

ФІЗИКА

УДК 535.42

*В.Н. Навыко, В.В. Шепелевич***ДИФРАКЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ГОЛОГРАММ
В КРИСТАЛЛЕ $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ПРОИЗВОЛЬНОГО СРЕЗА**

Кубические оптически активные фоторефрактивные пьезокристаллы силленит-типа $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO), $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO), $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO) представляют особый класс регистрирующих сред, перспективных для записи и считывания отражательных голограмм [1]. По сравнению с кристаллами LiNbO_3 , BaTiO_3 , SBN фоторефрактивные кристаллы силленит-типа имеют меньшие электрооптические коэффициенты, но обладают более быстрым фоторефрактивным откликом. Совместное действие оптической активности и фотоиндуцированной анизотропии приводит к возникновению комплекса сложных поляризационных эффектов при записи и считывании отражательных голограмм.

При изучении зависимости поляризационных (выходной азимут и эллиптичность дифрагированной предметной волны) и энергетических (относительная интенсивность дифрагированной предметной волны и дифракционная эффективность) характеристик отражательных голограмм от толщины кристалла и входного азимута поляризации предметной волны в фоторефрактивных кристаллах силленит-типа основное внимание уделяется срезам (001) и (111) [1–4]. В [5] показано, что в толстых кристаллах среза (111) выходные энергетические характеристики отражательных голограмм имеют более высокие значения, чем в аналогичных кристаллах среза (001).

Несмотря на наличие ряда публикаций, посвященных определению поляризационных и энергетических характеристик отражательных голограмм в кубических фоторефрактивных кристаллах, в научной литературе уделено мало внимания рассмотрению произвольного среза кристалла и оптимизации процессов считывания оптической информации. Кроме того, очень мало работ, учитывающих влияние пьезоэлектрического эффекта на свойства фазовых отражательных решеток. В то же время при изучении пропускающих голограмм в кубических фоторефрактивных кристаллах показано [6], что пьезоэлектрический эффект может изменять выходные энергетические характеристики голограмм в несколько раз.

Определению выходных энергетических характеристик отражательных голограмм в фоторефрактивных кристаллах произвольного среза посвящено несколько публикаций [7–9]. В [7] дана оценка коэффициента усиления отражательных голограмм, записанных в фоторефрактивных полупроводниках класса симметрии $\bar{4}3m$ произвольного среза. В [8] проведено теоретическое и экспериментальное исследование энергетических характеристик пропускающих голограмм в фоторефрактивных кристаллах силленит-типа произвольного среза, помещенных во внешнее постоянное электрическое поле. Зависимость максимальных значений относительной интенсивности предметной волны и дифракционной эффективности отражательных голограмм, выбранных путем анализа всех возможных срезов кристаллического образца, от толщины кристалла BSO изучена в [9]. Показано, что в этом кристалле толщиной до 6,44 мм максимальные значения относительной интенсивности предметной волны и дифракционной эффективности отражательной голограммы достигаются в кристалле среза (001). При толщине кристалла, лежащей в интервале от 6 мм до 20 мм, максимальные значения относительной интенсивности предметной волны и дифракционной эффективности отражательной голограммы в случае среза (111) превышают аналогичные значения для среза (001) и близки к максимально возможным значениям, выбранным путем анализа всех возможных срезов кристаллов.

В данной работе представлены результаты теоретического изучения зависимости дифракционной эффективности (η) отражательной голограммы, записанной в кубическом фоторефрактивном пьезокристалле BSO произвольного среза, от толщины кристалла. Целью исследования является определение оптимальных срезов кристалла BSO фиксированной толщины, лежащей в диапазоне $0 < d < 20$ мм, для которых поляризационно оптимизированная дифракционная эффективность отражательной голограммы достигает экстремально высоких значений.

На основании общей феноменологической модели дифракции света в фоторефрактивных кристаллах с помощью волнового уравнения для гиротропных сред в приближении заданной решетки в [10] получена система уравнений, описывающая одновременную дифракцию двух световых волн на отражательных голограммах в кубических оптически активных пьезокристаллах. Аналитическое решение системы уравнений связанных волн, позволяющее определить комплексные проекции дифрагированной предметной

волны на выходной грани кристалла, получено и проанализировано в [11]. Учет совместного действия электрооптического, фотоупругого и пьезоэлектрического эффектов в постоянных связях проведен на основании выражений, определяющих изменение компонент обратного тензора диэлектрической проницаемости для пространственно периодического электрического поля голографической решетки, представленных в [12]. Напряженность электрического поля голографической решетки принимается равной 0,6 кВ/см [13].

На рис. 1 представлена огибающая (кривая 1) семейства зависимостей дифракционной эффективности отражательной голограммы от толщины кристалла, выбранных путем анализа всех возможных срезов кристаллического образца, а также зависимости дифракционной эффективности от толщины кристалла d для срезов $(00\bar{1})$ и $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ (кривые 2 и 3). Из сравнения зависимостей $\eta(d)$ для кристалла срезов $(00\bar{1})$ и $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ (кривые 2 и 3) с огибающей $\eta^{\max}(d)$ (кривая 1) можно видеть, что для $d = 6,44$ мм наибольшее значение дифракционной эффективности отражательной голограммы достигается в кристалле среза $(00\bar{1})$. Для остальных значений толщины кристалла в интервале $6,44 < d < 20$ мм экстремальные значения дифракционной эффективности отражательной голограммы превышают значения дифракционной эффективности в кристалле среза $(00\bar{1})$.

Для наглядного представления о зависимости дифракционной эффективности отражательной голограммы от среза при фиксированной толщине кристалла воспользуемся методом указательных поверхностей [12]. На рис. 2 представлена указательная поверхность, характеризующая зависимость дифракционной эффективности отражательной голограммы от среза кристалла при $d = 4,03$ мм (точка А на рис. 1).

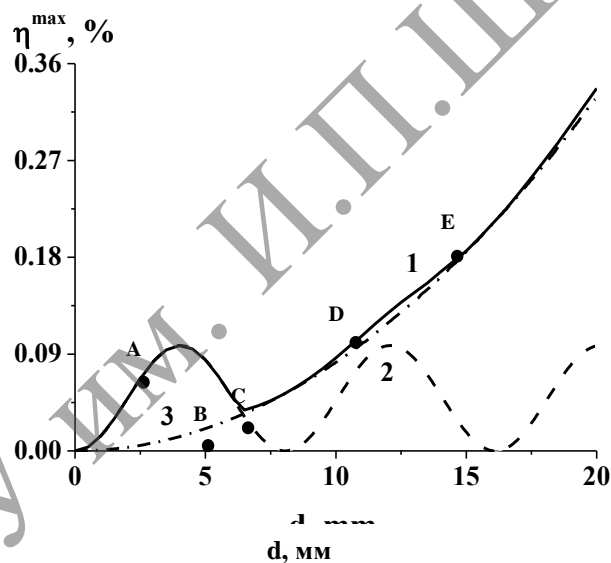


Рис. 1. Зависимость дифракционной эффективности η^{extr} (η^{\max} , η^{\min}) отражательной голограммы от толщины d кристалла.

- 1 – $\eta^{\max}(d)$, произвольный срез;
- 2 – $\eta^{\max}(d) = \eta^{\min}(d) = \eta(d)$, срез $(00\bar{1})$;
- 3 – $\eta^{\max}(d) = \eta^{\min}(d) = \eta(d)$, срез $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$.

Из рис. 2а видно, что симметрия указательной поверхности содержит элементы симметрии (поворотные оси симметрии второго и третьего порядка), присущие фоторефрактивным кристаллам силленит-типа. Экстремальные значения дифракционной эффективности ($\eta^{\max} = 0,1\%$, $\eta^{\min} = 0$) достигаются соответственно в кристаллах срезов $\{100\}$ и $\{110\}$. Локальные минимумы указательной поверхности существуют вдоль направлений $\langle 111 \rangle$. Дифракционная эффективность отражательных голограмм в кристалле среза $\{111\}$ в 7,35 раз меньше, чем в кристалле среза $\{100\}$.

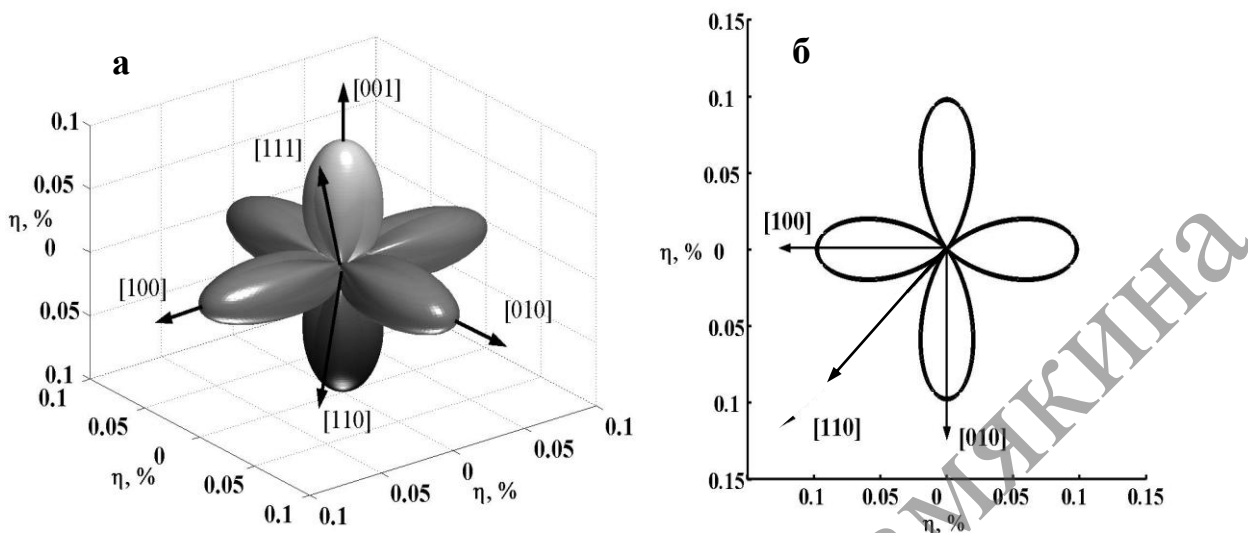


Рис. 2. Указательная поверхность дифракционной эффективности отражательной голограммы для кристалла толщиной 4,03 мм:
 а – общий вид указательной поверхности;
 б – сечение указательной поверхности плоскостью (001).

Рассмотрим представленную на рис. 3 указательную поверхность дифракционной эффективности отражательной голограммы для кристалла BSO толщиной 8,06 мм (точка С на рис. 1). Видно, что указательные поверхности для кристаллов толщиной 4,03 мм и 8,06 мм содержат одинаковые элементы симметрии, но принимают различную форму. Трансформация формы указательной поверхности обусловлена оптической активностью кристалла, которая приводит к снижению дифракционной эффективности в кристалле среза {100} в интервале $4,03 < d < 8,06$ мм (рис. 1). Дифракционная эффективность отражательной голограммы при данной толщине кристалла достигает экстремально высокого значения ($\eta^{\max} = 0,053\%$) в кристаллах среза {111}. Абсолютный минимум дифракционной эффективности ($\eta^{\min} = 0$) достигается в кристаллах срезов {100}, {110}.

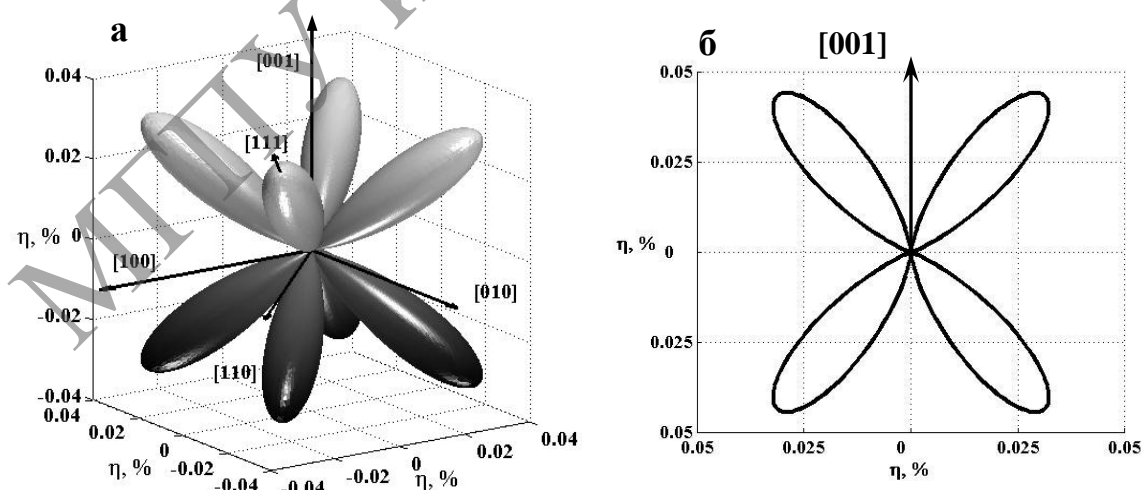


Рис. 3. Указательная поверхность дифракционной эффективности отражательной голограммы для кристалла толщиной 8,06 мм:
 а – общий вид указательной поверхности;
 б – сечение указательной поверхности плоскостью (110).

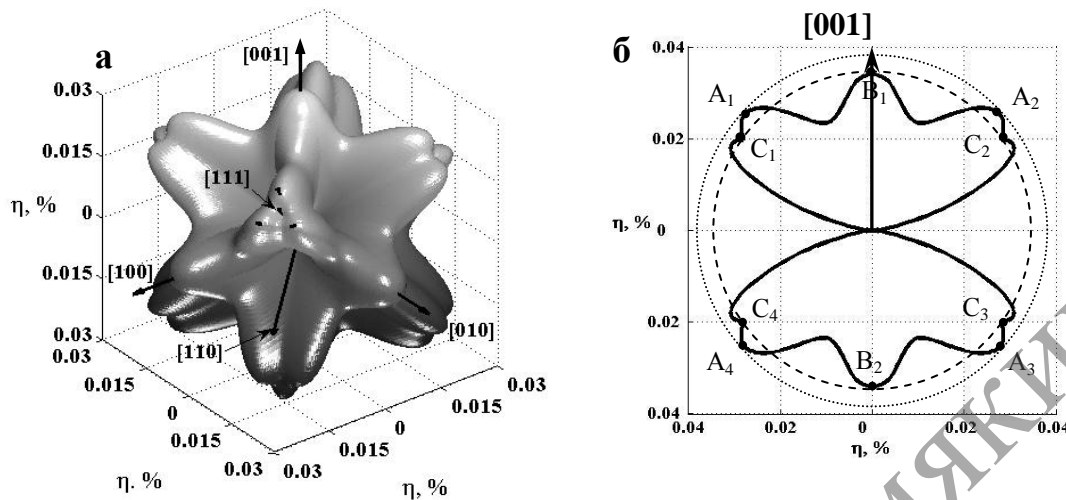


Рис. 4. Указательная поверхность дифракционной эффективности отражательной голограммы для кристалла толщиной 6,44 мм.
 а – общий вид указательной поверхности;
 б – сечение указательной поверхности плоскостью (110) вместе с вспомогательными окружностями.

Рассмотрим на рис. 4 указательную поверхность дифракционной эффективности отражательной голограммы для кристалла BSO толщиной 6,44 мм (точка В на рис. 1). В этом случае указательная поверхность имеет сложную форму и содержит элементы симметрии, присущие фоторефрактивным кристаллам силленит-типа. Вокруг поворотных осей симметрии третьего порядка (направления $\langle 111 \rangle$) возникают тройные оси, вдоль которых достигаются наибольшие значения дифракционной эффективности отражательной голограммы. Пространственное расположение точек указательной поверхности, лежащих на тройных осях, расположенных вокруг направления $[111]$ (изображены на рис. 4а), в сферической системе координат [14] характеризуется следующими координатами (ρ , θ , φ): $(40^\circ, 59^\circ, 0,37\%)$, $(46^\circ, 49^\circ, 0,37\%)$, $(52^\circ, 59^\circ, 0,37\%)$. Вдоль направлений $\langle 111 \rangle$ расположен локальный минимум с дифракционной эффективностью ($\eta = 0,337\%$), близкой к ее наибольшему значению. Аналогичное значение дифракционной эффективности отражательной голограммы достигается также в кристалле среза $\{100\}$. Абсолютный минимум дифракционной эффективности отражательной голограммы ($\eta^{\min} = 0$) достигается в кристалле среза $\{110\}$.

В точках A_1, A_2, A_3, A_4 тройные оси пересекаются с указательной поверхностью, и в этих точках достигаются наибольшие значения дифракционной эффективности отражательной голограммы; в точках B_1, B_2 достигаются максимальные значения дифракционной эффективности для кристалла среза $\{100\}$; в точках C_1, C_2, C_3, C_4 достигаются максимальные значения дифракционной эффективности для кристалла среза $\{111\}$, совпадающие по значению максимумом η для среза $\{100\}$.

Таким образом, максимальное значение дифракционной эффективности отражательной голограммы достигается в кристалле среза $\{100\}$ для $d = 6,44$ мм. В этом интервале абсолютный максимум дифракционной эффективности отражательной голограммы имеет место при толщине 4,03 мм. В кристалле толщиной 6,44 мм дифракционная эффективность отражательной голограммы для срезов $\{100\}$ и $\{111\}$ одинакова. В кристалле среза $\{111\}$ дифракционная эффективность отражательной голограммы совпадает с ее максимальным значением, выбранным путем перебора всех срезов кристалла, при толщине 8,06 мм и 16,12 мм. Для остальных значений толщины кристалла, принадлежащих интервалу $6,44 < d < 20$ мм, дифракционная эффективность отражательной голограммы достигает максимума в случае, если кристалл вырезан перпендикулярно одной из тройных осей.

Литература

1. Mallick, S. Polarization properties of self-diffraction in sillenite crystals: reflection volume gratings / S. Mallick, M. Miteva, L. Nikolova // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 1997. – Vol. 14. – P. 1179–1186.
2. Kukhtarev, N.V. Influence of the optical activity on hologram formation in photorefractive crystals / N.V. Kukhtarev, G.E. Dovgalenko, V.N. Starkov // *Appl. Phys. A.* – 1984. – Vol. 33. – P. 227–230.
3. Kukhtarev, N. Reflection holographic gratings in [111] cut $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ crystal for real time interferometry / N. Kukhtarev [et al.] // *Opt. Commun.* – 1993. – Vol. 104. – P. 23–28.
4. Miteva, M. Polarization-dependent self-induced changes in the optical rotation and optical transmittance in doped crystals of the sillenite type / M. Miteva, L. Nikolova // *J. Mod. Optics.* – 1996. – Vol. 43. – P. 1801–1809.
5. Шепелевич, В.В. Дифракция световых волн на отражательных голограммах в кубических пьезокристаллах / В.В. Шепелевич [и др.] // *Письма в ЖТФ.* – 2003. – Т. 29, № 18. – С. 22–28.
6. Shepelevich, V.V. Optimization of diffraction efficiency and gain for two-wave mixing in cubic (111)-cut photorefractive piezocrystals / V.V. Shepelevich [et al.] // *Ferroelectrics.* – 2002. – Vol. 266. – P. 305–333.
7. Eichler, H.J. Photorefractive two-wave mixing in semiconductors of the $\bar{4}3m$ space group in general spatial orientation / H.J. Eichler, Y. Ding, B. Smandek // *Phys. Rev. A.* – 1995. – Vol. 52. – P. 2411–2418.
8. Deliolanis, N.C. Diffractive properties of volume phase gratings in photorefractive sillenite crystals of arbitrary cut under the influence of an external electric field / N.C. Deliolanis [et al.] // *Phys. Rev. E.* – 2003. – Vol. 68. – P. 056602.
9. Навныко, В.Н. Ковариантные методы в физике / В.Н. Навныко, В.В. Шепелевич // *Оптика и акустика: сборник научных трудов; редкол.: А.М. Гончаренко (главн. редактор) [и др.].* – Минск: Ин-т физики НАН Беларуси, 2005. – С. 158–164.
10. Shepelevich, V.V. Light diffraction by holographic gratings in optically active photorefractive piezocrystals / V.V. Shepelevich, S.M. Shandarov, A.E. Mandel // *Ferroelectrics.* – 1990. – Vol. 110. – P. 235–249.
11. Шандаров, С.М. Изменение тензора диэлектрической проницаемости в кубических фоторефрактивных пьезоэлектрических кристаллах под действием электрического поля голографической решетки / С.М. Шандаров, В.В. Шепелевич, Н.Д. Хатьков // *Опт. и спектр.* – 1991. – Т. 70, № 5. – С. 1044–1048.
12. Шаскольская, М.П. Кристаллография / М.П. Шаскольская. – М.: Высш. шк., 1984. – 376 с.
13. Навныко, В.Н. Двухволновое взаимодействие света в отражательных голограммах / В.Н. Навныко [и др.]. – Мозырь, 2005. – 71 с. – (Препринт / УО МГПУ; № 3).
14. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1981. – 704 с.

Summary

The dependence of diffraction efficiency of the reflection grating in cubic photorefractive crystal $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ of arbitrary cut on the crystal thickness is investigated. The cut of crystal with fixed thickness where the diffraction efficiency of the reflection grating attains highest value are determined.

Поступила в редакцию 24.03.06.