
КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

УДК 531.7.082.5:535.42/44

В. Н. НАЗАРОВ, Ю. А. СОКОЛОВ

ДИФРАКЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ УГЛОВЫХ И ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Рассмотрена схема дифракционного контроля угловых и линейных перемещений, использующая амплитудно-фазовые распределения частотных спектров контролируемых объектов. Получено математическое выражение, описывающее распределение интенсивности света в плоскости регистрации. Результаты расчетов подтверждают предположение о высокой чувствительности схемы к угловым и линейным перемещениям. Приведено экспериментальное подтверждение работы модели.

Ключевые слова: дифракция, интерференция, измерения.

Дифракционные методы контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов наиболее часто используют в измерительной технике, когда требуются высокая точность, бесконтактность и автоматизация измерительного процесса [1, 2]. В реализующих дифракционный метод измерений приборах контролируемый объект освещают когерентным излучением лазера и получают в дальней области дифракционную картину (ДК) Фраунгофера. По интенсивности в ее характерных точках или расстоянию между ними судят о размерах, пространственном положении или физических свойствах объектов.

Для расширения функциональных возможностей методов и повышения точности измерений используются схемы с последовательной [3, 4] и параллельной дифракцией [5, 6], а также метод регистрации точек перегиба интенсивности [7].

В работе [6] для контроля малых угловых величин была предложена схема на основе двух щелевых апертур, расположенных с двух сторон от тонкой линзы. Получено математическое выражение, описывающее распределение интенсивности в фокальной плоскости линзы. Теоретическая чувствительность данной схемы к изменению угла падения излучения составила порядка 0,01". В настоящей работе исследуется упрощенный вариант такой схемы, представленный на рис. 1 (1, 2 — щелевые апертуры, 3 — линза, 4 — приемник излучения).

Здесь перед линзой расположены две щелевые апертуры, на которые падает излучение от лазерного источника. Известно, что при расположении щели перед линзой ее амплитудно-фазовое распределение (фурье-спектр) локализовано на сфере, пересекающейся с оптической осью в точке заднего фокуса линзы [8]. При продольном перемещении щели от линзы к ее переднему фокусу радиус такой сферы увеличивается, и если щель расположена в точке переднего фокуса, плоскость локализации ее фурье-спектра совпадает с задней фокальной плоскостью линзы. При поперечном смещении щели происходит разворот поверхности, на которой локализован ее фурье-образ, вокруг точки заднего фокуса линзы. При изменении угла па-

дения излучения на щель происходит смещение фурье-спектра щели по поверхности его локализации. В общем случае, когда поверхность, на которой формируется амплитудно-фазовое распределение фурье-спектра объекта, не совпадает с фокальной плоскостью линзы, между ними образуется переменный фазовый сдвиг, зависящий от расположения щели относительно линзы. При наличии перед линзой второй щели ее фурье-образ будет выступать в качестве опорного и интерферировать с амплитудно-фазовым распределением от первой щели. Это позволяет использовать результат интерференции для измерений перемещения щели или угла падения излучения на систему.

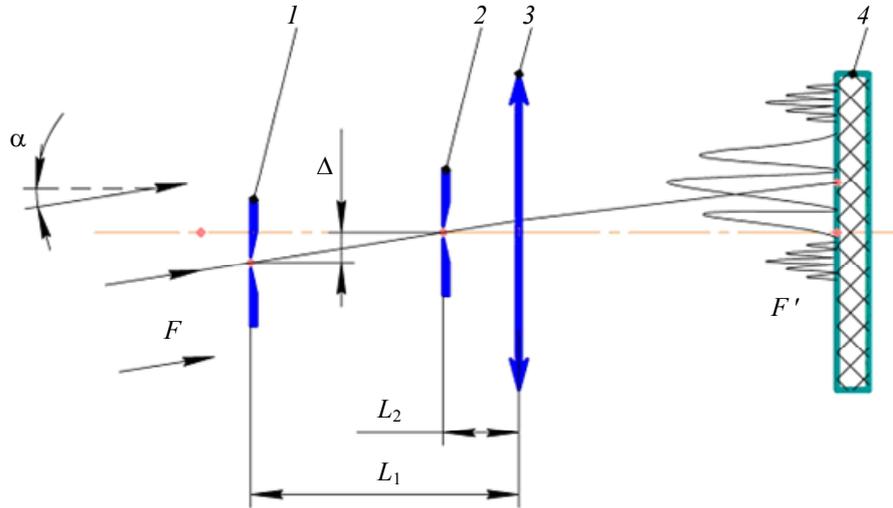


Рис. 1

Для исследуемой схемы было получено математическое выражение, описывающее распределение интенсивности в фокальной плоскости линзы:

$$I(x) = \left(\frac{1}{\pi f}\right)^2 \left\{ \left[\text{sinc} \left[\frac{\pi a_1}{\lambda} \left(\frac{x}{f} - \sin \alpha \right) \right] \right]^2 + \left[\text{sinc} \left[\frac{\pi a_2}{\lambda} \left(\frac{x}{f} - \sin \alpha \right) \right] \right]^2 + 2 \text{sinc} \left[\frac{\pi a_1}{\lambda} \left(\frac{x}{f} - \sin \alpha \right) \right] \text{sinc} \left[\frac{\pi a_2}{\lambda} \left(\frac{x}{f} - \sin \alpha \right) \right] \times \cos \left\{ \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{x^2}{f^2} (L_2 - L_1) + \left(\frac{x}{f} - \sin \alpha \right) [2\Delta + (L_2 - L_1) \text{tg} \alpha] \right] \right\} \right\},$$

где $\text{sinc} x = \sin x / x$; a_1, a_2 — размер щелей; f — фокусное расстояние линзы; α — угол падения излучения; Δ — поперечное расстояние между щелями; L_1, L_2 — расстояние от щелей до линзы.

Анализ результатов, полученных с помощью данной модели, подтвердил предположение о высокой чувствительности схемы к угловым α и линейным L перемещениям. Так, например, при следующих параметрах модели $L_1=80$ мм, $L_2=0$, $\Delta=40$ мм, $\alpha=30^\circ$, $a_1=a_2=100$ мкм, $f' = 90$ мм в случае изменения угла падения излучения $\Delta\alpha$ на $1,5''$ в центральной части главного максимума дифракционной картины происходит полный перепад интенсивности. При разрешающей способности приемника в 1 % максимальная чувствительность такой схемы достигает $\Delta\alpha=0,015''$. При дальнейшем изменении угла падения излучения наблюдаются периодические колебания интенсивности в области главного максимума дифракционной картины. По достижении максимальных и минимальных значений интенсивности указанная чувствительность снижается.

Установлено также, что при данных параметрах схемы и указанном выше способе регистрации теоретическая чувствительность к продольным перемещениям составляет 20 нм.

Для экспериментальной проверки данной модели была собрана установка, схема которой приведена на рис. 2 (1 — автоколлиматор АК-1У; 2 — зеркало; 3 — поворотный столик с микрометрической подвижкой; 4, 5 — щелевые апертуры; 6 — одиночная линза; 7 — ПЗС-матрица). Для исключения взаимного экранирования щели были разнесены в вертикальной плоскости на полуширину пучка лазерного источника, ближняя к источнику излучения щель помещена над осью вращения столика 3. С помощью автоколлиматора 1 контролировался задаваемый угол падения излучения α .

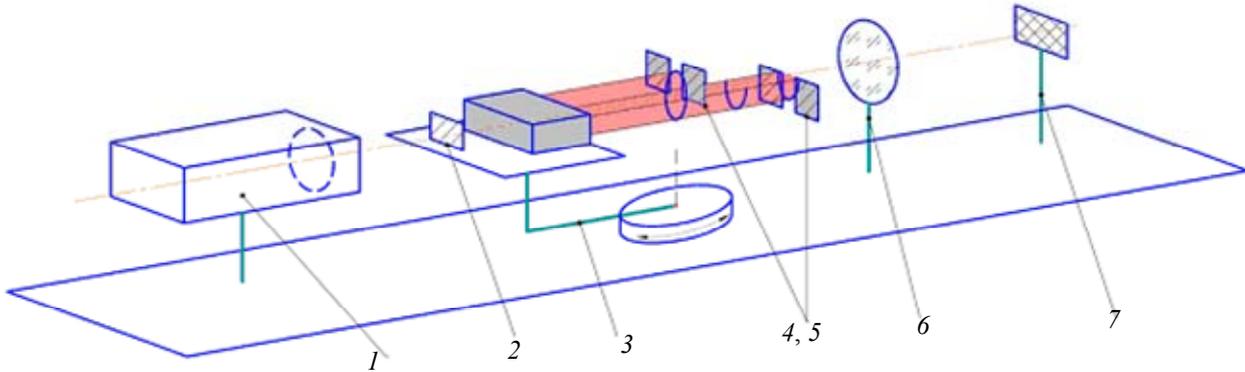


Рис. 2

В опыте была получена серия фотографий дифракционных картин в фокальной плоскости линзы 6 при увеличении угла α падения излучения от 0 до 13' с шагом в 30". Наблюдалось периодическое вертикальное перемещение полос в главных максимумах дифракционных картин. На рис. 3 представлены полученные фотографии с шагом в 1', инвертированные по интенсивности (темные области соответствуют большей интенсивности).

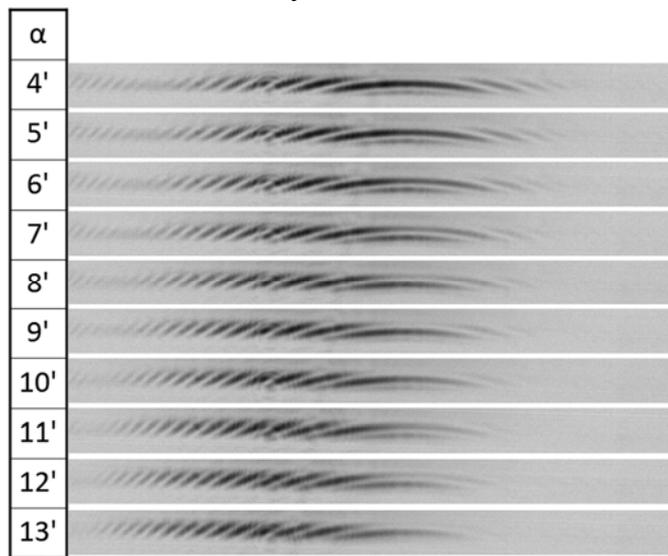


Рис. 3

На рис. 4, а, представлены графики интенсивности, полученные в среде MathCad из экспериментальных фотографий на одном и том же уровне по высоте дифракционной картины. Для нейтрализации шума центральные области главного максимума были аппроксимированы полиномами 12-й степени по методу наименьших квадратов (рис. 4, д, е). На рис. 4, б, г представлены графики интенсивности, полученные по теоретической модели на основе измеренных параметров установки: $a_1=86$, $a_2=54$ мкм, $L_1=286,5$, $L_2=121$ мм, $\Delta=0$, $f=320$ мм, $\alpha=0$, $\lambda=650$ нм.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает корректную работу модели. Следует отметить, что полученные дифракционные картины имеют протяженность по высоте (рис. 3), поэтому возможен одновременный анализ нескольких горизонтальных „сре-

зов“ дифракционной картины. Это позволяет сохранить чувствительность измерений при достижении максимального или минимального значения интенсивности в анализируемом срезе дифракционной картины. На основе полученных данных можно также сделать вывод, что для сохранения чувствительности схемы размеры щелей можно уменьшить так, чтобы на краях ПЗС-приемника был расположен участок главного максимума с интенсивностью, близкой к интенсивности в его центральной области.

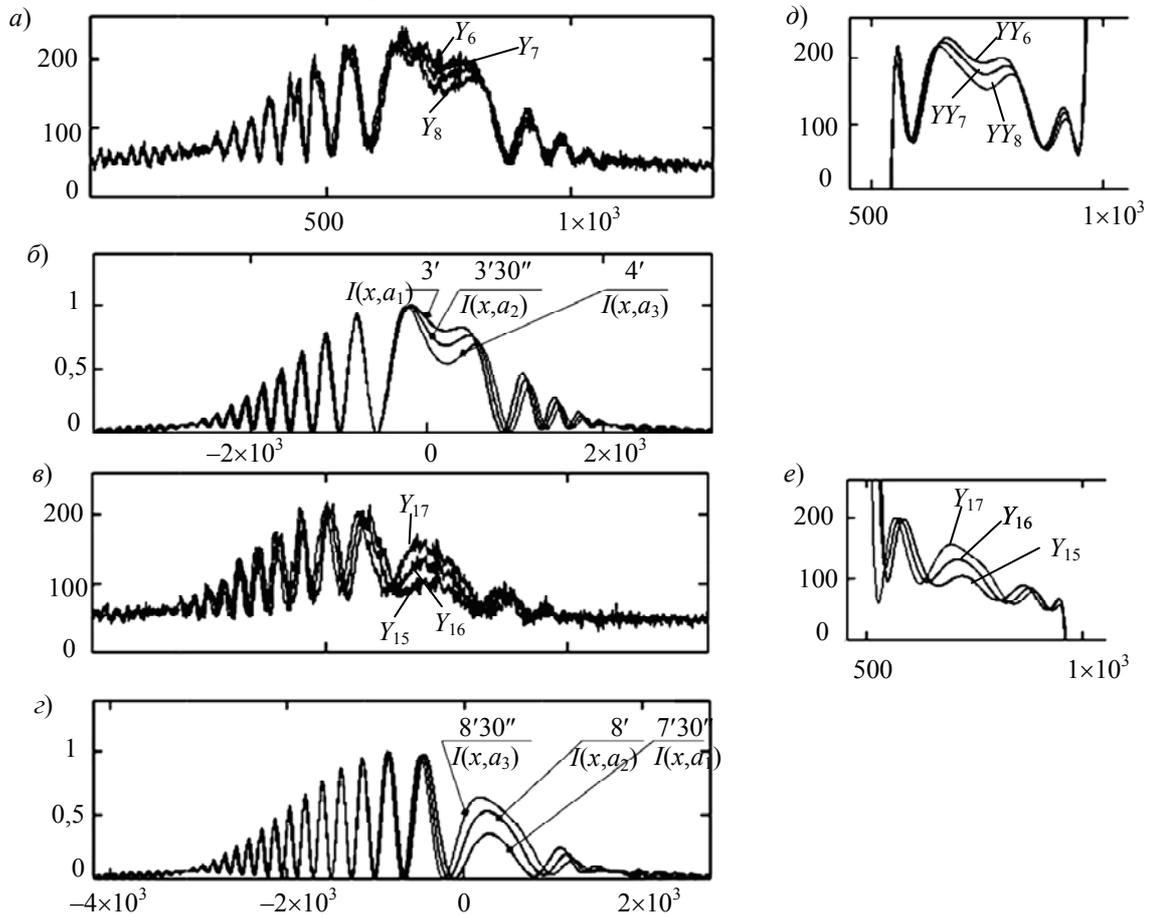


Рис. 4

В работе предложена схема дифракционного контроля угловых и линейных величин, использующая амплитудно-фазовую информацию фурье-спектров двух вторичных источников излучения, расположенных перед линзой. Получено математическое выражение, описывающее распределение интенсивности света в фокальной плоскости линзы. Представленные результаты расчетов подтверждают предположение о высокой чувствительности данной схемы. Представлены результаты экспериментального исследования, количественно подтверждающие правильность исследуемой модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крылов К. И., Прокопенко В. Т., Митрофанов А. С. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. Л.: Машиностроение, 1978.
2. Иваницкий Г. Р., Куниский А. С. Исследование микроструктуры объектов методами когерентной оптики. М.: Энергия, 1981.
3. Назаров В. Н., Линьков А. Е. Дифракционные методы контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов // Оптич. журн. 2002. Т. 69, № 2. С. 76—81.
4. Комоцкий В. А., Корольков В. И., Соколов Ю.М. Исследование датчика малых линейных перемещений на основе двух фазовых дифракционных решеток // Автометрия. 2006. Т. 42, № 6. С. 105—112.

5. Назаров В. Н., Иванов А. Н. Использование явления муара для увеличения точности дифракционных методов контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов // Оптич. журн. 2009. Т. 76, № 1. С. 46—50.
6. Назаров В. Н., Соколов Ю. А. Дифракционный метод контроля пространственного положения объектов с изменяющимся масштабом спектра Фурье // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 11. С. 53—56.
7. Иванов А. Н. Контроль геометрических параметров объекта по положению точек перегиба дифракционной картины Фраунгофера // Там же. С. 49—53.
8. Гудмен. Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970.
9. Коронкевич В. П., Кривенков Б. Е., Михляев С. В., Чугуй Ю. В. Оптико-геометрический метод расчета дифракции Фраунгофера на объемных телах // Автометрия. 1980. № 2. С. 25—35.

Сведения об авторах

- Виктор Николаевич Назаров** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: naz_1946@mail.ru
- Юрий Александрович Соколов** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; лаборант; E-mail: sokolov-juri@yandex.ru

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.