

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОЛОТНЯНЫХ ПЕРЕПЛЕТЕНИЙ НА КОМПЬЮТЕРЕ

П.Г.ШЛЯХТЕНКО, В.П.НЕФЕДОВ

(Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна,
Научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации)

В [1], [2] проведен расчет интенсивности $I(x, y)$ в дифракционной френель-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 ноль координат находится в центре дифракционной картины, а интег-

рирование проводилось по всей площади отверстий S в освещенной области объекта.

Получена формула, которая в случае аппроксимации простого полотняного переплетения системой отверстий в непрозрачной основе, имеет вид

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

где I_0 – интенсивность света, создаваемая в центре картины одним периодическим звеном (прямоугольным отверстием площадью AB); N_1 – число освещенных раппортов (периодов) ткани вдоль основных нитей (направление x); N_2 – то же вдоль уточных (направление y); T_1 – период повторения уточных нитей; T_2 – период повторения основных нитей.

Анализ формулы (2), сделанный в [1], показывает, 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 формулы:

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

где Δx – расстояние между соседними основными дифракционными максимумами вдоль оси x ; Δy – то же вдоль оси y , а также формулы (5), связывающие интенсивности в центральном (I_{00}) и соседних с ним основных максимумов (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, диаметр 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. В приближении справедливости интеграла Френеля-Кирхгофа в случае, когда интенсивность $E(\xi, \eta) \neq \text{const}$, исследование влияния распределения интенсивности света в лазерном пучке, описываемого функцией Гаусса [4], на параметры дифракционной картины.

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

К сожалению, прямой учет реального распределения света в пучке при решении интеграла (1) не дает в нашем случае аналитического ответа. Поэтому для решения поставленной задачи была составлена компьютерная программа по возможности максимально 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 использованы черно-белые компьютерные модели полотняного переплетения, кото-

рые строились по специальной программе по задаваемым параметрам переплетения (T_1 , T_2 , A , B), вводимым в память компьютера.

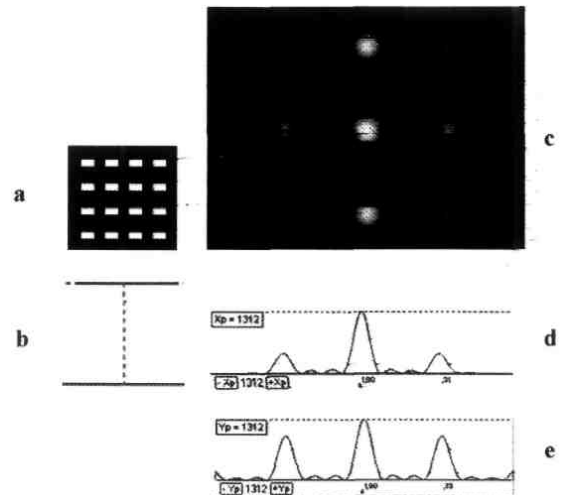


Рис. 1

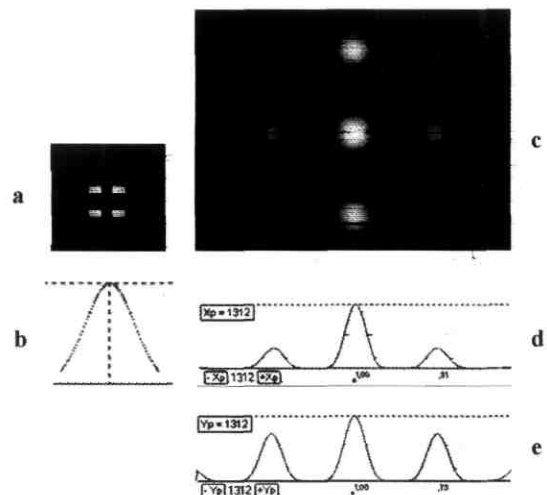


Рис. 2

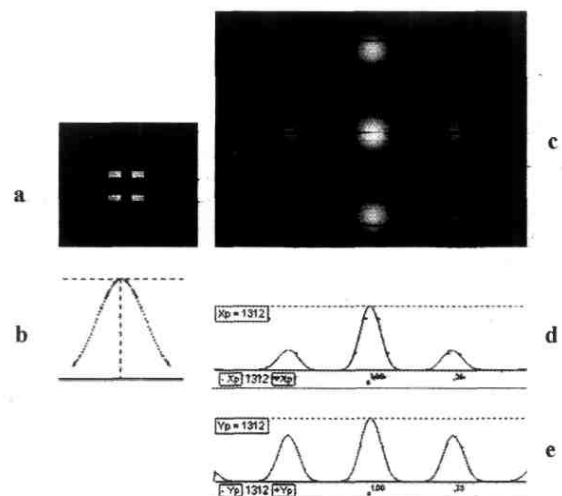


Рис. 3

На рис. 1...3 (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) представлены результаты расчетов по этой программе для одной и той же модели тканого переплетения с параметрами $T_1=T_2=T$; $A/T=0,5625$; $B/T=0,3125$, причем данные рис. 1 относятся к освещению объекта квадратным в сечении монохроматическим пучком света одинаковой интенсивности ($E=const$); 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 ($\sigma = const$).

На всех рисунках а – световое пятно на выходе объекта исследования; б – график зависимости интенсивности света, падающего на объект; с – вид картины на удаленном экране, определяемой для каждого случая расчетной формулой (1); д – график нормированной на центральный максимум зависимости $I(x,0)$; е – график нормированной на центральный максимум зависимости $I(0,y)$. Во всех представленных случаях величина $L = const$.

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 величина рассчитываемого светового пятна перекрывает более четырех периодов исследуемой структуры (T_1, T_2), картина на рис. 1-с и ход зависимостей на рис. 1-д,е 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. 2, 3-с и зависимостях, представленных на рис. 2, 3-д, е при тех же размерах светового пятна, практически отсутствуют дополнительные максимумы, лежащие между основными максимумами, хорошо заметные на рис. 1-с, если радиус рассчитываемого светового пятна на модели R больше величины σ .

Этот вывод объясняет реальные дифракционные картины Фраунгофера, наблюдаемые при освещении образцов полотна [1], [2], [5], нитей и резьбовых 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, 3-с, д, е, показывает, что они практически не различаются, 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. 2,3-д, е и рис. 1-д, е 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 увеличение числа освещенных периодов в объекте должно приводить к сужению дифракционных максимумов, что всегда на-

блюдалось 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) и выполнении оговоренных выше условий, не превышала 2%.

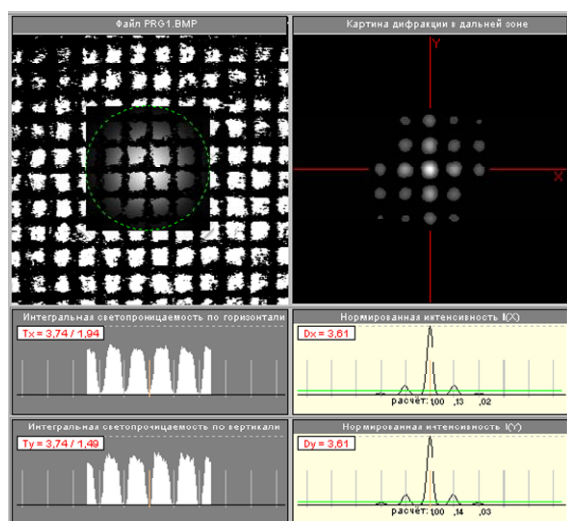


Рис. 4

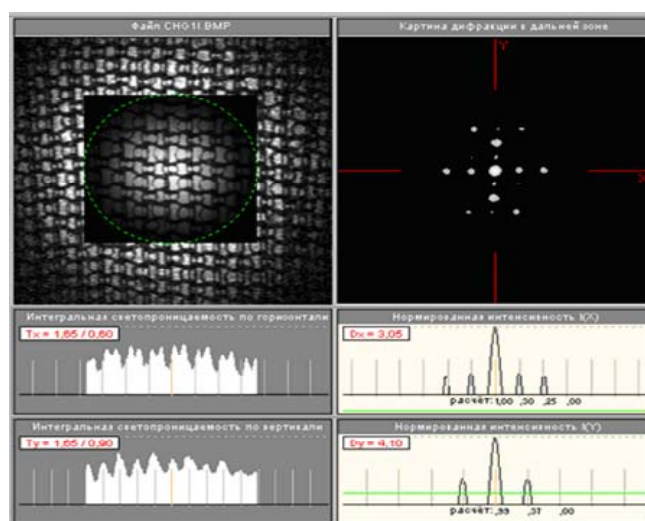


Рис. 5

На рис. 4...5 показана рабочая панель программы после анализа микроизображений реального полотна (рис. 4) и чулочного трикотажа (рис. 5), полученных с компьютерного микроскопа методом «напросвет», при учете нормального распределения интенсивности света в световом пучке. Расчет проводится внутри круга, ограниченного пунктирной линией.

Из данных этих рисунков можно сделать вывод о том, что максимумы в рассчитываемых дифракционных картинах после включения усиления яркости становятся хорошо наблюдаемыми и полностью соответствует экспериментальным дифракционным картинкам, приведенным для исследованных образцов в [1], [7].

В описываемой программе расчет значений периодов и плотности переплетения по утку и основе для полотна (периода петель или плотности петель в петельном ряду и расстояния между петельными рядами или плотности петлевых рядов для трикотажного полотна) рассчитываются после появления в соответствующих окнах функциональных зависимостей $I(x,0)$, $I(0,y)$. При этом требуется после необходимого их усиления совместить с помощью компьютерной "мыши" вертикальные

риски с положениями дифракционных максимумов на этих зависимостях. После этого расчет всех геометрических параметров структуры исследуемого переплетения осуществляется автоматически. На рис. 4 и 5 их значения приведены в относительных единицах.

Однако программа предусматривает введение нормирующего коэффициента, учитывающего коэффициент увеличения микроизображения исследуемого материала, как и вывод рассчитанных значений в отчете о измерениях.

Из данных рис. 4 и 5 также видно, что измерять параметры рассчитанной дифракционной картины несоизмеримо легче, чем по самим изображениям. Особенно, если это достаточно сложное переплетение (рис. 5). Рассчитанная дифракционная картина в этом случае намного проще, а расстояния между соседними горизонтальными и вертикальными рядами максимумов измеряются точно. Именно эти расстояния несут информацию о средних значениях параметров геометрической структуры исследуемого переплетения, которые рассчитываются программой по формулам (4) и (5).

ВЫВОДЫ

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

Составлена программа, позволяющая строить простую дифракционную картину по введенному в нее микроизображению исследуемого переплетения с учетом нормального распределения интенсивности освещения и автоматически рассчитывать по параметрам этой картины значения основных параметров переплетения.

Использование программы значительно облегчит процесс измерения основных геометрических структурных параметров текстильных материалов, проводимых с помощью стандартного компьютерного микроскопа.

1. Шляхтенко П.Г., Мещерякова Г.П., Успенских С.М., Куриленко О.Ю. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1998, № 4. С.45...49.

2. Шляхтенко П.Г. Дифракционный метод контроля изгиба нитей в текстильных полотнах // Оптический журнал. – 2000, №12, т. 67. С.21...26.

3. Борн М, Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973. С.345...380.

4. Бутиков Е.И. Оптика. – С-Петербург: Невский диалект, 2003. С. 283.

5. Шляхтенко П.Г., Мариева Н.Г. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2001, № 3. С.3...7.

6. Шляхтенко П.Г. Дифракционный метод контроля геометрических параметров спиральной нити // Оптика и спектроскопия. – 2000, № 1, т. 88. С.116...121.

7. Шляхтенко П.Г. Особенности дифракционного контроля геометрических параметров чулочного трикотажа // Оптический журнал. – 2004, №11, т.71. С.89...93.

Рекомендована кафедрой физики СПГУТД. Поступила 25.12.06.