

**ВЛИЯНИЕ ОБРАТНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА, ФОТОУПРУГОСТИ И ОПТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА ДИФРАКЦИОННУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОПУСКАЮЩИХ ГОЛОГРАММ В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$** **М. А. Аманова\*, В. В. Шепелевич, А. В. Макаревич, В. Н. Навныко**

УДК 535.4:548.0

*Мозырский государственный педагогический университет им. И. П. Шамякина, 247760, Беларусь; e-mail: maral\_amanova@mail.ru**(Поступила 15 января 2020)*

*Представлены результаты теоретических исследований зависимости дифракционной эффективности пропускающих голограмм, сформированных в образце фоторефрактивного кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ , от ориентационного угла, удельного вращения кристалла и его толщины. В теоретической модели учтены линейный электрооптический, обратный пьезоэлектрический и фотоупругий эффекты. Показано, что при изменении знака оптической активности кристалла может иметь место смещение максимумов дифракционной эффективности относительно значений ориентационного угла.*

**Ключевые слова:** *фоторефрактивный кристалл, линейный электрооптический эффект, обратный пьезоэлектрический эффект, фотоупругость, оптическая активность, дифракционная эффективность,  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ .*

*The results of a theoretical study of the dependence of the diffraction efficiency of a transmission hologram formed in a sample of a  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  photorefractive crystal on the orientation angle, specific rotation of the crystal, and its thickness are presented. The theoretical model takes into account linear electro-optical, inverse piezoelectric and photoelastic effects. It is shown that with a change in the sign of the specific rotation of the crystal, there can be a shift of the maximums of diffraction efficiency relative to the orientation angle.*

**Keywords:** *photorefractive crystal, linear electro-optical effect, inverse piezoelectric effect, photoelasticity, optical activity, diffraction efficiency,  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ .*

**Введение.** С момента открытия явления фоторефракции в кристаллах силленитов с 1966 до 1982 гг. электрооптический эффект считался основным механизмом формирования решетки показателя преломления при освещении кристалла интерференционной картиной. В 1986 г. были представлены результаты экспериментальных исследований характеристик голографических решеток в одноосном кристалле ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$  [1] и показано, что удовлетворительное объяснение полученных закономерностей может быть выполнено лишь при одновременном учете линейного электрооптического, обратного пьезоэлектрического эффектов и фотоупругости кристалла. Одновременную совокупность обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов для простоты в этих случаях принято сокращенно называть “пьезоэффектом”. В 1987 г. впервые рассмотрено влияние обратного пьезоэлектрического эффекта и фотоупругости на свойства голограмм в кубических кристаллах [2]. При этом не учтено явление оптической активности, которое присуще кубическим фоторефрактивным кристаллам силленитов класса симметрии 23. К моменту выхода работы [2] была развита технология [3] решения голографических задач матричным методом с использованием теории гиротропии,

**INFLUENCE OF INVERSE PIEZOELECTRIC EFFECT, PHOTOELASTICITY, AND OPTICAL ACTIVITY ON THE DIFFRACTION EFFICIENCY OF TRANSMISSING HOLOGRAMS IN PHOTOREFRACTIVE CRYSTAL  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$** **М. А. Аманова\*, В. В. Шепелевич, А. В. Макаревич, В. Н. Навныко** *(I. P. Shamyakin Mozyr State Pedagogical University, Mozyr, 247760, Belarus; e-mail: maral\_amanova@mail.ru)*

разработанной академиком Ф. И. Федоровым и его учениками (см., например, [4, 5]). В 1986 г. [6] в рамках электрооптического механизма фоторефракции с использованием ковариантных методов [7] рассчитаны выходные характеристики голографической решетки, записанной в оптически активном кубическом кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  (BSO) среза (110) при ориентации вектора решетки параллельно кристаллографическому направлению [001]. В [8] впервые показано, что учет обратного пьезоэлектрического эффекта и фотоупругости приводит в кубических оптически активных кристаллах не к малым поправкам в теоретических результатах, полученных при учете только электрооптического эффекта, а кардинально (качественно) изменяет описание дифракции в кристалле. Однако анализ закономерностей влияния удельного вращения на дифракционную эффективность пропускающих голограмм не проводился. Следует отметить, что после исследований [9—12] задача учета пьезоэффекта в фоторефрактивных кристаллах при расчете энергетических и поляризационных характеристик пропускающих голограмм решалась рядом авторов; например, в [13, 14] получены дополнительные экспериментальные данные, подтверждающие результаты [8, 10].

Цель настоящей работы — анализ закономерностей влияния гиротропных и пьезоэлектрических свойств кубических фоторефрактивных кристаллов класса симметрии 23 среза ( $\bar{1}\bar{1}0$ ) на зависимость дифракционной эффективности пропускающих голографических решеток от удельного вращения  $\rho$  и ориентационного угла  $\theta$ .

**Теоретические расчеты.** Рассмотрим влияние электрооптического эффекта, обратного пьезоэлектрического эффекта, фотоупругости и оптической активности на дифракционную эффективность голограммы, записанной в кристалле BSO толщиной 8 мм. Используются параметры кристалла BSO: электрооптический коэффициент  $r_{41} = -5$  пм/В; пьезоэлектрический коэффициент  $e_{14} = 1.12$  Кл/м<sup>2</sup>; коэффициенты упругости  $c_1 = 12.96 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>,  $c_2 = 2.99 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>,  $c_3 = 2.45 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>; фотоупругие постоянные  $p_1 = -0.16$ ,  $p_2 = -0.13$ ,  $p_3 = -0.12$ ,  $p_4 = -0.015$ ; показатель преломления  $n = 2.54$  [15]. Амплитуда напряженности электрического поля пространственного заряда  $E_{SC} = 5 \cdot 10^4$  В/м в соответствии с [15]. Дифракционная эффективность голограммы:

$$\eta(d) = \frac{S_{\perp}^2(d) + S_{\parallel}^2(d)}{R_{\perp}^2(0) + R_{\parallel}^2(0)} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $d$  — толщина кристалла;  $R_{\perp}(0)$  и  $R_{\parallel}(0)$  — проекции векторной амплитуды восстанавливающей голограмму волны  $R$  на направления, перпендикулярное плоскости падения и лежащее в плоскости падения на входе в кристалл;  $S_{\perp}(d)$  и  $S_{\parallel}(d)$  — аналогичные проекции векторной амплитуды восстановленной волны  $S$  на выходе из кристалла толщиной  $d$ .

Зависимость дифракционной эффективности от ориентационного угла  $\theta$  и удельного вращения  $\rho$  кристалла при двухволновом взаимодействии нетрудно получить путем решения связанных уравнений:

$$\begin{aligned} R'_{\perp} &= \rho R_{\parallel} + \kappa_1 S_{\perp} + \kappa_2 S_{\parallel}, \\ R'_{\parallel} &= -\rho R_{\perp} + \kappa_2 S_{\perp} + \kappa_3 S_{\parallel}, \\ S'_{\perp} &= -\kappa_1 R_{\perp} - \kappa_2 R_{\parallel} + \rho S_{\parallel}, \\ S'_{\parallel} &= -\kappa_2 R_{\perp} - \kappa_3 R_{\parallel} - \rho S_{\perp}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $R_{\perp}$  и  $S_{\perp}$  — проекции векторных амплитуд опорной и предметной световых волн на единичный вектор, перпендикулярный плоскости падения;  $R_{\parallel}$  и  $S_{\parallel}$  — проекции векторных амплитуд на единичные векторы, лежащие в плоскости падения и ортогональные волновым векторам соответствующих волн;  $\rho$  — удельное вращение плоскости поляризации; штрих означает дифференцирование по координате  $z = d$  (направление оси  $Oz$  характеризует единичный вектор  $e_3$  на рис. 1); постоянные связи  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$  и  $\kappa_3$  рассчитаны с учетом электрооптического и пьезоэлектрического механизмов фоторефрактивного эффекта [9]:

$$\begin{aligned} \kappa_1 &= -\kappa_0 \left[ \left( \frac{\Delta B_{11} + \Delta B_{22}}{2} - \Delta B_{12} \right) \cos^2 \theta + \Delta B_{33} \sin^2 \theta + \frac{\Delta B_{23} - \Delta B_{13}}{\sqrt{2}} \sin(2\theta) \right], \\ \kappa_2 &= -\kappa_0 \left[ \left( \Delta B_{12} + \Delta B_{33} - \frac{\Delta B_{11} + \Delta B_{22}}{2} \right) \frac{\sin(2\theta)}{2} + \frac{\Delta B_{23} - \Delta B_{13}}{\sqrt{2}} \cos(2\theta) \right], \end{aligned}$$

$$\kappa_3 = -\kappa_0 \left[ \left( \frac{\Delta B_{11} + \Delta B_{22}}{2} - \Delta B_{12} \right) \sin^2 \theta + \Delta B_{33} \cos^2 \theta + \frac{\Delta B_{13} - \Delta B_{23}}{\sqrt{2}} \sin(2\theta) \right],$$

$$\kappa_0 = \frac{\pi \varepsilon \sqrt{\varepsilon}}{2\lambda}.$$

Здесь  $\Delta B_{mn}$  определяются с помощью выражения (3), ориентационный угол  $\theta$  показан на рис. 1.

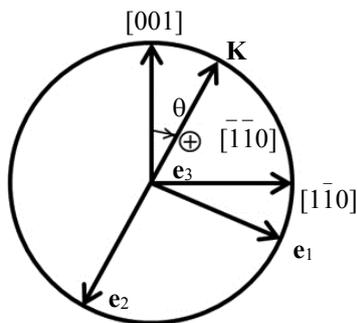


Рис. 1. Ориентация вектора решетки  $\mathbf{K}$  относительно кристаллографических осей и рабочей системы координат  $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$

Известно [16], что компоненты обратного тензора диэлектрической проницаемости пьезокристалла  $B_{mn}$  под действием электрического поля голографической решетки  $\mathbf{E}_{SC} = \mathbf{n}E_{SC}$ , где  $\mathbf{n}$  — единичный вектор, параллельный вектору решетки  $\mathbf{K}$ , приобретают приращения

$$\Delta B_{mn} = \Delta B_{mn}^{\text{эо}} + \Delta B_{mn}^{\text{фп}} = (b_{mn}^{\text{эо}} + b_{mn}^{\text{фп}}) E_{SC} = b_{mn} E_{SC}, \quad (3)$$

где индекс “эо” соответствует вкладу электрооптического эффекта, “фп” — совместному вкладу фотоупругого и пьезоэлектрического эффектов:

$$b_{mn}^{\text{эо}} = r_{mnp}^S n_p, \quad (4)$$

$$b_{mn}^{\text{фп}} = p_{mnkq}^E n_k \gamma_{qi} n_p e_{pij} n_j. \quad (5)$$

Формулы (3)—(5) применяются к кристаллам кубической сингонии. Электрооптический и пьезоэлектрический эффекты “разрешены” симметрией кристаллов кубической сингонии лишь для классов  $23$  и  $\bar{4}3m$ . Учтено, что для отличных от нуля компонент тензоров  $r$ ,  $e$ ,  $p$  и  $c$  выполняются соотношения:

$$\begin{aligned} r_{123}^S &= r_{132}^S = r_{213}^S = r_{231}^S = r_{312}^S = r_{321}^S \equiv r, \\ e_{123} &= e_{132} = e_{213} = e_{231} = e_{312} = e_{321} \equiv e_0, \\ p_{11}^E &= p_{22}^E = p_{33}^E \equiv p_1, p_{12}^E = p_{23}^E = p_{31}^E \equiv p_2, p_{13}^E = p_{21}^E = p_{32}^E \equiv p_3, \\ p_{44}^E &= p_{55}^E = p_{66}^E \equiv p_6, \\ c_{11}^E &= c_{22}^E = c_{33}^E \equiv c_1, c_{12}^E = c_{13}^E = c_{23}^E = c_{21}^E = c_{31}^E = c_{32}^E \equiv c_2, \\ c_{44}^E &= c_{55}^E = c_{66}^E \equiv c_3. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь использованы двухиндексные обозначения для компонент тензоров четвертого ранга  $p$  и  $c$ . Отметим, что для кристаллов класса  $\bar{4}3m$  количество независимых компонент тензора фотоупругости уменьшается, так как  $p_2 = p_3$ .

В результате несложных преобразований на основании (3)—(6) получаем

$$\begin{aligned} b_{11} &= p_1 n_1 R_1 + p_2 n_2 R_2 + p_3 n_3 R_3, \\ b_{22} &= p_1 n_2 R_2 + p_2 n_3 R_3 + p_3 n_1 R_1, \\ b_{33} &= p_1 n_3 R_3 + p_2 n_1 R_1 + p_3 n_2 R_2, \\ b_{12} &= p_4 (n_1 R_2 + n_2 R_1) + m_3, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned}
b_{13} &= p_4 (n_1 R_3 + n_3 R_1) + m_2, \\
b_{23} &= p_4 (n_2 R_3 + n_3 R_2) + m_1, \\
R_1 &= \gamma_{11} Q_1 + \gamma_{12} Q_2 + \gamma_{13} Q_3, \\
R_2 &= \gamma_{21} Q_1 + \gamma_{22} Q_2 + \gamma_{23} Q_3, \\
R_3 &= \gamma_{31} Q_1 + \gamma_{32} Q_2 + \gamma_{33} Q_3, \\
\gamma_{11} &= (\Gamma_{22} \Gamma_{33} - \Gamma_{23}^2) / D, \\
\gamma_{22} &= (\Gamma_{11} \Gamma_{33} - \Gamma_{13}^2) / D, \\
\gamma_{33} &= (\Gamma_{11} \Gamma_{22} - \Gamma_{12}^2) / D, \\
\gamma_{12} &= \gamma_{21} (\Gamma_{13} \Gamma_{23} - \Gamma_{12} \Gamma_{33}) / D, \\
\gamma_{13} &= \gamma_{31} (\Gamma_{12} \Gamma_{23} - \Gamma_{13} \Gamma_{22}) / D, \\
\gamma_{23} &= \gamma_{32} (\Gamma_{12} \Gamma_{13} - \Gamma_{11} \Gamma_{23}) / D, \\
D &= \Gamma_{11} (\Gamma_{22} \Gamma_{33} - \Gamma_{23}^2) - \Gamma_{22} \Gamma_{13}^2 - \Gamma_{33} \Gamma_{12}^2 + 2 \Gamma_{12} \Gamma_{13} \Gamma_{23}, \\
\Gamma_{11} &= c_1 n_1^2 + c_3 (n_3^2 + n_2^2), \\
\Gamma_{22} &= c_1 n_2^2 + c_3 (n_1^2 + n_3^2), \\
\Gamma_{33} &= c_1 n_3^2 + c_3 (n_1^2 + n_2^2), \\
\Gamma_{12} &= \Gamma_{21} = n_1 n_2 (c_2 + c_3), \\
\Gamma_{13} &= \Gamma_{31} = n_1 n_3 (c_2 + c_3), \\
\Gamma_{23} &= \Gamma_{32} = n_2 n_3 (c_2 + c_3), \\
Q_1 &= 2e_0 n_2 n_3, Q_2 = 2e_0 n_1 n_3, Q_3 = 2e_0 n_1 n_2.
\end{aligned} \tag{8}$$

Выражения (7) и (8) впервые получены в [16]. Они справедливы для произвольной ориентации вектора  $\mathbf{E}_{SC}$ , определяемой направляющими косинусами  $n_i$  в кристаллофизической системе координат, которая в случае кристаллов кубической сингонии совпадает с кристаллографической.

Если в кристалле среза  $(\bar{1}\bar{1}0)$  записана ненаклонная пропускающая голографическая решетка с вектором  $\mathbf{K}$ , произвольно ориентированным в плоскости среза под углом  $\theta$  к оси  $[001]$ , то

$$n_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta, n_2 = -\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta, n_3 = \cos \theta. \tag{9}$$

В этом случае компоненты изменения обратного тензора диэлектрической проницаемости:

$$\begin{aligned}
\Delta B_{11} &= e_0 E_{SC} \cos \theta \sin^2 \theta \frac{(p_1 + p_2) A + p_3 B}{C}, \\
\Delta B_{22} &= e_0 E_{SC} \cos \theta \sin^2 \theta \frac{(p_1 + p_3) A + p_2 B}{C}, \\
\Delta B_{33} &= e_0 E_{SC} \cos \theta \sin^2 \theta \frac{(p_2 + p_3) A + p_1 B}{C}, \\
\Delta B_{12} &= E_{SC} \cos \theta \left( r - 2e_0 p_4 \frac{A}{C} \sin^2 \theta \right), \\
\Delta B_{23} &= \frac{E_{SC}}{\sqrt{2}} \sin \theta \left( r - e_0 p_4 \frac{2A \cos^2 \theta + B \sin^2 \theta}{C} \right), \\
\Delta B_{21} &= \Delta B_{12}, \Delta B_{32} = \Delta B_{23} = -\Delta B_{31} = -\Delta B_{13}, \\
A &= (c_2 - c_3) \sin^2 \theta - 2c_1 \cos^2 \theta, \\
B &= 4(c_2 + c_3) \cos^2 \theta - 2c_3 - (c_1 + c_2) \sin^2 \theta,
\end{aligned} \tag{10}$$

$$C = \frac{1}{4} \left[ c_1 (c_1 + c_2) - 2(c_2 + c_3)^2 \right] \sin^2 2\theta + c_3 (c_1 + c_2) \sin^4 \theta + 2c_3 (c_1 \cos^2 \theta + c_3 \sin^2 \theta). \quad (11)$$

Для кристаллов класса  $\bar{4}3m$  в силу совпадения  $p_2$  и  $p_3$  выполняется равенство  $\Delta B_{11} = \Delta B_{12}$ .

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 2 представлены зависимости дифракционной эффективности  $\eta$  голограмм, записанных в кристаллических пластинках BSO толщиной  $d = 8$  мм, от ориентационного угла  $\theta$  и удельного вращения  $\rho$  кристалла, а также результаты влияния на дифракционную эффективность голограммы вкладов пьезоэффекта и оптической активности кристалла. Случаю фоторефрактивного кристалла, не проявляющего пьезоэффект, но с учетом оптической активности соответствует рис. 2, *a*. На краю поверхности  $\eta(\theta, \rho)$  при  $\rho = 405$  рад/м наблюдаем “одногорбую” кривую. На рис. 2, *б* при теоретических расчетах учтено совместное действие пьезоэффекта и оптической активности. Как видно “одногорбая” кривая при  $\rho = 405$  рад/м превращается в “двугорбую” при толщине кристалла  $d = 8$  мм.

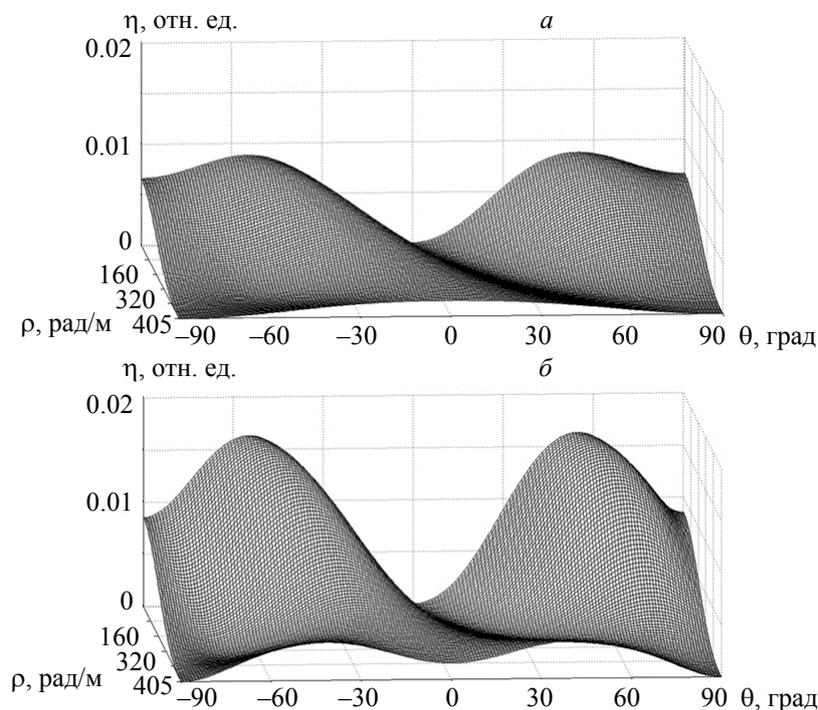


Рис. 2. Зависимости дифракционной эффективности  $\eta$  голограмм, сформированных в кристалле BSO толщиной 8 мм, от ориентационного угла  $\theta$  и удельного вращения  $\rho$  кристалла: *a* — без учета пьезоэффекта; *б* — с учетом пьезоэффекта

Исследование ориентационных зависимостей дифракционной эффективности голограмм в кристалле BSO фиксированной толщины может быть проведено с помощью сечения поверхностей  $\eta(\theta, d)$  плоскостями  $d = \text{const}$ . Для более детального анализа зависимости дифракционной эффективности  $\eta$  голограмм от ориентационного угла  $\theta$  и удельного вращения  $\rho$  кристалла рассмотрим сечения поверхностей  $\eta(\theta, d)$ . Результаты теоретических исследований приведены на рис. 3.

Видно, что пьезоэффект и оптическая активность существенно изменяют характер исследуемой зависимости. Игнорирование пьезоэлектрического эффекта может уменьшить рассчитанную дифракционную эффективность голограммы в  $\sim 2$  раза. Появление двух “горбов” зависимости  $\eta(\theta)$  при толщине кристалла BSO среза  $(\bar{1}\bar{1}0)$   $d = 8$  мм известно также из работ [8, 12, 17], и это не удается теоретически объяснить без учета пьезоэффекта и оптической активности. При этом, когда толщина кристалла принимает значения, “далекие” от  $d = 8$  мм, зависимости 3 и 4 (рис. 3) перестают быть симметричными относительно ориентационного угла  $\theta = 0$ . Например, при  $d = 3.45$  мм (рис. 4, *a*) и  $\rho > 0$  имеет место смещение локальных максимумов зависимостей 2 и 4 вправо. Если же удельное враще-

ние принимает отрицательные значения ( $\rho < 0$ ), то можно наблюдать “зеркальное отражение” зависимостей относительно  $\theta = 0$  (рис. 4, б). При необходимости можно изменить знак удельного вращения на противоположный с использованием эффекта Фарадея [18]. На рис. 4 также приведены зависимости  $\eta(\theta)$  при  $\rho = 0$ , поэтому кривые 1 и 2 не изменяют форму при изменении  $\rho$ .

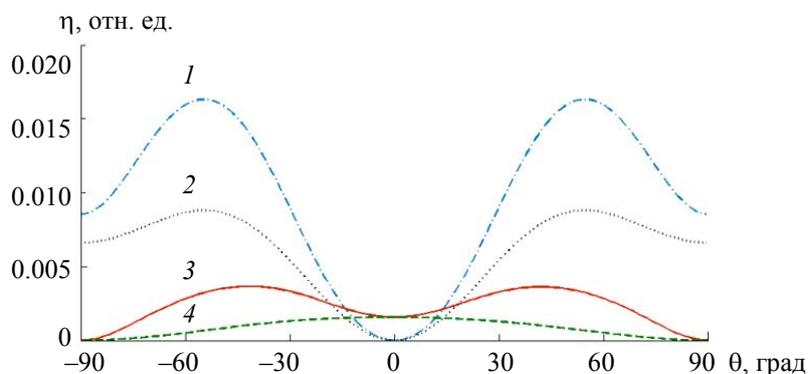


Рис. 3. Зависимости дифракционной эффективности  $\eta$  голограмм, сформированных в кристалле BSO толщиной 8 мм, от ориентационного угла  $\theta$  и удельного вращения  $\rho$  кристалла без учета пьезоэффекта (2, 4) и с учетом пьезоэффекта (1, 3);  $\rho = 0$  (1, 2) и 405 рад/м (3, 4)

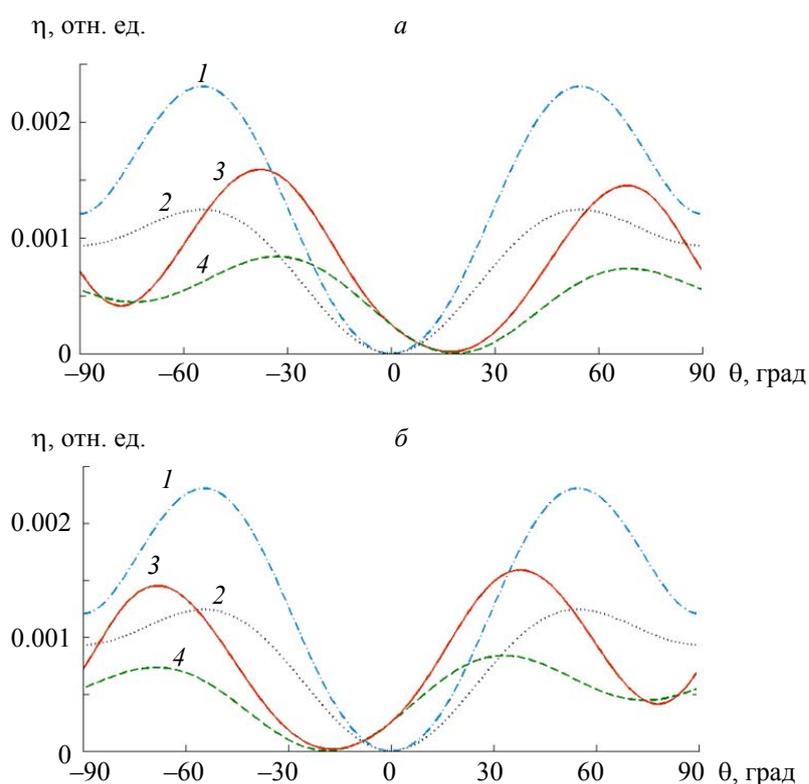


Рис. 4. Зависимости дифракционной эффективности  $\eta$  голограмм, сформированных в кристалле BSO толщиной 3.45 мм, от ориентационного угла  $\theta$  и удельного вращения  $\rho$  кристалла без учета пьезоэффекта (3, 4) и с учетом пьезоэффекта (1, 2);  $\rho = 0$  (1, 3) и 405 рад/м (2, 4); без изменения знака удельного вращения  $\rho > 0$  (а) и с изменением знака удельного вращения на противоположный  $\rho < 0$  (б)

**Заключение.** На примере образца кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  среза  $(\bar{1}\bar{1}0)$  фиксированной толщины  $d = 8$  мм показана возможность теоретического изучения зависимости дифракционной эффективности  $\eta$  голограмм от ориентационного угла  $\theta$  и удельного вращения  $\rho$  кристалла. Появление двух “горбов” на поверхности среза  $\eta(\theta, d)$  при  $\rho = 405$  рад/м не удастся объяснить без одновременного учета пьезоэффекта и оптической активности. Удельные вращения плоскости поляризации разных образцов кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  различаются. Это связано с тем, что при добавлении перед выращиванием кристаллов различных допантов (Cu, Fe) удельное вращение кристалла может значительно изменяться. Поэтому одновременное исследование влияния обратного пьезоэлектрического эффекта, фотоупругости и удельного вращения кристалла может оказаться полезным и позволит оценить полученные данные для оптимизации выходных энергетических характеристик голограмм. Установлено, что изменение знака удельного вращения кристалла приводит к сдвигу локальных максимумов дифракционной эффективности голограмм влево или вправо.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования Республики Беларусь (задание 1.2.01 Государственной программы научных исследований “Фотоника, опто- и микроэлектроника”).

- [1] А. А. Изванов, А. Е. Мандель, Н. Д. Хатьков, С. М. Шандаров. Автометрия, № 2 (1986) 79—84
- [2] С. И. Степанов, С. М. Шандаров, Н. Д. Хатьков. ФТТ, 29, № 10 (1987) 3054—3058
- [3] В. В. Шепелевич. ЖТФ, 55, № 6 (1985) 1201—1203
- [4] Ф. И. Федоров. Теория гиротропии, Минск, Наука и техника (1976)
- [5] Б. В. Бокуть, А. Н. Сердюков. Основы теоретической кристаллооптики, ч. 2, Гомель, ГГУ (1977)
- [6] В. В. Шепелевич. ЖТФ, 56, № 3 (1986) 618—619
- [7] Л. М. Барковский, Ф. И. Федоров. Кристаллография, 10, № 2 (1965) 174—180
- [8] А. Е. Мандель, С. М. Шандаров, В. В. Шепелевич. Письма в ЖТФ, 14, № 23 (1988) 2147—2151
- [9] А. Е. Мандель, С. М. Шандаров, В. В. Шепелевич. Опт. и спектр., 67, № 4 (1989) 819—822
- [10] V. V. Shepelevich, S. M. Shandarov, A. E. Mandel. Ferroelectrics, 110 (1990) 235—249
- [11] A. E. Mandel, S. M. Shandarov, V. V. Shepelevich. Topical Meeting on Photorefractive Materials, Effects, and Devices II. Technical digest, January 17—19, 1990 Aussous, France (1990) 105—108
- [12] В. И. Волков, Ю. Ф. Каргин, Н. В. Кухтарев, А. В. Привалко, Т. И. Семенец, С. М. Шандаров, В. В. Шепелевич. Квант. электрон., 18, № 10 (1991) 1237—1240
- [13] P. Günter, M. Zgonik. Opt. Lett., 16 (1991) 1826—1828
- [14] N. V. Kukhtarev, T. I. Semenets, P. Hribek. Ferroelectrics Lett. Sec., 13 (1991) 29—35
- [15] М. П. Петров, С. И. Степанов, А. В. Хоменко. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике, СПб., Наука (1992)
- [16] С. М. Шандаров, В. В. Шепелевич, Н. Д. Хатьков. Опт. и спектр., 70, № 5 (1991) 1068—1070
- [17] В. В. Шепелевич, А. В. Макаревич, С. М. Шандаров, П. И. Ропот, А. Е. Загорский. Изв. вузов. Физика, 58, № 10 (2015) 74—79
- [18] В. В. Шепелевич, П. И. Ропот. Способ считывания пропускающей голограммы, записанной в кубическом оптически активном фоторефрактивном кристалле со структурой силленита в диффузионном режиме, патент 13572 от 30.08.2010, Национальный центр интеллектуальной собственности (2010) 1—3