

Г.В. Григорян, С.Д. Захаров, М.А. Казарян, Н.П. Коротков,  
С.Е. Скипетров, А.Г. Таманян

## Светоиндуцированное движение микрочастиц в суспензии

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 21.02.2000 г.

Рассматривается упрощенная экспериментальная схема лазерного ускорения микрочастиц. Показано, что при расчетах процессов многократного динамического рассеяния света в случайно-неоднородных средах необходимо принимать во внимание эффекты светоиндуцированного движения частиц.

### Введение

О возможности светоиндуцированного ускорения заряженных и поляризующихся частиц было впервые указано в [1]. С появлением новых лазеров относительно большой мощности, работающих в непрерывном или в импульсном режиме, диапазон возможных методов ускорения существенно расширился [2, 3]. Проведенные вычисления для средних мощностей более 1 Вт, для видимой области спектра и пучков с расходимостью, определяемой дифракцией лазерного луча, показали, что ускорение микрочастиц в фокусе луча из-за светового давления может в десятки тысяч раз превосходить ускорение свободного падения.

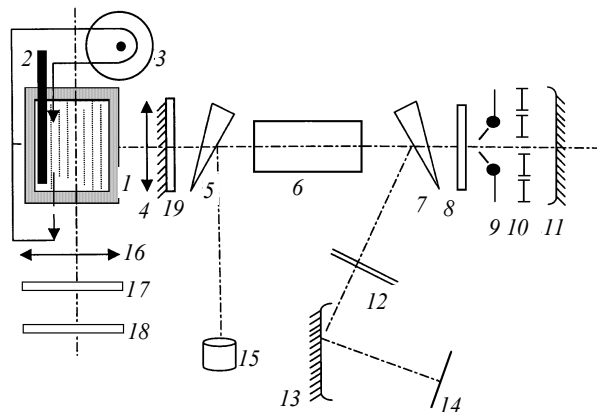
Существенно более высокие уровни ускорения могут быть достигнуты при взаимодействии лазерного излучения с поглощающими микрочастицами [4]. С развитием лазеров с высоким значением пиковой и средней мощности (импульсно-периодический лазер) рассматривались новые механизмы ускорения частиц, обусловленные микровзрывами прилегающих областей и сопровождающиеся генерацией мощных акустических ударных волн [5]. Объединенное с внутррезонаторной обработкой материалов в активных оптических системах [6] импульсно-периодическое ускорение микрочастиц позволило разработать новый технологический процесс – декоративную обработку материалов, использующих ускоренные микрочастицы.

### Метод внутррезонаторной обработки материалов в активной оптической системе

На рисунке представлена одна из схем экспериментальной установки.

Кратко опишем внутррезонаторную обработку материалов лазерным лучом, когда в кювете с суспензией частиц содержится сам объект обработки. Этот метод в настоящее время используется для обработки материалов лазерными лучами фактически любой конфигурации. Как видно из рисунка, эта система работает следующим образом: усиленное спонтанное излучение, исходящее из активной среды лазера 6, проходит через оптическую систему 4 и освещает обрабатываемый материал (объект) 2. Свет, рассеянный и отраженный объектом, еще раз собирается оптиче-

ской системой 4 в пучок, который несет информацию относительно объекта, и затем этот пучок усиливается в активной среде 6. После выхода из усилителя часть луча отражается светоделителем 7 и отражателем 13, который создает на экране 14 увеличенное изображение объекта 2. Другая часть луча, проходящая делитель 7, оптическую заслонку 9 и маску 10, отражается от зеркала обратной связи 11 и после усиления в активной среде 6 создает на поверхности объекта усиленное по яркости распределение пучка света, который соответствует конфигурации маски. Мощность луча определяется измерением мощности части луча, отраженного делителем 5 в сторону измерителя мощности 15.



Модернизированная схема экспериментальной установки для обработки материалов микрочастицами, ускоренными лазерным излучением: 1 – кювета с суспензией; 2 – обрабатываемый материал; 3 – прокатка суспензии; 4 – оптическая фокусирующая система; 5, 7 – светоделители; 6 – активная среда лазера; 8, 12, 17 – спектральные фильтры; 9 – оптическая заслонка; 10 – маска; 11, 13 – вогнутые отражающие зеркала; 14, 18 – экран для визуального наблюдения; 15 – измеритель мощности; 16 – проекционный объектив; 19 – частично отражающее зеркало резонатора

В этой схеме объект 2 и обратное зеркало 11 составляют самоспряженный резонатор. Лучи от различных точек объекта и маски смешиваются в активной среде, и их взаимодействие приводит к эффективному преобразованию средней энергии в излучение, отраженное от открытых участков зеркала 11 [7, 8]. Удельная мощность на объ-

екте более чем в  $M^2$  раз превышает мощность на открытых участках ( $M$  – увеличение оптической системы), и этот процесс может вызывать плавление, испарение и структурные преобразования освещенной части объекта 2. В то же время непрозрачные части маски фактически не подвергаются нагрузке. Следовательно, в экспериментах можно использовать диафрагмы, сделанные из черной бумаги, ткани и т.д., которые никоим образом не будут деформированы или разрушены в процессе экспериментов.

В этих экспериментах размеры полученных зон от 0,3 до 5 мкм, которые являются совместимыми с минимально допустимыми размерами для используемой оптики, рассчитаны с помощью критерия Рэлея. Этот метод имеет значение для регистрации больших объемов информации с лазерной частотой повторения импульсов  $10^4$  Гц и длительностью импульса  $10^{-8}$  с.

### Коллективное движение частиц в суспензии

Когда в указанной на рисунке схеме в качестве объекта используется кювета с суспензией частиц 1, можно ожидать, что эти частицы будут влиять на формирование светового поля и излучение будет вызывать движение частиц. В [9] было показано, что эритроциты (диаметр  $\sim 5$  мкм, масса  $10^{-10}$  г), хаотично распределенные вокруг центра суспензии, которая была первоначально в покое, после включения резонатора перемещаются в область центрального светового пятна. Клетки в центре разрушаются и образуют конгломераты размерами, которые в 5 – 10 раз превосходят размеры индивидуальных клеток. Через 20 с после формирования конгломератов движение всех частиц в световой области оказывается светоиндуцированным. Движение строго упорядочено и носит циклический характер. При известных условиях конгломераты придерживались у поверхности объекта 2 и сталкивающиеся частицы уже не могли покидать центр. Конгломераты выросли до размеров освещенной поверхности. Скорость движения эритроцитов по оценкам составляла 1 см/с.

Когда использовалась суспензия с прозрачными частицами, наблюдалось следующее. Частицы, распределенные вокруг центра, перемещались в область центрального светового пятна и удерживались там световым давлением. Характер этого специфического светодинамического эффекта, очевидно, отличается от простого захвата частиц в светоиндуцируемые ловушки [10], теоретическое описание которого давалось в [11, 12].

### Лазерное ускорение светопоглощающих частиц

Существует несколько механизмов, ответственных за ускорение микрочастиц: нагревание и движение среды (конвективное движение); нагревание поверхности поглощающей частицы (радиометрическое движение); давление при испарении частицы (реактивное давление).

При значительных коэффициентах поглощения все эти механизмы могут быть намного более определяющими, чем световое давление. Например, согласно работе [4] реактивное давление можно получить с помощью выражения

$$p_r \sim Mv_f \sim Iv / [\lambda + (l/2) v^2] \approx (p_l cv) [\lambda + (l/2) v^2],$$

где  $\lambda$  – удельная теплоемкость испарения;  $v_f$  – скорость ухода материала;

$$p_r/p_l \approx cv [\lambda + (l/2) v^2] \sim cv/\lambda \sim 10^4.$$

Такое давление может использоваться, в частности, для ускорения микрочастиц [4, 13] до скоростей  $10^6$  –  $10^8$  см/с, чтобы построить модели искусственных частиц типа микрометеоритов, которые обеспечивают большие локальные концентрации энергии в процессах столкновения частиц с поверхностью и друг с другом.

В схеме, представленной на рисунке, используется так называемое ускорение ударной волны в поле лазерного излучения [5]. В качестве сильнопоглощающих частиц использовали частицы размерами 1–10 мкм при концентрации  $10^5$  мм $^{-3}$ . Для плотностей мощности  $I \sim 10^9$  Вт/см $^2$  можно было наблюдать на экране 18 интенсивные движения частиц вдоль луча. Частицы, сталкивающиеся с кварцевой пластиной (объект 2), разрушали его поверхностный слой и некоторые из них проникали вглубь до 8–10 мкм. Конфигурация обработанной области соответствует форме маски на зеркале. При знании длины погружения  $d$  можно вычислить значение начальной скорости

$$v \approx \sqrt{\pi d 3 H \varepsilon \rho / 6 m},$$

где  $\varepsilon$  – удельная теплоемкость испарения;  $\rho$  – плотность;  $m$  – масса;  $H \approx 4-5$  – числовой фактор. Таким образом вычисляется скорость  $v_0 \sim 10^6$  см/с.

В работах [14 – 16] исследовалось поведение частиц в плотных случайно-неоднородных средах, когда светоиндуцированный поток ускоренных частиц движется внутри цилиндрической области. Методика для измерения скорости потока основана на использовании временной автокорреляционной функции рассеянного света.

### Многократное рассеивание света

Многократное рассеивание света в случайно-неоднородных средах изучается уже много лет. Наши недавние исследования показали важность рассмотрения взаимодействия света с веществом в вычислениях статистических свойств многократного рассеивания. Одна из таких особенностей состоит в учете ускорения микрочастиц при многократном рассеивании под влиянием падающего излучения. Это воздействует, в частности, на функцию временной корреляции рассеянного света.

Наши вычисления продемонстрировали, что описанное явление должно иметь два важных последствия: а) в некоторых специфических обстоятельствах пондеромоторное действие должно быть принято во внимание при интерпретации экспериментальных результатов, б) статистический анализ многократного рассеяния излучения мог бы служить инструментом для изучения явления лазерного ускорения частицы в концентрированных суспензиях. Развита теоретическая модель основана на диффузионном приближении и может использоваться с равным успехом для «а» и «б» случаев. Наши результаты указывают, что рассматриваемая методика должна найти применение на практике, например при изучении распространения мощных лазерных импульсов через атмосферные облака и водные среды с микровключениями, в решении проблемы лазерной обработки материалов и в медицинских приложениях лазеров.

1. Аскарян Г.А. // ЖЭТФ. 1962. Т. 42. № 6. С. 1567–1570.
2. Ashkin A. // Phys. Rev. Lett. 1970. V. 24. P. 156.
3. Ashkin A. // Phys. Rev. Lett. 1970. V. 25. P. 1321.
4. Аскарян Г.А., Мороз Е.М. // ЖТЭФ. 1962. Т. 43. С. 2319; 1967. Т. 45. С. 258.
5. Zakharov S.D., Kazaryan M.A., Korotkov N.P. // JETP Lett. 1994. V. 60. № 5. P. 317–319.
6. Земсков К.Л., Казарян М.А., Петраш Г.Г., Скрипченко А.С. // Краткие сообщения по физике. ФИАН. 1988. № 5. С. 30.
7. Земсков К.Л., Казарян М.А., Матвеев В.М., Петраш Г.Г., Скрипченко А.С. // Квантовая электроника. 1983. Т. 10. С. 336.
8. Казарян М.А., Матвеев В.М., Петраш Г.Г. // Квантовая электроника. 1984. Т. 11. С. 932.
9. Амбарцумян Р.В., Захаров С.Д., Земсков К.И., Казарян М.А., Коротков Н.П., Петраш Г.Г. // Краткие сообщения по физике. ФИАН. 1988. № 8. С. 35.
10. Ashkin A., Dziedzic J.M., Yamane T. // Nature. 1987. V. 330. P. 769.
11. Аскарян Г.А. // Успехи физических наук. 1973. Т. 110. № 1. С. 115–116.
12. Ashkin A. et al. // Opt. Lett. 1986. V. 11. P. 288.
13. Askarian G.A., Rabinovich M.S., Savehenko M.M., Stepanov V.K., Studenov V.B. // JETP Lett. 1967. V. 5. P. 258.
14. Скупетров С.Е., Чесноков С.С., Захаров С.Д., Казарян М.А., Коротков Н.П. и др. // Квантовая электроника. 1998. Т. 25. № 5. С. 434–438.
15. Skipetrov S.E., Chesnokov S.S., Zakharov S.D., Kazaryan M.A., Shcheglov V.A. // JETP Lett. 1998. V. 67. № 9. P. 635–639.
16. Skipetrov S.E., Zakharov S.D., Kazaryan M.A., Korotkov N.P. // J. of Moscow Physical Society. 1997. V. 7. P. 411–421.

*G.V. Grigoryan, S.D. Zakharov, M.A. Kazaryan, N.P. Korotkov, S.E. Skipetrov, A.G. Tamanyan.* **Light-induced motion of particles in suspensions.**

A simplified experimental geometry of laser-induced acceleration of microparticles is considered. We consider dynamic multiple scattering of light in random media having regard to the effect of laser radiation on particle motion.