редакції
24.XII 1976 р.