

09.6

Анализ закономерностей встречного четырехволнового взаимодействия в кубическом фоторефрактивном кристалле среза (001)

© В.Н. Навныко

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

Поступило в Редакцию 3 августа 2023 г.

В окончательной редакции 7 сентября 2023 г.

Принято к публикации 7 сентября 2023 г.

Рассмотрена задача о встречном четырехволновом взаимодействии на фазовых голографических решетках в кубическом фоторефрактивном поглощающем кристалле класса симметрии 23. Исследована зависимость коэффициента отражения от толщины кристаллического образца. Установлены условия, при которых оптимизированное по азимуту линейной поляризации световых волн значение коэффициента отражения достигает наибольших значений. Проанализировано влияние величин фазовых сдвигов между голографическими решетками и соответствующими им интерференционными картинками на интенсивность обращенной волны.

Ключевые слова: фоторефрактивный кристалл, четырехволновое взаимодействие, голографическая решетка, коэффициент отражения, дифракционная эффективность.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.20.56345.19699

Фоторефрактивные кристаллы (ФРК) обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными фоточувствительными голографическими материалами (такими, например, как бихромированный желатин, галоидосеребряные эмульсии и др.), так как допускают эффективное электрическое управление дифракцией световых волн и работу в режиме реального времени, а также имеют высокие эксплуатационные характеристики [1]. Вследствие этого такие кристаллы востребованы при создании современных информационно-телекоммуникационных систем [2]. В последние годы заметно расширилась сфера применения ФРК в биотехнологических и медицинских приложениях [3].

Четырехволновое взаимодействие (ЧВВ) на анизотропных фазовых решетках в ФРК используется при конструировании оптических генераторов и для создания устройств, предназначенных для обращения волнового фронта световых пучков [4]. В ранних работах (см., например, [5]) при нахождении ориентационных зависимостей коэффициента отражения анализировались случаи, когда в результате ЧВВ в кристалле формируется только одна голографическая решетка (далее решетка). В общем же случае при встречном ЧВВ максимально возможное количество записанных в ФРК решеток может достигать шести, две из которых пропускающие и четыре отражательные [6]. В недавних работах [7,8] было показано, что только аккуратный учет парциальных дифракционных вкладов всех формирующихся в ФРК решеток может приводить к удовлетворительному согласованию результатов численного моделирования с известными экспериментальными данными. Однако в работах [7,8] не рассматривались дифракционные вклады записываемых в ФРК решеток по отдельности и

не анализировалось влияние на интенсивность обращенной волны фазовых сдвигов решеток относительно соответствующих интерференционных картин. Решение этой задачи позволит более точно предсказывать условия эксперимента, при которых достигается увеличение эффективности ЧВВ на смещенных решетках. Это и является целью настоящей работы.

Рассмотрим кристалл $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) среза (001), на который направляются линейно поляризованные волны накачки 1 и 2, а также сигнальная волна 3, волновые нормали которых лежат в плоскости падения I и совпадают по направлению с единичными векторами \mathbf{e}_{1n} , \mathbf{e}_{2n} и \mathbf{e}_{3n} соответственно (рис. 1). Будем полагать, что при взаимодействии волн 1, 2 и 3 в ФРК происходит запись трех первичных решеток (одной пропускающей и двух отражательных) с фазовой структурой. При дифракции волн 1, 2 и 3 на первичных решетках возникает обращенная волна 4, волновая нормаль которой совпадает по направлению с единичным вектором \mathbf{e}_{4n} . Взаимодействие обращенной волны 4 с волнами 1, 2 и 3 приводит к вторичной записи пропускающей решетки с волновым вектором \mathbf{K}_{24} и отражательных решеток с волновыми векторами \mathbf{K}_{14} и \mathbf{K}_{34} .

На рис. 1 показан ортонормированный базис $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$, где $\mathbf{e}_3 = [\mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_2]$ (\mathbf{e}_3 не показан), который жестко связан с поверхностью голографического стола I . Ориентационный угол θ используется для задания угла поворота кристалла относительно оси Oz и равен угловому расстоянию между ортом \mathbf{e}_1 и единичным вектором \mathbf{q} , который фиксирован в кристаллографической системе координат. Ортонормированные базисы $(\mathbf{e}_{jp}, \mathbf{e}_{js}, \mathbf{e}_{jn})$, где $\mathbf{e}_{jn} = [\mathbf{e}_{jp} \times \mathbf{e}_{js}]$ ($j = 1, 2, 3, 4$), используются для описания состояния поляризации j -й волны. Углы между

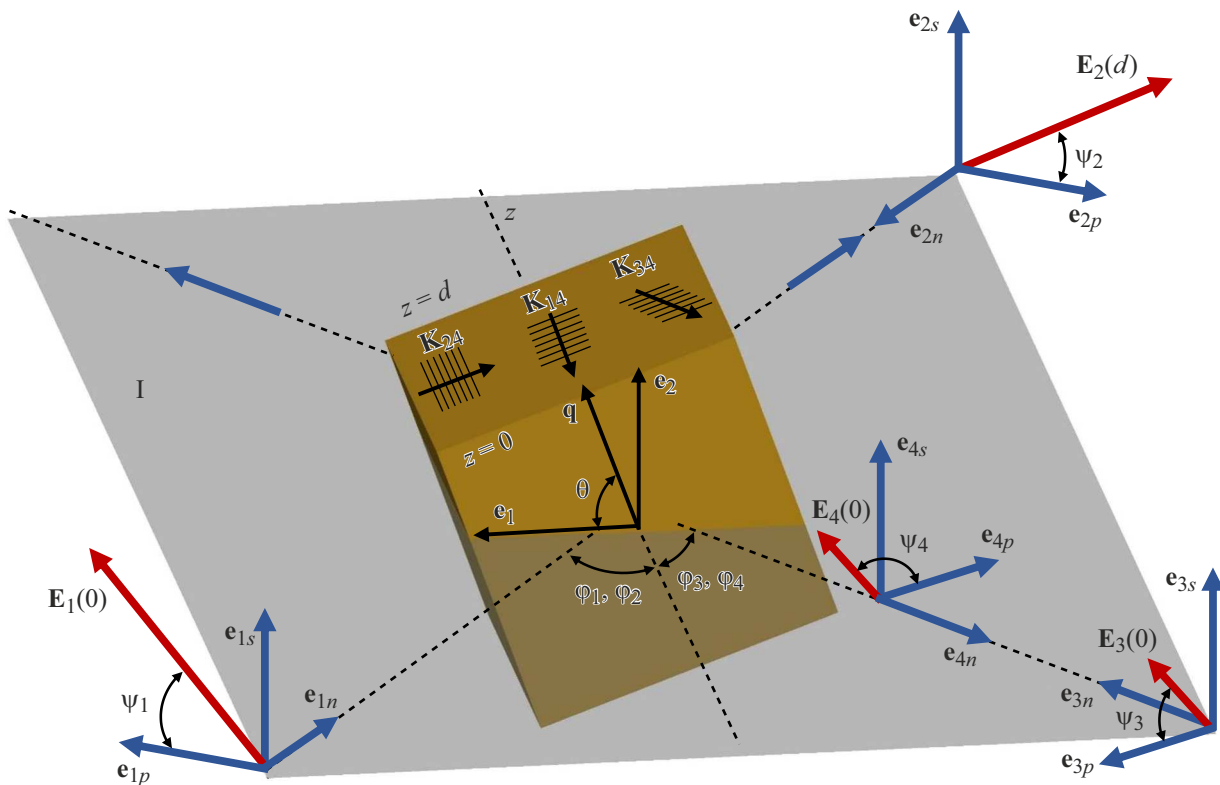


Рис. 1. Схематическое изображение геометрии встречного четырехволнового взаимодействия в фоторефрактивном кристалле.

векторами \mathbf{e}_{jn} и осью Oz обозначаются как φ_j и равняются углу Брэгга. Векторы напряженности электрического поля \mathbf{E}_j световых волн лежат в плоскостях, содержащих векторы \mathbf{e}_{jp} , \mathbf{e}_{js} , и ориентированы под азимутами ψ_j относительно векторов \mathbf{e}_{jp} . В дальнейшем при расчетах азимуты ψ_j выбирались таким образом, чтобы при каждом значении z внутри кристалла ($0 < z \leq d$) векторы \mathbf{E}_1 и \mathbf{E}_2 , а также \mathbf{E}_3 и \mathbf{E}_4 оставались параллельными друг другу. Кроме того, предполагалось, что при $z = 0$ выполнялось равенство $\psi_1 = \psi_3 = \psi$. При выполнении этих условий начальная глубина модуляции интерференционных картин оптимальна. Предполагаем, что рабочие грани ФРК покрыты антиотражающим покрытием.

Нахождение компонент векторов напряженности \mathbf{E}_j проводилось на основании численного решения уравнений связанных волн, приведенных в работе [8]. В теоретической модели приняты во внимание линейный электрооптический, фотоупругий и обратный пьезоэлектрический эффекты, а также оптическая активность, естественное поглощение и циркулярный дихроизм кристалла. Физические параметры ФРК, которые использовались при расчетах, приведены в работе [9]. Интенсивности волн накачки принимались равными друг другу, а соотношение интенсивностей сигнальной волны и волн накачки составляло 1:20. Углы φ_j при расчетах выбирались равными 5° . Анализ влияния каждой из шести решеток на характеристики обращенной волны в общем случае является довольно громоздкой задачей,

поэтому ограничимся учетом дифракционных вкладов трех вторичных решеток.

На рис. 2 и 3 сплошная линия (кривая 2) иллюстрирует зависимость дифракционной эффективности η отражательной решетки 14 от толщины кристалла, которая получена на основании численного решения уравнений связанных волн [8] при допущении равенства нулю начальных интенсивностей волн 2, 3 и 4. Для удобства сравнения коэффициент отражения R и дифракционная эффективность η выражены в относительных единицах. На рис. 2, а и 3 штрихпунктирные линии соответствуют зависимостям наибольших R^{\max} (кривая 1) и наименьших R^{\min} (кривая 3) значений коэффициента отражения от толщины, которые находились следующим образом. Для каждого d в результате перебора азимутов ψ в интервале от 0 до 180° с шагом в 2° формировался ряд значений параметра R , из которого выбирались R^{\max} и R^{\min} . При построении зависимостей на рис. 2, б оказалось, что параметр R не зависит от азимута ψ и графики зависимости $R^{\max}(d)$, $R^{\min}(d)$ вырождаются в зависимость $R(d)$ (штриховая и пунктирные кривые), которая рассчитана для различных фазовых сдвигов решеток 14 и 34 относительно соответствующих интерференционных картин ($\delta_{14} = \delta_{34} = \pi/2$ — кривая 1; $\delta_{14} = \pi/2$, $\delta_{34} = -\pi/2$ — кривая 3).

Как видно из рис. 2 и 3, дифракционная эффективность отражательной решетки 14 не зависит от азимута ψ . При ЧВВ на смещенных решетках 14 и 24 значение

интенсивности волны 4 становится функцией азимута ψ , и возникают огибающие максимальных $R^{\max}(d)$ и минимальных $R^{\min}(d)$ значений коэффициента отражения. Поскольку при любой толщине d значение R^{\max} превышает значение дифракционной эффективности η , можно сделать вывод, что при ЧВВ достигаются большие значения интенсивности волны 4, чем в случае классической схемы дифракции световой волны на отражательной решетке. Это обусловлено тем, что при выборе оптимальных значений азимута ψ дифракционные вклады отражательной решетки 14 и пропускающей решетки 24 будут когерентно суммироваться, что приведет к возрастанию интенсивности волны 4 на выходе из кристалла.

Как известно (см. работу [10]), при выполнении условия $\rho d = \pi/2, 3\pi/2, \dots$, где ρ — удельное вращение кристалла, дифракционная эффективность отражательной решетки в кристалле BSO среза (001) имеет близкие к нулю значения. Однако при ЧВВ интенсивность обращенной волны для таких значений d будет существенно превышать интенсивность волны, восстановленной при дифракции волны 1 на отражательной решетке 14, за счет конструктивной интерференции парциальных дифрагированных волн, образующихся при дифракции световых волн на решетках 14 и 24. При расчете кривых на рис. 2, *a* фазовые сдвиги δ_{14} и δ_{24} принимались равными $\pi/2$, и изменение их знака не приводило к трансформации огибающих $R^{\max}(d)$ и $R^{\min}(d)$.

В отличие от предыдущего случая при ЧВВ на решетках 14 и 34 интенсивность волны 4 практически не зависит от азимута ψ (рис. 2, *b*) и во многом определяется фазовыми сдвигами δ_{14} и δ_{34} . Если решетки смещены на $\pi/2$ (кривая 1), то их дифракционные вклады когерентно суммируются, и при любом d интенсивность волны 4 выше, чем дифракционная эффективность η . Противоположная ситуация имеет место, если фазовые сдвиги δ_{14} и δ_{34} равны по величине и имеют разные знаки ($\delta_{14} = \pi/2, \delta_{34} = -\pi/2$). В этом случае их дифракционные вклады когерентно вычитаются, и при любом значении d выполняется условие $R \leq \eta$.

При ЧВВ на решетках 14, 24 и 34 зависимости $R^{\max}(d)$ и $R^{\min}(d)$ для случая, когда фазовые сдвиги δ_{14}, δ_{24} и δ_{34} совпадают и равны $\pi/2$, показаны на рис. 3, *a*, а на рис. 3, *b* зависимости получены при $\delta_{14} = \delta_{24} = \pi/2$ и $\delta_{34} = -\pi/2$. Как видно из построения, максимально возможное значение коэффициента отражения ($R^{\max} = 1.6 \cdot 10^{-2}$) достигается в том случае, когда ЧВВ происходит на трех вторичных решетках 14, 24 и 34 с фазовыми сдвигами, равными $\pi/2$. В этом случае наибольшее значение R^{\max} на 50% превышает аналогичное значение R^{\max} , полученное для решеток 14, 24 (рис. 2, *a*), и на 25% превышает наибольшее R , достигаемое для решеток 14, 34 при $\delta_{14} = \delta_{34} = \pi/2$. Изменение фазового сдвига решетки 34 с $\pi/2$ на $-\pi/2$ существенно влияет на интенсивность обращенной волны. При выполнении условия $\delta_{14} = \delta_{24} = \delta_{34} = \pi/2$ при любом значении азимута ψ значение коэффициента отражения превышало дифракционную эффективность

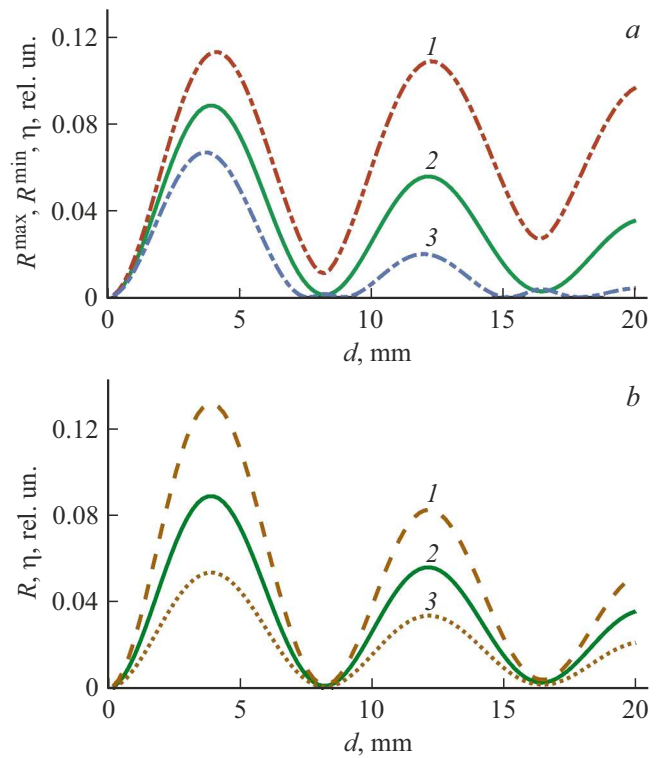


Рис. 2. *a* — зависимости дифракционной эффективности η отражательной голограммы (кривая 2) и коэффициентов отражения R^{\max} (кривая 1), R^{\min} (кривая 3) при ЧВВ от толщины кристалла d . Зависимости $R^{\max}(d), R^{\min}(d)$ рассчитаны для случая, когда при ЧВВ в фоторефрактивном кристалле формируются решетки 14 и 24. *b* — зависимости дифракционной эффективности η отражательной голограммы (кривая 2) и коэффициента отражения R (кривые 1 и 3) при ЧВВ от толщины кристалла d . Зависимости $R(d)$ рассчитаны для случаев, когда при ЧВВ в фоторефрактивном кристалле формируются решетки 14 и 34 с фазовыми сдвигами: 1 — $\delta_{14} = \delta_{34} = \pi/2$; 3 — $\delta_{14} = \pi/2, \delta_{34} = -\pi/2$.

η при толщине кристалла до 5.6 mm (рис. 3, *a*). В том случае, если $\delta_{34} = -\pi/2$, наблюдается противоположная картина: когерентное вычитание дифракционных вкладов решеток 14, 24 и решетки 34 приводит к тому, что для любого азимута ψ при толщине кристалла до 5.6 mm параметр η превышает R^{\max} . При толщине кристалла больше 5.6 mm в обоих рассмотренных случаях можно добиться превышения коэффициента отражения над дифракционной эффективностью за счет выбора оптимального значения азимута ψ . В локальных минимумах зависимостей $R^{\max}(d)$, которые достигаются при выполнении условия $\rho d = \pi/2, 3\pi/2$, параметр R^{\max} на рис. 3, *a* и *b* имеет приблизительно равные значения.

Таким образом, численное решение предложенных в работе [8] уравнений связанных волн позволяет предсказывать условия голографического эксперимента (начальные азимуты линейной поляризации световых волн, толщина кристалла), для которых достигаются наибольшие значения интенсивности обращенной волны при

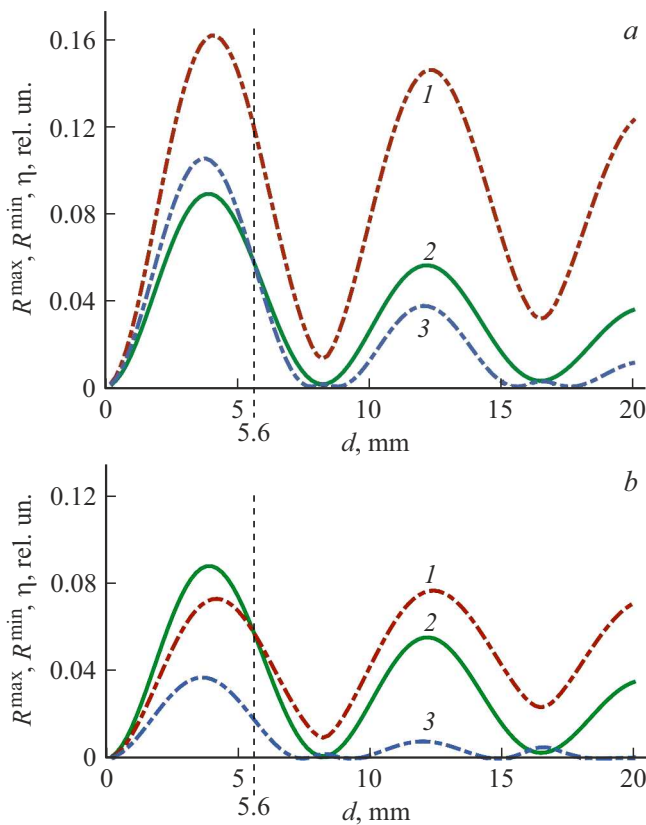


Рис. 3. Зависимости дифракционной эффективности η отражательной голограммы (кривая 2) и коэффициентов отражения R^{\max} (кривая 1), R^{\min} (кривая 3) при ЧВВ от толщины кристалла d . Зависимости $R^{\max}(d)$, $R^{\min}(d)$ рассчитаны для случаев, когда при ЧВВ в кристалле формируются решетки 14, 24, 34 с фазовыми сдвигами: a — $\delta_{12} = \delta_{24} = \delta_{34} = \pi/2$; b — $\delta_{12} = \delta_{24} = \pi/2$, $\delta_{34} = -\pi/2$.

встречном ЧВВ на смещенных решетках в кубическом оптически активном фоторефрактивном поглощающем кристалле. Показано, что выбор оптимальных условий эксперимента по ЧВВ может приводить к увеличению коэффициента отражения на 50% в кристалле BSO среза (001).

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (договор № 1410/2021 от 22.03.2021 г.) в рамках Государственной программы научных исследований № 6 „Фотоника и электроника для инноваций“ на 2021–2025 гг. (задание 6.1.14).

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Н.В. Никоноров, В.М. Петров, *Оптика и спектроскопия*, **129** (4), 385 (2021). DOI: 10.21883/OS.2021.04.50764.290-20 [N.V. Nikonorov, V.M. Petrov, *Opt. Spectrosc.*, **129**, 530 (2021). DOI: 10.1134/S0030400X21040172].
- [2] В.М. Петров, А.В. Шамрай, *Интерференция и дифракция для информационной фотоники* (Лань, СПб., 2019).
- [3] A. Blazquez-Castro, A. García-Cabanes, M. Carrascosa, *Appl. Phys. Rev.*, **5**, 041101 (2018). DOI: 10.1063/1.5044472
- [4] М.П. Петров, С.И. Степанов, А.В. Хоменко, *Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике* (Наука, СПб., 1992).
- [5] Y. Ding, H.J. Eichler, *Opt. Commun.*, **110**, 456 (1994). DOI: 10.1016/0030-4018(94)90449-9
- [6] С.Г. Одулов, М.С. Соскин, А.И. Хижняк, *Лазеры на динамических решетках: оптические генераторы на четырехволновом смещении* (Наука, М., 1990).
- [7] В.Н. Навныко, *Оптика и спектроскопия*, **130** (3), 387 (2022). DOI: 10.21883/OS.2022.03.52167.2936-21 [V.N. Naunya, *Opt. Spectrosc.*, **130** (3), 324 (2022). DOI: 10.21883/EOS.2022.03.53557.2936-21].
- [8] В.Н. Навныко, *Квантовая электроника*, **52** (8), 731 (2022). [V.N. Naunya, *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **49** (Suppl. 1), S58 (2022). DOI: 10.3103/S1068335622130073].
- [9] В.Н. Навныко, А.В. Макаревич, *ФТТ*, **65** (3), 451 (2023). DOI: 10.21883/FTT.2023.03.54745.516 [V.N. Naunya, A.V. Makarevich, *Phys. Solid State*, **65** (3), 441 (2023). DOI: 10.21883/PSS.2023.03.55587.516].
- [10] С.М. Шандаров, Н.И. Буримов, Ю.Н. Кульчин, Р.В. Ромашко, А.Л. Толстик, В.В. Шепелевич, *Квантовая электроника*, **38** (11), 1059 (2008). [S.M. Shandarov, N.I. Burimov, Yu.N. Kul'chin, R.V. Romashko, A.L. Tolstik, V.V. Shepelevich, *Quantum Electron.*, **38** (11), 1059 (2008). DOI: 10.1070/QE2008v038n11ABEH013793].