

УДК 535.42

КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОЛОТНЯНЫХ ПЕРЕПЛЕТЕНИЙ

© 2007 г. П. Г. Шляхтенко*, доктор техн. наук; В. П. Нефедов**, канд. техн. наук; С. Н. Шкуронат*

* Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна, Санкт-Петербург

** НИИ Министерства обороны, Санкт-Петербург

Составлена компьютерная программа расчета интеграла Френеля–Кирхгофа для одного и того же объекта в режиме равномерного распределения интенсивности и в режиме, когда интенсивность в световом пучке менялась по нормальному закону, соответствующему основной моде лазера. В качестве объекта исследования использованы черно-белые компьютерные модели полотняного переплетения, которые строились по специальной программе в соответствии с заданными параметрами переплетения, вводимыми в память компьютера. Показано, что при переходе от равномерного освещения к освещению гауссовым пучком величина и положение основных максимумов в дифракционной картине существенно не изменяются, в то время как неосновные максимумы исчезают. Выявленные закономерности доказывают возможность практического использования аналитических формул, полученных ранее при равномерном освещении, для расчетов параметров реальных полотняных переплетений в дифракционных экспериментах с лазерными пучками.

Коды OCIS: 120.4630.

Поступила в редакцию 12.10.2006.

В [1, 2] проведен расчет интенсивности $I(x, y)$ в дифракционной фраунгоферовой картине на экране, отстоящем на расстоянии L от теневой проекции тканого полотна, при равномерном нормальном освещении в проходящем монохроматическом свете с длиной волны λ в предположении справедливости приближения интеграла Френеля–Кирхгофа [3] по формуле

$$I = \text{const} \left| \iint_S \sqrt{E} \exp[-ik(p\xi + q\eta)] d\xi d\eta \right|^2, \quad (1)$$

где E – интенсивность падающего света ($E = \text{const}$), $k = 2\pi/\lambda$, $p = x/L$, $q = y/L$, декартовы оси координат ξ , η ориентированы вдоль нитей утка и основы, расположены в плоскости объекта и параллельны соответственно координатам x , y в плоскости экрана, причем начало координат находится в центре дифракционной картины, а интегрирование проводится по всей площади отверстий S в освещенной области объекта.

Получена формула, которая в случае простого полотняного переплетения имеет вид

$$I = I_0 \left(\frac{\sin \frac{\pi Ax}{\lambda L} \sin \frac{\pi By}{\lambda L} \sin \frac{\pi T_1 N_1 x}{\lambda L} \sin \frac{\pi T_2 N_2 y}{\lambda L}}{\frac{\pi Ax}{\lambda L} \frac{\pi By}{\lambda L} \sin \frac{\pi T_1 x}{\lambda L} \sin \frac{\pi T_2 y}{\lambda L}} \right)^2,$$

где I_0 – интенсивность света, создаваемая в центре картины одним периодическим звеном (прямоуголь-

ным отверстием площадью AB); N_1 и N_2 – число освещенных рапортов (периодов) ткани вдоль основных (направление x) и уточных (направление y) нитей соответственно, T_1 и T_2 – периоды повторения уточных и основных нитей соответственно.

Анализ формулы (2) показывает [1], что положения основных дифракционных максимумов в этом случае достаточно точно определяются выражениями

$$x_k = \frac{\lambda L}{T_1} k, \quad y_m = \frac{\lambda L}{T_2} m, \quad (3)$$

где k и m – целые числа ($0, \pm 1, \pm 2, \dots$).

Из (3) легко получить

$$T_1 = \frac{\lambda L}{\Delta x}, \quad T_2 = \frac{\lambda L}{\Delta y}, \quad (4)$$

где Δx и Δy – расстояния между соседними основными дифракционными максимумами вдоль осей x и y соответственно, а также формулы, связывающие интенсивности в центральном (I_{00}) и соседних с ним основных максимумах (I_{10} и I_{01}) с геометрическими параметрами ткани

$$\sqrt{\frac{I_{10}}{I_{00}}} = \frac{\sin \frac{\pi A}{T_1}}{\frac{\pi A}{T_1}}, \quad \sqrt{\frac{I_{01}}{I_{00}}} = \frac{\sin \frac{\pi B}{T_2}}{\frac{\pi B}{T_2}}. \quad (5)$$

Очевидно, что из формул (4), (5) по измеренным значениям Δx , Δy , I_{00} , I_{10} , I_{01} могут быть рассчитаны

предполагаемые значения таких геометрических параметров ткани, как поверхностная плотность ткани, плотности по утку и основе, диаметры нитей утка и основы.

Проведенные в [1] предварительные эксперименты на различных образцах ткани при нормальном их освещении светом He-Ne-лазера качественно подтвердили эти зависимости.

Целями настоящей работы являются:

1. Исследование влияния распределения интенсивности света в лазерном пучке, описываемого функцией Гаусса [4], на параметры дифракционной картины в приближении справедливости интеграла Френеля–Кирхгофа для случая, когда интенсивность $E(\xi, \eta) \neq \text{const}$.

2. Поиск ответа на вопрос, насколько правомочно в этом случае пользоваться формулами (3)–(5), полученными в [1] для иного случая освещения объекта исследования.

К сожалению, в нашем случае прямой учет реального распределения света в пучке при решении интеграла (1) не дает аналитического ответа. Поэтому для решения поставленной задачи была составлена компьютерная программа наиболее точного расчета этого интеграла для одного и того же объекта в режиме равномерного распределения интенсивности и в режиме, когда интенсивность в световом пучке менялась по нормальному закону, соответствующему основной моде лазера,

$$E = \text{const} \exp\left(-\frac{\xi^2 + \eta^2}{\sigma^2}\right). \quad (6)$$

В качестве объекта исследования были использованы черно-белые компьютерные модели полотняного переплетения, которые строились по специальной программе на основе заданных параметров переплетения (T_1, T_2, A, B), вводимых в память компьютера.

На рис. 1–3 представлены результаты расчетов по этой программе для одной и той же модели тканого переплетения с параметрами $T_1 = T_2 = T, A/T = 0,5625, B/T = 0,3125$. Данные рис. 1 относятся к освещению объекта квадратным в сечении монохроматическим пучком света одинаковой интенсивности ($E = \text{const}$); данные рис. 2 получены для светового пучка того же сечения, интенсивность которого определяется формулой (6) относительно центра квадрата; данные рис. 3 получены для круглого сечения пучка и той же зависимости интенсивности относительно центра круга ($\sigma = \text{const}$).

На всех рисунках а – световое пятно на выходе объекта исследования, б – график зависимости интенсивности света, падающего на объект; в – вид картины на удаленном экране, определяемой для

каждого случая расчетной формулой (1); г – график нормированной на центральный максимум зависимости $I(x, 0)$, д – график нормированной на центральный максимум зависимости $I(0, y)$. Во всех представленных случаях $L = \text{const}$.

Сравнение данных рис. 1–3, а также данных многочисленных экспериментов, проведенных для других параметров полотняного переплетения, позволяет выделить следующие закономерности, имеющие общий характер для всех исследованных моделей:

1. Если рассчитанное световое пятно перекрывает более четырех периодов исследуемой структуры (T_1, T_2), картина на рис. 1в и ход зависимостей рис. 1г, 1д практически точно описываются формулам (2)–(5), что свидетельствует о правильном алгоритме расчета интеграла (1). При этом отношения интенсивностей I_{10}/I_{00} и I_{01}/I_{00} в рамках погрешности вычислений совпадают со значениями, определяемыми для тех же параметров модели переплетения формулами (6).

2. В картине на рис. 2в, 3в и зависимостях, представленных на рис. 2г, 2д, 3г, 3д при тех же размерах светового пятна, практически отсутствуют дополнительные максимумы, лежащие между основными максимумами, хорошо заметные на рис. 1в, если радиус рассчитываемого светового пятна на модели R больше величины σ .

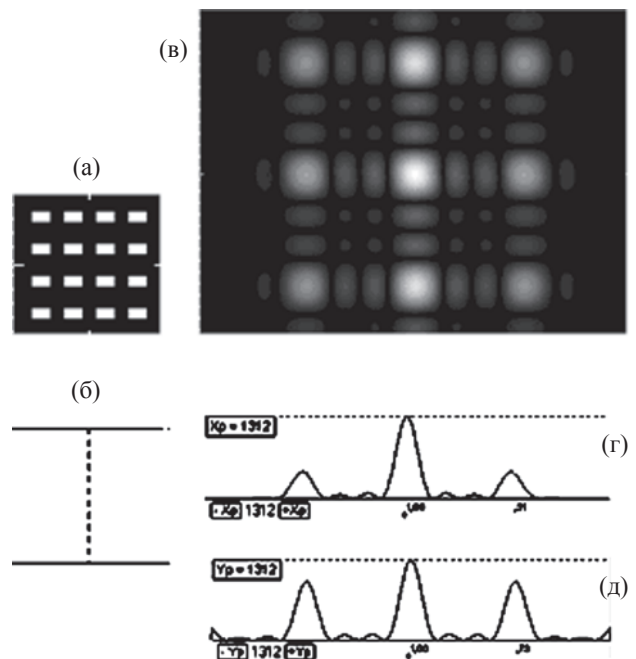


Рис. 1. Расчет дифракции от квадратного участка модели полотна при равномерном его освещении.

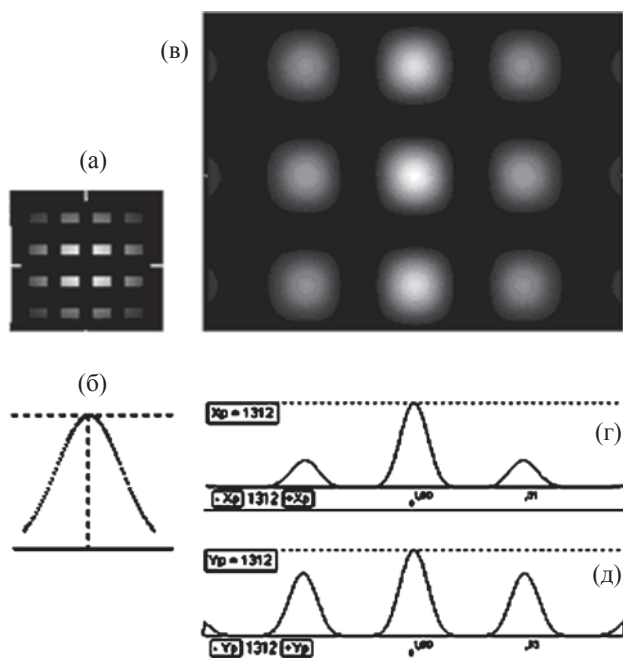


Рис. 2. Расчет дифракции от квадратного участка модели полотна при нормальном распределении интенсивности освещения относительно его центра.

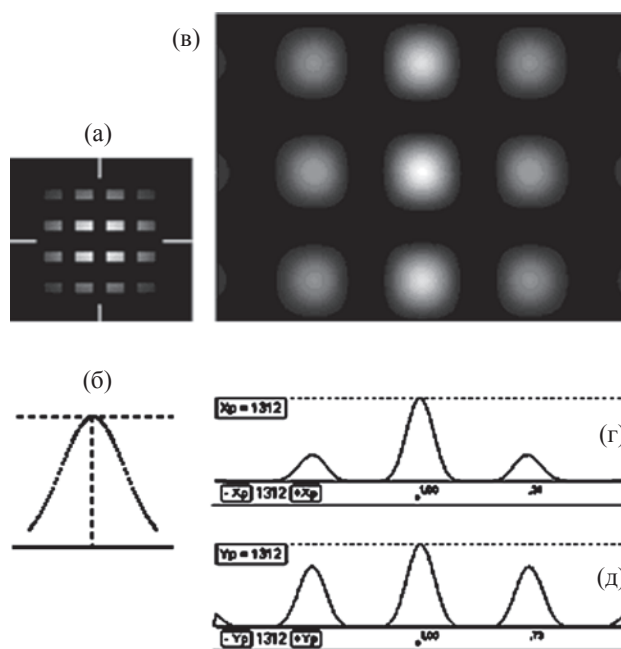


Рис. 3. Расчет дифракции от круглого участка модели полотна при нормальном распределении интенсивности освещения относительно его центра.

Этот вывод объясняет реальные дифракционные картины Фраунгофера, наблюдаемые при освещении образцов полотна [1, 2, 5], нитей и резбовых винтов [6] светом He-Ne-лазера, в которых дополнительные максимумы никогда не фиксировались. Эти максимумы в формуле (2) определяются двумя последними отношениями и, очевидно, связаны с ограничением светового пучка. Такое ограничение при освещении реального объекта гауссовым пучком света лазера отсутствует, что и объясняет отсутствие дополнительных максимумов в соответствующих дифракционных картинах.

3. Сравнение данных, приведенных на рис. 2 и рис. 3, показывает, что они практически не отличаются, что также естественно, если в области рассчитываемого светового пятна, где его геометрия в этих случаях отлична, его интенсивность достаточно мала, а следовательно, мал интерференционный вклад этих областей.

4. Сравнение данных рис. 2г, 2д, 3г, 3д и рис. 1г, 1д, показывает, что отношения интенсивностей максимумов I_{10}/I_{00} и I_{01}/I_{00} на рис. 2, 3 практически совпадают с аналогичными отношениями для основных максимумов на рис. 1.

5. Уменьшение величины σ^2 в (6) приводит к уширению максимумов, что, очевидно, связано с уменьшающимся вкладом в интерференцию периодов освещенной структуры, находящихся на периферии светового пятна. В этом случае увеличе-

ние числа освещенных периодов в объекте должно приводить к сужению дифракционных максимумов, что всегда наблюдалось для любых моделей переплетения.

6. Ошибка расчета основных параметров структуры моделей полотна для случая гауссова светового пучка по формулам (4), (5), включая ошибку программы при расчете интеграла (1), при выполнении оговоренных выше условий не превышала 2%.

Основной вывод

Отмеченные выше закономерности доказывают возможность практического использования формул (3)–(5) для расчетов параметров реальных полотняных переплетений в дифракционных экспериментах с лазерными пучками.

Работа проводилась при поддержке гранта Санкт-Петербурга в сфере научной и научно-технической деятельности (2006).

ЛИТЕРАТУРА

1. Шляхтенко П.Г., Мещерякова Г.П., Успасских С.М., Куриленко О.Ю. Исследование связи между коэффициентом поверхностного заполнения тканого полотна и параметрами фраунгоферовой дифракционной картины от He-Ne-лазера // Изв. вузов. ТТП. 1998. № 4. С. 45–49.

2. *Шляхтенко П.Г.* Дифракционный метод контроля изгиба нитей в текстильных полотнах // Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 12. С. 21–26.
 3. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1973. С. 345–380.
 4. *Бутиков Е.И.* Оптика. СПб.: Невский диалект, 2003. С. 283.
 5. *Шляхтенко П.Г., Мариева Н.Г.* Оптическое исследование строения композитного тканого материала // Изв. вузов. ТТП. 2001. № 3 (261). С. 3–7.
 6. *Шляхтенко П.Г.* Дифракционный метод контроля геометрических параметров спиральной нити // Опт. и спектр. 2000. Т. 88. № 1. С. 116–121.
-