

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., профессора Зимнякова Дмитрия Александровича о диссертационной работе Соколовской Ольги Игоревны «Влияние упругого рассеяния света на эффективность поглощения и комбинационного рассеяния света в средах с неоднородностями субмикронного размера», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика

Диссертационная работа О.И. Соколовской посвящена исследованию эффективности процессов поглощения и комбинационного рассеяния в условиях многократного упругого рассеяния света. Эффект повышения локальной плотности мощности в многократно рассеивающих средах может быть применен для усовершенствований оптических технологий в различных областях современной науки и техники. Оптические методики как неинвазивной диагностики, так и терапевтического воздействия на биологические ткани, повышение информативности ряда оптических методов исследования неоднородных сред (например, комбинационного рассеяния света), развитие технологии получения химически чистых наночастиц путем импульсной лазерной фрагментации светорассеивающих мишеней требуют детального учета процесса упругого рассеяния света в случайно-неоднородной среде. Определение оптимальных условий для достижения поставленных целей в вышеуказанных задачах является темой настоящего исследования, которая, несомненно, является **актуальной**.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографии. Общий объем работы составляет 145 страниц и включает в себя 49 рисунков и 12 таблиц. Список литературы содержит 255 наименований.

Во **введении** приведены общие сведения о диссертационной работе, такие как актуальность выбранной темы исследования, цели и задачи, научная новизна и практическая значимость, выносимые на защиту положения, а также информация о публикациях соискателя и данные об апробации результатов работы.

Первая глава содержит описание основных подходов, которые автор диссертации использовал для исследования распространения света в средах с субмикронными неоднородностями, выполнен краткий литературный обзор рассмотренных в диссертации задач. Приведено описание теории Ми для одиночной сферической частицы, метода Монте-Карло, корреляционного метода измерения времени жизни фотонов в мутных средах. Обсуждаются свойства оптически неоднородных сред в условиях контролируемого упругого рассеяния. Рассмотрены физические аспекты задачи фотогипертермии биотканей в присутствии кремниевых наночастиц, описана задача получения

химически чистых наночастиц кремния путем импульсной лазерной фрагментации микрочастиц кремния в водной среде.

Во **второй главе** представлены результаты численного моделирования фотогипертермии подкожной опухоли с введенными в нее кремниевыми наночастицами. Наночастицы получены методом абляции случайно-неоднородных кремниевых подложек в жидкостях, и для них были рассчитаны оптические характеристики. Введение наночастиц в злокачественную биоткань толщиной до нескольких миллиметров в концентрации не менее 5 мг/мл позволяет достичь температур выше 42°C в биоткани, при этом нагрев ограничен областью опухоли. Следует отметить, что в отсутствие наночастиц при значениях интенсивности облучения, меньших порога теплового разрушения биоткани, эффект гипертермии недостижим.

В **третьей главе** продемонстрирована роль упругого рассеяния света в достижении фазовых переходов в водных суспензиях кремниевых микрочастиц в результате их пикосекундного лазерного возбуждения. Показано, что характер зависимости массы образующегося после облучения суспензии одиночным лазерным импульсом расплава и испаренного кремния от концентрации исходного микропорошка определяется длиной волны облучения. Так, наличие поглощения излучения буферной средой приводит к формированию двух центров плавления – при низких концентрациях частиц центр находится в области фокуса излучения, а при высоких – в приповерхностном слое суспензии.

В **четвёртой главе** приведены результаты поиска пределов увеличения эффективности комбинационного рассеяния света в условиях упругого рассеяния света и исследований динамики фотонов в суспензиях. Для рассеивающих частиц размером до 5 мкм в результате Монте-Карло моделирования установлено, что рост величины обратно рассеянного сигнала комбинационного рассеяния света (КРС) в суспензии ДМСО по сравнению с сигналом в чистом ДМСО составляет до 7.5 раз. Как эксперимент, так и численное моделирование показали, что использование линзы для сбора излучения КРС приводит к уменьшению роста величины сигнала обратно рассеянного КРС в ДМСО, при этом объемная доля частиц, при которой реализуется данный максимум, сдвигается в область больших концентраций рассеивателей.

Заключение содержит сведения об основных результатах работы, библиографический список опубликованных работ автора по теме диссертации и общий список цитируемой литературы.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, в достаточной степени опубликована в соответствующих предметной области научных изданиях (в том числе и высокорейтинговых) и апробирована в форме докладов на всероссийских и международных конференциях. В каче-

стве основных **достоинств работы** можно выделить следующие:

1) выраженный междисциплинарный характер данного исследования, обусловленный многообразием решаемых фундаментальных и прикладных задач, относящихся к лазерной медицине, технологиям синтеза дисперсных наноструктурированных систем и лазерной диагностике случайно-неоднородных сред; решение этих задач в работе проведено в рамках единого подхода на основе современных представлений о влиянии упругого рассеяния света на перенос излучения в многократно рассеивающих случайно-неоднородных средах;

2) высокий уровень научной новизны и оригинальности полученных результатов, имеющих несомненное практическое значение; в первую очередь это относится к результатам в части лазерной гипертермии злокачественных новообразований биотканей, эффективность и селективность которой существенно увеличивается в результате введения в патологические участки кремниевых наночастиц; в части синтеза кремниевых наночастиц путем воздействия на исходные материалы пикосекундных лазерных импульсов; и в части увеличения эффективности возбуждения сигналов комбинационного рассеяния света при многократном рассеянии как излучения накачки, так и КР отклика среды;

3) несомненный высокий профессионализм автора работы в части владения современными экспериментальными и теоретическими методами исследования в области оптики случайно-неоднородных сред и статистической оптики.

Автореферат в полной мере соответствует тексту диссертационной работы.

В то же время к работе имеются некоторые замечания:

1) На мой взгляд, разделы 1.1 и 1.2 главы 1 перегружены излишне подробным описанием вывода основных соотношений теории Ми для рассеяния электромагнитных волн на сфере (стр. 14 – 17) и особенностей генерации случайных величин в Монте-Карло моделировании (стр. 19 – 21); без потери качества работы, эти фрагменты текста могли бы быть существенно сокращены и обобщены (тем более, что в тексте присутствуют ссылки на основополагающие источники по этим вопросам, в частности, на монографию Борена и Хаффмена);

2) В тексте работы местами встречаются несколько неудачные формулировки и не совсем корректные утверждения; в частности, раздел 1.1, стр. 13: «Для такой частицы интенсивность рассеяния плавно меняется с направлением рассеяния - пропорционально квадрату косинуса угла рассеяния»; это утверждение справедливо в дипольном приближении только в случае падающей и рассеянной волн, поляризованных в плоскости рассеяния; для орто-

гонально поляризованных волн распределение плотности потока энергии рассеянного света по углу рассеяния будет изотропным; стр. 15, «Если среда, в которую помещены частицы, является непоглощающей, то разность $U_0 - U$ определяется поглощением в частицах и рассеянием на них» - обычно рассматривается не разность $U_0 - U$, а отношение этих величин; стр. 16, «со соответствующими скоростями изменения энергий» - эти величины традиционно определяются в физике как потоки энергии; стр. 17, теория Ми [...хорошо описывает рассеяние света в коллоидном растворе] – некорректное утверждение; стр. 37 – «стохастический метод Монте-Карло» - это «масло масляное»; и далее по тексту;

3) Стр. 31, уравнения 1.14 и 1.15; строго говоря, в диффузионном приближении зависящий от времени коэффициент диффузного отражения от слоя определяется не геометрической, а эффективной толщиной слоя $L+l_{ext1}+l_{ext2}$, где l_{ext1} , l_{ext2} – длины экстраполяции для верхней и нижней границ слоя; при значениях транспортной длины, существенно меньших толщины слоя, можно считать что эффективная толщина приблизительно равна геометрической толщине, однако это следует оговаривать;

4) Стр. 59, таблица 2.2; приведенные данные вызывают некоторое недоумение; в работе следовало бы объяснить существенное (более чем в 7 раз) различие в коэффициентах поглощения водных суспензий наночастиц мезопористого и микропористого кремния на 633 нм и отсутствие различия на 800 нм;

5) Моделирование процесса лазерной гипертермии опухолей (стр. 65 – 71) осуществлялось для длины волны лазерного источника 633 нм; исходя из длины волны, можно предположить, что в качестве источника рассматривался гелий-неоновый лазер; используемое значение плотности мощности (0.5 Вт/см^2 , рис. 2.6) недостижимо для подобных лазеров (максимальная выходная мощность порядка 100 мВт при диаметре пучка порядка миллиметра; расширение пучка до 1 см в диаметре приведет к значениям плотности мощности, многократно меньшим в сравнении с указанной величиной); в экспериментах же (стр. 81 – 83) использовался же полупроводниковый лазер с длиной волны 660 нм; следовало бы объяснить выбор длины волны 633 нм при моделировании.

Указанные замечания имеют частный характер и не умаляют общего положительного впечатления о работе, которая представляет собой законченное научное исследование, в полной мере удовлетворяющее критериям актуальности, научной новизны и практической значимости для предметной области и свидетельствующее о том, что ее автор состоялся как ученый с высокими исследовательским потенциалом и мотивацией.

Считаю, что диссертация «Влияние упругого рассеяния света на эффективность поглощения и комбинационного рассеяния света в средах с не-

однородностями субмикронного размера» соответствует специальности 1.3.6. «Оптика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определённым пп. 2.1–2.5 «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к кандидатским диссертациям, и оформлена согласно приложениям № 8 и 9 «Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова», а её автор — Соколовская Ольга Игоревна — заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. «Оптика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Физика»
Физико-технического института
Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Зимняков Дмитрий Александрович

«30» мая 2024 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (8452) 99-86-24

E-mail: phys@sstu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена докторская диссертация:

01.04.05 — «Оптика»

Адрес места работы:

410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77, корпус 1.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Телефон: 99-86-03; e-mail: sstu_office@sstu.ru

«Подпись Зимнякова Дмитрия Александровича ЗАВЕРЯЮ»:

Учёный секретарь Ученого совета
СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Потапова А.В.