

03

## Об изотропных точках в примесных кристаллах $K_2SO_4$

© В.И. Стадник<sup>1</sup>, Р.Б. Матвиив<sup>1</sup>, Р.С. Брезвин<sup>1</sup>, П.А. Щепанский<sup>1,2</sup>, З.А. Когут<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Львовский национальный университет имени Ивана Франко,  
79005 Львов, Украина

<sup>2</sup> Ченстоховский университет им. Я. Длугоша,  
75-453 Ченстохова, Польша

<sup>3</sup> Национальный университет „Львовская политехника“,  
79013 Львов, Украина

e-mail: vasylstadnyk@ukr.net

Поступила в редакцию 08.04.2020 г.

В окончательной редакции 19.10.2020 г.

Принята к публикации 30.10.2020 г.

Исследованы температурные, спектральные и барические зависимости двупреломления  $\Delta n_i$  кристаллов сульфата калия с 1.7% примесью меди. Установлено, что введение примеси изменяет абсолютную величину  $\Delta n_i$  и ведет к увеличению температурной зависимости  $\Delta n_i(T)$ . Показано, что в примесном кристалле сульфата калия возникают изотропные точки, которые смещены в сторону низких температур на 5 К и 11 К соответственно по сравнению с чистым кристаллом. Установлено, что одноосные напряжения изменяют величину абсолютных значений  $\Delta n_i$ , а также область существования изотропного состояния. Построены обобщенные температурно-спектрально-барические диаграммы изотропного состояния примесного кристалла сульфата калия, которые дают возможность использовать их в качестве кристаллооптического датчика.

**Ключевые слова:** двупреломление, изотропная точка, дисперсия, одноосные напряжения, диаграммы, кристаллооптические датчики.

DOI: 10.21883/OS.2021.02.50556.130-20

### Введение

Инверсия знака двупреломления (изотропная точка, ИТ) является результатом повышения симметрии оптической индикатрисы при изменении температуры или длины волны. Исследования кристаллов с ИТ мотивированы возможностью их использования как рабочих элементов в кристаллооптических датчиках для измерения температуры или давления, а также создания новых оптически активных сред. Они создают лучшие условия для измерения температуры в жестких условиях (высокие электрические и магнитные поля, подвижные детали) и могут гарантировать чувствительность до  $10^{-3}$  К [1–4].

Ранее изотропные точки, которые охватывают широкие температурные и спектральные диапазоны существования, были обнаружены в ряде изоморфных кристаллов группы  $ABSO_4$  ( $LiKSO_4$ ,  $RbNH_4SO_4$ ,  $RbKSO_4$ ,  $LiNH_4SO_4$ ) [5–11]. Несмотря на значительное количество кристаллов, практическая ценность поиска новых кристаллов с ИТ является актуальной, поскольку много из известных кристаллов имеют ИТ в неудобной для практического применения области спектра, и практически все претерпевают фазовые переходы (ФП) при определенных температурах, что ограничивает их технические характеристики. С другой стороны, фундаментальный аспект исследования также является значительным, поскольку условия проявления изотропности в диэлектрических кристаллах изучены недостаточно [12–16].

Кристалл сульфата калия  $K_2SO_4$  (СК) является представителем кристаллов группы  $ABSO_4$  с изотропной точкой. Кристаллы  $K_2SO_4$  — типичные сегнетоэластики, в которых при  $T = 860$  К имеет место фазовый переход (ФП) из параэлектрической фазы в орторомбическую сегнетоэластическую с пространственной группой симметрии  $D_{2h}^{16} - Pmcn$  ( $c_0 = 7.48$  Å,  $b_0 = 10.07$  Å,  $a_0 = 5.76$  Å,  $Z = 4$  [17]). Исследование дифракции рентгеновских лучей [18] показало, что структура параэлектрической фазы кристаллов СК является центросимметрической с пространственной группой симметрии  $D_{6h}^6 - P6_3/mmc$  ( $c_1 = 7.90$  Å,  $b_1 = 10.12$  Å,  $a_1 = 5.84$  Å,  $Z = 2$ , при этом  $a_0 \parallel c_1$ ). В диапазоне температур 300–850 К он дважды переходит в оптически одноосное состояние, не связанное со структурными превращениями. При комнатной температуре кристалл СК — оптически двуосный и положительный, с углом между оптическими осями  $2V = 60^\circ$  для 632.8 нм и  $58^\circ$  для 441.1 нм [19,20]. Интересным является расширение температурного и спектрального диапазонов существования изотропной точки в данном кристалле.

Наиболее простым способом изменения оптических, механических или диэлектрических свойств кристаллов является введение разных примесей замещения либо влияние ионизирующего облучения. Однако для направленной модификации необходимо глубокое понимание процессов влияния этих факторов на вещество. Наиболее ярким проявлением этого является создание дефектов кристаллической решетки в результате радиационно-

химических процессов. Знание механизмов их создания и преобразования позволит вести направленный поиск радиационно-стойких или радиационно-чувствительных материалов, которые используются в качестве конструктивных в различных областях техники.

Ранее изучались физические свойства кристаллов сульфата калия с примесями [21–24]. Показано, что в кристалле  $K_2SO_4$ , активированного ионами  $Co^{2+}$ , при комнатной температуре наблюдаются новые полосы поглощения, которых не было обнаружено в чистом кристалле. Оптическая плотность полос поглощения увеличивается при росте концентрации примесных центров. Из спектров ЭПР обнаружено, что примеси  $Mn^{2+}$  в решетке сульфата калия создают несколько типов парамагнитных центров, что обусловлено вариацией положения катионной вакансии, компенсирует избыточный заряд гетеровалентной примеси. При внесении в кристалл СК примесных ионов двухвалентной меди  $Cu^{2+}$  в спектрах поглощения возникают две полосы поглощения, и имеют место незначительные смещения точки фазового перехода.

Но все изучение физических свойства примесных кристаллов сульфата калия было проведено для концентраций меди не более 1%. Мы считаем, что введение концентраций больше 1% может иметь существенное влияние на оптико-электронные свойства кристалла.

Поэтому целью данной работы является изучение температурных и спектральных зависимостей дупреломления кристаллов СК с содержанием примеси меди 1.7% для установления возможности расширения температурной и спектральной областей существования изотропных состояний в данных кристаллах. Ионы переходных металлов являются одним из традиционных активаторов для изучения спектральных и радиационных свойств кристаллов. Кроме того, на примесных ионах с недостоенной  $d$ -оболочкой созданы лазерные системы.

## Методика эксперимента

Исследуемые кристаллы были получены методом медленного испарения при комнатной температуре водного раствора солей чистого сульфата калия  $K_2SO_4$  и кристаллогидрата сульфата меди  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ . Масса последнего составляла 5% от общей массы растворенных солей (9.5 г сульфата калия и 0.5 г кристаллогидрата меди). Соответствующие соли растворяли в дистиллированной воде (100 ml) и перемешивали приблизительно 3 h. Для обеспечения максимального качества полученных кристаллов проводили предварительно многократную перекристаллизацию и фильтрацию раствора. Температура раствора составляла 293 K и контролировалась термостатом с точностью 0.5 K. Рост проводили из спонтанно образованных зародышей с псевдо-гексагональной морфологией. Полученные таким образом на протяжении 20 суток кристаллы имели хорошее оптическое качество, а также имели хорошо развитую

кристаллографическую огранку в виде удлиненной призмы размером приблизительно  $8 \times 8 \times 10$  mm.

Дупреломление  $\Delta n_i$  исследовали спектроскопическим методом, который дает возможность изучать дисперсию  $\Delta n_i$  в широком спектральном диапазоне, а также одновременно его температурные изменения в широкой спектральной области [4,26]. Пропускание поляризационной системы, которая состоит из скрещенных поляризаторов и кристалла между ними, определяют из соотношения:

$$I = I_0 \sin^2 \left[ \frac{\pi}{\lambda} (n_i - n_j) d \right], \quad (1)$$

где  $I_0$  и  $I$  — интенсивности падающего и прошедшего пучков;  $\lambda$  — длина волны;  $n_i - n_j$  — величина дупреломления. В случае прохождения белого пучка света через такую систему спектр в фокальной плоскости спектрографа будет состоять из ряда светлых и темных чередующихся полос. Положения экстремумов интерференционной картины определяют так:

$$d(n_i - n_j) = k\lambda, \quad (2)$$

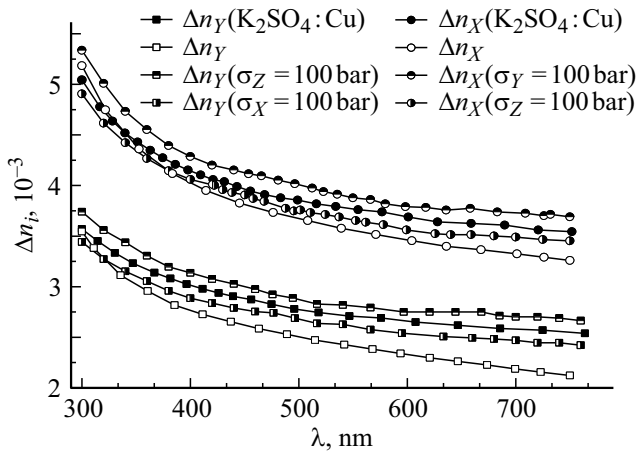
где  $k$  — порядок спектра. Точность измерения дупреломления составляла  $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ .

## Результаты и их обсуждение

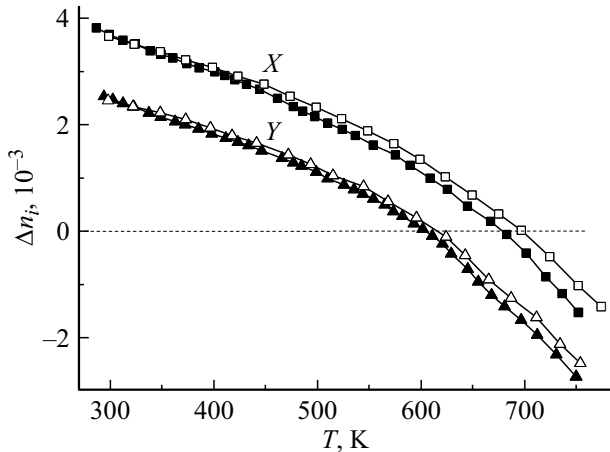
На рис. 1 показана дисперсия дупреломления чистых и с примесью кристаллов СК. Видно, что введение примеси незначительно изменяет абсолютную величину  $\Delta n_i$ , не изменяя при этом характера дисперсии  $|\partial \Delta n_x / \partial \lambda| > |\partial \Delta n_y / \partial \lambda| > |\partial \Delta n_z / \partial \lambda|$ . Однако следует отметить значительное изменение абсолютной величины дупреломления  $\Delta n_i$ . Так,  $\Delta n_i$  в  $X$ - и  $Y$ -направлениях увеличивается приблизительно на  $5.4 \cdot 10^{-4}$ , тогда как в  $Z$ -направлении уменьшается на  $1.4 \cdot 10^{-4}$ . Кроме того, наблюдается уменьшение величины  $\partial \Delta n_i / \partial \lambda$ : от  $3.5 \cdot 10^{-6} \text{ nm}^{-1}$  (чистый кристалл) до  $3.2 \cdot 10^{-6} \text{ nm}^{-1}$  (примесный кристалл).

На рис. 2 изображены температурные зависимости дупреломления кристаллов  $K_2SO_4$  для  $\lambda = 500$  nm. Для всех кристаллографических направлений  $\Delta n_i(T)$  изменяются нелинейно. Видно, что внесение примеси ведет к увеличению температурной зависимости  $\Delta n_i(T)$ . Так,  $d\Delta n_x(T)/dT = 10.1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  и  $11.1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , а также  $d\Delta n_y(T)/dT = 9.6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  и  $10.3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  для чистого и примесного кристаллов соответственно.

Поскольку кристалл СК обладает изотропными точками [27,28], условием возникновения которых являются равенства  $\Delta n_x = 0$  и  $\Delta n_y = 0$ , то изменения температурной зависимости  $d\Delta n_i(T)/dT$  означает смещение положения ИТ по температурной шкале. Так, в чистом кристалле ИТ были обнаружены при 617 K ( $\Delta n_y = 0$ ) и 700 K ( $\Delta n_x = 0$ ). Из рис. 2 видно, что в примесном кристалле СК ИТ возникают при  $T = 612$  K ( $\Delta n_y = 0$ , ИТ I) и  $T = 689$  K ( $\Delta n_x = 0$ , ИТ II). То есть введение



**Рис. 1.** Дисперсия двупреломления кристаллов  $K_2SO_4$  при комнатной температуре: светлые точки — чистый кристалл; темные точки — примесный механически свободный и зажатый кристаллы.



**Рис. 2.** Температурные зависимости двупреломления в направлениях  $X$  и  $Y$  примесных кристаллов  $K_2SO_4$  для  $\lambda = 500$  nm: светлые точки — чистый кристалл; темные точки — примесный кристалл.

примеси 1.7% меди приводит к смещению ИТ в сторону низких температур на 5 и 11 К соответственно.

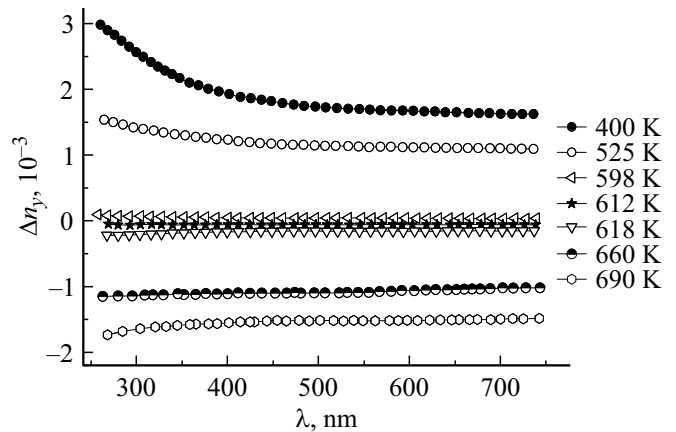
Кроме того, из температурных изменений  $\Delta n_i(T)$  для ряда длин волн видно, что температуры изотропных точек в направлениях  $X$  и  $Y$  не зависят от спектрального диапазона. Это свидетельствует об „изоспектральном“ характере изотропных точек в кристалле СК или точек с очень большим значением  $d\lambda_0/dT \rightarrow \infty$ .

На рис. 3 представлены дисперсионные зависимости  $\Delta n_y$  для ряда температур. При повышении температуры дисперсия  $\Delta n_y$  уменьшается, и при 612 К величина  $\Delta n_y(\lambda)$  одновременно для всего спектрального диапазона равна нулю. После изотропной точки имеет место почти зеркальное отображение кривой в плоскости, которая проходит через нулевые значения  $\Delta n_y$ . Характер дисперсионных изменений  $\Delta n_x$  полностью аналогичен

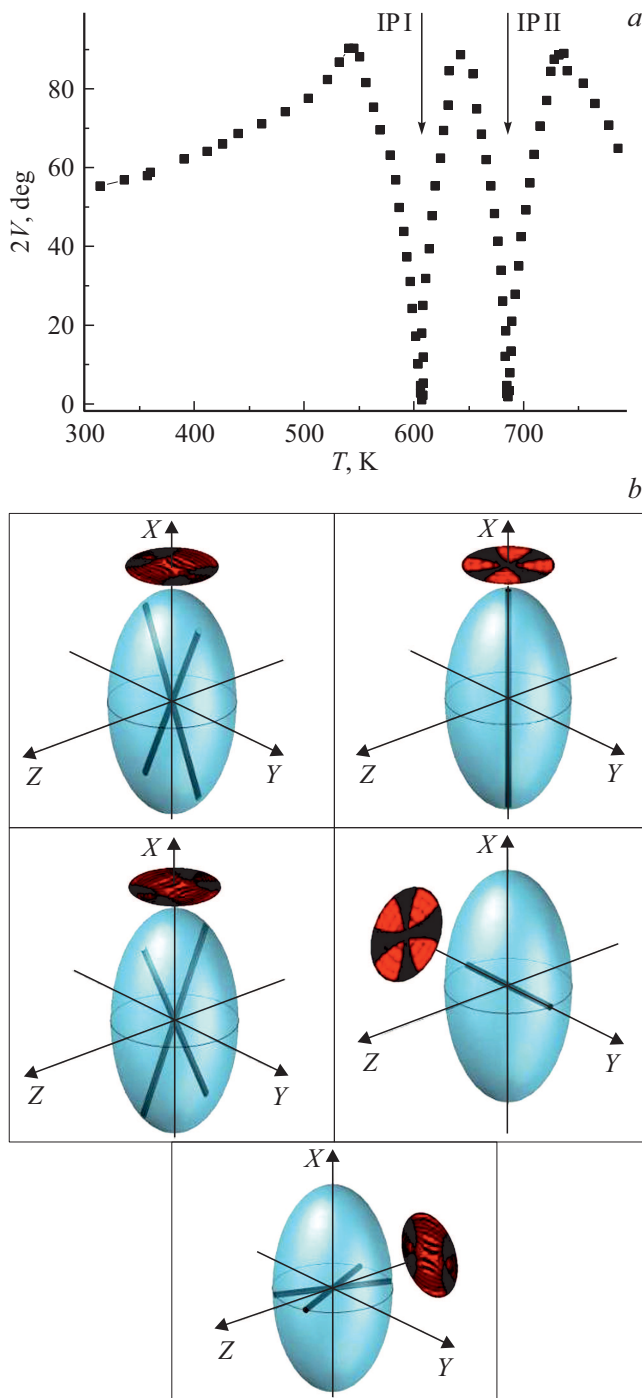
изменениям  $\Delta n_y$ , причем „изоспектральная“ изотропная точка возникает при 689 К.

Поскольку обе изотропные точки возникают при определенных температурах одновременно в широком спектральном диапазоне, то их природу связывают со взаимными температурными изменениями параметров ультрафиолетовых и инфракрасных осцилляторов, определяющих температурные и спектральные зависимости рефрактивных параметров кристаллов в разных кристаллофизических направлениях.

С целью дополнительной проверки существования ИТ в кристалле были проведены независимые температурные измерения угла между оптическими осями (рис. 4, а). Для этого кристалл предварительно ориентировали с помощью поляризационного микроскопа так, чтобы в поле зрения было сечение, перпендикулярное к биссектрисе острого угла между оптическими осями (в нашем случае это  $Z$ -срез). Кристалл устанавливают между скрещенными поляризаторами в диагональное положение, что обеспечивает максимальное просветление поля зрения. Установлено, что при комнатной температуре ( $T = 293$  К) угол между оптическими осями  $2V = 57^\circ$  для  $\lambda = 500$  nm (для чистого кристалла  $2V = 59^\circ$ ). При повышении температуры угол  $2V$  увеличивается и при температуре 540 К переходит через  $90^\circ$ , а потом уменьшается. Кристалл при этом меняет оптический знак с положительного на отрицательный, а при температуре 612 К его оптическая индикатриса превращается в эллипсоид вращения, и он снова становится оптически одноосным, отрицательным с оптической осью, направленной вдоль оси  $Y$ . В дальнейшем описанные изменения повторяются, и при 689 К кристалл СК опять становится оптически одноосным, но теперь оптическая ось направлена вдоль  $X$  (рис. 4, б). В районах обеих точек инверсии знака происходят наиболее резкие изменения  $2V(T)$  ( $dV/dT \sim 8$  deg/K). Температурный гистерезис при изменении угла между оптическими осями  $2V$  в пределах точности экспери-



**Рис. 3.** Спектральные зависимости двупреломления в  $Y$ -направлении примесных кристаллов сульфата калия для разных значений температуры.



**Рис. 4.** *a* — температурная зависимость угла между оптическими осями ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ ); *b* — общий вид оптической индикатрисы с соответствующим расположением оптических осей и общего вида коноскопических фигур примесных кристаллов сульфата калия.

мента отсутствует. На том же рисунке показаны деформации оптической индикатрисы при изменении температуры с указанным видом коноскопических фигур, соответствующих определенной ориентации оптических осей.

Угол между оптическими осями дополнительно можно оценить из экспериментальных значений показателей преломления, полученных ранее иммерсионным методом Обреимова, используя соотношение [26]

$$\operatorname{tg} V = \sqrt{\frac{N_p^{-2} - N_m^{-2}}{N_m^{-2} - N_g^{-2}}} \quad \text{или} \quad \sin V = \frac{N_g}{N_m} \sqrt{\frac{N_m^2 - N_p^2}{N_g^2 - N_m^2}}, \quad (3)$$

где  $N_g$ ,  $N_m$  и  $N_p$  — наибольший, средний и наименьший показатели преломления кристалла соответственно. Рассчитанное нами значение угла составляет  $2V = 56.8^\circ$ . То есть теоретически рассчитанные значения хорошо согласуются с экспериментальными.

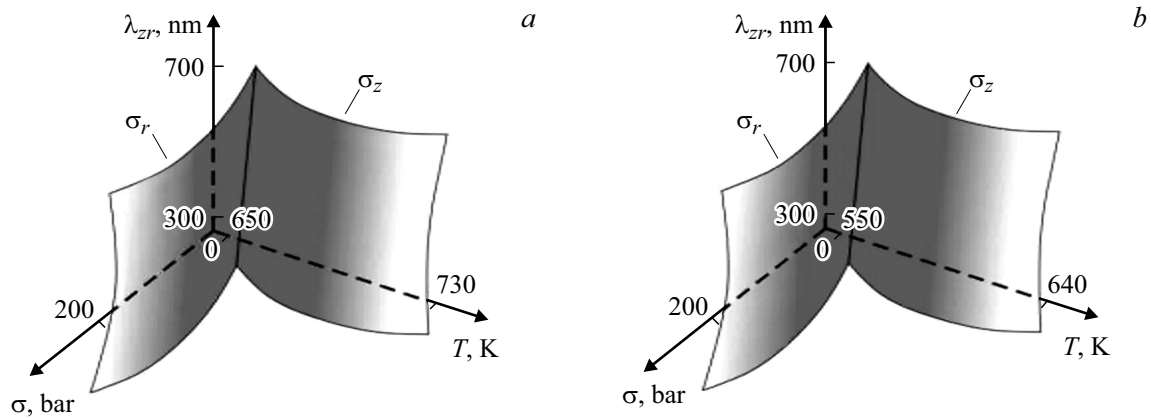
На рис. 1 также показаны дисперсионные зависимости двупреломления под действием одноосных напряжений.

Из рисунка видно, что одноосные напряжения  $\sigma_x = 200 \text{ bar}$  и  $\sigma_z = 200 \text{ bar}$  смещают дисперсионные кривые в сторону больших и меньших значений  $\Delta n_y$ . Одновременно смещается область существования изотропного состояния. Установлено, что одноосное напряжение  $\sigma_x = 200 \text{ bar}$  уменьшает  $\Delta n_y$ , так что „изоспектральность ИТ“ возникает при температуре  $T \sim 601 \text{ K}$ , тогда как напряжение  $\sigma_z = 200 \text{ bar}$  увеличивает  $\Delta n_y$ , так что „изоспектральность ИТ“ возникает при температуре  $T \sim 625 \text{ K}$ .

Температурно-барические исследования ИТ кристалла в направлениях  $X$  и  $Y$  показали, что при увеличении одноосного давления до  $200 \text{ bar}$  ИТ практически линейно смещаются в сторону высоких или низких температур. Наиболее чувствительными к влиянию одноосных напряжений является ИТ в  $X$ -направлении. Так, при одноосном сжатии вдоль оси  $Z$  ИТ смещается в сторону высоких температур со скоростью  $dT/d\sigma \approx +0.12 \text{ K/bar}$ , тогда как при сжатии вдоль оси  $Y$  она смещается в сторону низких температур со скоростью  $dT/d\sigma = -0.16 \text{ K/bar}$ . То есть одноосные напряжения существенно расширяют температурный интервал существования изотропного состояния данного кристалла.

Поскольку обе ИТ возникают при определенных температурах для фиксированных значений одноосного сжатия одновременно в широком спектральном диапазоне от  $350$  до  $750 \text{ nm}$ , то их природу необходимо связывать со структурными превращениями. Однако поскольку при таких условиях кристалл не становится оптически изотропным во всех направлениях, то обнаруженный эффект необходимо связывать со взаимными температурными либо барическими изменениями параметров УФ и ИК осцилляторов, которые определяют дисперсионные, температурные и барические зависимости показателей преломления.

Условие „изоспектральности“ можно получить из формулы Зельмеера при условии, что в изотропной



**Рис. 5.** Температурно-спектрально-барические диаграммы изотропного состояния кристалла  $K_2SO_4$ : направление  $X$  (а), направление  $Y$  (б).

точке ( $n_i = n_j$ ) [25,26]

$$n_i = n_j = \frac{B_{i1}\lambda_{0i1}^2\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_{0i1}^2} + \frac{B_{i2}\lambda_{0i2}^2\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_{0i2}^2} = \frac{B_{j1}\lambda_{0j1}^2\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_{0j1}^2} + \frac{B_{j2}\lambda_{0j2}^2\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_{0j2}^2}. \quad (4)$$

Температурное или барическое смещение изотропной точки описывается следующим выражением:

$$\left(\frac{d\lambda_0}{d\sigma}\right)_T = \frac{\left(\frac{d(n_1 - n_2)}{d\sigma}\right)_T}{\left(\frac{d(n_1 - n_2)}{d\lambda}\right)_T}. \quad (5)$$

Анализ температурных и барических изменений параметров УФ и ИК осцилляторов кристалла СК показал, что в районах ИТ они совпадают. То есть в данном кристалле реализуется наиболее простой случай, когда  $B_i \sim B_j$ ,  $B'_i \sim B'_j$ ,  $\lambda_{0i} \sim \lambda_{0j}$ . Величины и дисперсия показателей преломления кристалла  $K_2SO_4$  в направлениях  $i$  и  $j$  являются очень близкими и при определенных температурах или одноосных напряжениях совпадают по всему спектру, т. е. имеет место „изоспектральность“ ИТ.

Для ИТ в  $Y$ -направлении условие  $\Delta n_y = 0$  будет выполняться для фиксированной длины волны или температуры в зависимости от напряжения. Величину этих изменений можно записать так:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta n_y}{d\sigma_m} \Delta\sigma_m &= \left[ \frac{dn_x}{d\sigma_m} - \frac{dn_z}{d\sigma_m} \right] \Delta\sigma_m \\ &= \left[ \frac{1}{2} (\pi_{3m}n_{30}^3 - \pi_{1m}n_{10}^3) \Delta\sigma_m = \left( \frac{\partial \Delta n}{\partial \lambda} \right) \Delta\lambda \right]_{\lambda_0 + \Delta\lambda}. \end{aligned} \quad (6)$$

При одноосном сжатии вдоль оси  $X$  изменения поляризационных констант можно записать так:

$$a_{11} - a_{10}^0 = \pi_{11}\sigma_1, \quad a_{33} - a_{30}^0 = \pi_{31}\sigma_1, \quad (7)$$

а изменение двупреломления:

$$\frac{d\Delta n_y}{d\sigma_x} = \frac{1}{2} (\pi_{31}n_3^3 - \pi_{11}n_1^3). \quad (8)$$

То есть величину смещений точек температурно-спектральной диаграммы при одноосном сжатии  $\sigma_x$  в первую очередь определяют пьезооптические константы  $\pi_{11}$  и  $\pi_{31}$ . Поскольку для кристалла СК обнаружены следующие значения пьезооптических констант:  $\pi_{11} = 1.8$  Вр, а  $\pi_{31} = 1.6$  Вр, то смещение ИТ при действии  $\sigma_x$  в сторону высоких температур будут определять большие изменения  $n_x$ .

При одноосном сжатии вдоль оси  $Z$  получим

$$\frac{d\Delta n_y}{d\sigma_z} = \frac{1}{2} (\pi_{33}n_3^3 - \pi_{13}n_1^3). \quad (9)$$

Поскольку  $\pi_{13} = 1.1$  Вр, а  $\pi_{33} = 1.3$  Вр, то смещения ИТ в сторону высоких температур при одноосном сжатии  $\sigma_z$  будут также определять большие изменения показателей преломления  $n_x$  при одноосном сжатии  $\sigma_z$ .

Подобные изменения наблюдаются и для ИТ, которая возникает вдоль  $X$ -направления. При одноосном сжатии вдоль оси  $Y$  смещения ИТ в сторону более высоких температур будут определяться большими изменениями показателей преломления  $n_y$  под действием  $\sigma_y$ , тогда как при одноосном сжатии вдоль оси  $Z$  смещения ИТ в сторону более высоких температур будут определяться большими изменениями показателей преломления  $n_y$  под влиянием  $\sigma_z$ .

Используя экспериментально полученные температурные и спектральные зависимости двупреломления кристаллов СК для разных значений одноосного сжатия, построены обобщенные температурно-спектрально-барические диаграммы изотропного состояния кристаллов СК (рис. 5).

Данные диаграммы дают возможность найти соотношения между деформациями оптической индикатрисы, обусловленные изменениями температуры при постоянном сжатии  $\sigma_m$  и длине волны  $\lambda_{0i}$ , изменениями одноосного напряжения при постоянной температуре  $T$  и длине волны  $\lambda$ , а также деформациями, обусловленными изменениями длины волны при постоянной температуре  $T$  и одноосном напряжением  $\sigma_m$ .

Данная диаграмма дает возможность определить изотропное состояние кристаллов СК в определенных температурном, спектральном и барическом диапазонах, что может иметь практическое значение при использовании данного кристалла в качестве кристаллооптического датчика.

Под влиянием одноосного напряжения ИТ будут смещаться по спектру, и эту зависимость легко можно определить по форме коноскопической фигуры или за минимумом фототока (поскольку тогда  $\Delta n_i = 0$ ) [4]. В работе предлагаем использовать барическую зависимость изотропной точки аналогично тому, как для задания и измерения температуры используют температурную зависимость ее спектрального положения.

Для примесного кристалла сульфата калия принцип реализации оптического метода измерения давления состоит в следующем. Кристалл устанавливают между скрещенными поляризаторами в диагональном положении, задают температуру кристалла в одной из точек его температурно-спектральной диаграммы (140–410 К) и с помощью монохроматора (или фильтра) устанавливают длину волны. Коноскопическая картина при этом будет состоять из систем концентрических колец и темного креста. В таком случае фототок будет минимальным, поскольку на фотокатод будет проектироваться только узкая часть поля зрения, которая выделяет центральную часть темного креста. Это будет исходным положением установки кристалла. Потом кристалл нагружают, изменяют длину световой волны так, чтобы воссоздать такую же картину для другого цвета. Используя известную длину волны  $\lambda_0$ , из графика находят значения давления  $\sigma_m$  (рис. 5).

## Выводы

В работе исследованы температурные, спектральные и барические зависимости двупреломления кристаллов сульфата калия с 1.7% примесью меди. Установлено, что введение примеси изменяет абсолютную величину  $\Delta n_i$ , не изменяя при этом характера дисперсии  $\partial \Delta n_i / \partial \lambda$ , а также ведет к увеличению температурной зависимости  $\Delta n_i(T)$ . Показано, что в примесном кристалле сульфата калия возникают изотропные точки при  $T = 612$  К ( $\Delta n_y = 0$ , ИТ I) и  $T = 689$  К ( $\Delta n_x = 0$ , ИТ II), которые смещены в сторону низких температур на 5 и 11 К соответственно по сравнению с чистым кристаллом. Проведены измерения температурной зависимости угла между оптическими осями  $2V$ , которые подтвердили существование изотропного состояния в примесном кристалле СК. Барические исследования показали, что одноосные напряжения  $\sigma_x = 200$  бар и  $\sigma_z = 200$  бар смещают дисперсионные кривые в сторону больших и меньших значений  $\Delta n_y$ , и соответственно смещается область существования изотропного состояния. Установлено, что одноосное напряжение  $\sigma_x = 200$  бар уменьшает  $\Delta n_y$  так, что „изоспектральность ИТ“ возникает при температуре

$T \sim 601$  К, тогда как напряжение  $\sigma_z = 200$  бар увеличивает  $\Delta n_y$  так, что „изоспектральность ИТ“ возникает при температуре  $T \sim 625$  К. Используя экспериментально полученные температурные и спектральные зависимости двупреломления кристаллов для разных значений одноосного сжатия, построены обобщенные температурно-спектрально-барические диаграммы изотропного состояния кристаллов сульфата калия, которые дают возможность определить изотропное состояние кристаллов в определенных температурном, спектральном и барическом диапазонах, что может иметь практическое значение при использовании данного кристалла в качестве кристаллооптического датчика.

Работа выполнена в рамках проекта 2020.02/021 Национального фонда фундаментальных исследований „Экспериментально-теоретическое изучение и прогнозирование фотоупругих свойств кристаллических материалов для приборов управления электромагнитным излучением“.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Бокуть Б.В., Сердуков А.Н. Основы теоретической кристаллооптики / Учебное пособие. Гомель, 1977. Ч. I. 94 с. Ч. II. 60 с.
- [2] Соловьев Л.Е., Рудаков В.С. // Вестник ЛГУ. 1968. N 4. С. 23.
- [3] Laurenty J.P., Rustagi K.G., Rouzeyere M. // J. Appl. Phys. Lett. 1976. V. 45. N 4. P. 212. doi 10.1063/1.88700
- [4] Романюк Н.А. Кристаллооптика. Львов: Изд-во Львовского госуниверситета, 1971. 117 с.
- [5] Стадник В.И., Брезвин Р.С., Курляк В.Ю. // Опт. и спектр. 1994. Т. 77. № 5. С. 830.
- [6] Романюк Н.А., Стадник В.И., Брезвин Р.С., Кардаш В.И. // Кристаллография. 1996. Т. 41. № 5. С. 882.
- [7] Стадник В.И., Брезвин Р.С., Савчук П.В. // Опт. и спектр. 2012. Т. 113. № 3. С. 1. doi 10.1134/S0030400X12090147
- [8] Stadnyk V.Yo., Brezvin R.S. // Ukr. J. Phys. 2012. V. 57. N 12. С. 1231.
- [9] Stadnyk V.Yo., Brezvin R.S., Rudysh M.Ya., Shchepanskyi P.A., Gaba V.M., Kogut Z.O. // Opt. Spectrosc. 2014. V. 117. N 5. P. 756. doi 10.1134/S0030400X14110216
- [10] Kushnir O.S., Shchepanskyi P.A., Stadnyk V.Yo., Fedorchuk A.O. // Opt. Mater. 2019. V. 88. P. 723. doi 10.1016/j.optmat.2019.109221
- [11] Shchepanskyi P.A., Kushnir O.S., Stadnyk V.Yo., Rudysh M.Ya., Brezvin R.S., Demchenko P.Yu., Krymus A.S. // Ukr. J. Phys. Optics. 2017. V. 18. N 4. P. 187. doi 10.3116/16091833/18/4/187/2017
- [12] Wemple S.H., Di Domenico M. // Phys. Rev. Lett. 1969. V. 23. N 20. P. 1156. doi 10.1103/PhysRevLett.23.1156
- [13] Show R.W. // Phys. Rev. Lett. 1970. V. 25. N 12. P. 818. doi 10.1103/PhysRevLett.25.818
- [14] Hilton A.R., Jones C.E. // Appl. Opt. 1967. V. 6. N 9. P. 1513. doi 10.1364/AO.6.001513

- [15] *School F.W., Tang C.L.* // Phys. Rev. B. 1973. V. 8. N 10. P. 4607. doi 10.1103/PhysRevB.8.4607
- [16] *Chemla D.S.* // Phys. Rev. B. 1975. V. 12. N 5. P. 3275. doi 10.1103/PhysRevB.12.3275
- [17] *Miyake M., Iwai S.* // Phys. Chem. Minerals. 1981. V. 7. P. 211. doi 10.1007/BF00311891
- [18] *Ojima K., Nishihata Y., Sawada A.* // Acta Crystallogr. B. 1995. V. 51. P. 287. doi 10.1107/S0108768194013327
- [19] *Gaba V.M., Stadnyk V.Y., Kushnir O.S., Chizh O.Z.* // Opt. Spectrosc. 2011. V. 110. N 6. P. 967. doi 10.1134/S0030400X11060099
- [20] *Stadnyk V.Yo., Romanyuk M.O., Chyzh O.Z., Vachulovych V.F.* // Condensed Matter Physics. 2007. V. 10. N 1. P. 45. doi 10.5488/CMP.10.1.45
- [21] *Абдусабиров Р.Ю., Грязнов Ю.С., Зарупов М.М.* // ФТТ. 1970. Т. 12. С. 657.
- [22] *Chowdari B.V.R., Venkateswarlu P.* // J. Chem. Phys. 1968. V. 48. P. 318. doi 10.1063/1.1667923
- [23] *Bin Anooz S., Bertram R., Klimm D.* // Solid State Commun. 2007. V. 141. doi 10.1016/j.ssc.2006.12.008.
- [24] *Natarajaan M., Secco Etalo A.* // Canadian J. Chem. 1975. V. 53. doi.org/10.1139/v75-217
- [25] *Radhakrishna S., Pande K.P.* // Phys. Chem. Sol. 1972. V. 34. N 8. P. 2037. doi 10.1016/S0022-3697(73)80052-6
- [26] *Меланхолин Н.М.* Методы исследований оптических свойств кристаллов. М.: Наука, 1970. 150 с.
- [27] *Andrievskii B.V., Jaskolski M., Stadnyk V.Yo., Romanyuk M.O., Kashuba O.Z., Romanyuk M.M.* // Comput. Mater. Sci. 2013. V. 79. P. 442. doi 10.1016/j.commatsci.2013.06.048
- [28] *Andrievskii B.V., Romanyuk M.O., Stadnyk V.Yo.* // J. Phys. Chem. Sol. 2009. V. 70. N 7. P. 1109. doi 10.1016/j.jpcs.2009.06.007