

ИЗМЕРЕНИЕ РАЗМЕРОВ И СКОРОСТИ ЧАСТИЦ АЭРОЗОЛЯ

А. А. ТИТОВ, С. Ф. МИРСАИТОВ

Московский государственный университет приборостроения и информатики,
Москва, Россия, e-mail: dor7338@mail.ru

Предложен метод измерения скорости и размера частиц, основанный на использовании двух пучков света, сформированных акустооптическим модулятором и лазерным модулем, повышающий точность измерения.

Ключевые слова: лазер, акустооптический модулятор, фотоприемный модуль, частицы аэрозоля.

The increasing accuracy method of measurement of speed and sizes of particles based on the use of two beams of light formed by optical-acoustic modulator and optics is suggested.

Key words: laser, acousto-optic modulator, photoreceiving module, aerosol particles.

В настоящее время для измерения размера и скорости аэрозольных частиц используются интерференционные методы [1, 2]. Однако они не обладают достаточной точностью, поскольку глубина модуляции является функцией Бесселя отношения размера частицы к периоду интерференционной картины. В связи с этим при изменении размера частицы глубина модуляции меняется, что приводит к погрешности измерения. Кроме того, калибровка прибора и перестройка периода интерференционной картины сложны при исследовании частиц, период которых превышает период интерференционной картины, поскольку в данном случае глубина модуляции будет равна нулю. Для устранения этих недостатков разработано устройство (рисунок), основанное на сочетании интерференционного метода и метода рассеивания света на частицах, пересекающих лазерный пучок. При этом для формирования интерференционной картины используется способ, изложенный в [3].

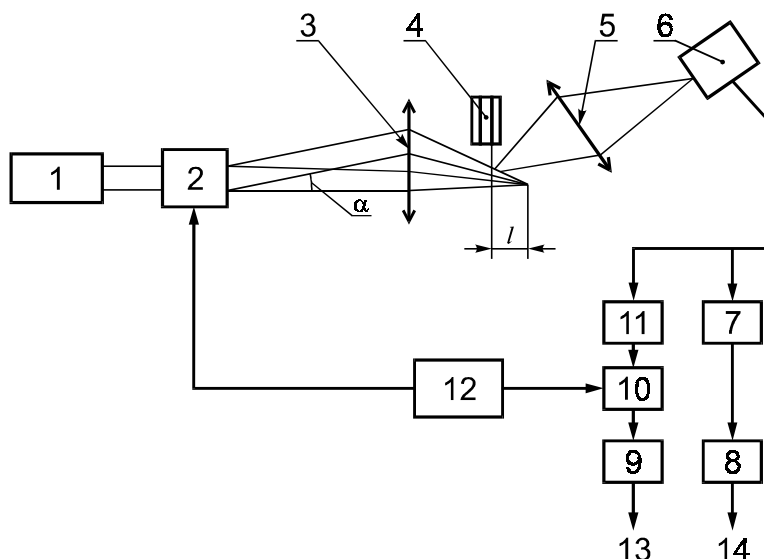


Схема устройства для измерения размера и скорости частиц:

1 – лазерный модуль; 2 – акустооптический модулятор (АОМ); $3, 5$ – объективы; 4 – трубка; 6 – фотоприемный модуль; $7, 11$ – фильтры; 8 – импульсный цифровой вольтметр; 9 – частотомер; 10 – фазовый детектор; 12 – блок управления; $13, 14$ – выходы импульсов

Лазерный модуль 1 освещает АОМ 2 коллимированным пучком, поэтому фронт световой волны можно считать плоским. Как показано в [3], для создания интерференционной картины в пучке, дифрагированном на АОМ, на модулятор подаются из блока 12 напряжения двух частот, сдвинутых на низкую частоту f_n . Модулятор 2 установлен под углом Брэгга к падающему пучку, поэтому из него выходят пучки дифрагированный и нулевого порядка, поступающие на объектив 3 . Рядом с фокусом объектива 3 установлена трубка 4 , по которой поступают частицы, пересекающие при пролете оба пучка. Рассеянный на частицах свет собирается объективом 5 и направляется на фотоприемный модуль 6 , на выходе из которого при пролете частицы через пучки, появляются два импульса. Первый образуется в случае частиц дифрагированного пучка, частота этого импульса формируется при пересечении интерференционной картины. Второй – образуется при пересечении пучка нулевого порядка. Фильтр 11 пропускает первый

импульс, а фильтр 7 – второй. Фазовый детектор 10 выделяет доплеровский сдвиг частоты, пропорциональный скорости частицы, измеряемый частотомером. Импульсный вольтметр 11 определяет амплитуду импульса, пропорциональную размеру частицы.

Оценим параметры устройства. Рассчитаем период интерференционной картины в месте пролета частиц, для чего найти размер пучка в этом месте. Для хода лучей, показанного на рисунке, размер пучка будет

$$h = Dl/f', \quad (1)$$

где D – диаметр пучка лазерного модуля; l – расстояние от фокуса до места пролета частицы; f' – фокусное расстояние объектива 3.

С учетом (1) и работы [3] вычислим сдвиг частоты

$$f_d = Vf_n f' / V_3 l, \quad (2)$$

где v , v_3 – скорости частицы и звуковой волны в АОМ, соответственно.

Аналогично по (1) найдем размер пучка нулевого порядка в месте пролета частиц.

Определим мощность сигнала на фотоприемнике от частиц, пересекающих оба пучка. В первом случае, используя результаты [2, 4 – 6] получим

$$P_d = \frac{P\sigma\tau M \sin^2(\varphi) \cos \alpha}{S_n}, \quad (3)$$

где P – мощность излучения лазерного модуля; σ – полное сечение рассеивания частицы; τ – потери в лазерном модуле и АОМ; M – коэффициент модуляции, зависящий от периода интерференционной картины и размера частицы; φ – апертурный угол объектива 5; α – угол между нормалью частицы и направлением на объектив 5; S_n – площадь пучка в месте пролета частиц.

Во втором случае, когда частицы пересекают пучок нулевого порядка, мощность на фотоприемнике можно также рассчитать по (3) без учета коэффициента модуляции M .

Найдем минимальный размер частицы предложенным методом. Отметим, что для очень малых частиц справедливо рассеяние Рэлея. Скорректируем (3) для подобного случая. Как показано в [2], для рэлеевских частиц сферической формы полное сечение рассеяния σ будет иметь вид

$$\sigma = \frac{1,5\pi^5 d^6}{\lambda^4} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2, \quad (4)$$

где d , n – диаметр и показатель преломления частицы; λ – длина волны излучения.

С использованием (1), (3) (без учета коэффициента M) и (4) с исключением коэффициента M , получим выражение для минимального размера частицы

$$d = \sqrt[6]{\frac{1,5\lambda^4 \Phi \sqrt{F}}{4\pi^4 \tau P \sin^2 \varphi \cos \alpha} \left(\frac{S}{N} \right) \left(\frac{Dl}{f} \right)^2 \left(\frac{n^2 + 2}{n^2 - 1} \right)^2}, \quad (5)$$

где Φ – пороговая чувствительность фотоприемного модуля; F – полоса частот сигнала; S/N отношение сигнал–шум.

Оценим минимальный и максимальный размеры частиц. Минимальный размер найдем по (5), задав входные параметры. В качестве источника излучения используют полупроводниковый лазерный модуль, мощностью излучения $P = 0,1$ Вт, размер пучка $D = 5$ мм, длина волны излучения $\lambda = 0,65$ мкм. Определим размер пучка, пересекаемого частицей. Выберем фокусное расстояние объектива $3f' = 200$ мм, а расстояние от фокуса до места пролета частицы $l = 2$ мм. Тогда из (1) получим $h = 50$. Чтобы найти полосу частот сигнала, вычислим длительность импульса при пролете частиц через пучок. Как показано в [1, 5], скорость движения частиц может достигать 10 м/с. Тогда длительность импульса составит $t = 0,05$ мм / 10000 мм/с = 5 мкс, а ширина его спектра – 0,2 МГц. В качестве фотоприемного модуля выберем фотоэлектронный умножитель фирмы Hamamatsu H10721-20 с пороговой чувствительностью порядка 10^{-16} Вт·Гц^{0,5}, при этом $S/N = 10$. Остальные параметры возьмем из [3 – 6]: $\sin \varphi = 0,3$; $\tau = 0,5$; $\cos 45^\circ = 0,7$; $n = 1,5$. Подставим значения параметров в (5) и получим минимальный размер частиц $d = 37$ нм. При использовании более мощных лазеров и оптимизации входящих в (5) параметров d может быть еще меньше.

Найдем максимальный размер a частиц. Он будет определяться диаметром пучка, через который пролетает частица. В рассмотренном примере $D = 50$ мкм, т. е. диапазон измерений 0,037 – 50 мкм. Максимальный размер движущейся частицы будет зависеть от периода Λ интерференционной картины. Как показано в [2], коэффициент модуляции обращается в нуль при соблюдении соотношения

$$a/\Lambda=1,22. \quad (6)$$

Для расчета периода интерференционной картины в месте пролета частиц необходимо знать параметры АОМ. В качестве кристалла АОМ возьмем парателлуриит, при использовании которого можно достичь скорости звука 617 м/с и полосы частот 1 МГц. Тогда с учетом выражений (2), (6) имеем

$$a = 1,22v_3 l / f_n f'. \quad (7)$$

Подставив в (7) значения указанных выше параметров, получим $a = 7,5$ мкм. Минимальный размер частиц, скорость которых можно измерять, изменится, так как в (5) будет другая полоса частот. Ее ширина будет складываться из полосы АОМ и доплеровского сдвига частоты, который можно рассчитать по (2). В результате она будет равна $F = 2,62$ МГц, и при подстановке этого значения в (5), получим $d = 46$ нм. Таким образом, указанную в примере скорость пролета 10 м/с можно измерять для частиц, размеры которых находятся в диапазоне 0,046 – 7,5 мкм. Для меньших скоростей диапазон соответственно расширится.

Определим погрешность измерения скорости частиц. Для этого используем выражение (2), в котором выделим параметры, имеющие систематические погрешности. К ним можно отнести расстояние l от фокуса до трубки, которое может быть измерено при сборке прибора. Остальные параметры будем полагать случайными. Методом дифференцирования с учетом (2) получим выражение для относительной погрешности измерения скорости

$$\frac{\Delta v}{v} = \sqrt{\left(\frac{\Delta f_d}{f_l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v_3}{v_3}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f_n}{f_n}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f'}{f'}\right)^2}, \quad (8)$$

где Δ – абсолютная погрешность соответствующих величин.

В [4] указаны следующие значения входящих в (7) параметров: $\Delta f_d / f_n = 0,05$; $\Delta v_3 / v_3 = 5 \cdot 10^{-4}$; $\Delta f_n / f_n = \Delta f' / f' = 10^{-4}$. Подставив эти значения в (8), получим $\Delta v / v \approx 5\%$.

Оценим точность измерения размера рэлеевских частиц. С учетом (3), (4) найдем напряжение на входе импульсного вольтметра

$$U = \frac{1,5\pi^5 d^6 P(n^2 - 1)^2 \tau k \sin^2(\varphi) \cos \alpha}{\lambda^4 (n^2 + 1)^2 S_n}, \quad (9)$$

где k – коэффициент передачи фотоприемного модуля.

Выделим в (9) параметры, имеющие систематические погрешности. К ним относятся φ , α , τ , S_n , n , которые можно определить перед началом измерений.

Используя метод дифференцирования и учитывая (9), получим

$$\frac{\Delta d}{d} = \sqrt{\frac{1}{36} \left(\frac{\Delta k}{k} \right)^2 + \frac{1}{36} \left(\frac{\Delta U}{U} \right)^2 + \frac{4}{9} \left(\frac{\Delta P}{P} \right)^2 + \frac{4}{9} \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right)^2}. \quad (10)$$

Найдем значения входящих в (10) параметров. В [4] показано, что $\Delta P/P = 1\%$. Погрешность $\Delta U/U$ современных импульсных цифровых вольтметров составляет порядка 0,5 – 1,0 % (В4-24), как и относительная погрешность коэффициента передачи фотоприемного модуля $\Delta k/k$. Для полупроводниковых лазеров ширина спектра излучения равняется $\Delta \lambda = 1,5$ нм, а погрешность $-\Delta \lambda/\lambda = 0,23\%$. При подстановке этих значений в (10) получим аппаратную относительную погрешность измерения порядка 0,5 %. Указанные значения погрешностей в дальнейшем необходимо уточнить при проведении испытаний прибора.

Таким образом, предложенный метод позволяет измерять размеры и скорость частиц с достаточно высокой точностью и в широком диапазоне.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Беляев С. П.** Оптико-электронные методы изучения аэрозоля. М.: Энергия, 1981. С. 117 – 122.
2. **Дубнищев Ю. Н., Ринкевичус Б. С.** Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982. С. 38 – 39.
3. **Титов А. А., Амурский В. В., Гарипов В. К.** Методы построения и расчета лазерных измерительных и запоминающих устройств. М.: Машиностроение, 2008.
4. **Титов А. А.** Гетеродинный измеритель скорости и направления падения дождевых капель //Измерительная техника. 2008. № 11. С. 43 – 45; **Títov A. A.** Heterodyne meter for the velocity and direction of falling raindrops //Measurement Techniques. 2008. V. 51. N 11. P. 1200 – 1203.
5. **Титов А. А., Коновалов И. Н.** Измерение размеров сальтирующих песчинок проекционным методом //Измерительная техника. 2010. № 2. С. 26 – 28; **Títov A. A., Konovalov I. N.** Measurement of the dimensions of saltationing sandstone by a projection method //Measurement Techniques. 2010. V. 53. N 2. P. 153 – 155.
6. **Заказнов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. И.** Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992. С. 113 – 115.

Дата принятия 21.12.2012 г.