

Определение оптимальных направлений волнового вектора фазовой голограммы в кристалле InP:Fe

В. Н. Навныко¹⁾, Д. С. Блоцкая¹⁾, А. В. Макаревич¹⁾, Г. В. Кулак¹⁾, С. М. Шандаров²⁾

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

²⁾ Томский университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия,
e-mail: stanislavshandarov@gmail.com

Для кристалла InP:Fe в кристаллографической системе координат определены направления волнового вектора голографической решетки, при которых коэффициент связи между дифрагирующими опорной и предметной световыми волнами достигает максимально возможной величины. Выполнен сравнительный анализ значений коэффициентов связи, которые достигаются для типичных кристаллических срезов, используемых при проведении экспериментов

Ключевые слова: фоторефрактивный кристалл; фазовая голограмма; симметрия; диэлектрическая проницаемость.

Determination of optimal directions of the wave vector of the phase hologram in the crystal InP:Fe

V. N. Naunyka¹⁾, D. S. Blotskaya¹⁾, A. V. Makarevich¹⁾, G. V. Kulak¹⁾, S. M. Shandarov²⁾

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

²⁾ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia,
e-mail: stanislavshandarov@gmail.com

The directions of the holographic grating wave vector at which the coupling coefficient between the diffracted reference and object light waves reaches its maximum possible value are determined in the crystallographic coordinate system for InP:Fe crystal. A comparative analysis of the coupling coefficient values achieved for typical crystal cuts used in the experiments is performed.

Keywords: photorefractive crystal; phase hologram; symmetry; permittivity.

Введение

Вследствие пространственной анизотропии линейного электрооптического, фотоупругого и обратного пьезоэлектрического эффектов глубина модуляции показателя преломления фоторефрактивного кристалла при записи фазовой голограммы зависит от направления ее волнового вектора в кристаллографической системе координат. Поскольку величины коэффициентов связи дифрагированных волн при их взаимодействии на фазовой голографической решетке определяются амплитудными значениями показателя преломления, представляет интерес нахождение пространственных ориентаций волнового вектора голограммы, при которых эффективность двухволнового взаимодействия достигает наибольших значений.

В качестве фоторефрактивной среды рассмотрим кристаллы InP:Fe класса симметрии $\bar{4}3m$, которые обладают относительно малым временем фоторефрактивного отклика и близкой к теоретическому пределу голографической чувствительностью. Отсутствие оптической активности приводит к тому, что выходные энергетические характеристики фазовой голограммы изменяются монотонно с возрастанием толщины кристалла. В связи с этим установление оптимальных направлений волнового вектора при соответствующем выборе азимутов поляризации волн позволит добиваться максимальных для InP:Fe значений дифракционной эффективности и коэффициента усиления независимо от длины взаимодействия опорной и предметной волн.

1. Основные результаты и обсуждение

На рис. 1, *а* представлена указательная поверхность, которая иллюстрирует зависимость максимального значения коэффициента связи $\chi^{\max}$ от направления волнового вектора $\mathbf{K}$ фазовой голограммы, рассчитанная для фоторефрактивного полупроводника InP:Fe. График зависимости $\chi^{\max}(\mathbf{K})$ получен на основании численного решения системы уравнений связанных волн, приведенной в [1]. Каждому из направлений вектора $\mathbf{K}$ соответствует фиксированное значение параметра $\chi^{\max}$, который равен максимальному коэффициенту связи среди ряда значений χ , полученных для различных состояний поляризации связанных волн. Для построения поверхности находились значения параметра $\chi^{\max}$ по всем возможным направлениям волнового вектора $\mathbf{K}$, которые затем откладывались на радиус-векторах, исходящих из начала координат. При соединении концов этих векторов реализуется поверхность, приведенная на рис. 1, *а*. Если параметр $\chi^{\max}$ принимает положительное значение, то соответствующая точка на поверхности окрашивается в светло-серый (белый) цвет, а если отрицательное значение – в темно-серый (черный) цвет. На рис. 1, *а* направленными отрезками (x_1 , x_2 , x_3) обозначены оси кристаллографической системы координат.

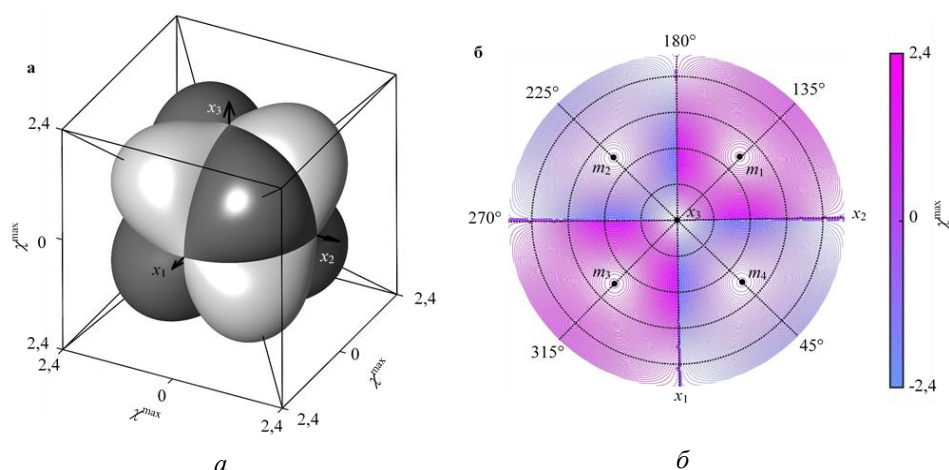


Рис. 1. Зависимость коэффициента связи $\chi^{\max}$ от направления волнового вектора $\mathbf{K}$ фазовой голограммы:
а – кристаллографическая система координат; *б* – стереографическая проекция

Как видно из рис. 1, *а*, поверхность состоит из четырех белых и четырех черных симметрично расположенных областей. Экстремальные направления поверхности, вдоль которых значения $\chi^{\max}$ достигают основного максимума, визуально совпадают с диагоналями куба. Для более точного определения экстремальных направлений рассмотрим стереографическую проекцию [2] поверхности на параллельную (100) плоскость x_1x_2 , приведенную на рис. 1, *б*. На построении точками m_1-m_4 обозначены основные максимумы зависимости $\chi^{\max}(\mathbf{K})$. Легко заметить, что экстремальные направления поверхности совпадают со стереографическими проекциями поворотных осей третьего порядка $\langle 111 \rangle$.

График зависимости $\chi^{\max}(\mathbf{K})$ представляет собой поверхность смешанной полярности, внешняя симметрия которой соответствует точечной группе антисимметрии $\bar{4}'3m'$ [3]. Наличие антиповоротных осей четвертого порядка, параллельных направлениям $\langle 100 \rangle$, следует из симметричности поверхности относительно поворота на 90° и знакопеременного преобразования. Поверхность также может быть совмещена в результате преобразований совпадающими с $\{100\}$ плоскостями антисимметрии, поскольку график функции $\chi^{\max}(\mathbf{K})$ симметричен относительно полярной плоскости симметрии и знакопеременного преобразования. Таким образом, внешняя форма поверхности удовлетворяет основному закону кристаллофизики [4].

Для нахождения $\chi^{\max}$ вдоль осей $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ и $\langle 112 \rangle$ проанализируем приведенные на рис. 2 и рис. 3 сечения графика функции $\chi^{\max}(\mathbf{K})$ плоскостями (100) и (112). На рисунках окрашенные в серый цвет параллелограммы отображают находящуюся внутри куба часть секущей плоскости. Кривые на рис. 2, *б* и 3, *б* соответствуют точкам пересечения секущей плоскости с рассекаемой поверхностью. На рис. 2, *б* сечения белой и черной фигур, составляющих поверхность, совпадают и поэтому кривая окрашена в один тон. На рис. 3, *б* сечения не совпадают и точки пересечения с белой фигурой окрашены в светло-серый цвет, а с черной фигурой – темно-серый цвет. Штриховая окружность на рис. 3, *б* является дополнительным построением и ее радиус равен экстремальному значению коэффициента связи χ^{extr} .

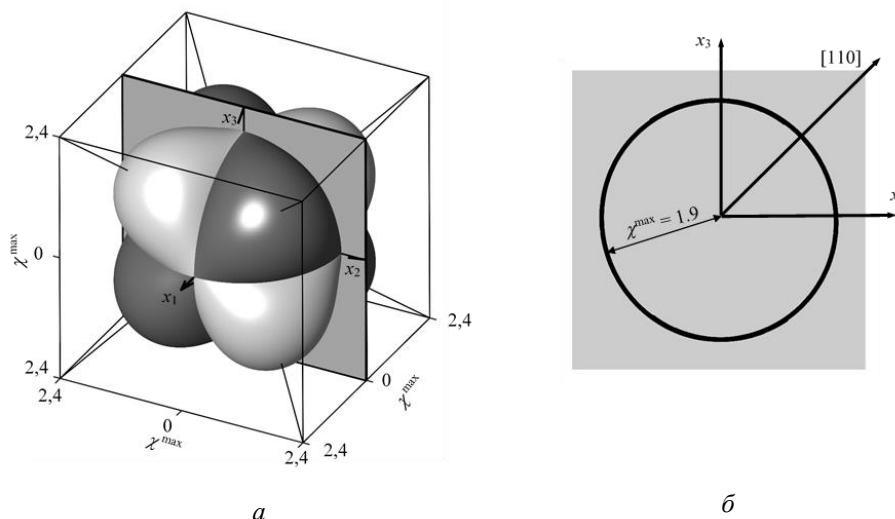


Рис. 2. Сечение графика зависимости $\chi^{\max}(\mathbf{K})$ плоскостью (100)

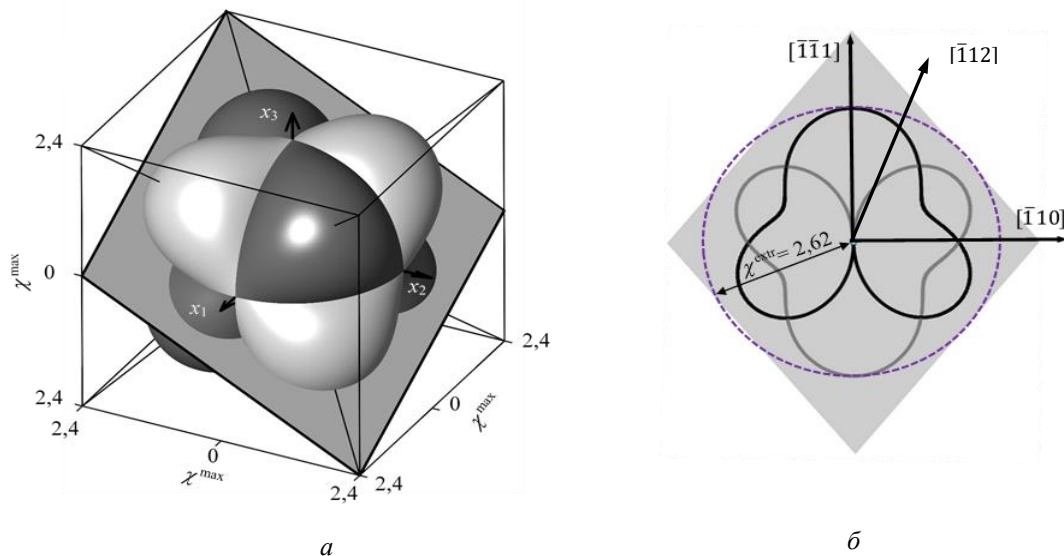


Рис. 3. Сечение графика зависимости $\chi^{\max}(\mathbf{K})$ плоскостью (112)

Как следует из рис. 2, б, все лежащие в плоскостях $\{100\}$ направления, включая $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$, являются симметрично эквивалентными, так как достигаемые вдоль них коэффициенты связи $\chi^{\max}$ приблизительно равны 1,9. Это означает, что при двухволновом взаимодействии на фазовой решетке с волновым вектором $\mathbf{K}$, направленным вдоль направлений осей $\langle 100 \rangle$ или $\langle 110 \rangle$, эффективность взаимодействия между опорной и предметной волнами при выборе оптимальной геометрии взаимодействия будет одинаковой. Наибольшие значения коэффициента связи будут достигаться в случае, когда волновой вектор $\mathbf{K}$ направлен вдоль одного из направлений $\langle 111 \rangle$. В этом случае коэффициент связи достигает экстремального значения $\chi^{\text{extr}} = 2,62$, которое превышает соответствующие направлениям $\langle 100 \rangle$ или $\langle 110 \rangle$ значения $\chi^{\max}$ на 35 %. Если сравнивать направления $\langle 111 \rangle$ и $\langle 112 \rangle$, то можно отметить, что достигаемый вдоль осей $\langle 112 \rangle$ коэффициент связи $\chi^{\max}$ приблизительно равен 2,45, что на 7 % меньше максимально возможной величины χ^{extr} .

Таким образом, наибольшее значение коэффициента связи между взаимодействующими на фазовой голографической решетке световыми волнами в кристалле InP:Fe достигается в том случае, когда волновой вектор голограммы ориентирован вдоль одного из направлений $\langle 111 \rangle$. Сравнимое по величине с максимально возможным значение коэффициента связи достигается при ориентации волнового вектора решетки вдоль направлений $\langle 112 \rangle$. Для осей $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$ уменьшение коэффициента связи по отношению к максимально возможной величине равно 35 %.

Библиографические ссылки

1. Навыко В. Н. Четырехволновое взаимодействие на комбинированных голограммах в фоторефрактивном кристалле класса симметрии 23 // ЖТФ. 2024. Т. 94, № 11. С. 1854–1866.
2. Шубников А. В. Симметрия и антисимметрия конечных фигур. – Москва : Изд-во Академии наук СССР, 1951. 568 с.
3. Егоров-Тисменко Ю. К. Кристаллография и кристаллохимия: учеб. Пособие. – М : КДУ, 2005.
4. Шаскольская М. П. Кристаллография. – Москва : Высшая школа, 1984. 443 с.