

2. Казак, Н. Бесселевы световые пучки: свойства и перспективы применения / Н. Казак, В. Белый, Н. Хило // Наука и инновации. – 2003. – № 7–8. – С. 9–18.

3. Generating Bessel beams with broad depth-of-field by using phase-only acoustic holograms / S. Jiménez-Gambín [et al.] // Scientific reports. – 2019. – Т. 9, № 1. – Article 20104.

4. Vaity, P. Perfect vortex beam: Fourier transformation of a Bessel beam / P. Vaity, L. Rusch // Optics letters. – 2015. – Т. 40, № 4. – P. 597–600.

5. Прудников, А.П. Интегралы и ряды. Специальные функции / А.П. Прудников, Ю.А. Брычков, О.И. Маричев. – М. : Наука, 1983.

УДК 535.4; 53.05

**А.В. Макаревич<sup>1</sup>, В.Н. Навныко<sup>1</sup>, С.М. Шандаров<sup>2</sup>, Е.Ю. Цырулик<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Мозырский государственный педагогический университет имени И.П. Шамякина

<sup>2</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

## **ОСОБЕННОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫХОДНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОЛОГРАММ В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ КРИСТАЛЛАХ**

Представлены результаты экспериментальных исследований зависимости дифракционной эффективности и коэффициента усиления предметной световой волны от толщины фоторефрактивного кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ . Дана теоретическая интерпретация полученных результатов на основе модели смешанных голограмм, формируемых в этом кристалле, с одновременным учетом обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов. Экспериментальные исследования реализованы на основе ранее апробированной методики изучения зависимости выходных энергетических характеристик фазовых голограмм от толщины фоторефрактивных кристаллов  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  и  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ .

**Ключевые слова:** голографическая решетка, смешанная голограмма, фоторефрактивный кристалл, дифракционная эффективность, коэффициент усиления.

**Введение.** Известно, что дифракционная эффективность  $\eta$  объемных голограмм и коэффициент усиления  $\gamma$  предметной световой волны в фоторефрактивных кристаллах типа силленита  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  (BSO),  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  (BGO) и  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  (BTO) существенно зависят от толщины  $d$  используемых кристаллических образцов, их материальных параметров, а также от условий формирования голограмм. К таким условиям, в частности, относятся ориентация вектора голографической решетки относительно кристаллографических направлений, определяемая ориентационным углом кристалла  $\theta$ , и поляризация взаимодействующих в них световых волн, задаваемая азимутом  $\Psi_0$  (см., например [1–3]).

При этом ранее в работах, рассматривающих зависимости выходных энергетических характеристик голограмм от толщины фоторефрактивных сред, авторы чаще всего ограничивались обсуждением только результатов теоретического анализа, не сравнивая их с экспериментом (см., например, [4, 5]). Однако в работах [6–8] с использованием идеи, предложенной в [9–11], на примерах кристаллов BSO и BGO была

показана и развита возможность исследования зависимостей дифракционной эффективности  $\eta$  и коэффициента усиления  $\gamma$  не только от толщины  $d$  этих кристаллических сред, но и от их ориентационного угла  $\theta$  при различных значениях азимута линейной поляризации  $\Psi_0$  взаимодействующих в них волн. Также на основании проведенных исследований была показана необходимость обязательного учета обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов (далее сокращенно «пьезоэффект») при теоретической интерпретации экспериментальных данных, чем пренебрегалось в [9–11].

В рамках данной работы представлены результаты экспериментального изучения зависимостей  $\eta(d)$  и  $\gamma(d)$  с теоретической интерпретацией экспериментальных данных в соответствии с моделью, предложенной в [12], при одновременном учете пьезоэффекта и модели смешанных голограмм, формируемых в кристалле ВТО среза  $(\bar{1}10)$ .

Для изучения зависимости дифракционной эффективности голограмм от толщины кристалла ВТО использовалась методика проведения эксперимента и обработки полученных данных, описанная в [6; 7]. Угол схождения опорного и предметного световых пучков вне кристалла равнялся  $50^\circ$ , а отношение их интенсивностей составляло приблизительно 0,5. Ориентационный угол  $\theta$  был равен  $200^\circ$ . Толщина кристалла составляла 7,7 мм.

Полученные экспериментальные зависимости  $\eta(d)$  при  $\Psi_0 = 0, 45^\circ, 90^\circ$  и  $135^\circ$  изображены на рисунке 1, где также представлены соответствующие теоретические кривые, построенные с учетом влияния на дифракционную эффективность смешанной голограммы пьезоэффекта (сплошная линия) и без его учёта (штриховая линия).

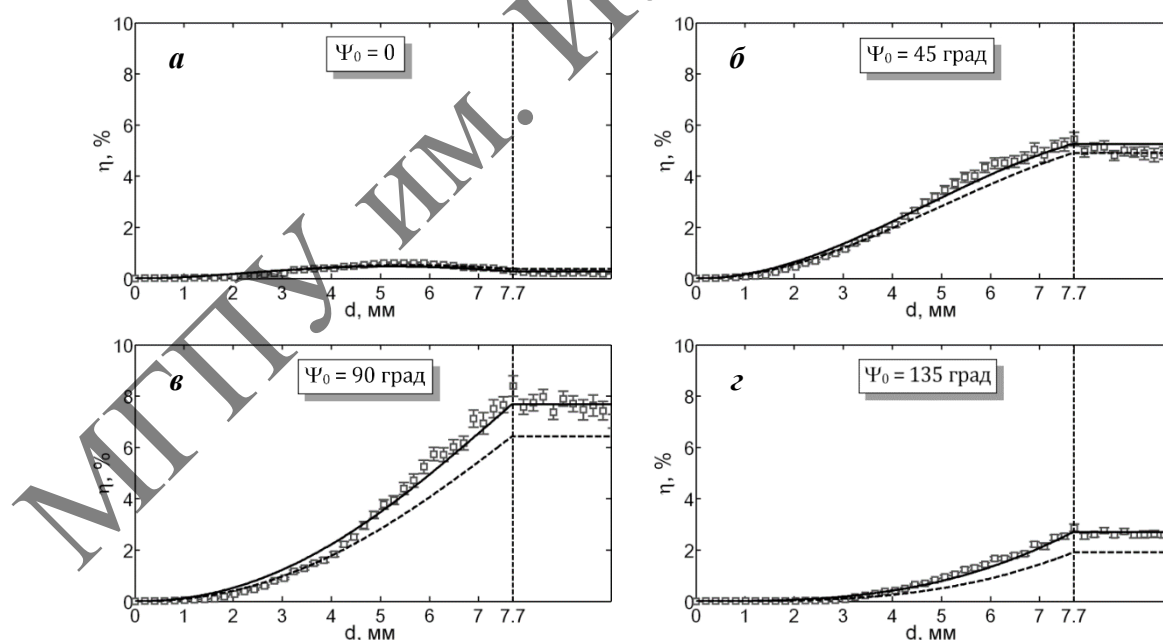


Рисунок 1 – Зависимости  $\eta(d)$  смешанных голограмм в кристалле ВТО: штриховая и сплошная линии – без учёта и с учётом пьезоэффекта соответственно;  $\square$  – экспериментальные данные

При теоретическом анализе полученных результатов использованы параметры кристалла ВТО из [12]. Амплитуда напряженности поля пространственного заряда  $E_{SC}$  была определена по результатам наилучшей корреляции теории и эксперимента и составила 3,053 кВ/см.

Исходя из рисунков 1, б–1, г, можно сделать вывод, что теоретические зависимости  $\eta(d)$ , построенные в пренебрежении пьезоэффектом, существенно расходятся с экспериментальными данными. Исключением является рисунок 1, а, где это различие невелико. При этом в пренебрежении пьезоэффектом варьирование подгоночных значений  $E_{SC}$  не дает одновременной удовлетворительной корреляции теоретических зависимостей  $\eta(d)$  и полученных экспериментальных данных на рисунках 1, а–1, г.

В частности, полученные при проведении эксперимента двумерные изображения распределения интенсивности восстановленного с голограммы пучка на светочувствительной матрице CCD-камеры в соответствии с методикой, описанной в [6; 7], представлены на рисунке 2. Для лучшей визуализации этих изображений их яркость и контраст увеличены на 50 единиц с использованием диспетчера рисунков Microsoft Office.

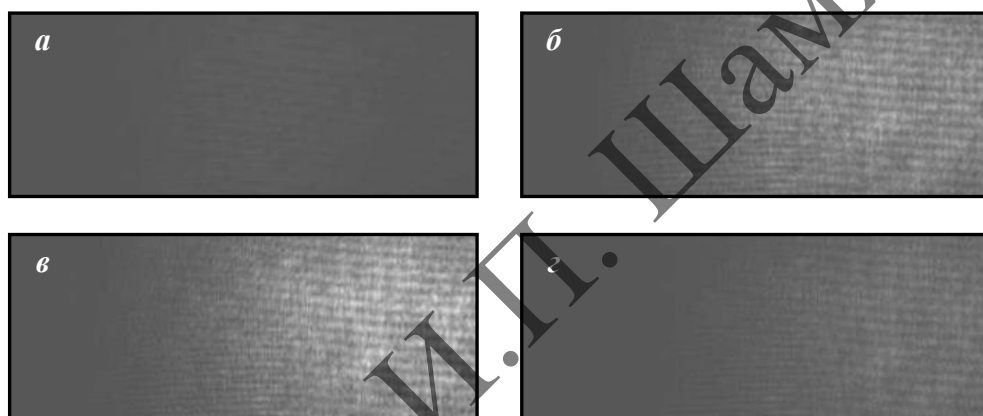


Рисунок 2 – Изображения распределения интенсивности восстановленного с голограммы пучка на светочувствительной матрице CCD-камеры: а –  $\Psi_0 = 0^\circ$ ; б –  $\Psi_0 = 45^\circ$ ; в –  $\Psi_0 = 90^\circ$ ; г –  $\Psi_0 = 135^\circ$

Для экспериментального изучения зависимости  $\gamma(d)$  и обработки полученных данных была применена методика, описанная в [8]. Условия эксперимента были аналогичны рассмотренным выше, за исключением отношения интенсивностей световых пучков до вхождения в кристалл, которое в этом случае составляло приблизительно 0,24.

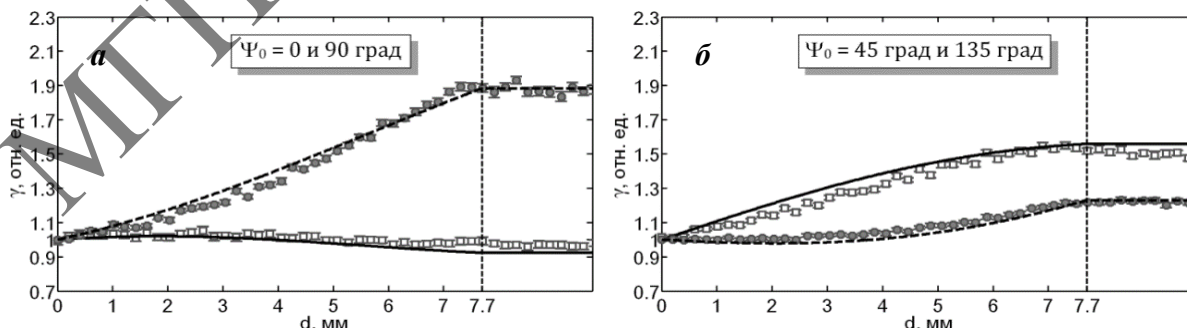


Рисунок 3 – Зависимости  $\gamma(d)$  смешанных голограмм в кристалле ВТО: а –  $\Psi_0 = 0^\circ$  и  $90^\circ$ ; б –  $\Psi_0 = 45^\circ$  и  $135^\circ$ ; сплошная линия и  $\square$  – соответственно теоретически рассчитанные и экспериментально установленные зависимости  $\gamma(d)$  при  $\Psi_0 = 0^\circ$  и  $45^\circ$ ; штриховая линия и  $\bullet$  – соответственно теоретически рассчитанные и экспериментально установленные зависимости  $\gamma(d)$  при  $\Psi_0 = 90^\circ$  и  $135^\circ$

Результаты экспериментальных и теоретических исследований, выполненных при двух взаимно перпендикулярных поляризациях, представлены на рисунке 3. В данном случае при теоретическом анализе экспериментальных данных амплитуда напряженности поля пространственного заряда  $E_{SC}$  составила 1,301 кВ/см.

Из этих рисунков следует, что экспериментальные данные и теоретические зависимости  $\gamma(d)$  имеют удовлетворительное согласование. Этот экспериментально доказанный факт является признаком того, что система уравнений связанных волн, представленная в [12], также может быть успешно применена для описания процесса одновременной дифракции световых волн на смешанных голограммах, сформированных при двухволновом взаимодействии в кристалле ВТО.

Расчет доверительных интервалов для экспериментальных данных на рисунках 1 и 3 проводился при значении доверительной вероятности, равном 0,95.

Ниже в соответствии с методикой, описанной в [8], на рисунке 4 показаны двумерные изображения распределения интенсивности предметного пучка при проведении экспериментов. Здесь яркость и контраст изображений увеличены на 20 единиц.

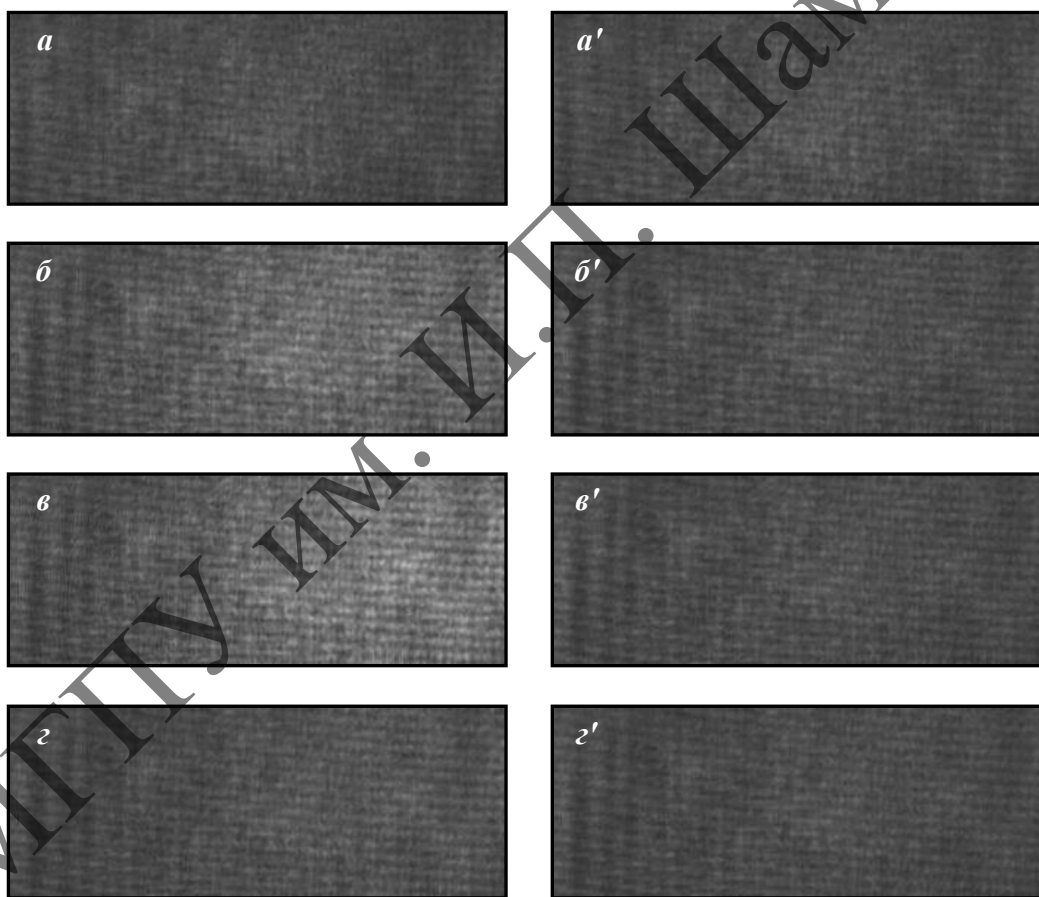


Рисунок 4 – Изображения распределения интенсивности в предметном пучке:  $a, б, в, г$  – при наличии голографической решётки в кристалле;  $a', б', в', г'$  – в отсутствие голографической решётки в кристалле;  $a$  и  $a'$  – при  $\Psi_0 = 0$ ;  $б$  и  $б'$  – при  $\Psi_0 = 45^\circ$ ;  $в$  и  $в'$  – при  $\Psi_0 = 90^\circ$ ;  $г$  и  $г'$  – при  $\Psi_0 = 135^\circ$

Полосы, которые можно видеть в левой части изображений 4,  $a-г$  и 4,  $a'-г'$  являются результатом дифракции предметного пучка на прямоугольной диафрагме. Однако при обработке экспериментальных данных [8] влияние этих дифракционных полос при получении зависимостей  $\gamma(d)$  взаимно компенсируется.

Таким образом, представлены результаты экспериментального исследования зависимости дифракционной эффективности  $\eta$  смешанных голограмм и коэффициента усиления  $\gamma$  предметного светового пучка от толщины  $d$  кристалла ВТО ( $\bar{1}\bar{1}0$ ) при его ориентационном угле  $\theta = 200^\circ$  и четырех азимутах линейной поляризации взаимодействующих световых пучков  $\psi_0 = 0, 45^\circ, 90^\circ$  и  $135^\circ$  с использованием одного кристаллического образца среза ( $\bar{1}\bar{1}0$ ) с фиксированной толщиной 7,7 мм. Выявлено, что только учет обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов наряду с моделью смешанных голограмм в теоретических расчётах приводит к удовлетворительному согласованию теории и эксперимента, что должно быть принято во внимание при практическом использовании этого кристалла. При этом методика исследования и обработки экспериментальных данных, описанная в [6–8], может быть в перспективе использована для аналогичного исследования и других объемных фоторефрактивных голографических сред с целью проверки или возможной корректировки теории дифракции в них световых волн.

#### Список использованных источников

1. Solymar, L. The physics and applications of photorefractive materials / L. Solymar, D. J. Webb, A. Grunnet-Jepsen. – Oxford : Clarendon Press, 1996. – 494 p.
2. Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах / С. М. Шандаров [и др.]. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 242 с.
3. Шепелевич, В.В. Голография в фоторефрактивных оптически активных кристаллах / В.В. Шепелевич. – Минск : Изд. центр БГУ, 2012. – 254 с.
4. Gonzalez, G. Optimization of the diffraction efficiency in non-uniform gratings in sillenite crystals ( $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  and  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ ) considering the variation of fringe period, optical activity and polarization angles in a strong non-linear regime / G. Gonzalez, A. Zuñiga, F. Magaña // Rev. Mex. Fis. – 2009. – Vol. 55, № 1. – P. 25–31.
5. Gonzalez, G. Influence of the non-uniformity of the grating along sample thickness and of grating period variation, on the diffraction efficiency optimization in a sillenite crystal ( $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ) in a strong non-linear regime under an external dc field / G. Gonzalez, A. Zuñiga, F. Magaña // Opt. mat. – 2009. – Vol. 31, № 8. – P. 1218–1223.
6. Экспериментальное исследование ориентационной зависимости дифракционной эффективности пропускающих голограмм от толщины кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  / А.В. Макаревич [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41, № 19. – С. 46–54.
7. Экспериментальное исследование зависимости дифракционной эффективности фоторефрактивных голограмм от толщины образца и ориентационного угла в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  среза ( $\bar{1}\bar{1}0$ ) / В.В. Шепелевич [и др.] // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 28, № 10. – С. 74–79.
8. Макаревич, А.В. Влияние пространственной ориентации и толщины кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  на коэффициент усиления предметной световой волны: теория и эксперимент / А.В. Макаревич, В.В. Шепелевич, С.М. Шандаров // Проблемы физики, математики и техники. – 2018. – № 4 (37). – С. 35–43.
9. Dynamic holography with none plane waves in sillenites / E. Shamonina [et al.] // Opt. Quant. Electron. – 1996. – Vol. 28, № 1. – P. 25–42.

10. Investigation of two-wave mixing in arbitrary oriented sillenite crystals / E. Shamonina [et al.] // Appl. Phys. B. – 1997. – Vol. 64, № 1. – P. 49–56.

11. Optical activity in photorefractive  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  / E. Shamonina [et al.] // Opt. Comm. – 1998. – Vol. 146, № 1–6. – P. 62–68.

12. Шепелевич, В.В. Смешанные пропускающие голограммы в фоторефрактивном пьезокристалле  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  / В.В. Шепелевич, А.В. Макаревич, С.М. Шандаров // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40, № 22. – С. 83–89.

УДК 535.42

**С.Ф. Ничипорко**

*Мозырский государственный педагогический университет имени И.П. Шамякина*

### **ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДИФРАКЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГОЛОГРАММ В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ КРИСТАЛЛАХ СРЕЗА (111)**

Представлены результаты исследований поляризационной зависимости дифракционной эффективности пропускающих голограмм от приложенного электрического поля к фоторефрактивному кристаллу  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  с одновременным учетом электрооптического и пьезоэлектрического эффектов, фотоупругости и оптической активности кристалла.

**Ключевые слова:** дифракционная эффективность голограммы, фоторефрактивный кристалл, азимут поляризации.

За последние 30 лет проявляется значительный интерес к исследованию взаимодействия световых волн в кубических фоторефрактивных кристаллах  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  (BSO),  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  (BTO), GaAs среза (111). В [1] изучались дифракция и двухволновое взаимодействие в кристалле GaAs среза (111). Ориентационная зависимость эффективности четырехволнового взаимодействия в кристаллах класса  $\bar{4}3m$  этого же среза исследовалась в [2]. В [3] рассматривалось двухволновое взаимодействие в таких же кристаллах для случая произвольной пространственной ориентации вектора голографической решетки, включая срез (111). Исследованию отражательных голографических решеток в кристалле BTO среза (111) посвящена работа [4]. В [4–9] рассмотрены различные способы оптимизации относительной интенсивности сигнальной волны и дифракционной эффективности голограмм кубических фоторефрактивных пьезокристаллах среза (111). Выходные характеристики смешанных голограмм, записанных в фоторефрактивном кубическом пьезокристалле BTO в диффузионном режиме в случае произвольной пространственной ориентации вектора голографической решетки, включая срез (111) исследованы в [10].

В данной работе представлены результаты исследования влияния внешнего электрического поля на поляризационные зависимости дифракционной эффективности пропускающих голограмм с учетом электрооптического, пьезоэлектрического эффектов, фотоупругости и оптической активности кубического кристалла BSO среза (111).