

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ
РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

СКИПЕТРОВ СЕРГЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**ДИФФУЗИОННО-ВОЛНОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ
В СРЕДАХ С ПРОСТРАНСТВЕННО НЕОДНОРОДНОЙ
ДИНАМИКОЙ РАССЕЙВАТЕЛЕЙ**

Специальность 01.04.21 — лазерная физика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель — канди-
дат физико-математических наук
доцент Чесноков Сергей Сергеевич

Москва — 1998

Содержание

Введение	5
I Многократное рассеяние света в случайно-неоднородных средах. Диффузионно-волновая спектроскопия	15
1.1 Методы теоретического описания процессов многократного рассеяния световых волн в случайно-неоднородных средах	15
1.1.1 Метод диаграмм	16
1.1.1.1 Диаграммный ряд для средней функции Грина. Уравнение Дайсона	18
1.1.1.2 Диаграммный ряд для функции когерентности. Уравнение Бете-Солпитера	20
1.1.1.3 Приближение Бурре и лестничное приближение	21
1.1.1.4 Веерные диаграммы	22
1.1.2 Метод уравнения переноса	22
1.1.2.1 Общий вид уравнения переноса излучения	23
1.1.2.2 Метод сферических гармоник	24
1.1.2.3 Диффузионное приближение	26
1.1.2.4 Граничные условия для средней интенсивности	27
1.1.2.5 Уравнение переноса для функции временной когерентности	29
1.1.3 Метод интегралов по траекториям	30
1.1.3.1 Рассеяние на броуновских частицах	30
1.1.3.2 Рассеяние на потоках частиц	31
1.1.3.3 Метод Монте-Карло	33

1.2	Диффузионно-волновая спектроскопия	33
1.2.1	Основы диффузионно-волновой спектроскопии . .	34
1.2.2	Диффузионно-волновая спектроскопия в условиях направленных потоков рассеивателей	36
1.2.2.1	Диффузионно-волновая спектроскопия в сдвиговом потоке	36
1.2.2.2	Диффузионно-волновая спектроскопия в пуазейлевском потоке	38
1.2.2.3	Диффузионно-волновая спектроскопия в турбулентном потоке	38
1.2.3	Применения диффузионно-волновой спектроскопии	40
1.2.4	Некоторые современные тенденции в развитии диффузионно-волновой спектроскопии	41
	Выводы к главе I	42

II Динамическое многократное рассеяние света в многослойных мутных средах 44

2.1	Уравнение диффузии для временной автокорреляционной функции	44
2.1.1	Диффузия временной корреляции	45
2.1.2	Граничные условия для $G_1(\mathbf{r}, \tau)$	48
2.2	Аналитическое решение задачи динамического много- кратного рассеяния света в многослойной среде	50
2.2.1	Решение для произвольного числа слоев N	50
2.2.2	Частные случаи $N = 1, 2, 3$	54
2.2.3	Основные результаты для двухслойной среды . . .	55
2.2.4	Основные результаты для трехслойной среды . . .	57
2.2.5	Влияние поглощения на временную корреляцию рассеянного света	61

2.3	Метод Монте-Карло в задаче о динамическом многократном рассеянии света	65
2.3.1	Принцип моделирования	65
2.3.2	Изотропное рассеяние	68
2.3.3	Анизотропное рассеяние	70
	Выводы к главе II	73

III Возможности локализации и диагностики динамических неоднородностей в мутных средах **75**

3.1	Диффузия временной корреляции с учетом направленных потоков рассеивателей	76
3.2	Теоретический анализ	77
3.2.1	Расчет τ_f	79
3.2.2	Граничные условия и источники излучения	80
3.2.3	Аналитические выражения для $G_1(\tau)$	81
3.3	Сравнение теоретических результатов с экспериментальными — I	84
3.3.1	ДВС в присутствии локализованного в пространстве ламинарного потока рассеивателей	85
3.3.2	ДВС при наличии в среде области с менее интенсивным броуновским движением рассеивателей	89
3.4	Сравнение теоретических результатов с экспериментальными — II	94
3.4.1	ДВС в присутствии локализованного в пространстве ламинарного потока рассеивателей	94
3.4.2	Возможность использования ДВС для изучения различных типов динамики рассеивающих свет частиц	98
	Выводы к главе III	100

IV Динамическое многократное рассеяние в условиях светоиндуцированного движения рассеивателей	102
4.1 Эффекты лазерного ускорения микрочастиц	104
4.2 Возможности диагностики светоиндуцированного движения частиц в концентрированных суспензиях методами диффузионно-волновой спектроскопии	106
4.2.1 Постановка задачи	106
4.2.2 Расчет рассеяния на светоиндуцированном потоке	109
4.2.3 Возможность диффузионно-волновой спектроскопии в светоиндуцированных потоках	113
4.3 Роль пондеромоторного действия света в задачах диффузионно-волновой спектроскопии	116
4.3.1 Постановка задачи	116
4.3.2 Расчет временной корреляционной функции	119
4.3.3 Обсуждение результатов	124
Выводы к главе IV	128
Основные результаты и выводы	129
Приложения	133
А. Фазовая функция Хени-Гринштейна	133
Б. Условия проведения эксперимента – I	133
В. Условия проведения эксперимента – II	135
Литература	138

Введение

Одной из актуальных задач современной лазерной физики является изучение многократного рассеяния когерентного оптического излучения в случайно-неоднородных мутных средах. В последнее время интерес к этой области исследований значительно повысился в связи с возрастающим значением методов лазерной диагностики в медицинских и промышленных приложениях.

Актуальность темы исследования. Уже сравнительно давно известны методы оптической диагностики случайно-неоднородных мутных сред, основанные на анализе однократно рассеянного излучения (см., например, [1–13]). Эти методы к настоящему моменту достаточно хорошо развиты и с успехом применяются, например, для диагностики биологических сред [14–20]. В средах с высокой концентрацией рассеивающих центров, однако, интенсивность однократно рассеянного излучения оказывается слишком низкой, либо слишком сложным оказывается извлечение интересующей исследователя информации о среде из характеристик этого излучения. В такой ситуации целесообразным оказывается анализ многократно рассеянного излучения [19–24].

Одной из методик, предназначенных для оптической диагностики многократно рассеивающих свет случайно-неоднородных сред, является так называемая диффузионно-волновая спектроскопия (ДВС). Применяющий ДВС исследователь измеряет временную автокорреляционную функцию $G_2(t, \tau) = \langle I(t)I(t + \tau) \rangle$ интенсивности света, многократно рассеянного в образце случайно-неоднородной мутной среды, произ-

водит интерпретацию полученных в различных условиях зависимостей $G_2(t, \tau)$ на основе соответствующей теоретической модели и, наконец, делает выводы об интересующих его характеристиках среды (таких, например, как средний размер рассеивающих свет частиц, их распределение по размерам, характерные скорости движения и т.п.). Разработка теоретической модели, адекватно описывающей конкретную экспериментальную ситуацию, является одним из наиболее важных этапов описанной процедуры.

К началу выполнения настоящей работы теоретические основы ДВС случайно-неоднородных сред были достаточно хорошо проработаны и проверены экспериментально только в условиях *макроскопически однородных* сред, т.е. сред, в которых характеристики рассеивающих свет частиц и характер их движения неизменны во всем объеме (см., например, [22–28]). Поэтому методика ДВС могла успешно применяться только при условии, что имеется возможность получения более или менее однородного образца среды. Вместе с тем, во многих случаях желательным оказывается проведение диагностики сред с пространственно неоднородной динамикой рассеивателей, т.е. сред, разные области которых либо состоят из различных частиц, либо содержат одинаковые частицы, характер движения которых различен. Такая “сложная” геометрия образца может быть как задана самой природой (например, при диагностике кровотока в сосудах, скрытых под слоем кожи, который, в свою очередь, сам имеет сложную структуру), так и возникать в среде под действием лазерного излучения вследствие ускорения частиц среды в световом поле. В этом случае представляет интерес не только спектроскопия составляющих среду частиц, но и выяснение макроскопической структуры среды: локализация макроскопических включений, визуализация потоков и т.п.

Цель работы. Общая задача настоящей работы состояла в те-

оретическом анализе временной автокорреляционной функции когерентного лазерного излучения, многократно рассеянного в случайно-неоднородной мутной среде с *пространственно неоднородной динамикой рассеивателей*; сравнении теоретических результатов с экспериментальными; предсказании новых эффектов, следующих из теоретической модели, но пока не обнаруженных экспериментально; и, таким образом, в теоретическом обосновании применения методики ДВС в средах с пространственно неоднородной динамикой рассеивателей.

Конкретные задачи исследования включали в себя:

1. Теоретический анализ динамического рассеяния света в многослойной случайно-неоднородной среде, в пределах каждого из слоев которой рассеяние является существенно многократным. Целью такого анализа являлось изучение влияния макроскопической неоднородности среды на корреляционные свойства многократно рассеянного света.
2. Теоретический расчет и последующий анализ временной корреляционной функции излучения, многократно рассеянного в случайно-неоднородной мутной среде с локализованным в пространстве потоком рассеивателей; сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными других научных групп для выяснения адекватности теоретической модели реальным физическим процессам, происходящим в условиях многократного рассеяния.
3. Изучение возможности локализации и диагностики макроскопических неоднородностей, скрытых в толще образца и отличающихся от окружающей их случайно-неоднородной среды только динамикой составляющих их частиц (“динамических” неоднородностей); определение максимальной достижимой точности в опре-

делении размера и положения динамических неоднородностей методами ДВС.

4. Теоретический анализ динамического многократного рассеяния света при наличии в среде индуцированных лазерным излучением потоков. Целью анализа являлась разработка модификации ДВС, предназначенной для изучения эффектов лазерного ускорения микрочастиц в концентрированных суспензиях.
5. Выяснение роли эффектов лазерного ускорения микрочастиц в экспериментах по динамическому многократному рассеянию света; т.е. анализ многократного рассеяния лазерного излучения на им же самим индуцированном потоке рассеивателей.

Научная новизна и положения, выносимые на защиту. В настоящей работе впервые проведено теоретическое исследование временной автокорреляционной функции когерентного лазерного излучения, многократно рассеянного в случайно-неоднородной мутной среде с пространственно неоднородной динамикой рассеивателей. На защиту выносятся следующие положения:

1. Временная корреляция света, многократно рассеянного в случайно-неоднородной мутной среде с макроскопически неоднородной динамикой рассеивателей (в том числе, при наличии в среде локализованных в пространстве потоков рассеивателей), с достаточной точностью описывается диффузионной моделью в случаях, когда роль рассеяния низких порядков мала.
2. Полученные автором общие аналитические выражения позволяют рассчитать временную автокорреляционную функцию излучения, многократно рассеянного в многослойной случайно-неоднородной мутной среде, состоящей из произвольного числа слоев.
3. Методы ДВС применимы для локализации и диагностики мак-

роскопических динамически неоднородных областей в толще случайно-неоднородных мутных сред (в том числе и для визуализации потоков). В условиях типичных экспериментов анализ временной корреляции диффузно отраженного света позволяет получать информацию о неоднородной области до тех пор, пока она расположена не далее, чем на расстоянии $15 \div 20$ транспортных длин свободного пробега фотона ℓ^* от границы среды; геометрические размеры и положение динамически неоднородной области могут быть определены с точностью $1 \div 5\ell^*$.

4. Предложенная и теоретически обоснованная автором модификация ДВС дает возможность использовать методы ДВС для изучения эффектов лазерного ускорения микрочастиц в концентрированных суспензиях. При этом средняя скорость частиц в светоиндуцированном потоке может быть определена на основе анализа временной автокорреляционной функции многократно рассеянного в суспензии излучения.
5. В соответствии с теоретическими расчетами, выполненными автором, индуцированное лазерным излучением направленное движение рассеивающих центров в случайно-неоднородной среде приводит к уменьшению времени когерентности многократно рассеянного излучения. Эффект описывается полученными в диссертации аналитическими выражениями для временной автокорреляционной функции рассеянного света.
6. Характерная мощность сильно сфокусированного лазерного пучка, при которой эффекты лазерного ускорения микрочастиц будут играть важную роль в экспериментах по динамическому многократному рассеянию света в концентрированных суспензиях, составляет величину порядка $1 \div 10$ Вт.

Практическая ценность результатов диссертации:

1. Результаты, касающиеся рассеяния света в многослойных средах, могут быть использованы при разработке оптических методов диагностики ожогов.¹
2. Результаты исследований динамического многократного рассеяния света в случайно-неоднородных средах с локализованными в пространстве потоками рассеивателей могут найти применение при разработке методов *in vivo* диагностики кровотока в крупных сосудах и капиллярах.²
3. Предложенная в работе модификация метода ДВС, предназначенная для изучения эффектов лазерного ускорения микрочастиц в концентрированных суспензиях, может быть использована для измерения скоростей движения ускоренных лазерным излучением частиц. Полученная таким образом информация может иметь большое значение в связи с интересом к механизмам лазерного ускорения микрочастиц в суспензиях.
4. На основе проведенного в работе анализа роли эффектов лазерного ускорения микрочастиц в условиях многократного рассеяния излучения в суспензии установлено, что рамки применимости известной на сегодня теоретической модели ДВС ограничены ситуациями, когда мощность сильно сфокусированного лазерного пучка, падающего на среду, не превышает величину порядка $1 \div 10$ Вт. При бóльших мощностях необходимо принимать во внимание ускорение частиц среды под действием лазерного излучения.

¹Соответствующие исследования ведутся, например, группой А. Йода [A. Yodh] (Университет Пенсильвании, Филадельфия, США).

²Соответствующие исследования ведутся, например, группами А. Йода [A. Yodh], В.В. Тучина (Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия) и А.В. Приезжева (Московский государственный университет, Москва, Россия).

Апробация работы. Изложенные в диссертации результаты докладывались и обсуждались на Международной конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам “Ломоносов-97” (Москва, Россия, 1997 г.), Второй международной конференции “Новые лазерные технологии и применения лазеров” (Олимпия, Греция, 1997 г.), IV Симпозиуме “Оптика атмосферы и океана” (Томск, Россия, 1997 г.), Молодежной научной школе по оптике, лазерной физике и оптоэлектронике “Проблемы оптической физики” (Саратов, Россия, 1997 г.), Школе НАТО “Диффузионные волны в сложных средах” (Лезуш, Франция, 1998 г.), XVI Международной конференции по когерентной и нелинейной оптике (Москва, Россия, 1998 г.), Международной конференции по биомедицинской оптике “BiOS Europe’98. The European Biomedical Optics Week” (Стокгольм, Швеция, 1998 г.), Международном междисциплинарном научном семинаре и осенней школе молодых ученых “Методы светорассеяния в механике, биомедицине и материаловедении” (Саратов, Россия, 1998 г.). Кроме того, часть результатов докладывалась автором на объединенном семинаре кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ и Международного учебно-научного лазерного центра МГУ, на семинаре Оптического отдела ФИАН им. П.Н. Лебедева, на семинаре УНЦ “Оптика и спектроскопия”.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, в том числе статьи:

1. Skipetrov S.E., Maynard R. Dynamic multiple scattering of light in multilayer turbid media. *Phys. Lett. A*, 1996, v. **217**, № 2,3, p. 181–185.
2. Heckmeier M., Skipetrov S.E., Maret G., Maynard R. Imaging of dynamic heterogeneities in multiple-scattering media. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, v. **14**, № 1, p. 185–191.

3. Skipetrov S.E., Kazaryan M.A., Korotkov N.P., Zakharov S.D. Diagnostics of laser-induced particle motion in dense random media using temporal field correlation. *J. Moscow Phys. Soc.*, 1997, v. **7**, № 4, p. 411–420.
4. Скипетров С.Е., Чесноков С.С. Возможности локализации и диагностики динамических неоднородностей в сильно рассеивающих свет мутных средах. *Оптика атмосферы и океана*, 1997, т. **10**, № 12, с. 1493–1499.
5. Skipetrov S.E., Maynard R. Diffusing wave spectroscopy in dynamically heterogeneous random media. In: *Proceedings of the 2nd GR-I International Conference on New Laser Technologies and Applications* (Olympia, Greece, June 1–4, 1997), ed. Carabelas A. *Proc. SPIE*, 1998, v. **3423**, p. 252–257.
6. Skipetrov S.E., Kazaryan M.A., Korotkov N.P., Zakharov S.D. Multiple light-scattering probes of laser-induced particle flows in random media: theoretical consideration. *Physica Scripta*, 1998, v. **57**, № 3, p. 416–419.
7. Скипетров С.Е., Меглинский И.В. Диффузионно-волновая спектроскопия в случайно-неоднородных средах с локализованными в пространстве потоками рассеивателей. *ЖЭТФ*, 1998, т. **113**, вып. 4, с. 1213–1222.
8. Скипетров С.Е., Чесноков С.С., Захаров С.Д., Казарян М.А., Коротков Н.П., Щеглов В.А. Многократное динамическое рассеяние лазерного излучения на светоиндуцированной струе микрочастиц в суспензии. *Квантовая Электроника*, 1998, т. **25**, № 5, с. 447–451.
9. Скипетров С.Е., Чесноков С.С., Захаров С.Д., Казарян М.А., Щеглов В.А. Пондеромоторное действие света в задаче о многократном рассеянии света в случайно-неоднородной среде. *Письма в*

ЖЭТФ, 1998, т. **67**, № 9, с. 611–615.

10. Skipetrov S.E. Effect of absorption on temporal correlation of light scattered from turbid medium. *Opt. Commun.*, 1998, v. **152**, № 4–6, p. 229–232.
11. Скипетров С.Е., Чесноков С.С. Анализ методом Монте-Карло применимости диффузионного приближения для анализа динамического многократного рассеяния света в случайно-неоднородных средах. *Квантовая Электроника*, 1998, т. **25**, № 8, с. 753–757.

и тезисы докладов на конференциях:

12. Skipetrov S.E., Maynard R. Diffusing wave spectroscopy in dynamically heterogeneous media. In: *2nd GR-I International Conference on New Laser Technologies and Applications. Abstracts of reports* (Olympia, Greece, June 1–4, 1997), p. 78–79.
13. Скипетров С.Е., Чесноков С.С. Возможности локализации и диагностики динамических неоднородностей в сильно рассеивающих свет мутных средах. В сборнике: *IV Симпозиум “Оптика атмосферы и океана”. Тезисы докладов* (ИОА СО РАН, Томск, 10–13 июня 1997 г.), с. 55–56.
14. Меглинский И.В., Скипетров С.Е. Диффузионно-волновая спектроскопия как вариант оптической корреляционной спектроскопии. В сборнике: *Проблемы оптической физики. Материалы молодежной научной Школы по оптике, лазерной физике и оптоэлектронике* (Саратов, Россия, ноябрь 1997 г.), с. 108–109.
15. Скипетров С.Е. Многократное рассеяние света в случайно-неоднородных средах со сложной динамической структурой. В сборнике: *Труды XI Всероссийской школы-конференции по дифракции и распространению волн* (МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 12–15 января 1998 г.), с. 249.

16. Skipetrov S.E., Chesnokov S.S., Zakharov S.D., Kazaryan M.A., Korotkov N.P., Shcheglov V.A. Dynamic multiple scattering of laser radiation on light-induced flows of microparticles in suspension. In: *XVI International Conference on Coherent and Nonlinear Optics. Technical Digest* (Moscow, Russia, June 29–July 3, 1998), p. 139.
17. Skipetrov S.E., Chesnokov S.S., Meglinsky I.V., Tuchin V.V. Diffusing-wave spectroscopy of flows. In: *XVI International Conference on Coherent and Nonlinear Optics. Technical Digest* (Moscow, Russia, June 29–July 3, 1998), p. 290.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, приложений и списка литературы. Первая глава содержит обзор литературы по теме исследования, а в главах со второй по четвертую излагаются оригинальные результаты, полученные автором. Объем диссертации — 153 страницы, включая 24 рисунка, оглавление и список литературы, состоящий из 164 наименований.
