

Энергообмен световых волн при встречном двухволновом взаимодействии на фазово-амплитудной решетке в фоторефрактивном кристалле

В. Н. Навныко¹⁾, Д. С. Блоцкая¹⁾, М. А. Аманова²⁾,
Г. В. Кулак¹⁾, С.М. Шандаров³⁾

¹⁾ Мозырский государственный педагогический университет им. И. П. Шамякина,
Мозырь, Беларусь, e-mail: valnav@inbox.ru

²⁾ Институт телекоммуникаций и информатики Туркменистана, Ашхабад, Туркменистан
e-mail: maral_amanova@mail.ru

³⁾ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия,
e-mail: stanislavshandarov@gmail.com

Исследованы зависимости относительной интенсивности предметной волны от толщины фоторефрактивного кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ при встречном двухволновом взаимодействии на отражательной голографической решетке. Рассмотрены случаи, когда при взаимодействии опорной и предметной световых волн в кристалле формируются решетки с фазовой и фазово-амплитудной структурами. Показано, что условия достижения максимума интенсивности предметной волны на выходе из кристалла могут существенно отличаться для таких решеток.

Ключевые слова: фоторефрактивный кристалл; отражательная решетка; встречное двухволновое взаимодействие; относительная интенсивность.

Energy of light waves exchange during contra-direction two-wave mixing by phase-amplitude grating in photorefractive crystal

V. N. Naunyka¹⁾, D. S. Blotskaya¹⁾, M. A. Amanova²⁾, G. V. Kulak¹⁾, S. M. Shandarov³⁾

¹⁾ Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin, Mozyr, Belarus,
e-mail: valnav@inbox.ru

²⁾ Institute of Telecommunications and Informatics of Turkmenistan, Ashgabat, Turkmenistan
e-mail: maral_amanova@mail.ru

³⁾ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia,
e-mail: stanislavshandarov@gmail.com

The dependences of the relative intensity of the object wave on the thickness of the photorefractive crystal $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ at the contra-direction two-wave mixing by reflection holographic grating are analyzed. The cases when at mixing of the reference and object light waves in the crystal forms gratings with phase- and phase-amplitude structures are considered. It is shown, that conditions for achieving the maximum intensity of the object wave at the exit from the crystal can differ significantly for such gratings.

Keywords: photorefractive crystal; reflection grating; contra-direction two-wave mixing; relative intensity.

Введение

Исследованию закономерностей преобразования световых волн при их дифракции на объемной отражательной голографической решетке, сформированной в кубическом фоторефрактивном кристалле, посвящен ряд работ (см. [1]). Во

многим это связано с широким перечнем технических приложений, в которых используются фоторефрактивные кристаллы в качестве регистрирующих сред: голографическая интерферометрия, оптическая фильтрация, генерация оптического излучения. В последние годы такие кристаллы находят свое применение также в биомедицине и информационных технологиях.

В большинстве работ анализируются поляризационные и энергетические характеристики отражательных голограмм, имеющих фазовую структуру [1]. В этом случае голографическая решетка в фоторефрактивном кристалле формируется за счет модуляции диэлектрической проницаемости среды. Однако, как установлено в [2], в фоторефрактивном поглощающем кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (ВТО) формируются голографические решетки с фазово-амплитудной структурой, которые представляют собой совокупность фазовой и амплитудной решеток. Авторами показано, что только лишь при учете амплитудной составляющей голографической решетки достигается удовлетворительное соответствие теоретических и экспериментальными результатами. Кроме того, в нелегированных кубических фоторефрактивных кристаллах со структурой силленита наряду с фотопроводимостью имеет место наличие заметного циркулярного дихроизма [3].

Зависимости дифракционной эффективности в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) от толщины образца и эллиптичностей световых волн, с учетом линейного поглощения и циркулярного дихроизма регистрирующей среды, рассмотрены в работе [4]. В этой работе рассматривались свойства фазовой отражательной решетки, поскольку в качестве фоточувствительной среды выбран кристалл BSO. Особенности энергообмена при двухволновом взаимодействии на фазово-амплитудной отражательной решетке в кристалле ВТО до настоящего времени изучены недостаточно. Данные исследования позволят провести сравнительный анализ свойств фазовых и фазово-амплитудных голограмм с целью определения условий достижимости их максимальных энергетических характеристик.

Целью настоящей работы является проведение сравнительного анализа закономерностей энергетического обмена линейно поляризованных световых волн при дифракции на фазовой и фазово-амплитудной отражательных голографических решетках в кристалле ВТО с учетом электрооптического, фотоупругого и пьезоэлектрического эффектов.

Пусть на фоторефрактивный кристалл ВТО (рис. 1) направляются две линейно поляризованные предметная (индекс r) и опорная (индекс s) световые волны. Будем полагать, что грани кристаллического образца покрыты просветляющим покрытием и далее влиянием френелевского отражения будем пренебрегать. На рис. 1 плоскость (I) совпадает с плоскостью падения световых волн и параллельна поверхности голографического стола. Волновые нормали подающихся на кристалл предметной и опорной световых волн лежат в плоскости (I) и совпадают по направлению с единичными векторами \vec{n}_s и \vec{n}_r соответственно.

Ортонормированный базис $(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$, где $\vec{e}_3 = [\vec{e}_1 \times \vec{e}_2]$, жестко связан с плоскостью (I) и используется для задания пространственного расположения кристалла. Через ориентационный угол θ задается угол поворота кристалла относительно оси Oz , который равен угловому расстоянию между ортом \vec{e}_2 и единичным вектором \vec{h} , который жестко связан с кристаллографической системой координат.

Базисы $(\vec{q}_j, \vec{u}_j, \vec{n}_j)$, где $\vec{n}_j = [\vec{q}_j \times \vec{u}_j]$ ($j = r, s$), необходимы для описания поляризации j -й волны. Углы между векторами \vec{n}_j и осью Oz обозначаются как φ_j и равны углу Брэгга. Векторы напряженности электрического поля \vec{R} и \vec{S} лежат в плоскостях, содержащих векторы \vec{q}_j, \vec{u}_j , соответственно, и ориентированы под азимутальными углами ψ_j относительно векторов \vec{u}_j . При расчетах азимуты ψ_j выбирались таким образом, чтобы при каждом z в кристалле ($0 < z \leq d$) пары векторов \vec{R} и \vec{S} оставались параллельными друг другу [5].

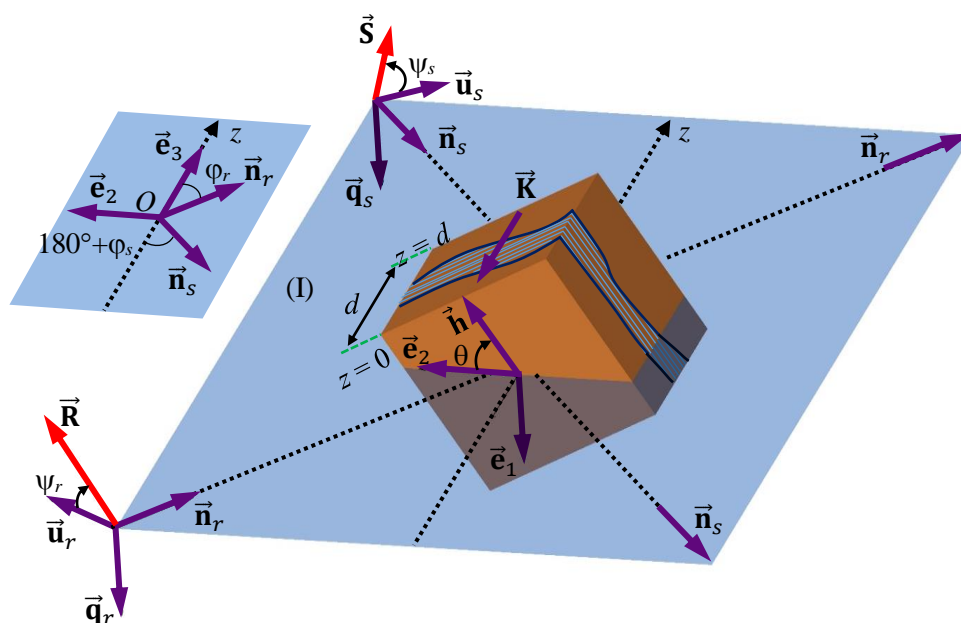


Рис. 1. Схема встречного взаимодействия двух световых волн в кристалле

Нахождение компонент векторов напряженности \vec{R} и \vec{S} производилось на основании численного решения уравнений связанных волн, приведенных в [6]. Физические параметры кристалла и методика численного решения уравнений связанных волн приведены в [7]. Отношение интенсивностей предметной и опорной волн полагалось равным 1:20. Углы φ_j выбирались равными 5° . Напряженность поля разделенных зарядов рассчитывалась в соответствии с результатами работы [8].

Результаты расчетов и их обсуждение

На рис. 2 графики 2 и 4 рассчитаны для фазовой решетки, а графики 1, 3 и 5 для случая, когда решетка имеет фазово-амплитудную структуру. При этом кривые 2 и 3 получены при условии, что для любого z выполняется условие $\vec{R} \parallel \vec{S}$, а кривые 1, 4 и 5 получены в результате перебора всех физически различимых значений ψ_j . Для фазовой решетки зависимость $\gamma(d)$, рассчитанная при выполнении условия $\vec{R} \parallel \vec{S}$ для любого z , и огибающая максимальных значений $\gamma^{\max}(d)$, совпадают (см. кривую 2). Это согласуется с известным утверждением [5], что для отражательной решетки с фазовой структурой условием достижения наибольшей относительной интенсивности γ предметной волны является параллельность векторных амплитуд \vec{R} и \vec{S} световых волн при их распространении внутри кристалла.

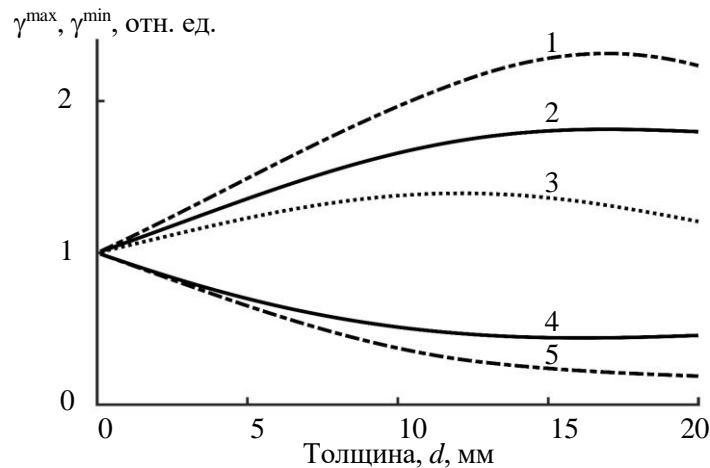


Рис. 2. Зависимости максимальных γ^{\max} (кривые 1–3) и минимальных γ^{\min} (кривые 4, 5) относительной интенсивности от толщины d , рассчитанные для кристалла ВТО среза (001)

В результате “включения” амплитудной составляющей отражательной решетки зависимости $\gamma^{\max}(d)$ и $\gamma(d)$ – разделяются на рис. 2. При выполнении условия $\vec{R} \parallel \vec{S}$ значения γ для фазово-амплитудной решетки (кривая 3) становятся меньшими, чем величина γ^{\max} для фазовой решетки (кривая 2), что можно объяснить когерентным вычитанием дифракционных вкладов амплитудной и фазовой решеток. Как видно из рассмотрения кривых 1 и 2, значения γ^{\max} для фазово-амплитудной решетки будут превышать аналогичные значения γ^{\max} для фазовой решетки вплоть до 40%. Наибольшая разность достигается при толщине, при которой угол поворота плоскостей поляризации световых волн при их распространении внутри кристалла, будет приблизительно равен 90° . Наименьшие значения относительной интенсивности достигаются в том случае, когда в кристалле формируется фазово-амплитудная решетка (см. кривые 4 и 5).

Для проверки полученных данных были проанализированы зависимости $\gamma^{\max}(d)$, $\gamma^{\min}(d)$ и $\gamma(d)$ для случая, когда волновой вектор решетки \vec{K} ориентирован вдоль кристаллографического направления $[111]$ (Рис. 3). Как видно из построения, значения γ^{\max} для фазово-амплитудной решетки существенно выше, чем γ^{\max} для фазовой решетки, причем разность между ними, в отличие от предыдущего случая, увеличивается с возрастанием толщины кристалла. При $\vec{R} \parallel \vec{S}$ как для фазовой, так и для фазово-амплитудной решетки интенсивность предметной волны не зависит от азимута поляризации, поскольку для этой конфигурации отражательная голографическая решетка является изотропной. Для фазовой решетки график $\gamma(d)$ совпадает с огибающей максимальных значений $\gamma^{\max}(d)$, а для фазово-амплитудной решетки достижимые значения γ меньше максимально возможных.

Таким образом, интенсивность предметной волны при встречном двухволновом взаимодействии на фазово-амплитудной решетке зависит от знака фазового сдвига при когерентном сложении парциальных дифракционных вкладов фазовой и амплитудной решеток. Если при двухволновом взаимодействии происходит когерентное суммирование таких вкладов, то это приводит к более интенсивной перекачке энергии световых волн и достижимая максимальная относительная интенсивность предметной волны будет больше, чем для чисто фазовой решетки.

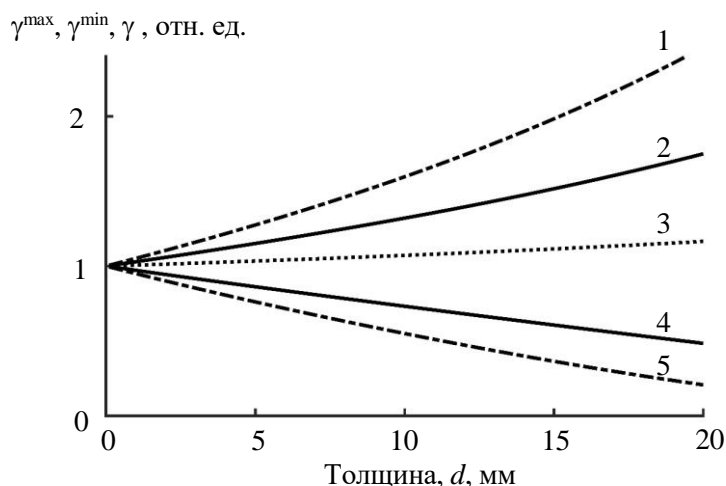


Рис. 3. Зависимости относительной интенсивности γ (кривая 3), а также ее максимальных γ^{\max} (кривые 1, 2) и минимальных γ^{\min} (кривые 4, 5) значений от толщины d , рассчитанные при $\vec{K} \parallel [111]$

Заключение

Проанализированы зависимости максимальных и минимальных значений относительной интенсивности предметной волны от толщины кристалла $\text{Vi}_{12}\text{TiO}_{20}$ при встречном двухволновом взаимодействии на отражательной решетке при ориентации его волнового вектора вдоль направлений $[001]$ и $[111]$. Рассмотрены случаи, когда в кристалле формируются решетки с фазовой и фазово-амплитудной структурами. Установлено, что при оптимальных условиях максимальная интенсивность предметной волны для фазово-амплитудной решетки в кристалле среза (001) может быть на 40 % больше, чем для фазовой решетки. При ориентации волнового вектора вдоль $[111]$ максимальная интенсивность предметной волны для фазово-амплитудной решетки будет больше, чем для фазовой решетки, причем разность между этими значениями возрастает с увеличением толщины кристалла.

Библиографические ссылки

1. Динамические голограммы Денисюка в кубических фоторефрактивных кристаллах / С. М. Шандаров [и др.] // Квантовая электроника. 2008. Т. 38, № 11. С. 1059–1069.
2. Макаревич А. В. Выходные характеристики смешанных голограмм в кристалле $\text{Vi}_{12}\text{TiO}_{20}$ среза $(\bar{1}\bar{1}0)$. Теория и эксперимент / А. В. Макаревич, В. В. Шепелевич, С. М. Шандаров. // ЖТФ. 2017. Т. 87, № 5. С. 766–771.
3. Круговой дихроизм в области состояний, обусловленных вакансиями, в кристаллах типа силленита / В. И. Бурков [и др.] // Письма в ЖЭТФ. 1983. Том 38, вып. 7. С. 326–328.
4. Навныко В. Н. Влияние поляризации считывающей волны и циркулярного дихроизма на дифракционную эффективность отражательной голограммы в кубическом оптически активном фоторефрактивном поглощающем пьезокристалле / В. Н. Навныко, В. В. Шепелевич, С. М. Шандаров // Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129, № 1. С. 66–74.
5. Miteva M. 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, No. 5. P. 1179–1186.
6. Навныко В. Н., Макаревич А. В. Взаимная трансформация световых волн при встречном взаимодействии на отражательной голографической решетке в кристалле $\text{Vi}_{12}\text{SiO}_{20}$ среза (001) // ФТТ. 2023. Т. 65, вып. 3. С. 451–459.
7. Вырожденное четырехволновое взаимодействие на пропускающих голографических решетках в кристалле $\text{Vi}_{12}\text{TiO}_{20}$ среза (110) / В. Н. Навныко [и др.] // ЖТФ. 2021. Т. 91, вып. 5. С. 832–839.
8. Holographic storage in electrooptic crystals. I. Steady state / N. V. Kukhtarev [et al.] // Ferroelectrics. 1979. Vol. 22. P. 949–960.