

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, трапезиевидная геометрия, кристалл ВГО

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].

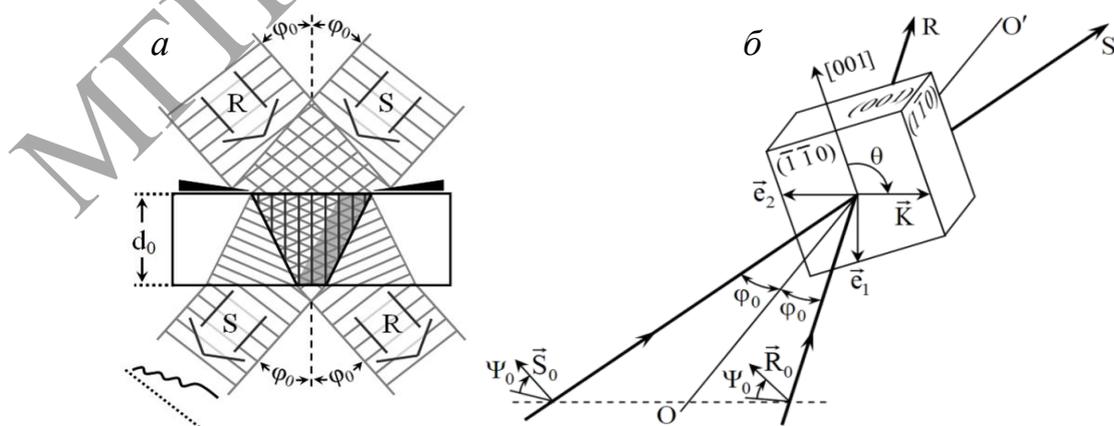
В настоящей работе при изучении зависимости коэффициента усиления предметной световой волны от толщины кристалла ВГО мы рассмотрели его пространственные ориентации, отличные от указанных

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 трапециевидная 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 φ_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 – трапециевидная 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 θ отсчитывался от кристаллографического направления $[001]$ к вектору голографической решетки \vec{K} . При изменении θ кристалл проворачивался относительно оси OO' с шагом $\Delta\theta = 10^\circ$. Направление отсчета азимута линейной поляризации световых пучков Ψ_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 γ от ориентационного угла θ и толщины d кристалла BGO для значений Ψ_0 , равных $0, 45^\circ, 90^\circ$ и 135° 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 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 φ_0 вне кристалла составлял 15° . Время τ записи голограммы в кристалле было приблизительно равно 30 с .

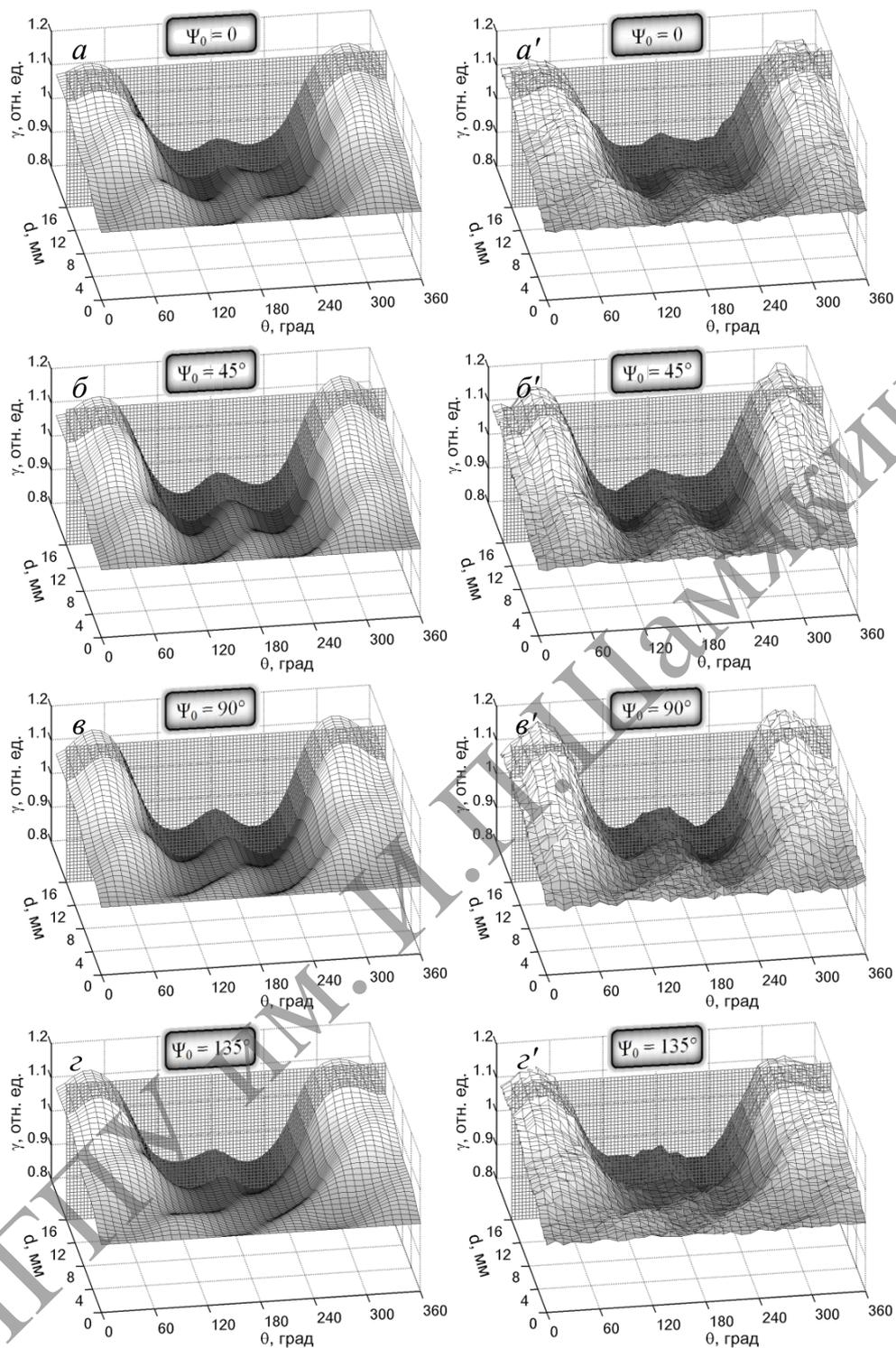
В теоретических расчетах использовались следующие параметры кристалла BGO: удельное вращение плоскости поляризации $\rho = 363 \text{ рад/м}$; показатель преломления $n = 2.54$; электрооптический коэффициент $r_{41} = -3.4 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}$; коэффициенты упругости $c_1 = 12.8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$, $c_2 = 3.05 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$, $c_3 = 2.55 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$; 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 γ 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}').

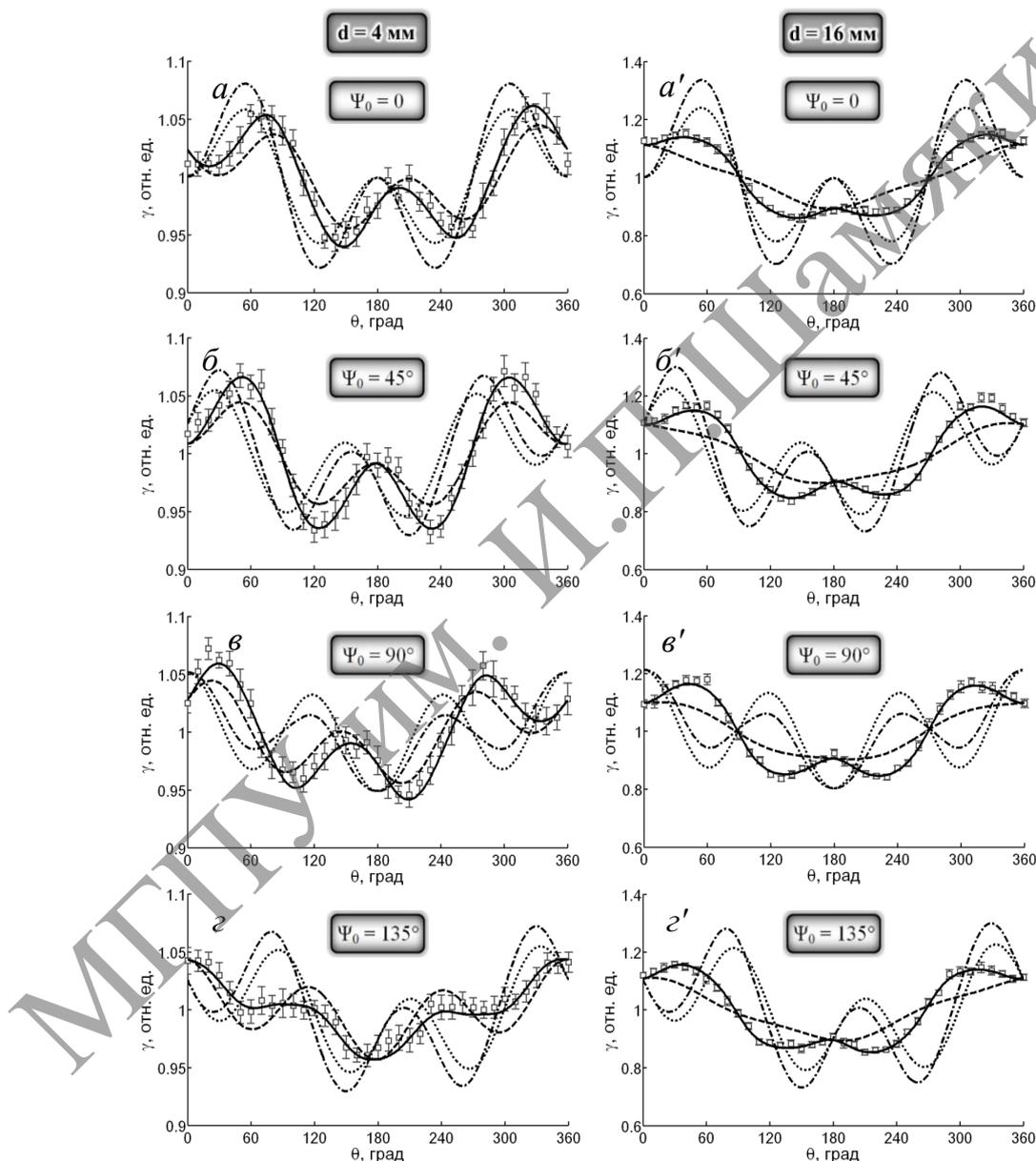


$a, б, в, г$ – теория; $a', б', в', г'$ – эксперимент
Рисунок 2. – Поверхности $\gamma(\theta, \rho)$ для различных значений Ψ_0

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 γ 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 Ψ_0

Закключение. 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 γ 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 γ 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.