

04; 07

© 1991 г.

РАССЕЯНИЕ СВЕТА НА СГУСТКАХ ПЛАЗМЫ ОПТИЧЕСКОГО ПРОБОЯ В ГАЗЕ И ПРОЗРАЧНОМ ДИЭЛЕКТРИКЕ

Н. Н. Белов

Найдены простые формулы для оценки влияния показателя преломления частицы и среды, в которой взвешена частица, на количество и угловые координаты минимумов интенсивности рассеяния света сгустками плазмы. Показано, что эти оценки удовлетворительно согласуются с результатами численного исследования по теории Ми. Полученные результаты позволяют оптимизировать численные исследования фотоэлектрических счетчиков аэрозоля, показывают возможность решения обратной задачи восстановления параметров сгустков плазмы по пульсациям рассеянного излучения.

Введение

В [1] использовано приближение «мягких» частиц для исследования рассеяния излучения на сгустках лазерной плазмы, возникающих вокруг частиц аэрозолей. В [1] показано, что пульсации интенсивности излучения, рассеянного в некотором направлении плазменным сгустком, радиус которого непрерывно растет, обусловлены увеличением числа лепестков индикатрисы рассеяния и оптические свойства сферического сгустка плазмы во многом аналогичны свойствам сферической однородной частицы. В частности, вокруг сгустка плазмы существуют направления, рассеяние света в которых минимально. Из (4) и (5) [1] следует, что углы θ_i , соответствующие этим направлениям, в приближении «мягких» частиц радиуса a равны

$$\theta_i = 2 \arcsin(y), \quad y = \frac{\lambda}{4\pi n} \left[\frac{4.4934}{\pi} + i - 1 \right], \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где λ — длина волны излучения в вакууме, n — показатель преломления среды, N — число лепестков индикатрисы.

В [2, 3] этот подход предложено использовать для объяснения пульсаций рассеяния, возникающих при облучении отдельных микрочастиц в прозрачных диэлектриках [4-9] и при расширении отдельной взрывающейся под действием лазерного излучения капли [10]. В настоящей работе нелинейное рассеяние на плазменном сгустке в прозрачном диэлектрике и в воздухе исследовано численно по теории Ми. Область применимости (1) расширена на прозрачные диэлектрики. Получены простые оценки рассеяния света однородным шаром.

Число лепестков индикатрисы рассеяния однородного шара

Из (1) следует, что в приближении «мягкой» частицы число лепестков N_m индикатрисы рассеяния однородного шара можно найти, приравнявая значение y арксинуса единице,

$$N_m = \text{int} \left[\frac{4\pi n}{\lambda} - \frac{4.4934}{\pi} + 1 \right], \quad (2)$$

где функция int предлагает взять целую часть от своего аргумента.

Следует особенно отметить, что в приближении «мягких» частиц из (1) и (2) следует независимость углового распределения минимумов рассеяния излучения и их общего числа для частицы данного радиуса a от показателя преломления вещества частицы. В то же время показатель преломления среды n сильно влияет на N и θ ; за счет изменения в n раз длины волны падающего на частицу излучения.

На рис. 1 приведены результаты расчета изменения с ростом радиуса частицы с показателем преломления $1.01 - i10^{-5}$ числа лепестков индикатрисы рассеяния и по теории Ми на длине волны рубинового лазера ($\lambda = 0.6943$ мкм) для трех значений показателя преломления среды $n=0.5$ (кривая 1), 1.00 (кривая 2) и 1.5 (кривая 3). Расчеты выполнены по программе [11]. Проведенные расчеты моделировали пузырь со слабопоглощающим газом в стекле (кривая 3),

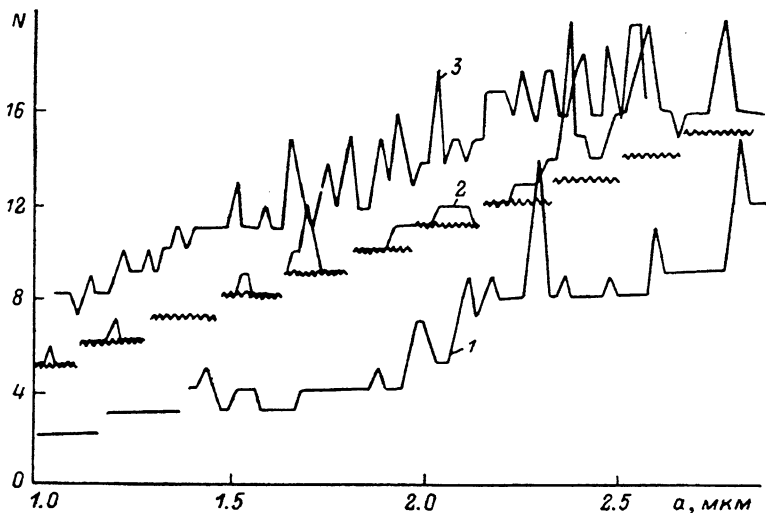


Рис. 1. Зависимость числа N лепестков индикатрисы рассеяния частицы с показателем преломления $1.01 - i10^{-4}$, находящейся в плазме (1), вакууме (2) и в стекле (3).

Сплошная линия — численное исследование по теории Ми, волнистая линия — оценка по (2).

в плазме (кривая 1) и в прозрачном газе (кривая 2). Волнистой линией отмечены результаты оценки N по (2). Видно, что (2) во всех случаях дает удовлетворительную оценку порядка величины N . В случае малого отличия показателей преломления частицы и окружающей среды (кривая 2) результаты численных исследований практически совпадают с расчетами по (2), если выполняется условие малости набега фазы β в частице [12]

$$\beta = 2|m_a - 1|\rho < 1, \quad (3)$$

где $\rho = (2\pi a n)/\lambda$ — параметр дифракции частицы в данной среде, $m_a = n_a - i x_a$ — комплексный показатель преломления вещества частицы. Результаты расчетов по теории Ми (кривая 2 на рис. 1) удовлетворительно согласуются с оценкой (2) вплоть до $a \approx 2.2$ мкм, чему соответствует набег фаз $\beta = 0.4$ ($\lambda = 0.69$ мкм, $m_a = -1.06 - i 10^{-5}$, $n = 1.0$), т. е. в области выполнения условия (3). Следует отметить, что существенные отличия показателя преломления среды и частицы и нарушение условия (3) не приводят к катастрофическим различиям результатов расчета по теории Ми и оценок по (2). Из (2) видно, что при больших отношениях a/λ

$$\lim_{a/\lambda \rightarrow \infty} N_m = \frac{4an}{\lambda} = \frac{2}{\pi} \rho. \quad (4)$$

Оценка (4) удовлетворительно согласуется с утверждением [13], что при $n=1$ величина N примерно равна параметру дифракции частицы ρ .

Угловое распределение лепестков индикатрисы рассеяния однородного шара

Из (1) следует, что при малых значениях аргумента

$$y = \frac{\lambda}{4an} \left(\frac{4.4934}{\pi} + i - 1 \right) \quad (5)$$

углы между соседними направлениями на минимумы рассеяния θ_i и θ_{i+1} не зависят от

$$\Delta\theta \approx \frac{\lambda}{2an}. \quad (6)$$

На рис. 2 приведены результаты численного исследования по теории Ми значений θ_i , $i=1, 2, \dots, N$ для частицы радиусом 1 мкм, находящейся в вакууме ($\lambda=0.6943$ мкм), в зависимости от действительной части показателя преломления n_a вещества частицы (мнимая часть показателя преломления веще-

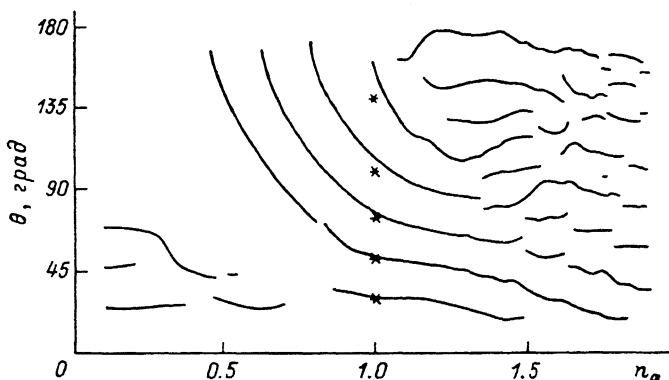


Рис. 2. Влияние показателя преломления n_a частицы радиусом 1 мкм, находящейся в вакууме, на угловые координаты минимумов индикатрисы рассеяния излучения с длиной волны 0.6943 мкм.

Сплошные линии — численное исследование по теории Ми, звездочки — оценка по (1).

ства частицы везде предполагалась равной 10^{-5}). Расчеты, результаты которых приведены в левой стороне рис. 2, где показатель преломления частицы $n_a < 1$, моделируют сгустки бесстолкновительной плазмы в воздухе. Правая часть рис. 2 характерна для слабопоглощающих аэрозольных частиц. Звездочками отмечены положения минимумов индикатрисы рассеяния, найденные по (1). Видно, что (1) дает удовлетворительную оценку положения минимумов индикатрисы рассеяния, если показатели преломления частицы и среды близки между собой. Малоугловые методы диагностики размеров дисперсной фазы опираются на независимость от показателя преломления вещества частицы угловой ширины $\Delta\theta_1$ первого максимума рассеяния света частицей. Из рис. 2 видно, что при переходе n от 0.1 до 2 величина $\Delta\theta_1$ частицы радиусом 1 мкм изменяется не более чем на 30—50%. Исключение составляют диапазоны n (0.38, 0.44) (0.7, 0.845), где первый минимум превращается в перегиб. Наличие таких особенностей существенно снижает точность малоугловой диагностики размеров частиц. Например, если вещество частицы имеет $\bar{m}=0.8-i10^{-5}$, то радиус частицы, измеренный по малоугловому рассеянию, будет занижен более чем в 2.5 раза. Если ширина первого максимума вне указанных выше и сравнительно узких диапазонов слабо зависит от показателя преломления вещества частицы, то положение и количество остальных максимумов существенно изменяется с ростом n . Сложную картину зависимости $\theta_i(n)$ на рис. 2, для которой характерны появление и исчезновение лепестков индикатрисы с ростом n , а также изменение плотности размещения минимумов, можно упрощенно прокомментировать следующим образом. С ростом n появление нового минимума инди-

катрисы рассеяния происходит вблизи направления рассеяния назад и сопровождается смещением всех лепестков индикатрисы в малоугловую область. Эту зависимость числа лепестков индикатрисы рассеяния от показателя преломления частицы можно аппроксимировать зависимостью типа (2)

$$N_m \approx \text{int} \left(4ann_a \lambda^{-1} - \frac{4.4934}{\pi} + 1 \right). \quad (7)$$

Формула (7) удовлетворительно описывает результаты, представленные на рис. 1, 2. Таким образом, формулы (1)—(7) позволяют решать обратную задачу восстановления изменения во времени радиуса частицы (сгустка плазмы) и показателя преломления вещества частицы при наличии дополнительной информации о кинетике свойств частицы. Разделить влияние a и n_a позволяют измерения на нескольких длинах волн, на которых значения $n_a(\lambda)$ заметно различаются.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что изменение показателя преломления сферической области влияет на число минимумов индикатрисы рассеяния в той же степени, в какой проявляется влияние радиуса сгустка (частицы).

Соотношения (1), (2), (7) позволяют оптимизировать разбиение апертуры приемника при численном моделировании фотоэлектрических счетчиков аэрозоля в численном решении обратной задачи нахождения кинетики оптических и геометрических свойств микроочага плазмы по исследованию пульсаций рассеяния излучения в заданном диапазоне углов.

Список литературы

- [1] Белов Н. Н. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 5. С. 14—19.
- [2] Белов Н. Н. // Взаимодействие излучения с дисперсными средами. Томск, 1988. С. 26—35.
- [3] Белов Н. Н. // Тез. докл. IV Всесоюз. совещ. по распространению лазерного излучения в дисперсной среде. Барнаул, 1988. Т. 1. С. 94—96.
- [4] Пилипецкий Н. Ф., Макишанцев Б. И., Ковалев А. А. и др. // ЖЭТФ. 1979. Т. 76. Вып. 6. С. 2026—2038.
- [5] Данилейко Ю. К., Маненков А. А., Нечитайло В. С. // Квантовая электрон. 1976. Т. 3. № 2. С. 438—440.
- [6] Данилейко Ю. К., Маненков А. А., Нечитайло В. С., Хаимов-Мальков В. И. // Тр. ФИАН. 1978. № 101. С. 75—86.
- [7] Маненков А. А. // ДАН СССР. 1970. Т. 190. № 6. С. 1315—1317.
- [8] Макишанцев Б. И. // Письма в ЖТФ. 1978. Вып. 4. С. 1275—1279.
- [9] Лысков Ю. И. // ТВТ. 1985. Т. 23. № 6. С. 1227—1229.
- [10] Белов Н. Н. Докт дис. М., 1989. 386 с.
- [11] Борен К., Хафман Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир. 1986. 660 с.
- [12] Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. М.: ИЛ, 1961. 536 с.
- [13] Лукашевич Н. Л., Шарп В. П. Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша. № 83. М., 1977. 62 с.

Научно-исследовательский
физико-химический институт
им. Л. Я. Карпова
Москва

Поступило в Редакцию
12 февраля 1990 г.