УДК 535.42

В.Н. Навныко, В.В. Шепелевич, С.М. Шандаров

Поляризационные свойства отражательной голограммы, сформированной в электрооптическом фоторефрактивном кристалле

Изучена зависимость дифракционной эффективности отражательной голограммы от азимута линейной поляризации опорной световой волны для различных срезов кубического оптически активного фоторефрактивного кристалла класса симметрии 23. Найдены поляризационные условия достижения максимальных значений дифракционной эффективности отражательных голограмм.

Ключевые слова: отражательная голограмма, фоторефрактивный кристалл, дифракционная эффективность, азимут поляризации.

Введение

Объемные отражательные голограммы, впервые изученные в 60-х годах прошлого века Ю.Н. Денисюком [1, 2], уже более 40 лет являются объектом интенсивных исследований (см. обзор в [3]). В качестве регистрирующих сред для объемных отражательных голограмм могут быть использованы кубические фоторефрактивные кристаллы, поскольку они допускают многократную запись и считывание информации, а также возможность работы с голограммой в режиме реального времени (см., напр., [4]).

Дифракционная эффективность объемной отражательной голограммы, сформированной в кубическом фоторефрактивном кристалле (напр., $Bi_{12}SiO_{20}$ (BSO), GaAs), является объектом изучения в целом ряде публикаций [3]. В предыдущих работах исследовалась зависимость дифракционной эффективности отражательной голограммы от толщины кристалла и от азимута линейной поляризации считывающего света при фиксированном срезе (напр., [5, 6]) либо анализировалась зависимость максимальной дифракционной эффективности от среза кристалла при фиксированной толщине кристалла [7].

К настоящему времени остается малоизученной зависимость азимута линейной поляризации считывающей отражательную голограмму световой волны, при котором достигается наибольшая дифракционная эффективность, от среза кубического оптически активного фоторефрактивного кристалла.

Таким образом, целью данной работы является исследование зависимости азимута линейной поляризации опорной световой волны, при котором достигается наибольшая дифракционная эффективность отражательной голограммы, от среза фоторефрактивного кристалла класса симметрии 23 с параметрами кристалла BSO.

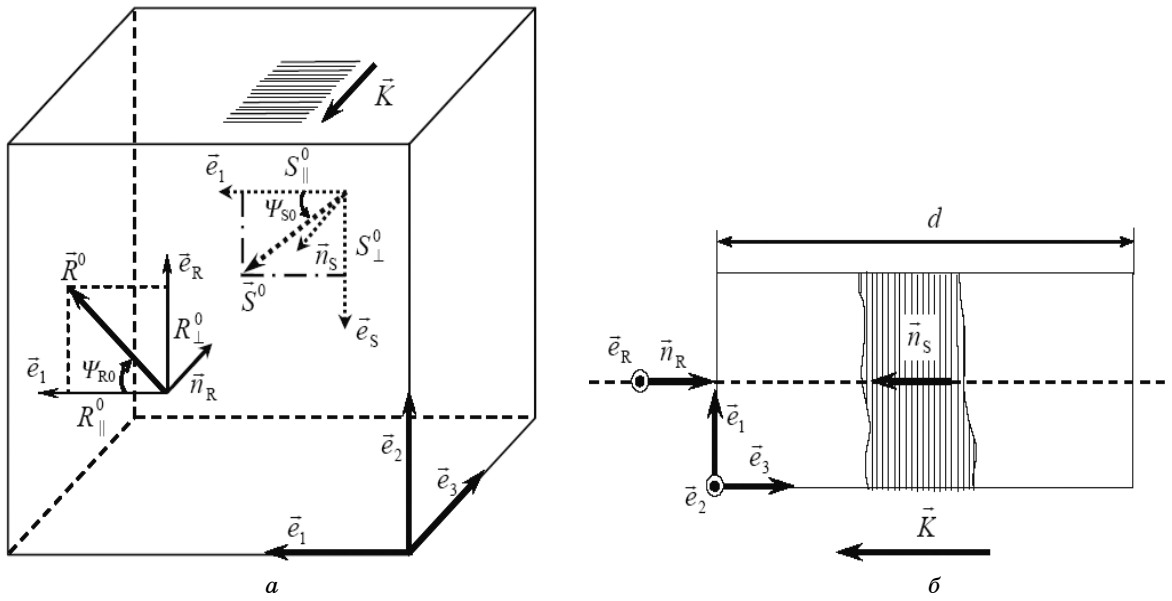
Здесь и далее под термином «дифракционная эффективность» будем понимать отношение интенсивностей восстановленной и опорной световых волн на передней рабочей грани кристалла, а под термином «оптимальный азимут» будем понимать такое значение азимута линейной поляризации опорной световой волны, при котором дифракционная эффективность отражательной голограммы, сформированной в кристалле фиксированного среза и толщины, будет наибольшей.

Теоретическая модель

Рассмотрим фоторефрактивный кристалл BSO (рис. 1), в котором сформирована объемная фазовая отражательная голографическая решетка с волновым вектором $\mathbf{K}$, направленным перпендикулярно передней грани кристалла. Плоскость передней грани кристалла произвольно ориентирована относительно кристаллографической системы координат $(\mathbf{a},\mathbf{b},\mathbf{c})$. Опорная волна R распространяется внутри кристалла и дифрагирует на отражательной решетке, вследствие чего формируются прошедшая и дифрагированная (восстановленная предметная) волны.

На рис. 1, *а* схематически представлена запись объемной отражательной голограммы. Рабочая система координат, задаваемая единичными векторами $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$, определяет ориентацию кристалла по отношению к голографическому столу. Единичные векторы $\mathbf{n}_R$ и $\mathbf{n}_S$ задают направления волновых нормалей опорной и предметной световых волн; $R_{\parallel}^0$, $R_{\perp}^0$ и $S_{\parallel}^0$, $S_{\perp}^0$ обозначают проекции векторов $\mathbf{R}^0$ и $\mathbf{S}^0$ напряженности электрического по-

ля опорной и предметной световых волн соответственно на входе в кристалл на направления, определяемые единичными векторами $\mathbf{e}_1$ и $\mathbf{e}_{R,S} = [\mathbf{n}_{R,S}, \mathbf{e}_1]$. Ψ_{R0} и Ψ_{S0} – азимуты линейной поляризации опорной и предметной световых волн на входе в кристалл.



а *б*

Рис. 1. Геометрическая схема записи (*а*) и считывания (*б*) объемной отражательной голограммы

На рис. 1, *б* представлена схема восстановления предметной световой волны объемной отражательной голограммой. Восстановленная предметная волна на рис. 1, *б* распространяется вдоль вектора голографической решетки ($\mathbf{n}_S \| \mathbf{K}$).

Для описания дифракции опорной световой волны на объемной отражательной голограмме в кубическом оптически активном фоторефрактивном кристалле используем систему уравнений связанных волн, записанную в приближениях медленно меняющихся амплитуд и статической решетки:

$$\frac{dR_\perp}{dz} = \kappa_1 S_\perp - \kappa_2 S_\parallel + \rho R_\parallel,$$

$$\frac{dR_\parallel}{dz} = \kappa_2 S_\perp - \kappa_3 S_\parallel - \rho R_\perp,$$

$$\frac{dS_\perp}{dz} = \kappa_1 R_\perp + \kappa_2 R_\parallel - \rho S_\parallel,$$

$$\frac{dS_\parallel}{dz} = -\kappa_2 R_\perp - \kappa_3 R_\parallel + \rho S_\perp,$$

где $\kappa_1 = (\mathbf{e}_1 \kappa \mathbf{e}_1)$, $\kappa_2 = (\mathbf{e}_1 \kappa \mathbf{e}_2)$, $\kappa_3 = (\mathbf{e}_2 \kappa \mathbf{e}_2)$, $\kappa = -\frac{\pi n_0^3 E_{sc}}{2\lambda} \Delta B$; $R_\perp, R_\parallel, S_\perp, S_\parallel$ – составляющие векторных амплитуд опорной и предметной волн, распространяющихся внутри кристалла, являющиеся функцией переменной z (координатная ось z направлена параллельно единичному вектору $\mathbf{e}_3$ (см. рис. 1)); ρ – удельное вращение кристалла; n_0 – показатель преломления фоторефрактивного кристалла в отсутствие голографической решетки; ΔB – изменение обратного тензора диэлектрической проницаемости кубического кристалла класса симметрии 23, определяемое в работе [8]; E_{sc} – амплитуда напряженности электрического поля голографической решетки; λ – длина опорной и предметной световых волн в вакууме.

Для численных расчетов выбирались параметры кристалла, приведенные в [4]. Значение амплитуды напряженности пространственно периодического электрического поля голографической решетки E_{sc} принималось равным 0,6 кВ/см.

Результаты и обсуждение

Для наглядного представления функции зависимости максимальной дифракционной эффективности отражательной голограммы от среза кристалла воспользуемся методом указательных поверхностей [9]. Модуль радиус-вектора указательной поверхности определяется значением максимальной дифракционной эффективности отражательной голограммы для кристалла фиксированного среза, а направление радиус-вектора совпадает с направлением вектора **K** отражательной голографической решетки. Плоскость среза кристалла перпендикулярна радиус-вектору. Указательная поверхность строится следующим образом: для каждого среза кристалла определяются значения максимальной дифракционной эффективности отражательной голограммы путем перебора всех возможных азимутов Ψ_{R0} линейной поляризации опорной световой волны на входе в кристалл. Далее отрезок, длина которого равна максимальной дифракционной эффективности, откладывается вдоль радиус-вектора, исходящего из начала координат в направлении, параллельном вектору **K**. Соединяя концы радиус-векторов, соответствующих различным срезам кристалла, построим указательную поверхность, характеризующую распределение в пространстве поляризационно оптимизированной дифракционной эффективности отражательной голограммы, сформированной в кристалле произвольного среза заданной толщины.

На рис. 2 представлена указательная поверхность максимальных значений дифракционной эффективности отражательной голограммы, сформированной в кристалле с параметрами BSO толщиной 4 мм. Эта поверхность рассчитана с учетом линейного электрооптического эффекта (рис. 2, *а*), а влияние оптической активности учтено на рис. 2, *б*.

Как можно видеть из рис. 2, при «включении» оптической активности наибольшая дифракционная эффективность, достигаемая в кристалле BSO толщиной 4 мм, уменьшается более чем в два раза.

Графики, представленные на рис. 2, не содержат информации об азимутах линейной поляризации опорной волны, соответствующих каждой точке указательной поверхности максимальной дифракционной эффективности отражательной голограммы. Представляет интерес получить соответствующие графики зависимостей оптимальных азимутов линейной поляризации от среза кристалла.

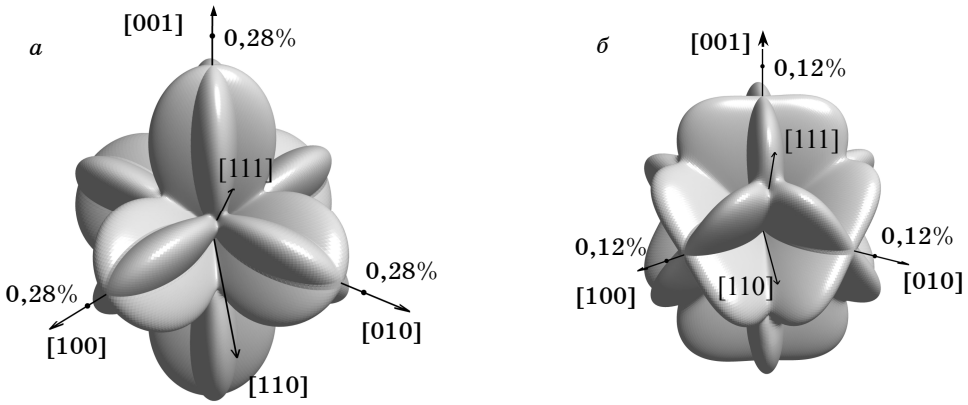


Рис. 2. Указательная поверхность дифракционной эффективности отражательной голограммы, сформированной в фоторефрактивном кристалле с параметрами BSO толщиной 4 мм, рассчитанная без учета (*а*) и с учетом (*б*) оптической активности

Для решения этой задачи в области пространства, ограниченной положительными направлениями кристаллографических осей [100], [010] и [001], в сферической системе координат построены графики зависимости ориентаций вектора напряженности электрического поля опорной волны, для которых достигается максимальная дифракционная эффективность, от среза кристалла BSO толщиной 4 мм (рис. 3, *а* и 3, *б*).

Графики на рис. 3, *а* и *б* рассчитывались следующим образом: при каждом фиксированном срезе кристалла вычислялась дифракционная эффективность отражательной голограммы для каждого значения азимута линейной поляризации опорной волны, а затем выбиралось значение азимута, которому соответствует максимальная дифракционная эффективность. После этого в рабочей системе координат, характеризуемой по отношению к кристаллографической системе координат фиксированными углами Эйлера, строился единичный отрезок, показывающий направление линейной поляризации вектора напряженности электрического поля опорной световой волны. Таким образом, каждый отрезок

на рис. 3, *а* и *б* соответствует фиксированному срезу и определяет оптимальный азимут, который использовался для расчета указательных поверхностей на рис. 2.

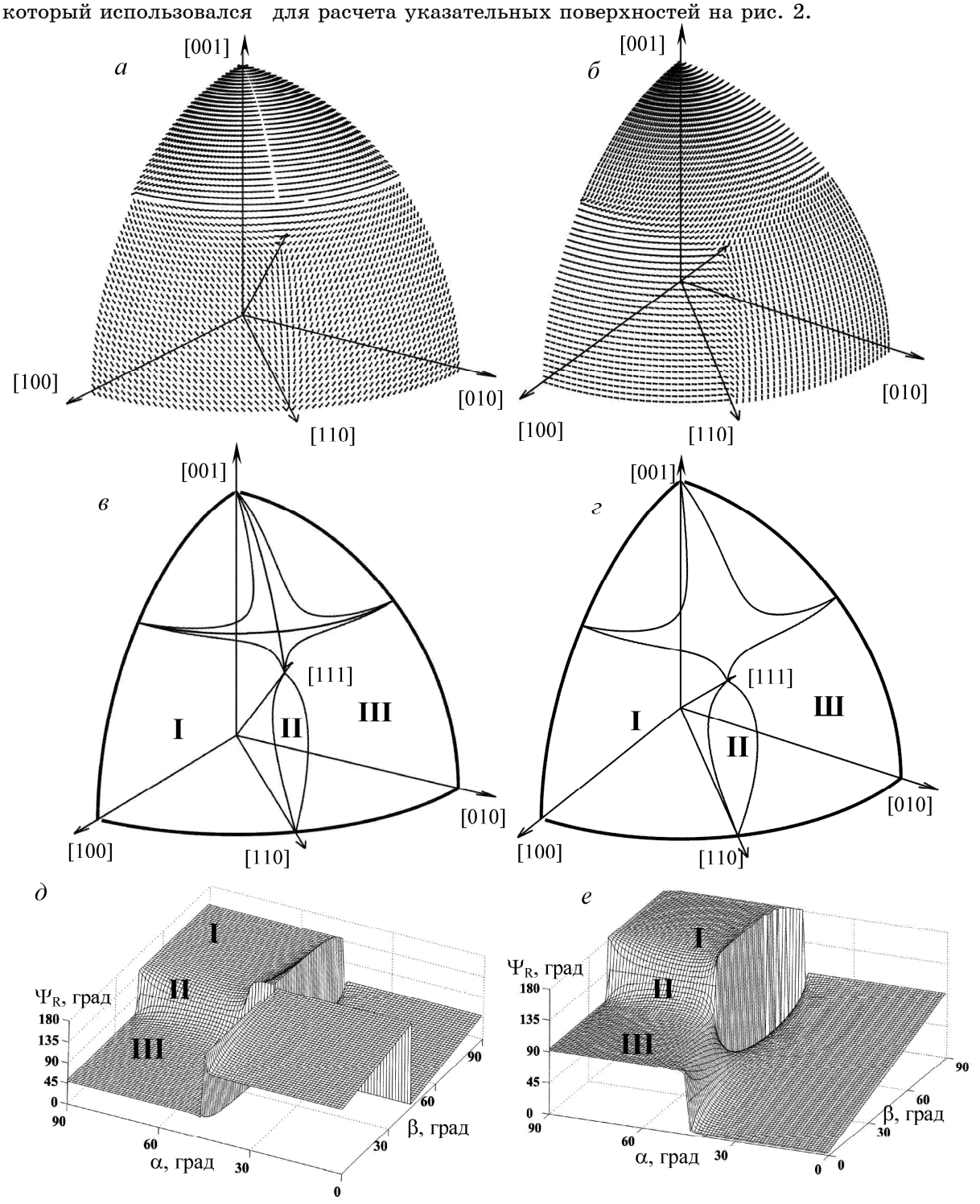


Рис. 3. Графики зависимости оптимальных ориентаций вектора напряженности электрического поля опорной волны от среза кристалла BSO толщиной 4 мм, рассчитанный без учета (*а*) и с учетом (*б*) оптической активности; *в*, *г* – диаграммы графиков, представленных на (*а*) и (*б*), на которых отмечены совокупности срезов (области срезов) кристалла с характерным распределением направлений вектора напряженности электрического поля опорной волны без учета (*в*) и с учетом (*г*) оптической активности; *д*, *е* – графики зависимости оптимальных азимутов линейной поляризации опорной волны от среза кристалла, без учета (*д*) и с учетом (*е*) оптической активности

Как следует из анализа рис. 3, *а* и *б*, существуют совокупности (области на рис. 3, *в* и *г*) срезов кристалла BSO, для которых максимальная дифракционная эффективность

отражательной голограммы достигается при близких по величине азимутах линейной поляризации опорной волны.

Для более детального анализа рассмотрим рис. 3, *в*, *г*, *д* и *е*. На рис. 3, *в* и *г* сплошными линиями ограничены области сферической поверхности, представленной на рис. 3, *а* и *б*, внутри которых азимуты линейной поляризации опорной волны для каждого фиксированного среза можно объединить по некоторому признаку. На рис. 3, *д* и *е* в декартовой системе координат представлен график зависимости оптимальных азимутов линейной поляризации опорной волны от среза кристалла. Угол α на рис. 3, *д* и *е* образован радиус-вектором и кристаллографическим направлением [001], а угол β образован проекцией радиус-вектора на плоскость, содержащую кристаллографические оси [100] и [010], и кристаллографической осью [010].

Согласно численным расчетам для областей I и III срезов кристалла (см. рис. 3, *д*) значения оптимальных азимутов линейной поляризации опорной волны приблизительно равны по величине в каждой из этих областей по отдельности. Так, для области I значения азимутов варьируются в пределах 48±3°, а для области III – 132±3°.

Для области II (см. рис. 3, *д*) можно отметить, что даже для двух срезов с малым угловым расстоянием между нормалями к их плоскостям значения оптимальных азимутов сильно отличаются по величине, причем изменение величины этого оптимального азимута от среза к «соседнему» срезу при изменении угла β происходит по сложному нелинейному закону. В граничной точке области II, соответствующей направлению [111], расположена «выколотая» точка с неопределенным значением азимута.

Для области, определяемой углом α, находящимся в интервале (0, 45°) и углом β, изменяющимся от 0 до 90° (см. рис. 3, *д* и *е*), оптимальный азимут линейной поляризации опорной волны изменяется практически линейно, за исключением малой области, близкой к точке, соответствующей срезу (111).

Заключение

Таким образом, найдены и проиллюстрированы соответствующими графиками оптимальные азимуты линейной поляризации опорной волны, при которых достигаются максимальные значения дифракционной эффективности отражательной голограммы, сформированной в кристалле BSO толщиной 4 мм.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (ГКПНИ «Фотоника 1.07») и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект №Ф09М-013).

Литература

1. Денисюк Ю.Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // Доклады АН СССР. – 1962. – Т. 144, № 6. – С. 1275–1278.

2. Денисюк Ю.Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // Опт. и спектр. – 1963. – Т. 15, № 4. – С. 522–532.

3. Динамические голограммы Денисюка в кубических фоторефрактивных кристаллах / С.М. Шандаров, Н.И. Буримов, Ю.Н. Кульчин и др. // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 11, № 11. – С. 1059–1069.

4. Петров М.П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике / М.П. Петров, С.И. Степанов, А.В. Хоменко. – СПб.: Наука, 1992. – 320 с.

5. Храмович Е.М. Дифракция электромагнитных волн при их встречном распространении в отражательных голограммах, записанных в фоторефрактивных оптически активных кристаллах / Е.М. Храмович, В.В. Шепелевич // Известия АН БССР. Сер. физ.-мат. науки. – 1987. – № 2. – С. 106–112.

6. Reflection holograms in sillenite crystals for double-exposure interferometry / M. Weber, E. Shamonina, K.H. Ringhofer, G. von Bally // Opt. Mat. – 2001. – Vol. 18, № 1. – P. 119–122.

7. Shepelevich V.V. Effect of optical activity and crystal symmetry on maximal diffraction efficiency of reflection holograms in cubic photorefractive piezocrystals of arbitrary cut / V.V. Shepelevich, V.N. Naunyka // Appl. Phys. B. – 2009. – Vol. 95. – P. 459–466.

8. Шандаров С.М. Изменение тензора диэлектрической проницаемости в кубических фоторефрактивных кристаллах под действием электрического поля голографической решетки / С.М. Шандаров, В.В. Шепелевич, Н.Д. Хатьков // Опт. и спектр. – 1989. – Т. 67, № 4. – С. 819–822.

9. Сиротин Ю.И. Основы кристаллофизики / Ю.И. Сиротин, М.П. Шаскольская. – М.: Наука, 1979. – 639 с.

Навныко Валерий Николаевич
Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. теоретической физики
УО МГПУ им. И.П. Шамякина, г. Мозырь, Республика Беларусь
Тел.: (375-2) 351-2-40-91
Эл. почта: valnav@inbox.ru

Шепелевич Василий Васильевич
Д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф. теоретической физики
УО МГПУ им. И.П. Шамякина, г. Мозырь, Республика Беларусь
Тел.: (375-2) 351-2-40-91
Эл. почта: vasshep@inbox.ru

Шандаров Станислав Михайлович
Д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. каф. электронных приборов ТУСУРа
Тел.: (382-2) 41-38-87
Эл. почта: shand@stack.ru

Naunyka V.N., Shepelevich V.V., Shandarov S.M.
Polarization properties of reflection hologram recorded in electro-optic photorefractive crystal

The dependence of diffraction efficiency of the reflection hologram on the azimuth of linear polarization of the reference light wave for different cuts of an optically active cubic photorefractive crystal is investigated. The polarization conditions for achieving the maximal values of the reflection holograms diffraction efficiency are found.
Keywords: reflection hologram, photorefractive crystal, diffraction efficiency, azimuth of polarization.