

Технические науки

УДК 535.36, 543.436

МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ИНДИКАТРИСЫ РАССЕЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГАЗОДИСПЕРСНОЙ СРЕДЕ

И.А. Тихомиров, В.Ф. Мышкин, В.А. Власов, В.А. Борисов, В.М. Сосновенко, А.Г. Васильев

Томский политехнический университет
E-mail: chair23@phtd.tpu.edu.ru

Излагаются методы и устройства: для определения: малоугловой индикатрисы рассеяния лазерного излучения, включая направление 0°; малоугловой и полной индикатрис рассеяния одиночных дисперсных частиц одним фотоприемником. Приводятся экспериментальные результаты.

Гетерогенные среды имеют широкое распространение: лазерная и плазменная технология, космическая техника. Оптические методы диагностики перспективны для определения содержания компонент и пространственной структуры газовых и плазменных систем. Лазерная диагностика гетерогенной плазмы, по сравнению с другими методами, более информативна (например, при изучении процессов горения).

Зависимость фактора эффективности рассеяния оптического излучения на дисперсных частицах от его размера имеет сложный характер. Частицы микронных размеров обладает характерными особенностями в угловом распределении рассеянного излучения в диапазоне углов 0...180°. Характерные особенности индикатрисы рассеяния крупных дисперсных частиц, по сравнению с длиной волны зондирующего излучения, находятся в диапазоне углов 0...5°. В зависимости от диапазона углов регистрации рассеянного излучения можно выделить методы: малоуглового рассеяния, полной индикатрисы, обратного рассеяния. Теоретической основой интегральных оптических методов является решение уравнения Фредгольма первого рода численными методами.

Метод измерения малоугловой индикатрисы для определения дисперсного состава частиц был предложен К.С. Шифриным [1]. Технически малоугловые измерения светорассеяния могут быть проведены, например, по схемам: призмы полного внутреннего отражения и длиннофокусной линзы [2]. В ма-

лоугловой схеме с призмой полного внутреннего отражения прошедшее без взаимодействия через газодисперсную среду излучение призмой возвращается назад. Пучок параллельных, рассеянных на один и тот же малый угол, лучей проходят через призму, преломляясь. При использовании линзовой схемы для регистрации малоугловой индикатрисы рассеянные на газодисперсной среде параллельные лучи разделяются по углам с помощью объектива при фокусировании на плоскость фотоприемника. Угловое разрешение определяется размером фокального пятна используемого объектива.

При малоугловом рассеянии может быть предусмотрено функциональное преобразование потока рассеянного излучения [3]. Сигнал на выходе фотоприемника, благодаря применению функционального преобразования (например, серого оптического клина, перемещающегося синхронно с фотоприемником, набора апертурных диафрагм, клиновидной диафрагмы), пропорционален $I_{\text{ср}}(\theta)\theta^3$ или $I_{\text{ср}}(\theta)\theta^2$, а не $I_{\text{ср}}(\theta)$. Это расширяет диапазон интенсивностей рассеянного излучения, регистрируемых фотоприемником.

Во всех известных схемах принципиально невозможно измерить интенсивность излучения, рассеянного в направлении угла 0°. В установке для измерения интенсивности малоуглового рассеяния, включая направление угла 0°, формируется пучок коллимированного излучения гелий-неонового лазера, который разделяется на когерентные опорный и зондирующий пучки равной интенсивности [4].

Таблица. Малоугловая индикатриса рассеяния

θ°	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1	1,3
$I(\theta) \cdot 10^3$, отн. ед.	10^3	930	750	520	290	120	30	1,3	4,7	15	12	0,3
θ°	1,6	1,9	2,3	2,7	3,1	3,7	4,3	4,9	5,6			
$I(\theta) \cdot 10^3$, отн. ед.	4,3	0,14	1,3	0,57	0,044	0,033	0,026	0,022	0,035			

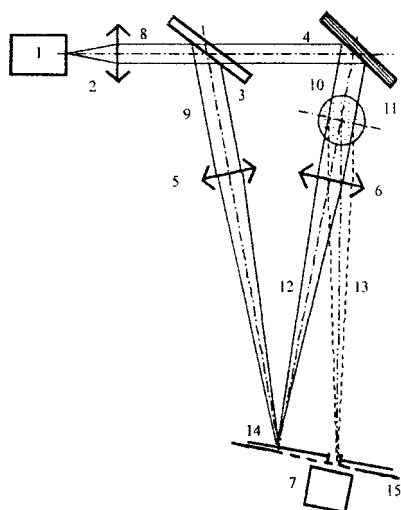


Рис. 1. Принципиальная схема определения малоуглового рассеяния: 1) лазер; 2) коллиматор; 3) светоделительная пластина; 4) зеркало; 5, 6) объективы; 7) ФЭУ; 8, 9, 10) коллимированный, опорный, зондирующий лучи, соответственно; 11) аэрозоль; 12, 13) прошедший и рассеянный лучи; 14, 15) подвижная и клиновидная диафрагмы

Зондирующий пучок оптического излучения направляется через рассеивающую среду. Затем пучок коллимированного оптического излучения, прошедшего через рассеивающую среду, поток оптического излучения, рассеянного на рассеивающей среде на малые углы и пучок опорного оптического излучения совмещают в плоскости, в которой регистрируют величины интенсивностей излучения. При этом угол пересечения оптических осей опорного и зондирующего пучков оптического излучений должен быть таким, чтобы период формируемой при этом интерференционной картины указанных пучков превышал диаметры фокальных пятен опорного и зондирующего пучков. Измерения в направлении угла 0° возможны, если фокальные пятна пучков зондирующего и опорного оптического излучений совмещаются в одном из минимумов интерференционной картины. При этом в плоскости регистрации интенсивностей потоков рассеянного излучения интенсивность прошедшего рассеивающую среду зондирующего оптического излучения можно уменьшить ниже порога чувствительности используемого фотоприемника. В этом случае ФЭУ регистрирует только рассеянное оптическое излучение.

Схема малоугловой экспериментальной установки приведена на рис. 1. Используется коллимированный пучок излучения гелий-неонового лазера диаметром 10 мм, который с помощью поворотного зеркала направляется на струю газа диаметром ≈ 15 мм, содержащую частицы металлического железа размерами 25...30 мкм. Пучки опорного и зондирующего излучения фокусируются с помощью индивидуальных объективов с фокусным расстоянием 200 мм на подвижную диафрагму под углом в 6° . При этом в передней фокальной плоскости од-

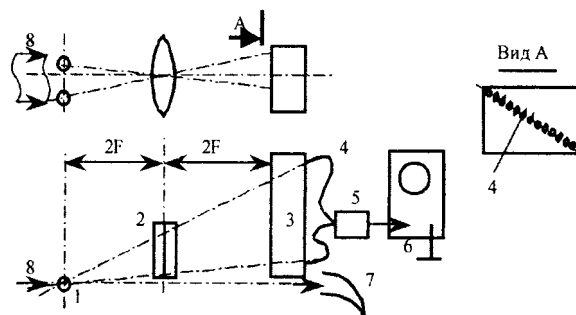


Рис. 2. Схема установки для регистрации малоугловой индикатрисы рассеяния: 1) дисперсная частица, 2) цилиндрическая линза, 3) линейка световодов, 4) световоды, 5) ФЭУ, 6) осциллограф, 7) светоловушка, 8) лазерный луч

ного из объективов располагается газовая струя, а в задней — подвижная диафрагма. Период интерференционной картины составляет $\approx 6,1$ мкм, а диаметр фокального пятна $\approx 3,1$ мкм. Сигналы ФЭУ-114 регистрируются с помощью осциллографа С8-12. Время определения малоугловой индикатрисы рассеяния в диапазоне углов $[0^\circ, 5,7^\circ]$ составляло $\approx 6,7 \cdot 10^{-4}$ с. В таблице приведена усредненная для нескольких частиц экспериментально полученная малоугловая индикатриса рассеяния.

Для регистрации малоугловой индикатрисы рассеяния лазерного излучения от одиночной дисперсной частицы нами также разработана и испытана установка, содержащая источник зондирующего излучения, систему сбора рассеянного излучения, ФЭУ, светоловушку и электронный блок регистрации (рис. 2) [5]. Для выделения потоков излучения, рассеянных в диапазоне малых углов, используется цилиндрическая линза из оптического стекла, которая проецирует изображение счетного объема на поверхности, содержащей входные торцы световодов. Входные торцы световодов, оптические оси которых совпадают с оптической осью цилиндрической линзы по каждому направлению рассеяния (световоды установлены под разными углами к плоскости рассеяния), установлены равномерно по диагонали на кронштейне. Выходные концы всех световодов собраны в один пучок на входе в ФЭУ. Расстояние между осью счетного объема и цилиндрической линзой, фокусное расстояние этой линзы и расстояние от линзы до входных торцов световодов связаны соотношением тонкой линзы. Световоды помещены в светонепроницаемый кожух. Параллельно световоду, расположенному в направлении угла рассеяния 5° , установлен дополнительный световод. Это позволяет выделять

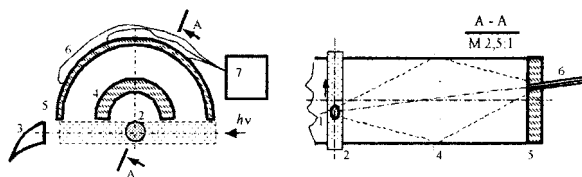


Рис. 3. Схема индикатрисометра: 1) дисперсная частица, 2) счетный объем, 3) светововушка, 4) кольцо, 5) кронштейн, 6) световоды, 7) ФЭУ

частицы, траектории которых параллельны оси счетного объема фотоэлектронного счетчика дисперсных частиц (ФЭС).

В основе работы ФЭС лежит принцип последовательной регистрации одним ФЭУ малоугловой индикатрисы рассеяния при прохождении дисперсной частицей счетного объема. Каждой точке по высоте счетного объема ставится в соответствие угол, в котором производится отбор части потока рассеянного зондирующего излучения для регистрации.

Одиночная дисперсная частица проходит по счетному объему системы выделения потоков рассеянного лазерного излучения под углом 90° к направлению зондирующего излучения. Цилиндрическая линза выделяет часть из потока рассеянного вперед излучения и проецирует ее в виде линии с переменной интенсивностью, соответствующей индикатрисе рассеяния, на кронштейне со сборкой световодов. При продвижении дисперсной частицы вдоль счетного объема ее изображение последовательно пересекает вход одного из световодов. Прошедшее через счетный объем зондирующее излучение поглощается светововушкой. Время регистрации одной индикатрисы определяется скоростью пролета дисперсной частицы через счетный объем.

Были использованы: аргонный лазер ЛГН-506; ФЭУ-114; цилиндрическая линза размерами 25×30 мм с фокусным расстоянием 32 мм; световоды длиной 0,4 м ($\varnothing_{\text{св}} = 2$ мм). Калибровка устройства проводилась с помощью частиц латекса в воздушном потоке. Технические характеристики: диапазон углов измерения: $2...24^\circ$, угловое разрешение: не менее $1,5^\circ$, диапазон измеряемых диаметров: $1,5...30$ мкм, максимальная концентрация измеряемых частиц в счетном объеме: 100 см^{-3} .

Можно выделить два основных способа регистрации полной индикатрисы: сканирование одним фотоприемником в заданном диапазоне углов (сканирование источником зондирующего излучения), одновременная регистрация на нескольких фиксированных направлениях. Счетный объем формируется в месте пересечения зондирующего оптического излучения и центра объемной системы выделения рассеянного излучения. Недостатком индикатрисометров с механическим сканированием одним фотоприемником по дуге или полусфере является большое время регистрации полной индикатрисы. Применение таких приборов в масштабе реального

времени или для исследования изменяющихся во времени объектов невозможно.

Установка нескольких фотоприемников на разных углах заметно уменьшает время регистрации индикатрисы рассеяния. Для увеличения информативности, полную индикатрису рассеяния можно регистрировать на фотопленку [6]. Такой способ определения полной индикатрисы требует длительного времени.

Для регистрации полной индикатрисы рассеяния от одиночной дисперсной частицы разработана установка, содержащая источник зондирующего излучения, объемную систему сбора рассеянного излучения, фотоприемник, светововушку и электронный блок регистрации интенсивностей рассеянного на различные углы излучений. Объемная система сбора рассеянного излучения выполнена в виде установленных соосно кольца из оптически прозрачного материала и кронштейна в форме винтовой линии не менее одного оборота. Схема такого индикатрисометра приведена на рис. 3 [7]. Кольцо из оптически прозрачного материала имеет радиальное сечение в форме тонкой линзы и два отверстия, расположенных на его диаметрально противоположных сторонах по направлению зондирующего излучения. Размеры отверстий превышают размеры поперечного сечения зондирующего излучения. Геометрическая ось кольца совпадает с входной плоскостью тонкой линзы в каждом сечении цилиндрической линзы. На винтовом кронштейне радиально установлены равномерно распределенные по его длине световоды, ориентированные по оптической оси тонкой линзы в каждом его сечении. В зависимости от углового положения на кронштейне входные торцы световодов установлены под разными углами к геометрической оси объемной системы выделения рассеянного излучения, а их оси совмещены с оптическими осями тонкой линзы, проходящими через центр дисперсной частицы. Входные торцы световодов установлены в плоскости изображений тонкой линзы, а выходные торцы объединены в один пучок на входе в фотоприемник. Сигналы фотоприемников запоминаются электронным блоком регистрации интенсивностей рассеянных на различные углы излучений.

Счетный объем имеет форму, близкую к цилиндрической, ось симметрии которого совмещена с геометрической осью кольца из оптически прозрачного материала. Высота счетного объема ограничена длиной отрезка геометрической оси кронштейна, в пределах которого установлены входные торцы световодов с учетом коэффициента увеличения изображения. Счетный объем ФЭС расположен в геометрическом центре объемной системы выделения рассеянного излучения, сформированного из кольца из оптически прозрачного материала и кронштейна в форме винтовой линии со сборкой световодов. Входные торцы световодов распределены равномерно по разным углам по отношению к на-

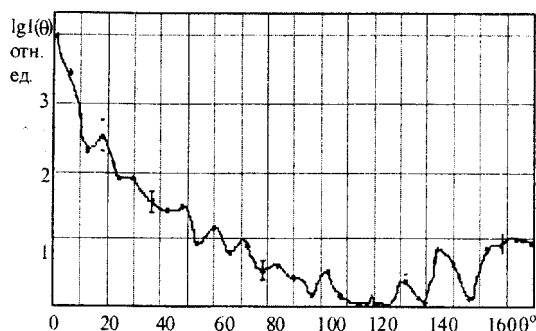


Рис. 4. Экспериментальные индикатрисы рассеяния при последовательной регистрации по углам от одиночной частицы латекса диаметром 5 мкм

правлению зондирующего излучения.

При измерениях диаметров дисперсная частица, направляемая с помощью воздушного потока, проходит вдоль геометрической оси объемной системы выделения рассеянного лазерного излучения под углом 90° к направлению распространения зондирующего излучения. Из потока рассеянного излучения кольцо из оптически прозрачного материала выделяет экваториальную часть и проецирует ее в виде светящейся окружности с переменной интен-

сивностью, соответствующей полной индикатрисе рассеяния, на внешнем кронштейне со сборкой световодов. При продвижении дисперсной частицы вдоль счетного объема рассеянное излучение, сформированное в виде окружности, последовательно пересекает входной торец одного из световодов, установленных на кронштейне под разными углами по отношению к направлению распространения зондирующего излучения. На фотоприемник (ФЭУ-114) поочередно попадает рассеянное на различных углах, по отношению к направлению зондирующего излучения, прошедшее счетный объем не рассеиваясь, поглощается светоловушка.

ФЭС позволяет регистрировать полную индикатрису рассеяния с необходимым угловым разрешением, в диапазоне углов $2...178^\circ$, $182...358^\circ$ одним фотоприемником как временную последовательность электрического сигнала, получаемого при пролете одиночной частицы вдоль оптической оси кольцевой линзы. На рис. 4 приведена экспериментально полученная полная индикатриса рассеяния излучения на длине волны 0,514 мкм аргонового лазера. Приведенные данные усреднены по 10 экспериментальным значениям индикатрисы [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шифрин К.С. Вычисление некоторого класса интегралов, содержащих квадрат бесселевой функции первого рода // Труды ВЗЛТИ. — 1956. — Вып. 2. — С. 108–121.
2. Шифрин К.С. Изучение свойств вещества по однократному рассеянию / Теоретические и прикладные проблемы рассеяния света. — М.: Изд-во НТЛ, 1971. — С. 228–244.
3. Вичасина М.Ф., Орлов Р.Ю. Оптический гранулометр для фракций частиц 2–100 мкм // Заводская лаборатория. — 1988. — № 9. — С. 72–74.
4. Патент 2183828 РФ. Способ регистрации малоугловой индикатрисы / И.А. Тихомиров, В.Ф. Мышкин, В.Н. Цимбал и др. // БИИПМ. — 2002. — № 17 от 20.06.02.
5. Полезная модель 12251 РФ. Устройство для регистрации полной индикатрисы рассеяния / В.Ф. Мышкин, И.А. Тихомиров, В.А. Власов, В.Н. Цимбал // БИИПМ. — 1999. — № 12 от 16.12.99.
6. Федорова Е.О. Изучение индикатрис рассеяния света крупными прозрачными частицами сферической и произвольной формы // Труды Государственного оптического института. — 1957. — Т. 25. — Вып. 151.
7. Тихомиров И.А., Мышкин В.Ф., Цимбал В.Н., Коровин О.М. Устройство для регистрации полной индикатрисы рассеяния одиночных дисперсных частиц // Приборы и техника эксперимента. — 2001. — № 3. — С. 166–167.