УДК 535

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ В ОДНО- И ДВУМЕРНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

М. С. Попова, Р. А. Лимаренко, В. Б. Тараненко

Исследовано дифракционное расплывание и сужение лазерного пучка внутри голографической периодической структуры как численно, так и экспериментально. Мы сравнили два различных подхода к решению дифракционной задачи для периодических структур. Развитый оптимизированный алгоритм для расчетов является полезным для компьютерного моделирования дифрагированного поля и позволяет сделать вывод о свойствах пространственного поведения. Рассмотрены возможные применения управления распространением световых пучков.

Ключевые слова: дифракция, периодическая структура, лазерный пучок.

В работе рассмотрены два метода решения дифракционной задачи для периодических структур. Предложенная модель позволяет получить решение задачи дифракции волны. Эта модель также полезна для развития алгоритма моделирования поля в волновой зоне, что позволяет быстро и наглядно составлять качественное, а иногда и довольно точное количественное представление о результате дифракции волн при различных сложных условиях их распространения.

Постановка задачи для распространения света в периодической структуре иллюстрируется на рис. 1. Модель описывает распространение световых волн $E(x, y, z)$ с заданным начальным амплитудно-фазовым распределением $E_0(\xi, \eta)$. Решетка занимает пространство от z_0 до z_l и разбита на слои с некоторым шагом Δz.

Первый подход к нахождению $E(x, y, z)$ базируется на обобщении аналитического уравнения Зоммерфельда, что позволяет получить решение без традиционного приближения. Волновой метод может быть применен к количественным вычислениям для описания распространения волн в свободном пространстве и в материалах с различными оптическими характеристиками.

Международный центр “Институт прикладной оптики” НАН Украины.

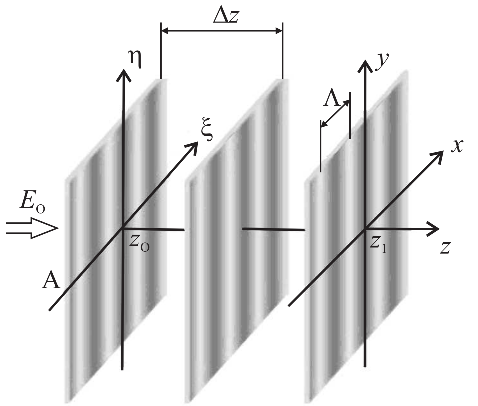

Рис. 1: *Постановка дифракционной задачи для периодических структур: E_0 – падающая плоская волна или пучок, Λ – период решетки, Δz – шаг расчета изменения волнового фронта.*

Выражение для дифракционного поля в интегральном виде с ядром W будет следующим:

$$E(x,y,z) = \int_A \int d\xi d\eta \frac{\partial^2 W(x-\xi, y-\eta, z)}{\partial\xi\partial\eta} E_0(\xi,\eta). \quad (1)$$

Ядро интегрального представления W может быть выражено следующим образом:

$$W = \frac{i}{\pi}\frac{\partial U_\xi}{\partial \xi}\frac{\partial U_\eta}{\partial \eta}\exp(iU_\xi^2 + iU_\eta^2),$$

где U_ξ и U_η являются безразмерными криволинейными квазипараболическими координатами: $U_\xi = \pm\sqrt{k}\sqrt{\sqrt{(x-\xi)^2+z^2}-z}$, $U_\eta = \pm\sqrt{k}\sqrt{\sqrt{(y-\eta)^2+z^2}-z}$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Уравнение (1) можно переписать в виде

$$E(x,y,z) = \int_A \int E_0 \frac{i}{\pi}\frac{\partial U_\xi}{\partial \xi}\frac{\partial U_\eta}{\partial \eta}\exp(iU_\xi^2 + iU_\eta^2) d\xi d\eta. \quad (2)$$

Запишем распределение поля для нашего одномерного случая

$$E_n(x) = \int d\xi \frac{\partial W(x-\xi, \Delta z)}{\partial \xi} E_{n-1}(\xi)\cdot G(\xi) = \sum E_{n-1}(\xi)\cdot \Delta W_n \cdot G(\xi), \quad (3)$$

где ΔW_n – интеграл Френеля, записанный в комплексной форме, и $G(\xi)$ – решетка:

$$\Delta W_n = \frac{i}{\pi}\int\limits_{U(x-\xi_n-\Delta/2,z)}^{U(x-\xi_n+\Delta/2,z)} \exp(i\mu^2)d\mu \text{ и } G(\xi) = \exp\left(i\gamma\cos\left(\frac{\xi}{\Lambda}\right)\right),\ \gamma - \text{модуляция решетки.}$$

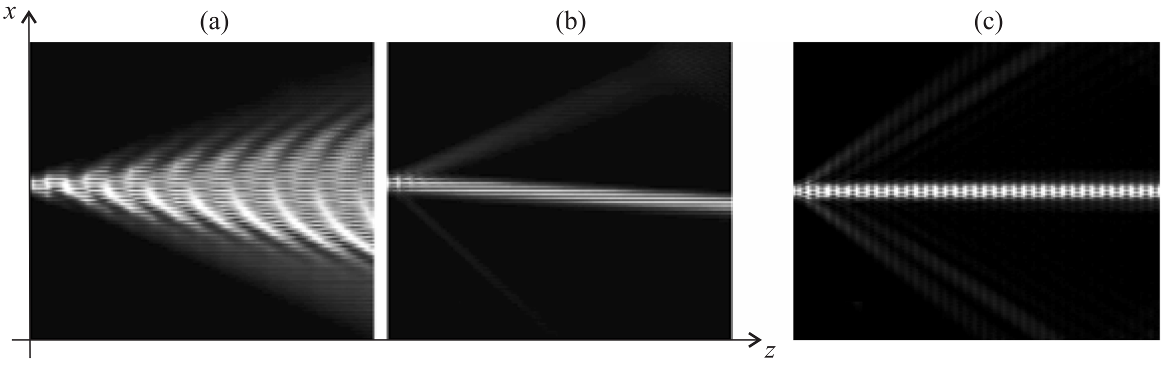

Рис. 2: *Смоделированное распространение светового пучка под несколькими входными углами вдоль одномерной (a), (b) и двумерной (c) периодической структуры; x и z – координаты, нормированные на длину волны.*

Этот метод дает возможность описать структуру поля в ближней, дальней и промежуточной зонах.

Второй подход базируется на решении так называемого скалярного волнового уравнения Гельмгольца, которое записывается таким образом:

$$\partial_z E = -iknE\cos Kx - \frac{i}{2k}\partial^2_{xx}E, \tag{4}$$

где E – начальное поле, k – волновое число, K – вектор решетки, n – коэффициент преломления, x и z – поперечная и продольная координаты соответственно. Для численного моделирования распространения пучка применялся классический метод разделения переменных с быстрым преобразованием Фурье.

На рис. 2 представлены результаты моделирования, с помощью *второго подхода*, распространения световых пучков вдоль одно- и двумерной периодических структур: (а) брэгговский случай, когда пучок запускается в решетку под углом Брэгга и (б) эффект коллимации, когда пучок запускается под углом половины Брэгга и проходит вдоль максимумов решетки без дифракции.

На рис. 2(c) показано распространение пучка в двумерной структуре при нормальном падении пучка.

Для проверки результатов численного моделирования был проведен эксперимент по созданию периодической структуры на фотополимерной пленке голографическим методом и наблюдению распространения светового лазерного пучка внутри такой решетки. Для формирования решеток использовалась двухпучковая схема записи элемен-

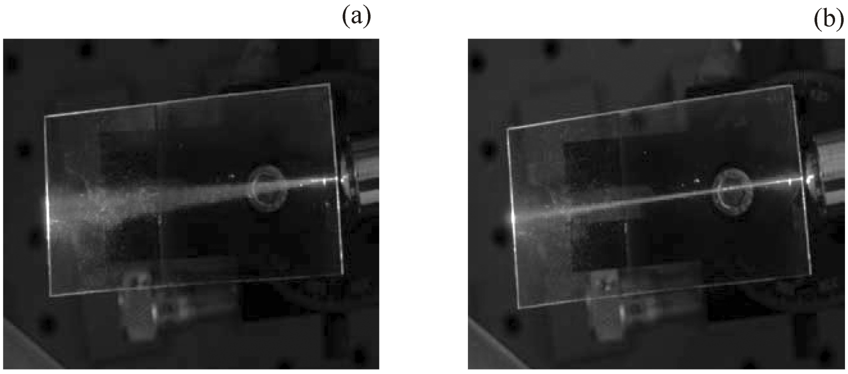

Рис. 3: *Экспериментальное наблюдение прохождения светового лазерного пучка внутри голографической периодической структуры:* $\theta = 5°15'$ *(a) и* $\theta = 2°40'$ *(b), соответственно.*

тарных голограмм излучением He-Ne лазера с длиной волны 633 нм. Период решетки $\Lambda = 1.7$ мкм, толщина пленки $T = 52$ мкм, амплитуда модуляции показателя преломления – $2 \cdot 10^{-3}$, длина $z_1 - z_0 = 5$ см.

Для исследования поведения света излучение лазера фокусировалось с помощью микрообъектива (20) на торец решетки. Исследуемый образец располагался на вращающемся столике, обеспечивающем перестройку направления распространения света. Далее мы изменяли угол падения пучка θ, т.е. угол нормали к поверхности относительно оптической оси, и визуально наблюдали свет, проходящий внутри голографической периодической структуры. На рис. 3 приведены примеры падения пучка под углом Брэгга ($\theta = 5°15'$) и падения под углом примерно половины угла Брэгга ($\theta = 2°40'$).

Из рис. 3 видно совпадение вышеприведенных результатов моделирования с результатами эксперимента.

Таким образом, развитые алгоритмы являются полезными для проведения исследования и численного моделирования дифрагированного поля.

Л И Т Е Р А Т У Р А

[1] А. Зоммерфельд, *Оптика*. Перевод с нем. Н. В. Родниковой (М., изд-во Иностранной Литературы, 1953).

[2] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light* (Cambridge University Press, Cambridge, England, 2002).

[3] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (Princeton U. Press, 1995).

[4] D. N. Christodoulides, F. Lederer, and Y. Silberberg, Nature **424**, 817 (2003).

По материалам 3 Всероссийской молодежной школы-семинара "Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики", Москва, ФИАН, октябрь 2009 г.

Поступила в редакцию 26 ноября 2009 г.