

09

## Смешанные пропускающие голограммы в фоторефрактивном пьезокристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$

© В.В. Шепелевич<sup>1</sup>, А.В. Макаревич<sup>1</sup>, С.М. Шандаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Мозырский государственный педагогический университет  
им. И.П. Шамякина, Мозырь, Беларусь

<sup>2</sup> Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники, Томск, Россия  
E-mail: vassher@inbox.ru

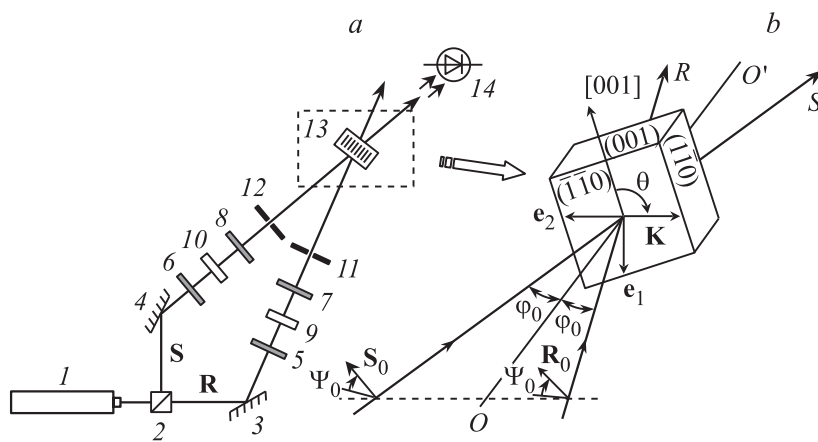
Поступило в Редакцию 28 мая 2014 г.

Проведено экспериментальное исследование зависимости дифракционной эффективности ненаклонных пропускающих голограмм, сформированных в фоторефрактивном пьезокристалле  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  среза  $(\bar{1}\bar{1}0)$ , от ориентационного угла кристалла. Показано, что для теоретического объяснения полученных экспериментальных результатов необходимо предположить наличие в кристалле наряду с фазовыми голографическими решетками амплитудных решеток.

В связи с возможностями практического применения кубического фоторефрактивного кристалла со структурой силленита  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  (ВТО) в качестве светочувствительной регистрирующей среды в голографической интерферометрии (см., например, [1–3]) представляет интерес оптимизация процесса считывания формируемых в нем голограмм.

В [4,5] показано, что для удовлетворительной интерпретации экспериментальных данных, получаемых при исследовании дифракционной эффективности фазовых голограмм, сформированных в фоторефрактивном пьезокристалле  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  (BSO) среза  $(\bar{1}\bar{1}0)$ , необходимо учитывать кроме линейного электрооптического эффекта пьезоэлектрические и фотоупругие свойства этого кристалла, а также его оптическую активность.

Однако проведенные экспериментальные исследования зависимости дифракционной эффективности голографических решеток, записанных в кристалле ВТО среза  $(\bar{1}\bar{1}0)$  толщиной 7.7 mm, от ориентационного угла кристалла показали, что даже для качественного соответствия



**Рис. 1.** *a* — оптическая схема экспериментальной установки: 1 — гелий-неоновый лазер, 2 — светоделительный кубик; 3, 4 — зеркала; 5–8 — поляризаторы; 9, 10 — четвертьволновые фазовые пластинки; 11, 12 — диафрагмы; 13 — кристалл ВТО; 14 — фотодиод ФД-7К; *b* — ориентация кристаллического образца относительно плоскости падения световых пучков.

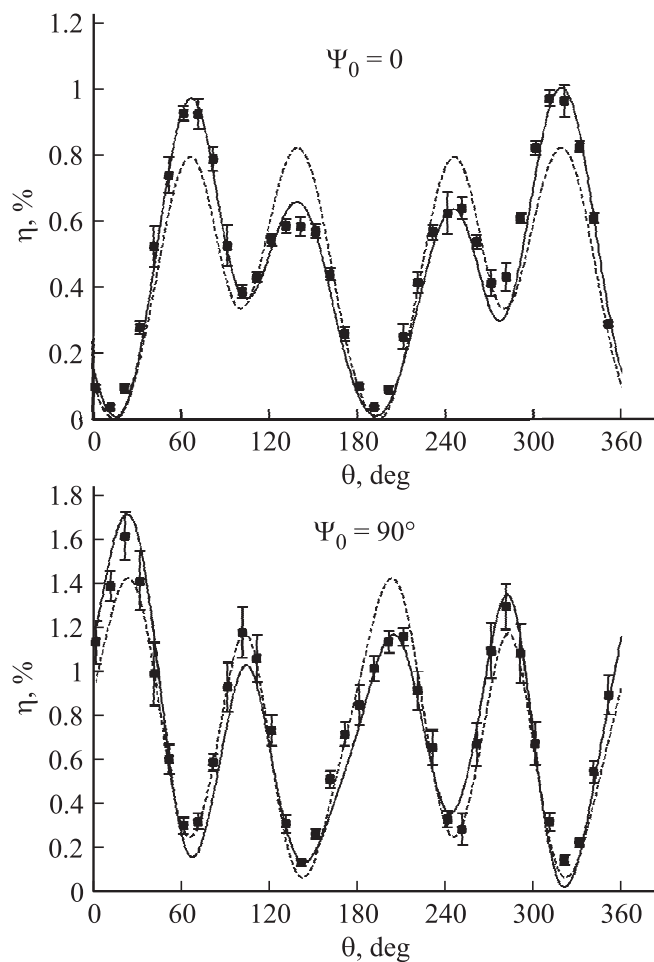
полученных экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов недостаточно использования модели чисто фазовых голограмм, а необходимо дополнительное привлечение феноменологической модели амплитудных голограмм. Возникновение таких голограмм, как известно [6], обусловлено изменениями коэффициента поглощения среды под действием интерференционного светового поля. При этом совокупность фазовой и амплитудной (абсорбционной) голографических решеток принято называть смешанной голограммой [7].

Эксперимент проводился по схеме, изображенной на рисунке 1, *a*. Световой пучок от гелий-неонового лазера (ЛГН-222) 1, излучающего на длине волны 632.8 нм, разделялся светоделительным кубиком 2 на опорный *R* и предметный *S* пучки. Эти пучки, отражаясь от зеркал 3 и 4, проходили через установленные на их пути поляризаторы 5–8, четвертьволновые фазовые пластинки 9, 10 и диафрагмы 11, 12, формируя в кристалле ВТО 13 ненаклонную пропускающую голограмму. При этом роль поляризаторов 5 и 6 заключалась в создании линейной поляризации световых пучков *R* и *S* с заданным азимутом,

что значительно упрощало юстировку четвертьволновых фазовых пластинок 9, 10. За кристаллом на пути распространения предметного пучка устанавливался в качестве регистратора световой интенсивности фотодиод (ФД-7К) 14.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. После непрерывного освещения кристалла световыми пучками в течение промежутка времени  $\tau \approx 30$  s, во время которого светочувствительная площадка фотодиода 14 перекрывалась, осуществлялось перекрытие предметного пучка  $S$  между диафрагмой 12 и кристаллом 13 и открытие светочувствительной площадки фотодиода 14. В результате дифракции пучка  $R$  на записанной в кристалле голографической решетке происходило восстановление копии  $S'$  предметного пучка  $S$ , участвовавшего в записи голограммы. Восстановленная копия  $S'$  предметного пучка регистрировалась фотодиодом 14, включенным в электрическую цепь, содержащую цифровой вольтметр, показания которого фиксировались. После этого кристалл поворачивался на  $10^\circ$  вокруг оси  $OO'$  (рис. 1,  $b$ ) с последующим повторением вышеописанной последовательности действий. На рис. 1,  $b$  показана также ориентация кристаллического образца относительно плоскости распространения световых пучков. Ориентационный угол  $\theta$  отсчитывался от кристаллографического направления  $[001]$  к вектору голографической решетки  $\mathbf{K}$ , направленному противоположно единичному вектору  $\mathbf{e}_2$  рабочей декартовой системы координат. Эксперименты проводились при одинаковых значениях азимутов поляризации опорной и предметной световых волн, которые выбирались равными  $\Psi_0 = 0$  и  $\Psi_0 = 90^\circ$  при соответствующих отношениях интенсивностей пучков  $I_S/I_R$ , равных 0.14 и 0.09. Угол Брэгга  $\varphi_0$  вне кристалла был равен  $12^\circ$ . Перед началом проведения экспериментов кристалл ВТО засвечивался коллимированным опорным пучком в течение 30 min.

На рис. 2 представлены результаты экспериментальных исследований зависимости дифракционной эффективности  $\eta(\theta) = I_R^{diff}(\theta)/I_R^0 \cdot 100\%$  от ориентационного угла кристалла  $\theta$ , где  $I_R^{diff}(\theta) = I'_S(\theta)$  — интенсивность дифрагированного на голографической решетке опорного пучка  $R$  на выходе из кристалла при некотором фиксированном значении  $\theta$ ,  $I_R^0$  — интенсивность опорного пучка  $R$  на входе в кристалл. При выполнении теоретических расчетов были приняты во внимание френелевские коэффициенты отражения считывающего пучка на лицевой грани кристалла, а дифрагированного пучка — на тыльной.



**Рис. 2.** Зависимость дифракционной эффективности  $\eta$  голограмм, записанных в ВТО, от ориентационного угла  $\theta$ : штриховая линия — теоретическая зависимость  $\eta(\theta)$  без учета вклада амплитудной составляющей голограммы, сплошная линия — теоретическая зависимость  $\eta(\theta)$  с учетом вклада амплитудной составляющей голограммы; ■ — экспериментальные данные.

В каждом эксперименте при фиксированном азимуте поляризации  $\Psi_0$  осуществлялся полный пятикратный оборот кристалла вокруг оси  $OO'$ . При этом некоторый разброс экспериментальных данных объясняется неидеальной виброустойчивостью экспериментальной установки, непостоянством температуры помещения при проведении экспериментов, возможными небольшими изменениями мощности лазерного излучения и т. д.

Теоретическая интерпретация экспериментальных данных проводилась на основании решения системы линейных дифференциальных уравнений связанных волн (1):

$$\begin{cases} \frac{dR_{\perp}}{dz} = -\alpha R_{\perp} + \rho R_{\parallel} + \left(ie^{-i\delta}\chi_1 - \frac{\varepsilon_i}{\cos\varphi}\right) S_{\perp} + ie^{-i\delta}\chi_2 S_{\parallel}, \\ \frac{dR_{\parallel}}{dz} = -\rho R_{\perp} - \alpha R_{\parallel} + e^{-i\delta}\chi_3 S_{\perp} + \left(ie^{-i\delta}\chi_4 - \frac{\varepsilon_i \cos 2\varphi}{\cos\varphi}\right) S_{\parallel}, \\ \frac{dS_{\perp}}{dz} = \left(ie^{i\delta}\chi_1 - \frac{\varepsilon_i}{\cos\varphi}\right) R_{\perp} + ie^{i\delta}\chi_3 R_{\parallel} - \alpha S_{\perp} + \rho S_{\parallel}, \\ \frac{dS_{\parallel}}{dz} = ie^{i\delta}\chi_2 R_{\perp} + \left(ie^{i\delta}\chi_4 - \frac{\varepsilon_i \cos 2\varphi}{\cos\varphi}\right) R_{\parallel} - \rho S_{\perp} - \alpha S_{\parallel}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь введены обозначения  $R_{\perp}$  и  $R_{\parallel}$ ,  $S_{\perp}$  и  $S_{\parallel}$  — проекции векторных амплитуд волн  $R$  и  $S$  на направление, перпендикулярное к плоскости падения ( $\perp$ ) и лежащее в плоскости падения ( $\parallel$ );  $\alpha = \alpha_{\lambda}/\cos\varphi$ , где  $\alpha_{\lambda}$  — коэффициент поглощения кристалла для данной длины волны электромагнитного излучения;  $\varphi$  — брэгговский угол для опорной и предметной световых волн внутри кристалла;  $\rho = \rho_0/\cos\varphi$ ,  $\rho_0$  — удельное вращение плоскости поляризации световой волны;  $\varepsilon_i$  — параметр для характеристики амплитудной решетки;  $\delta = \pi/2$  — фазовый сдвиг фазовой составляющей голографической решетки относительно амплитудной составляющей этой решетки, совпадающей по фазе с интерференционной картиной;  $\chi_j$  — постоянные связи, включающие влияние электрооптического, обратного пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов, где  $j = 1, 2, 3, 4$ .

При расчете использованы параметры кристалла ВТО из [8]. Кроме того, удельное вращение плоскости поляризации  $\rho_0 = 112 \text{ rad/m}$  и коэффициент поглощения были измерены на исследуемом образце кристалла ВТО; электрическое поле решетки пространственного заряда  $E_G$  для азимута поляризации  $\Psi_0 = 0$  принималось равным  $8.25 \cdot 10^4 \text{ V/m}$ , а для азимута поляризации  $\Psi_0 = 90^\circ - 9.75 \cdot 10^4 \text{ V/m}$ ; при этом расхождение значений полей пространственного заряда объясняется различиями угла между направлениями векторов напряженности

электрического поля для входящих в гиротропный кристалл световых волн, что непосредственно влияет на величину глубины модуляции видности голографической решетки кристалла. В случае чисто фазовой голограммы параметр  $\varepsilon_i$ , характеризующий амплитудную решетку, считался равным 0 (штриховая линия), а в случае учета абсорбционной составляющей голограммы составлял  $2.1 \text{ м}^{-1}$ .

Из рис. 2 видно, что в случае теоретической кривой, характеризующей зависимость дифракционной эффективности чисто фазовых голограмм от ориентационного угла кристалла, в каждом случае ( $\Psi_0 = 0$  и  $\Psi_0 = 90^\circ$ ) наблюдается повторение ее характера после поворота кристалла на угол  $\theta = 180^\circ$ , что, несомненно, противоречит результатам эксперимента. При этом „включение“ амплитудной составляющей голографической решетки приводит к качественному соответствию теоретических результатов и экспериментальных данных, что свидетельствует о необходимости ее учета при теоретическом описании процессов считывания голограмм в кристалле ВТО и дает возможность предсказания ориентационных углов и толщины кристалла, при которых дифракционная эффективность голограмм принимает максимальные значения.

В заключение отметим, что возможность существования смешанных голографических решеток в фоторефрактивном кристалле GaAs:Cr класса симметрии  $\bar{4}3m$  ранее теоретически и экспериментально исследована в работе [9]. Теоретическое моделирование возможного увеличения дифракционной эффективности голограмм в кристалле BSO посредством учета амплитудных (фотохромных) решеток представлено в [10]. В [11,12] при изучении вклада флексоэлектрического эффекта при встречном взаимодействии распространяющихся в кристалле ВТО световых волн также указывается на возможность существования амплитудных решеток в этом кристалле. Насколько нам известно, детальные теоретическое и экспериментальное исследования вклада амплитудной составляющей голографических решеток в дифракционную эффективность пропускающих голограмм в кристалле ВТО в данной работе рассмотрено впервые.

Работа выполнена при поддержке Государственной комплексной программы научных исследований „Электроника и фотоника“, задание 2.2.18, а также Минобрнауки Российской Федерации в рамках задания № 2014/225 (проект № 2491).

## Список литературы

- [1] *Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В.* Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука. С.-Петербургское отделение, 1992. 320 с.
- [2] *Gedilnik G., Esselbach M., Kiessling A., Kowarschik R.* // *Appl. Opt.* 2000. V. 39. N 13. P. 2091–2100.
- [3] *Barbosa E.A., Verzini R., Carvalho J.F.* // *Opt. Comm.* 2006. V. 263. N 2. P. 189–196.
- [4] *Шандаров С.М., Шандаров В.М., Мандель А.Е., Буримов Н.И.* Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах. Томск: ТУСУР, 2007. 242 с.
- [5] *Шепелевич В.В.* Голография в фоторефрактивных оптически активных кристаллах. Минск: Изд. центр БГУ, 2012. 254 с.
- [6] *Андреева О.В.* Прикладная голография. СПб.: СПбГУИТМО, 2008. 184 с.
- [7] *Montemezzani G., Zgonik M.* // *Phys. Rev. E.* 1997. V. 55. N 1. P. 1035–1047.
- [8] *Zagorskiy A.E., Shepelevich V.V., Nichiporko S.F., Egorov N.N., Hu Y., Ringhofer R.H., Shamonina E.* // *Opt. Mater.* 2001. V. 18. P. 131–133.
- [9] *Shcherbin K., Odoulov S., Litvinov R., Shandarov E., Shandarov S.* // *J. Opt. Soc. Am. B.* 1996. V. 13. N 10. P. 2268–2277.
- [10] *Fish D.A., Powel A.K., Hall T.J.* // *Opt. Comm.* 1993. V. 98. N 4–6. P. 349–356.
- [11] *Шандаров С.М., Шмаков С.С., Буримов Н.И., Соваева О.С., Каргин Ю.Ф., Петров В.М.* // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 85. В. 12. С. 699–702.
- [12] *Шандаров С.М., Шмаков С.С., Зуев П.В., Буримов Н.И., Каргин Ю.Ф., Шепелевич В.В., Ропот П.И., Гуделев В.Г.* // Оптический журнал. 2013. Т. 80. В. 7. С. 5–12.