

А. Б. ВЕСЕЛОВСКИЙ, А. С. МИТРОФАНОВ, Г. Д. ФЕФИЛОВ

**ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
РАЗМЕРА МИКРООБЪЕКТА КРУГЛОЙ ФОРМЫ  
ДИФРАКЦИОННЫМ МЕТОДОМ  
ПРИ НЕРАВНОМЕРНОЙ АМПЛИТУДЕ ОБЛУЧАЮЩЕГО СВЕТОВОГО ПОЛЯ**

Рассматривается влияние симметричной и несимметричной неравномерности распределения амплитуды облучающего поля на относительное изменение интервалов между минимумами интенсивности в дифракционной картине Фраунгофера при дифракции гауссова пучка на отверстии круглой формы.

*Ключевые слова:* погрешность измерения, лазерная дифрактометрия микрообъектов, параметры лазерного излучения.

Оптические методы измерений получили широкое распространение при определении линейных размеров изделий. Основными преимуществами оптических методов являются неконтактность, высокая точность измерения и высокое пространственное разрешение. С помощью оптических методов измерений удастся также решить широкий круг задач, связанных с исследованиями в биологии и медицине [1—3]. Однако при уменьшении размеров контролируемых объектов проявляется характерный недостаток многих оптических измерительных приборов, возникающий из-за влияния дифракции. При этом погрешность измерения объектов

с линейными размерами менее 100 мкм, в зависимости от метода измерения и типа прибора, может достигать 20—100 %. В то же время технологический допуск на многие промышленные изделия, имеющие микронные размеры, составляет единицы процентов (что соответствует допустимой абсолютной погрешности измерения размера, составляющей 1—0,1 мкм). Например, допуск на вольфрамовую проволоку диаметром 10 мкм составляет  $\pm 1,5$  %.

Для измерения изделий с микронными размерами наиболее перспективным является дифракционный метод. В его основу положена обратно пропорциональная зависимость между размером контролируемого объекта и угловым или линейным размером дифракционного максимума. Так, лазерные дифрактометры обладают высокой чувствительностью к изменению размера контролируемого объекта, малой пространственной и временной локальностью измерений, обеспечивают высокую точность измерения. Дифрактометрия применяется для измерения объектов, размер которых составляет  $\sim 10\lambda$  и более ( $\lambda$  — длина волны излучения), что при использовании видимого излучения соответствует диапазону измерения от единиц до сотен микрометров. Наибольшее распространение дифрактометрия получила при измерении размеров изделий массового производства, имеющих круглые микроотверстия (таких как алмазные волокна, микросопла, часовые камни, диафрагмы и др.), а также при измерении размеров щелей, микропроволоки, нитей и волокон из различных материалов, элементов микросхем, биологических клеток и микрочастиц, находящихся в состоянии взвесей.

Основным источником излучения, применяемым в дифрактометрии, является He—Ne-лазер. Хотя для целого ряда применений могут быть использованы и другие типы лазеров, например полупроводниковые или твердотельные с полупроводниковой накачкой. Лазерное излучение, в отличие от излучения других типов источников, обладает выраженной, вполне определенной структурой поля излучения, характеризуемой распределением амплитуды поля в поперечном сечении пучка, расходимостью излучения, пространственной и временной функцией когерентности. Временная когерентность лазерных источников излучения даже без использования специальных технических приемов, как правило, высока и в реально достижимом диапазоне точностей дифрактометров может не учитываться [4]. Заметное влияние на параметры дифракционной картины оказывает пространственная когерентность излучения при размере изделия, соизмеримом с интервалом корреляции [5].

Большинство выпускаемых промышленностью He—Ne-лазеров излучают на основной поперечной моде с практически гауссовым законом распределения интенсивности в поперечном сечении пучка и малой угловой расходимостью в области перетяжки, что и определяет характер распределения амплитуды и фазы поля в плоскости объекта. При облучении измеряемого отверстия гауссовым пучком распределение амплитуды и фазы поля в плоскости отверстия неравномерно. Неравномерность распределения фазы поля в плоскости контролируемого объекта составляет тысячные доли процента, что оказывает незначительное влияние на погрешность дифракционных способов измерения [6]. Если размер контролируемого объекта соизмерим с размером гауссова пучка, то возникающая неравномерность распределения амплитуды в плоскости объекта существенно влияет на размер дифракционных максимумов и, как следствие, на погрешность измерения дифракционным способом.

В настоящей статье представлены результаты исследования влияния неравномерности распределения амплитуды облучающего поля в плоскости контролируемого объекта на погрешность измерения его размера дифракционным методом.

Классическим объектом при решении дифракционных задач являются отверстия круглой формы и дополняющие их экраны. Увеличение отношения радиуса контролируемого отверстия к радиусу гауссова пучка приводит к возрастанию неравномерности амплитуды поля, а смещение отверстия относительно поперечного сечения гауссова пучка добавляет еще и асимметрию распределения амплитуды поля в плоскости отверстия. Как следствие, возникает несимметричное искажение дифракционной картины во всех радиальных сечениях. Матема-

тическое моделирование дифракционного поля при смещении отверстия относительно поперечного сечения гауссова пучка осуществляется с помощью модифицированного дифракционного интеграла. Задавая отклонение фазы поля в плоскости отверстия равным нулю и используя безразмерные переменные:  $\alpha = a/w_e$  — отношение радиуса отверстия к радиусу пучка и  $m = l/w_e$  — отношение величины смещения отверстия к радиусу гауссова пучка (где  $l$  — величина смещения центра отверстия относительно центра гауссова пучка), получаем следующее выражение:

$$I(u, \varphi) \approx a^4 \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^1 A_0 \exp[-(\alpha^2 r^2 + 2\alpha m r \cos \varphi + m^2)] \exp[jru \cos(\varphi - \varphi^*)] r dr, d\varphi \right\}^2, \quad (1)$$

где  $A_0$  — амплитуда поля в центре гауссова пучка;  $\varphi, \theta$  — углы дифракции;  $r, u$  — безразмерные переменные:  $r = \rho/a$ ,  $u = (2\pi a/\lambda) \sin \theta = (\pi D/\lambda) \sin \theta$ ;  $\rho, \varphi^*$  — полярные координаты;  $D$  — диаметр контролируемого объекта.

Выражение (1) использовано для математического моделирования дифракции гауссова пучка на круглом отверстии. В процессе вычислений безразмерные параметры  $\alpha$  и  $m$  варьировались от 0 до 0,5 с шагом 0,1, при этом рассчитывались:

— текущие значения распределения интенсивности излучения в моделируемой дифракционной картине с шагом  $0,1\pi$  в диапазоне от 0 до  $5,5\pi$ ;

— координаты первых пяти минимумов интенсивности излучения с погрешностью 0,05 % в моделируемой дифракционной картине.

Относительное изменение линейного размера  $L_{i,k}$  между заданными экстремальными точками (минимумами интенсивности) в дифракционной картине при облучении отверстия пучком с равномерным распределением амплитуды поля рассчитывалось по формуле

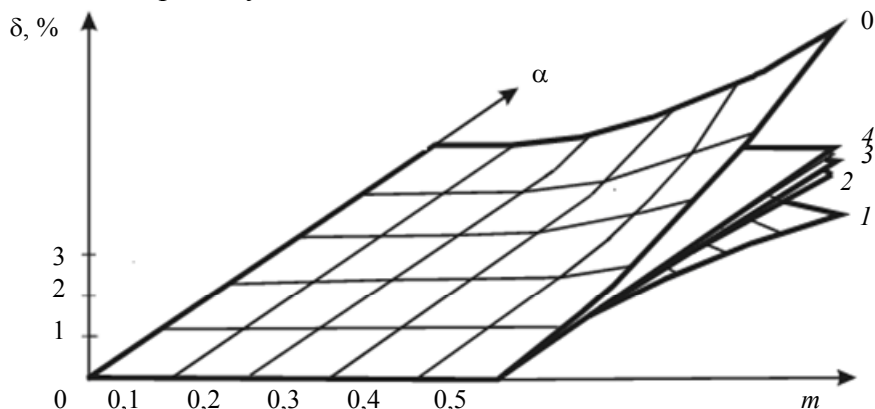
$$\delta = \frac{L_{i,k}^* - L_{i,k}}{L_{i,k}}, \quad (2)$$

где  $L_{i,k}^*$  — линейный размер между заданными экстремальными точками в дифракционной картине при облучении отверстия пучком с неравномерным распределением амплитуды.

Анализ влияния параметров  $\alpha$  и  $m$  на относительное изменение интервалов между экстремальными точками в моделируемой дифракционной картине при  $\varphi = 0$  и  $\varphi = 180^\circ$  (см. рисунок) показывает, что при увеличении параметра  $\alpha$  интервал  $L_{i,k}$ , обозначенный на графике как „0“, между центром дифракционной картины и ее первым минимумом монотонно расширяется, а интервалы 1, 2, 3, 4 между последующими минимумами во всех радиальных сечениях дифракционной картины монотонно сжимаются. Зависимость интервалов от параметра  $\alpha$  уменьшается при увеличении порядкового номера интервала (если в качестве опорных использовать интервалы между соответствующими минимумами идеальной дифракционной картины объекта круглой формы). Подобное изменение размера интервалов между минимумами интенсивности дифракционной картины отмечено другими авторами для случая дифракции на щели [7].

При смещении отверстия относительно центра гауссова пучка наибольшее изменение линейных размеров наблюдается между минимумами интенсивности в радиальном сечении дифракционной картины, плоскость которого совпадает с направлением смещения ( $\varphi=0$ ,  $\varphi=180^\circ$ ). При повороте секущей плоскости в направлении, соответствующем  $\varphi = 90^\circ$  и  $\varphi = 270^\circ$ , влияние смещения отверстия на линейный размер между минимумами интенсивности дифракционной картины монотонно уменьшается и достигает в три раза меньших значений

в сечении, ортогональном направлению смещения отверстия. С увеличением параметра  $\alpha$  влияние смещения отверстия на изменение линейных размеров между экстремальными точками в дифракционной картине увеличивается.



Сравнительный анализ результатов проведенных исследований показывает, что на размер между экстремальными точками в дифракционной картине большее влияние оказывает отношение размера отверстия к размеру гауссова пучка (параметр  $\alpha$ ).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник / Под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1986. 487 с.
2. Лопатин В. Н., Сидько Ф. Я. Введение в оптику взвесей клеток. Новосибирск: Наука, 1988.
3. Тарлыков В. А., Бессмельцев С. С., Андреева Н. Е., Губаренко Н. К. Использование дифрактометрии мазков крови для диагностики реологических расстройств и оценки динамики течения заболеваний системы крови // Клиническая лабораторная диагностика. 1997. № 4. С. 8—11.
4. Тарлыков В. А. Лазерная дифрактометрия микрообъектов типовой формы: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб, 2000.
5. Франсон М., Сланский С. Когерентность в оптике. М.: Наука, 1967. 80 с.
6. Митрофанов А. С., Фефилов Г. Д. Влияние неравномерности распределения фазы поля на круглом отверстии на погрешность дифракционного метода измерения // Науч.-техн. вестн. СПбГИТМО (ТУ). 2001. № 4. С. 74—80.
7. Звонарев С. Л., Кийко В. В., Наумова В. Л., Тарлыков В. А. Особенность дифрактометрии линейных размеров единичных элементов микроэлектроники // Там же. 1989. № 11. С. 42—43.

#### Сведения об авторах

- Андрей Борисович Веселовский** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; E-mail: avesel@mail.ru
- Андрей Сергеевич Митрофанов** — канд. техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; E-mail: mitrofan-as-1941@mail.ru
- Георгий Дмитриевич Фефилов** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; E-mail: fg1319@mail.ru

Рекомендована кафедрой лазерной техники и биомедицинской оптики

Поступила в редакцию  
26.04.13 г.