

А. Н. ИВАНОВ

**КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА  
ПО ПОЛОЖЕНИЮ ТОЧЕК ПЕРЕГИБА  
ДИФРАКЦИОННОЙ КАРТИНЫ ФРАУНГОФЕРА**

Предложен метод оценки размера контролируемого объекта по положению точек перегиба главного максимума дифракционной картины. Показано, что метод обладает высокой чувствительностью к изменению размера объекта и позволяет проводить измерения с погрешностью до 0,1 мкм.

*Ключевые слова:* дифракция, точки перегиба, измерение геометрических параметров.

**Введение.** Для точного контроля изделий малого размера иногда применяется дифракционный метод измерений. В реализующих метод приборах для освещения контролируемого объекта используется когерентное излучение лазера, в результате чего в дальней области формируется дифракционная картина Фраунгофера. Преимуществом таких приборов являются относительная простота конструкции, невысокие требования к оптике, увеличение чувствительности с уменьшением размера объекта.

Определение размера объекта по дифракционной картине Фраунгофера заключается в том, что по функции распределения интенсивности  $I(x)$  вычисляются координаты ее минимумов. Затем определяется коэффициент, связывающий эти координаты с размером объекта. Анализ дифракционных методов измерений показал, что их доминирующей погрешностью является ошибка определения координат точек минимумов — чувствительность сигнала  $dI(x)/dx$  в их окрестности близка к нулю, что приводит к значительной погрешности определения положения минимума [1—3].

На основе методики, предложенной в работе [4], автором настоящей статьи было получено выражение, связывающее разность интенсивностей на соседних пикселах ПЗС-приемника в окрестности минимума дифракционной картины с параметрами измерительной схемы:

$$\Delta I \approx \frac{2d^2 a^2 I_0}{N^2 \lambda^2 (f')^2}, \quad (1)$$

где  $N$  — порядок минимума,  $d$  — размер пиксела,  $a$  — размер объекта,  $f'$  — фокусное расстояние объектива; анализ этого выражения показал, что в большинстве случаев нельзя однозначно определить пиксел, соответствующий минимуму: ошибка составляет  $\pm 2$ —3 пкс.

**Анализ дифракционной картины.** Определим координаты точек дифракционной картины на объекте в форме щели, в которых чувствительность приемника достигает максимального значения. Распределение интенсивности описывается выражением

$$I(U) = \sin^2 U / U^2, \quad (2)$$

где  $U = k a x / 2 f'$ ,  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число.

Определим координаты точки, в которой модуль первой производной функции (2) принимает максимальное значение:  $|dI(U)/dU| = \max$ . Отсюда следует, что максимальная чувствительность  $I'(U) = 0,54$  наблюдается в точках с координатами  $U_2 = 1,303$  и  $U_1 = -1,303$ . Эти точки соответствуют точкам перегиба главного максимума дифракционной картины:

см. рис. 1, здесь кривая 1 соответствует исходному распределению интенсивности, кривые 2 и 3 — первой и второй производным.

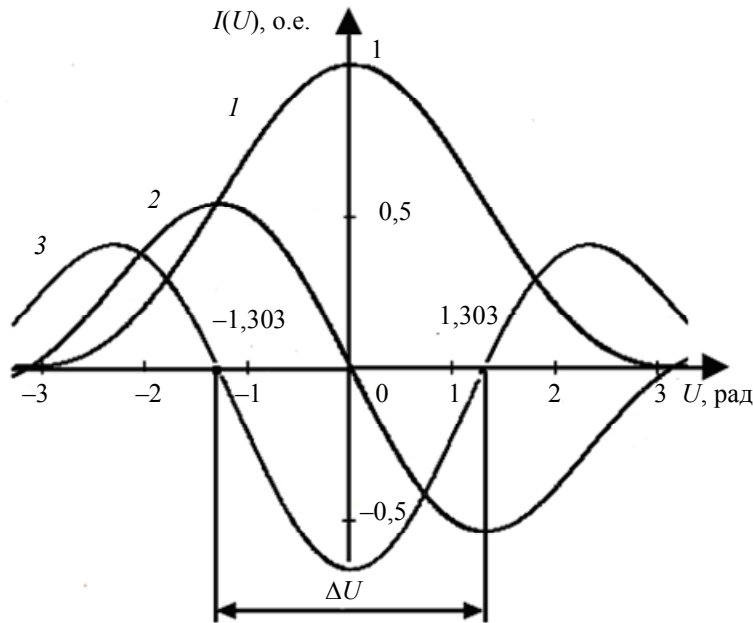


Рис. 1

Разность интенсивностей на соседних пикселах ПЗС-приемника в их окрестности описывается выражением

$$\Delta I \approx \frac{2,2 d a I_0}{\lambda f'} \quad (3)$$

Сравнение выражений (1) и (3) показывает, что при наличии точек перегиба разность интенсивностей на соседних пикселах возрастает на два порядка: это гарантирует обнаружение точки перегиба с погрешностью  $\pm 1$  пкс.

В ходе исследований была определена зависимость (при  $f' = 25$  мм и  $\lambda = 0,63$  мкм) чувствительности положения точек перегиба от размера объекта (рис. 2, кривая 1): как и для точки минимума 1-го порядка (кривая 2), она возрастает с уменьшением размера объекта.

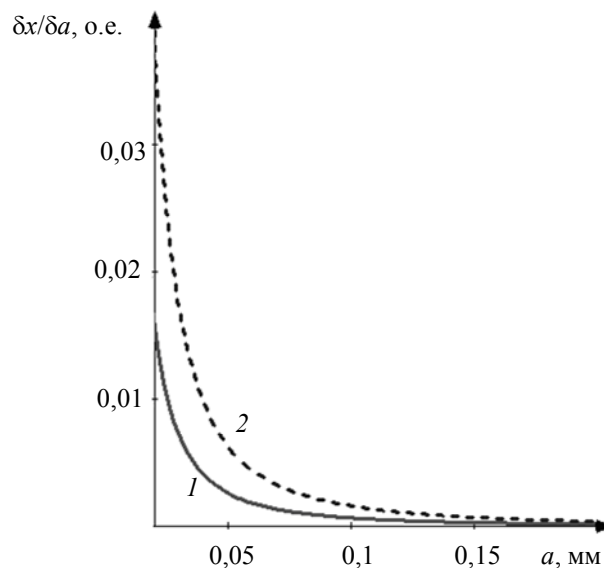


Рис. 2

Если измерить разность линейных координат точек перегиба  $\Delta x = x_2 - x_1$ , то она будет связана с априори известной, согласно выражению (2), разностью угловых координат этих

точек  $\Delta U = U_2 - U_1 = 2,606$  простой зависимостью  $\Delta U = k a \Delta x / 2 f'$ . Отсюда можно определить размер объекта:

$$a = 2 \Delta U f' / k \Delta x = 5,212 f' / k \Delta x. \quad (4)$$

**Экспериментальное исследование.** Для проверки предложенного алгоритма была собрана экспериментальная установка (рис. 3), состоящая из лазера 1 (ЛГН-5), спектральной щели 2 с шагом раскрытия 1 мкм, объектива 3 с фокусным расстоянием  $f' = 25$  мм и ПЗС-камеры 4 (792×576 пкс).

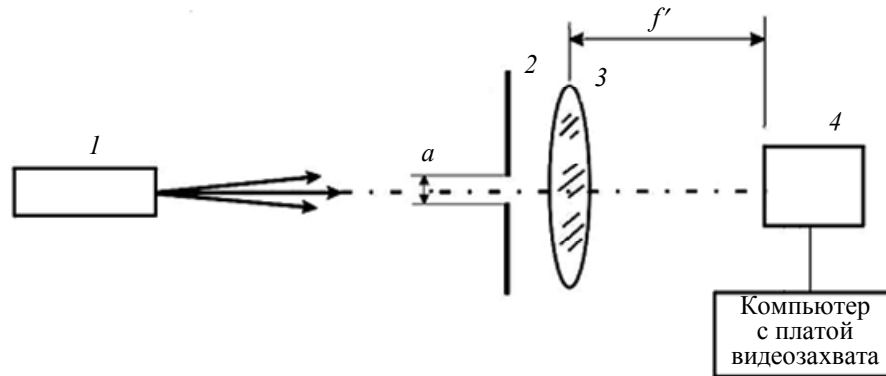


Рис. 3

В ходе эксперимента осуществлялась регистрация дифракционных картин на щели, ширина которой изменялась в диапазоне от 40 до 70 мкм с шагом 2 мкм. Главный максимум дифракционной картины подвергался предварительной обработке в целях подавления шумов. В качестве фильтра использовался фильтр Гаусса, ширина которого на высоте 0,606 от максимального значения соответствовала 0,25 ширины главного максимума на той же высоте [5].

Затем главный максимум численно дифференцировался [6] с помощью интерполяционной формулы Ньютона:

$$I'_i \approx [(I_{i+1} - I_i) - (I_{i+1} - I_i)^2 / 2 + (I_{i+1} - I_i)^3 / 3] / h,$$

где  $i$  — номер элемента ПЗС-приемника,  $I_i$  — интенсивность сигнала на  $i$ -м элементе,  $h$  — дискретность ПЗС-приемника ( $h = 1$  пкс).

На рис. 4 показаны экспериментально полученные сечение главного максимума (кривая 1) и его первая производная (кривая 2) для щели шириной 70 мкм. Координаты экстремумов полученной функции соответствуют координатам точек перегиба.

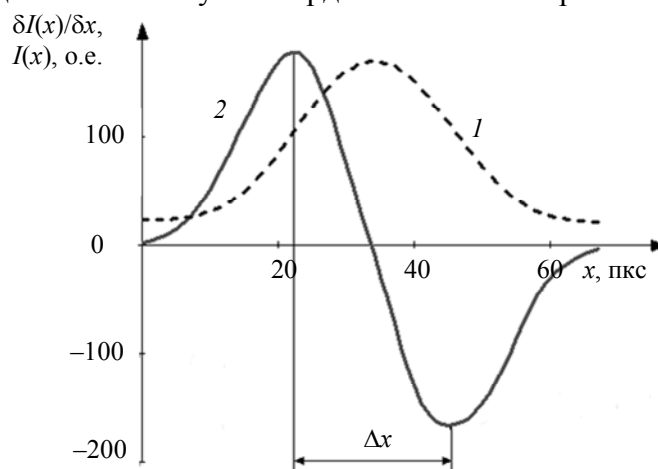


Рис. 4

Для определения положения экстремумов производной с субпиксельной точностью была осуществлена аппроксимация первой производной в окрестности ее экстремумов методом наименьших квадратов, что позволило определить ее положение с погрешностью

$\pm 1/5$  пкс [7]: см. рис. 5, здесь 1 — исходная дискретная функция, 2 — полученная аппроксимированная функция. В качестве аппроксимирующей функции была взята производная от функции, описывающей распределение интенсивности в дифракционной картине. Далее определялась разность  $\Delta x$  и по выражению (4) вычислялась ширина щели.

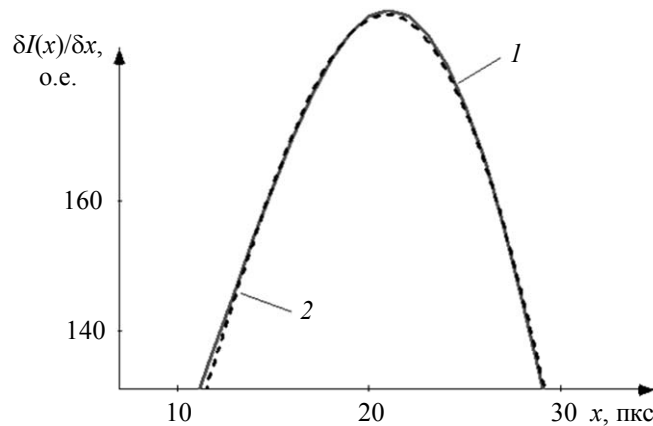


Рис. 5

Ниже приведены результаты измерения ширины щели; погрешность измерения составила 0,3—1 %.

Ширина щели, мкм	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70
Погрешность измерения, мкм	0,3	0,3	0,4	0,1	0,3	0,2	0,2	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

**Заключение.** Предложен метод измерения геометрических параметров объекта по положению точек перегиба дифракционных картин, которые обладают высокой чувствительностью при их регистрации фотоприемником. Несложные преобразования дифракционной картины позволяют надежно и с хорошей точностью определить координаты точек перегиба.

Выявлена зависимость между координатами точек перегиба и размером контролируемого объекта и проведены экспериментальные исследования, подтвердившие правильность теоретических расчетов. Показана целесообразность использования метода для контроля объектов малого размера, когда на площадке ПЗС-приемника размещается только главный максимум дифракционной картины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаров В. Н., Линьков А. Е. Дифракционные методы контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов // Оптич. журн. 2002. Т. 69, № 2. С. 76—81.
2. Власов Н. Г., Кулиш С. М. Нелинейная цифровая обработка дифракционных картин // Мир техники кино. 2008. № 8. С. 41—42.
3. Госьков П. И., Грозов В. И., Пронин С. П., Якунин А. Г. Особенности обработки дифракционных картин ПЗС-фотоприемником // Автометрия. 1987. № 3. С. 114—116.
4. Сачков Д. Ю. Влияние дискретной структуры фотоприемника на погрешность интерференционного измерения // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2008. Вып. 49. С. 67—73.
5. Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Земцев А. Ю., Степанов С. А. Разработка методов и программных средств подавления шумов в интерферограммах на этапе их предварительной обработки // Компьютерная оптика. 2005. Т. 28. С. 140—144.
6. Исаков В. Н. Элементы численных методов. М.: АCADEMIA, 2003.

7. Пальчик О. В., Андреев В. Г. Обработка данных триангуляционного измерителя // Цифровая обработка сигналов и ее применения: Материалы докл. VI Междунар. конф. М., 2004. Т. 2. С. 197—200.

***Сведения об авторе***

***Александр Николаевич Иванов***

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов;  
E-mail: i\_off@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
компьютеризации и проектирования  
оптических приборов

Поступила в редакцию  
26.04.11 г.