

Лабораторная работа № 7

Дифракционные измерители линейных размеров

Цель работы - изучение способов контроля линейных размеров изделий, имеющих форму тонкого длинного цилиндра, и оценки средних размеров частиц мутной среды, основанных на явлении дифракции.

Дифракционные способы измерения линейных размеров применяются во многих лазерных приборах оптического неразрушающего контроля, используемых в промышленности. С их помощью, например, контролируют диаметр тонких цилиндрических изделий (проволок, волокон и т.п.), точность изготовления изделий типа поршневых колец и лопаток турбин, износ режущего инструмента автоматизированных токарных станков, осуществляют бесконтактную оценку скорости, длины и площади бумажного полотна. Основными достоинствами дифракционных измерителей являются возможность проведения непрерывного контроля параметров изделий в процессе их изготовления и независимость результатов измерения от мощности источника излучения.

Широкое применение находят дифракционные измерители при оценке размеров частиц с размерами 5–100 мкм в различных газообразных и жидких средах (контроль окружающей среды, оценка качества двигателей и т.п.).

Явление дифракции заключается в том, что при падении светового потока, на ОК, у которого показатель преломления иной, нежели у окружающей среды (оптическая неоднородность или препятствие), на границе света и тени за ним возникает сложная картина распределения интенсивности света – дифракционное поле. В модели скалярной волновой оптики принято различать дифракцию Френеля (падающие волны – сферические, ближняя зона наблюдения) и дифракцию Фраунгофера (падающие волны – плоские, дальняя зона наблюдения). Количественным критерием вида дифракции служит число Френеля Fs , определяемое равенством [9]

$$Fs = \frac{2\pi d^2}{\lambda} \cdot \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right). \quad (1)$$

где d – размер ОК, λ – длина волны падающего света, a – расстояние от источника излучения до ОК, b – расстояние от ОК до точки наблюдения. При $Fs \gg 1$ имеет место дифракция Френеля, при $Fs \ll 1$ – дифракция Фраунгофера.

Для реальных ОК с размерами от единиц до сотен микрометров и при использовании лазеров, длины волн излучения которых лежат в видимом

диапазоне, дифракция Фраунгофера наблюдается уже на расстоянии от микрометров до миллиметров за объектами.

Принцип действия дифракционных измерителей линейных размеров основан на анализе углового распределения интенсивности света в поле дифракции. Параметром, несущим информацию о контролируемом размере, является расстояние между экстремальными точками (максимумами или минимумами) этого поля. Замечательной особенностью таких измерителей является увеличение чувствительности прибора при уменьшении размера объекта контроля.

С целью получения удобного для контроля расстояния между экстремумами за ОК устанавливают объектив, а анализ поля дифракции производят в его фокальной плоскости. Так как распределение интенсивности, получаемое в фокальной плоскости идеального объектива инвариантно к смещениям ОК, расположенного перед ним, то использование объектива позволяет также уменьшить влияние положения объекта на результат измерения.

В дифракционных измерителях линейных размеров процесс измерения осуществляется отслеживанием положения экстремума одного и того же дифракционного порядка. Это дает возможность достичь наибольшего диапазона измерений за счет монотонной зависимости положения экстремума дифракционного поля от размера ОК.

Дифракционный измеритель обычно состоит из ряда функциональных

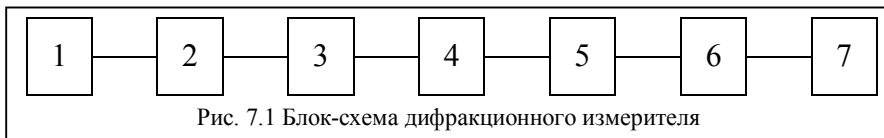


Рис. 7.1 Блок-схема дифракционного измерителя

узлов (рис. 7.1). В качестве лазера 1 чаще всего используется He-Ne лазер ($\lambda = 0,63$ мкм). Формирователь пучка 2, представляющий собой телескопическую систему, обеспечивает получение луча заданной формы и размера. Для формирования дифракционного изображения применяют объектив 4, объект контроля 3 при этом располагают перед объективом. В схеме предусмотрен преобразователь 5 оптического сигнала в электрический, блок обработки электрического сигнала 6, с которого сигнал поступает на устройство индикации 7.

Точная оценка концентрации малых частиц, включенных в прозрачную среду, и их распределения по размерам требует довольно сложных измерений [22]. Ситуация резко упрощается, если диаметры частичек мало отклоняются от некоторого среднего значения. При хаотическом расположении частиц в среде наблюдаемая дифракционная картина имеет такой же

вид, как если бы дифракция наблюдалась на одной частице, но с интенсивностью усиленной во столько раз, сколько частиц содержит контролируемая среда. Этот случай реализуется, например, при анализе размеров водяных капелек или кристалликов льда, взвешенных в воздухе и образующих туман.

Методика выполнения работы

В работе используется лабораторная установка для дифракционного измерения линейных размеров, имеющая существенно упрощенную по сравнению с промышленными приборами схему. В ее состав входят: He-Ne лазер ($\lambda = 0,628$ мкм); рейтер, на котором крепятся рамки с образцами проволоки или препаратом, моделирующим мутную среду (стеклянная пластинка, запыленная спорами ликоподия) и экран с нанесенной на него шкалой

В установке реализована схема дифракции Фраунгофера. В этом случае, согласно принципу Бабине [9], дифракционные картины от соответствующих экранов совпадают, следовательно, при дифракции на непрозрачных объектах (проволока, споры ликоподия) угловое распределение интенсивности света имеет такой же вид, что и в случае дифракции на экране с соответствующими отверстиями.

При дифракции на проволоке распределение интенсивности света по экрану $S(\theta)$ как функция угла дифракции θ имеет вид

$$S(\theta) = \frac{\sin^2(kd\theta)}{(kd\theta)^2}, \quad (2)$$

где $S(\theta) = \frac{\pi kd}{I_0} \cdot \frac{dI}{d\theta}$; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; d – диаметр проволоки; I – интенсивность света в плоскости шкалы; I_0 – интенсивность падающего светового потока.

В промышленных измерителях диаметров блок обработки электрического сигнала формирует прямоугольный импульс, длительность которого пропорциональна расстоянию между минимумами дифракционного распределения. Это расстояние определяется из соотношения, определяющего положение минимума:

$$d \sin \theta = n\lambda, \quad (3)$$

где $n = \pm 1, \pm 2, \dots$ – целые числа (порядки дифракции). В приборе используют объектив, оптические характеристики которого допускают смещение ОК в пределах ± 5 мм вдоль пучка и $\pm 2,5$ мм поперек пучка. При указанных смещениях ОК относительная погрешность измерителя не превосходит $\pm 0,5\%$.

В лабораторной модели измерителя в качестве величины, значение которой однозначно связано с диаметром проволоки, также использовано расстояние l_n между минимумами n -го порядка дифракции, которое определяется визуально по оптической шкале. Поскольку угол дифракции θ всегда мал, то можно считать что

$$\sin \theta_n \approx \text{tg} \theta_n \approx l_n / 2L, \quad (4)$$

где L – расстояние от проволоки до шкалы. Тогда из соотношения (3) получим формулу для искомого диаметра проволоки d :

$$d = n\lambda \frac{2L}{l_n}. \quad (5)$$

При установке в рейтере пластинки с моделью слоя мутной среды на экране будет наблюдаться картина диффузного рассеяния, на фоне которой видна система светлых и темных дифракционных колец. Угловое распределение интенсивности по экрану совпадает с распределением при *дифракции на одной частице*. Это явление объясняется следующим образом. При дифракции Фраунгофера картину дифракции определяет только направления интерферирующих вторичных волн. Поэтому при дифракции на системе многих частиц смещение частицы в плоскости, параллельной плоскости экрана, без изменения ее ориентации в пространстве не влияет на распределение интенсивности по экрану. Поскольку частиц в среде много, расположены они хаотически и имеют близкие размеры, то при наложении дифракционных полей от отдельных частиц в среднем произойдет их взаимное погашение. В результате произойдет простое усиление интенсивности в N раз (N – число частиц) дифракционной картины от одной частицы без изменения углового распределения в ней.

Таким образом, в нашем опыте распределение интенсивности света по экрану дает такая же формула, как и в случае дифракции света на круглом отверстии (формула Эйри) [22]:

$$I(\theta) = \left[\frac{2J_1(kaw)}{kaw} \right]^2, \quad (6)$$

где a – средний радиус частицы; $J_1(kaw)$ – функция Бесселя первого порядка; $w = \sin \theta$. Для максимумов и минимумов невысоких порядков n соответствующие углы дифракции θ_n по-прежнему приближенно определяет соотношение вида (4)

$$\sin \theta_n \approx D_n / 2L, \quad (7)$$

где D_n – диаметр n -го кольца. Из соотношений (6) и (7) следует, что искомый средний диаметр частиц $d_0 = 2a$ выражается через диаметры темных колец D_n следующим образом

$$a = \frac{2x_{n+1}\lambda L}{\pi D_n}, \quad (8)$$

где x_{n+1} – корни уравнения $J_1(x) = 0$ (первый корень этого уравнения $x_1 = 0$ соответствует центральному максимуму интенсивности). Для первых трех колец значения x_{n+1} приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1

Номер кольца, n	1	2	3
x_{n+1}	3,832	7,016	10,174

Порядок выполнения работы

1. Установить все элементы лабораторного измерителя линейных размеров на оптической скамье. Установить в рейтере рамку с образцами проволок
2. Менять положение рамки относительно экрана, добиться четкого дифракционного изображения одной из проволок в плоскости экрана. Измерить расстояние от рамки до экрана L .
3. Измерить расстояние между несколькими дифракционными минимумами l_n (между 1 и -1 , 2 и -2 и т.д.). Для каждого l_n ($n \geq 6$) по формуле (4) найти диаметр проволоки d_i . Определить погрешность измерения.
4. Получить картину дифракции от другого образца проволоки и повторить измерения согласно п.п. 2 – 3.
5. Установить в рейтере образец с моделью слоя мутной среды. Менять положение рамки и объектива относительно экрана, получить на экране четкую картину дифракции, имеющую вид системы концентрических колец.
6. Измерить расстояние от рамки до экрана L . Измерить диаметры трех наблюдаемых темных колец D_n .
7. По формуле (8) найти диаметр частицы, оценить погрешность измерения.