

**В. В. Шепелевич, А. В. Макаревич**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ  
КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ПРЕДМЕТНОЙ СВЕТОВОЙ  
ВОЛНЫ ОТ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ И ТОЛЩИНЫ  
КРИСТАЛЛА  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$**

*Выполнены экспериментальные исследования зависимости коэффициента усиления предметной световой волны при двухволновом взаимодействии от ориентационного угла и толщины кубического фоторефрактивного оптически активного кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  с использованием только одного кристаллического образца среза  $(\bar{1}\bar{1}0)$  толщины 16 мм. Показано, что полученные экспериментальные результаты могут быть удовлетворительно теоретически интерпретированы только с учетом обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов в дополнение к традиционно рассматриваемому электрооптическому эффекту.*

**Ключевые слова:** фоторефрактивный кристалл, кристаллический образец, оптическая активность, электрооптический эффект, обратный пьезоэлектрический эффект, фотоупругость, коэффициент усиления, трапециевидная геометрия, кристалл BGO

**Введение.** В настоящее время фоторефрактивные кристаллы силленитов  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  (BSO),  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  (BGO) и  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  (BTO) нашли применение во многих голографических приложениях, которые представлены, например, в [1–3], что обусловлено полезными оптическими свойствами и качествами кристаллов данного типа. Однако часто в таких работах для формирования голографических решеток используются только такие пространственные ориентации кристаллов, при которых вектор голографической решетки  $\vec{K}$  параллелен или перпендикулярен кристаллографическому направлению [001]. Как известно, в этих случаях при теоретических расчетах вкладом в выходные характеристики голограмм (коэффициент усиления предметной световой волны и дифракционную эффективность голограммы) обратного пьезоэлектрического эффекта и фотоупругости (далее сокращенно «пьезоэффект») можно пренебречь [4], [5].

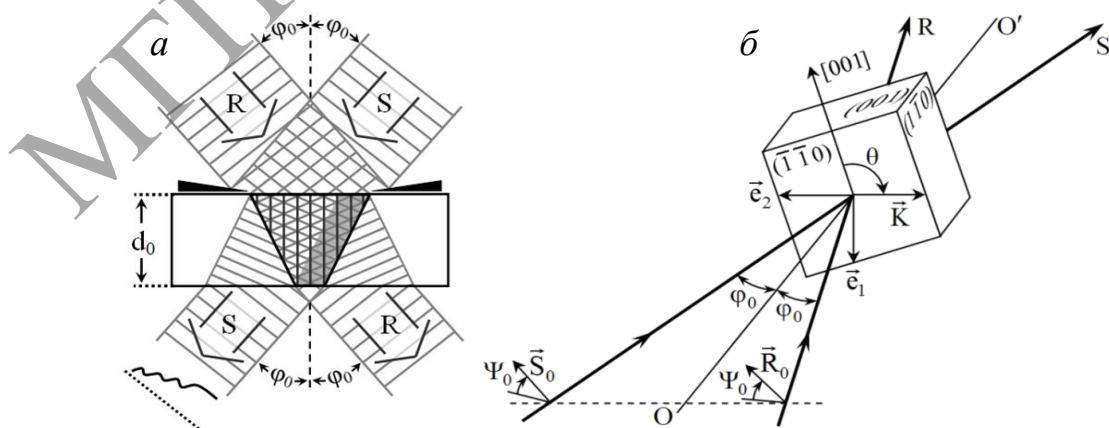
В настоящей работе при изучении зависимости коэффициента усиления предметной световой волны от толщины кристалла BGO мы рассмотрели его пространственные ориентации, отличные от указанных

выше, и установили, что в этих случаях полученные экспериментальные данные могут быть удовлетворительно теоретически интерпретированы только при дополнительном учете пьезоэффекта.

**Методика проведения эксперимента.** Для проведения экспериментальных исследований по изучению зависимости коэффициента усиления предметной световой волны от ориентационного угла и толщины кристалла BGO использовалась трапецевидная геометрия пересечения в кристалле опорного и предметного световых пучков, которая была предложена в работах [6–8] для аналогичных исследований силленитов. Однако в этих работах опять же рассматривались только такие пространственные ориентации кристаллов, при которых  $\vec{K} \parallel [001]$  и  $\vec{K} \perp [001]$ , что позволило исключить пьезоэффект из теоретических расчетов.

Общий принцип использования этой геометрии поясняется на рисунке 1а, из которого видно, что при падении на кристалл опорного R и предметного S световых пучков под углом  $\varphi_0$  и при прохождении ими прямоугольной диафрагмы (обозначена черными клиньями перед кристаллом) в нем формируется голографическая решетка в форме равнобокой трапеции. При этом в светлой области голограммы пересечение пучков осуществляется при различных значениях эффективной толщины кристалла  $d$ , принадлежащей интервалу  $0 < d \leq d_0$ , а в затемненной при фиксированной толщине кристалла  $d_0$ . Очевидно, что при таком подходе, используя только один кристаллический образец, можно получить зависимость коэффициента усиления предметной световой волны от толщины кристалла. При этом описание алгоритма обработки получаемых экспериментальных данных можно найти в [7].

Ориентация использованного в эксперименте кристалла BGO среза  $(\bar{1}\bar{1}0)$  толщины  $d_0 = 16$  мм относительно плоскости распространения световых пучков R и S с векторами напряженности электрического поля  $\vec{R}_0$  и  $\vec{S}_0$ , связанной с рабочей системой координат с осями  $\vec{e}_1$ ,  $\vec{e}_2$  и  $\vec{e}_3$ , представлена на рисунке 1б.



а – трапецевидная геометрия пересечения в кристалле световых пучков;  
б – ориентация кристалла относительно плоскости распространения световых пучков  
Рисунок 1. – Взаимодействие световых пучков в кристалле BGO

Угол пространственной ориентации кристалла  $\theta$  отсчитывался от кристаллографического направления  $[001]$  к вектору голографической решетки  $\vec{K}$ . При изменении  $\theta$  кристалл проворачивался относительно оси  $OO'$  с шагом  $\Delta\theta = 10^\circ$ . Направление отсчета азимута линейной поляризации световых пучков  $\Psi_0$  также представлено на фрагменте  $\bar{b}$  рисунка 1.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Полученные экспериментальные и теоретические (с учетом пьезоэффекта) результаты по изучению зависимости коэффициента усиления предметной световой волны  $\gamma$  от ориентационного угла  $\theta$  и толщины  $d$  кристалла BGO для значений  $\Psi_0$ , равных  $0, 45^\circ, 90^\circ$  и  $135^\circ$  представлены на рисунке 2.

Из рисунка 2 видно, что полученные с учетом пьезоэффекта теоретические поверхности  $\gamma(\theta, d)$  удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. При этом следует отметить, что пренебрежение пьезоэффектом ведет к качественному и количественному различию теории с экспериментом.

При проведении экспериментальных исследований использовался гелий-неоновый лазер ЛГН-207А с относительно малой мощностью, равной  $1.5 \text{ mW}$ . Отношение интенсивностей предметного и опорного световых пучков до вхождения в кристалл  $I_S^0 / I_R^0$  было приблизительно равно  $1/4$ . Угол Брэгга  $\varphi_0$  вне кристалла составлял  $15^\circ$ . Время  $\tau$  записи голограммы в кристалле было приблизительно равно  $30 \text{ с}$ .

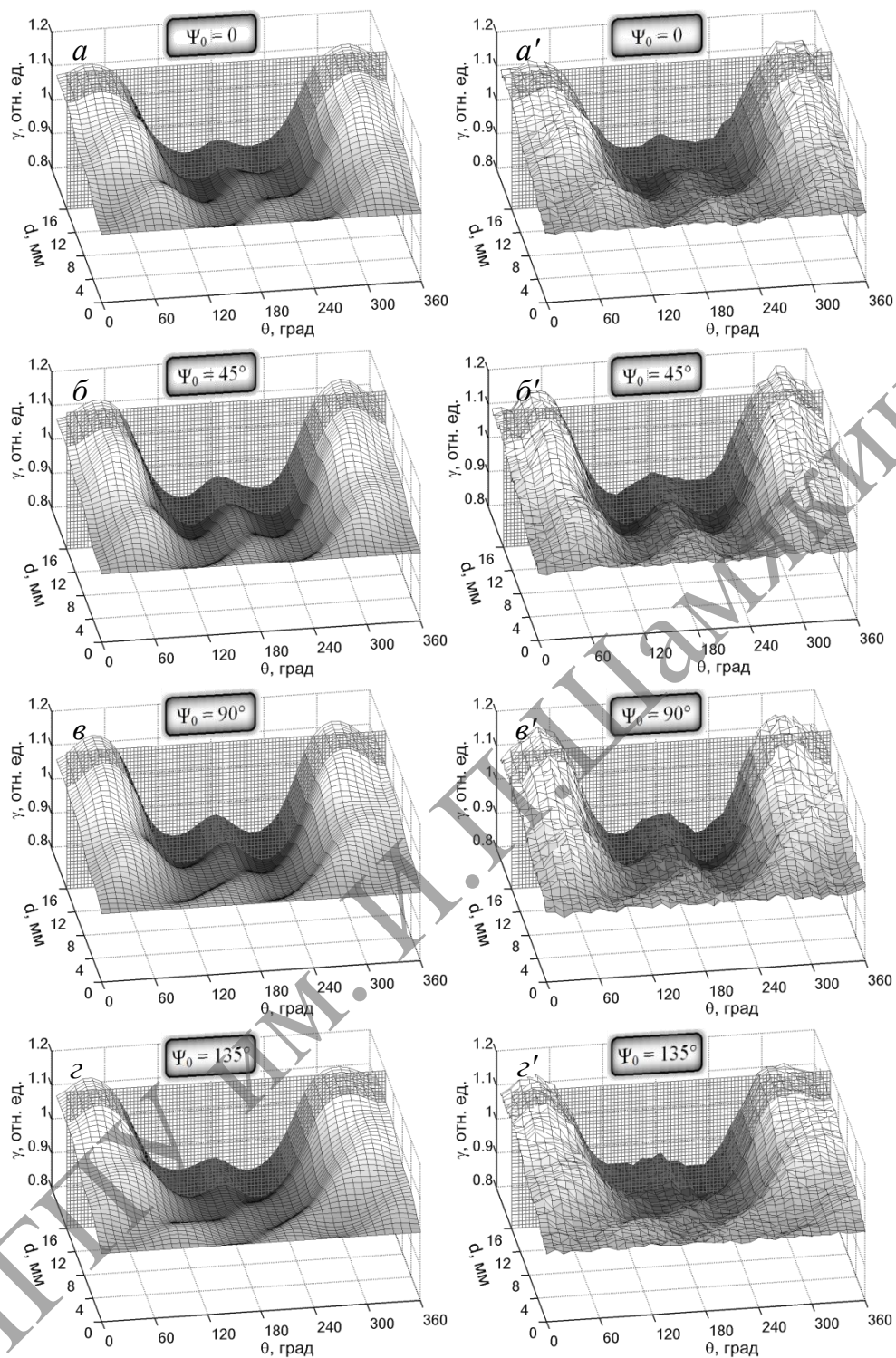
В теоретических расчетах использовались следующие параметры кристалла BGO: удельное вращение плоскости поляризации  $\rho = 363 \text{ рад/м}$ ; показатель преломления  $n = 2.54$ ; электрооптический коэффициент  $r_{41} = -3.4 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}$ ; коэффициенты упругости  $c_1 = 12.8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ ,  $c_2 = 3.05 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ ,  $c_3 = 2.55 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ ; пьезоэлектрический коэффициент  $e_{14} = 0.99 \text{ Кл/м}^2$ ; фотоупругие постоянные  $p_1 = -0.136$ ,  $p_2 = -0.103$ ,  $p_3 = -0.091$ ,  $p_4 = -0.0134$ .

Коэффициент усиления предметной световой волны  $\gamma$  определялся как

$$\gamma = \frac{I_S(\theta)}{I_S^0(\theta)},$$

где  $I_S^0(\theta)$  – интенсивность светового пучка  $S$  на выходе из кристалла без голографической решетки (в отсутствие пучка  $R$ ), а  $I_S(\theta)$  – интенсивность этого же пучка на выходе из кристалла, но при наличии голографической решетки (в присутствии пучка  $R$ ).

Сечение поверхностей  $\gamma(\theta, d)$ , представленных на рисунке 2, плоскостями  $d = \text{const}$  позволяет получить зависимости  $\gamma(\theta)$ , которые показаны на рисунке 3, например, для  $d = 4 \text{ мм}$  (фрагменты  $a, \bar{b}, \bar{v}$  и  $\bar{z}$ ) и  $d = 16 \text{ мм}$  (фрагменты  $a', \bar{b}', \bar{v}'$  и  $\bar{z}'$ ).

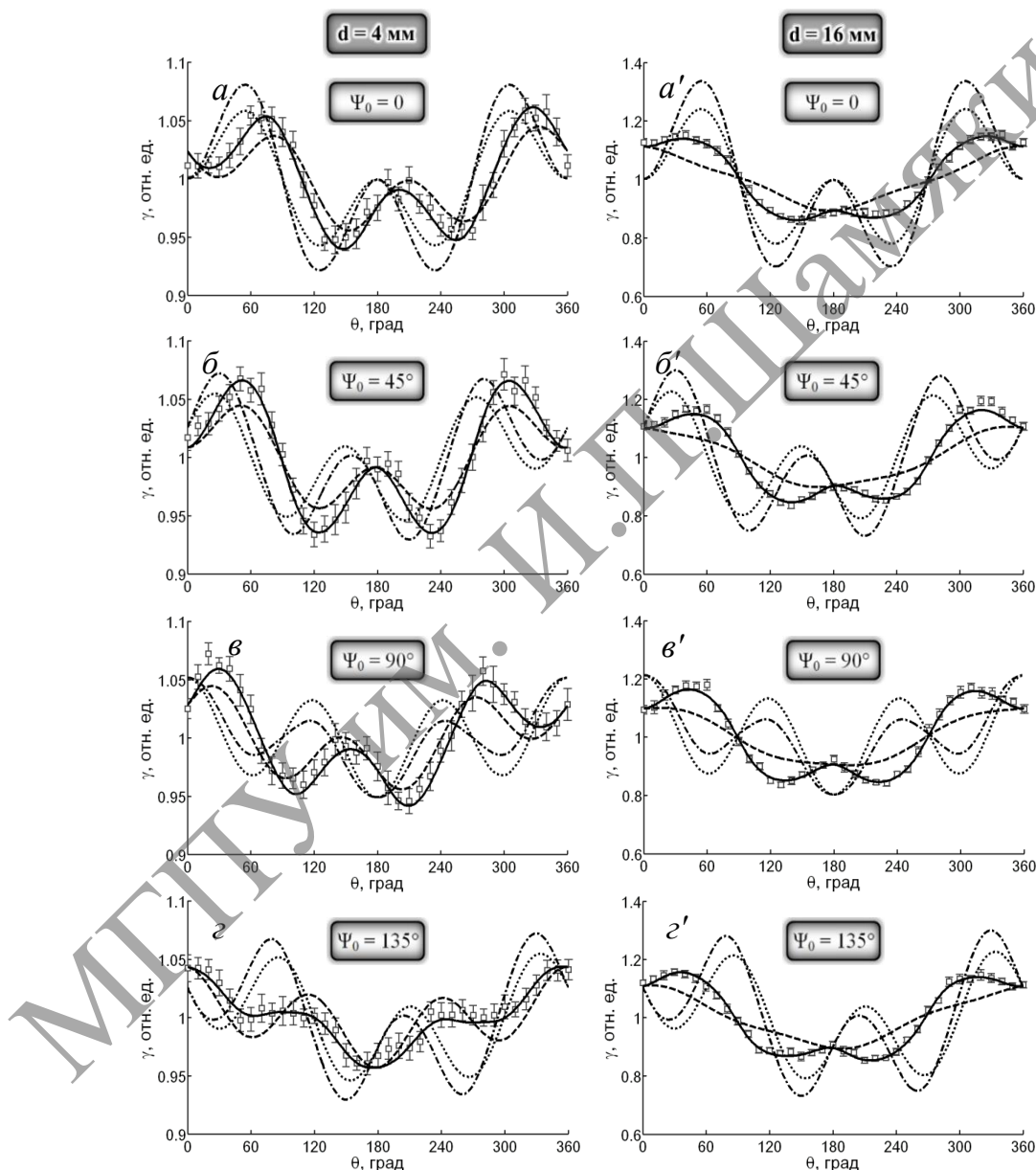


**$a, б, в, г$  – теория;  $a', б', в', г'$  – эксперимент**  
**Рисунок 2. – Поверхности  $\gamma(\theta, \rho)$  для различных значений  $\Psi_0$**

Данные результаты убедительно демонстрируют необходимость учета пьезоэффекта при теоретическом описании взаимодействия световых волн в этом представителе силленитов. Кроме того, из рисунка 3 также следует, что «выключение» оптической активности ведёт к большему проявлению перекачки энергии из одного пучка в другой в широком диапазоне ориентационных углов кристалла.

При этом следует отметить, что существенное увеличение значения  $\gamma$  может быть достигнуто за счет уменьшения отношения интенсивностей  $I_S^0 / I_R^0$  пучков R и S, однако решение такой задачи в рамках настоящей работы не рассматривалось.

Расчет доверительных интервалов экспериментальных данных, представленных на рисунке 3, проводился при значении доверительной вероятности, равном 0.95. Также для графиков, расположенных на этом рисунке слева и справа, выбиралась различная градуировка осей ординат для более детального отражения полученных результатов.



пунктирная линия – теория при  $\epsilon_{14} = 0$  и  $\rho = 0$ ; штрихпунктирная линия – теория при  $\epsilon_{14} \neq 0$  и  $\rho = 0$ ; пунктирная линия – теория при  $\epsilon_{14} = 0$  и  $\rho \neq 0$ ; пунктирная линия – теория при  $\epsilon_{14} \neq 0$  и  $\rho \neq 0$ ;  $\square$  – экспериментальные данные  
 Рисунок 3. – Зависимости  $\gamma(\theta)$  при различных значениях  $d$  и  $\Psi_0$

**Заклучение.** Таким образом, анализируя представленные выше теоретические и экспериментальные данные, можно сделать вывод о том, что удовлетворительное соответствие теории и экспериментальных результатов по исследованию коэффициента усиления  $\gamma$  предметной световой волны в кристалле ВГО при двухволновом взаимодействии возможно только при одновременном учете электрооптического, обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов, а также оптической активности кристалла. При этом проведение экспериментальных исследований зависимости коэффициента  $\gamma$  от ориентационного угла и толщины кристалла дает информацию об указанных параметрах кристаллического образца, при которых достигаются локальные максимумы перекачки энергии из одного пучка в другой, а также позволяет выявить правильность выбранной теоретической теории для предсказания положения таких максимумов.

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

#### **Список основных источников**

1. Петров, М. П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике / М. П. Петров, С. И. Степанов, А. В. Хоменко. – СПб. : Наука. С.-Петербургское отд-ние, 1992. – 320 с.
2. Gesualdi, M. R. R. Light-induced lens analysis in photorefractive crystals employing phase-shifting real-time holographic interferometry / M. R. R. Gesualdi, M. Muramatsu, E. A. Barbosa // Opt. comm. – 2008. – Vol. 281, № 23. – P. 5739–5744. •
3. Photorefractive digital holographic microscopy applied in microstructures analysis / I. V. Brito [et al.] // Opt. Comm. – 2013. – Vol. 286, № 1. – P. 103–110.
4. Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах / С. М. Шандаров [и др.]. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 242 с.
5. Шепелевич, В. В. Голография в фоторефрактивных оптически активных кристаллах / В. В. Шепелевич. – Минск : Изд. центр БГУ, 2012. – 254 с.
6. Dynamic holography with none plane waves in sillenites / E. Shamonina [et al.] // Opt. Quant. Electron. – 1996. – Vol. 28, № 1. – P. 25–42.
7. Investigation of two-wave mixing in arbitrary oriented sillenite crystals / E. Shamonina [et al.] // Appl. Phys. B. – 1997. – Vol. 64, № 1. – P. 49–56.
8. Optical activity in photorefractive  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  / E. Shamonina [et al.] // Opt. Comm. – 1998. – Vol. 146, № 1–6. – P. 62–68.

Vasiliy Shepelevich, Aleksandr Makarevich

**EXPERIMENTAL STUDY OF DEPENDENCE OF OBJECT LIGHT  
WAVE GAIN ON THE SPATIAL ORIENTATION AND THICKNESS  
OF  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  CRYSTAL**

*Summary.* Experimental studies of the dependence of object light wave gain at two-wave interaction on the orientation angle and thickness of cubic photorefractive optically active crystal  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  were performed using only one  $(\bar{1}\bar{1}0)$ -cut crystal sample of 16 mm thick. It is shown that the obtained experimental results can be satisfactorily theoretically interpreted taking into account the inverse piezoelectric and the photo-elastic effects in addition to the traditionally considered electro-optical effect.

**Keywords:** photorefractive crystal, crystal sample, optical activity, electro-optic effect, inverse piezoelectric effect, photoelasticity, gain, trapezoidal geometry, BGO crystal.