

ОТЗЫВ

официального оппонента к.ф.-м.н. Доленко Татьяны Альдефонсовны
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.

Рассмотренными в работе рассеивающими средами являются суспензии, а также биоткани: первые нередко служат субстратом для лазерных методов фабрикации нанообъектов, а вторые являются объектом оптической тераностики, предполагающей введение в биоткань агентов, модифицирующих оптические свойства тканей с целью достижения селективности воздействия. Эффект комбинационного рассеяния света (КРС) широко используется как в методах идентификации веществ, так и в некоторых разработках новых источников излучения. Таким образом, определение условий, при которых становится возможен рост эффективности процессов поглощения и комбинационного рассеяния света в средах с контролируемой долей упруго рассеивающих свет неоднородностей за счет многократного рассеяния света в них является **актуальной** задачей междисциплинарного характера.

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

Во **Введении** изложены актуальность диссертационной работы и степень ее разработанности, сформулирована цель и основные задачи исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту, отмечена их научная новизна и практическая значимость, приведены основные публикации и доклады по теме диссертации, обоснована достоверность полученных результатов.

В **первой главе** приводится информация о современном состоянии исследований по распространению света в сильнорассеивающих средах. Приведено описание теории Ми и метода Монте-Карло (МК), используемых в работе для исследования оптических свойств одиночных рассеивателей и расчета оптического отклика мутной среды. Введены оптические характеристики сред с рассеивающими и поглощающими частицами, необходимые для дальнейших расчетов в работе. Описаны преимущества и ограничения, а также особенности применения метода МК для моделирования распространения света в исследуемых суспензиях, например, способ реализации генера-

тора случайных чисел с заданной функцией распределения вероятности, оптимизационный метод «русской рулетки» для повышения вычислительной скорости моделирования. Обсуждаются методы исследования динамики фотонов в случайно-неоднородных средах, обоснованы условия применения с этой целью диффузионного и интерференционного приближений, а также оптического гетеродинамирования. Рассмотрена эффективность применения теории рассеяния света в биотканях. Подробно описано современное состояние применения кремниевых наночастиц в качестве наноагентов для фотодиагностики и в тераностике.

Вторая глава посвящена исследованию влияния упругого рассеяния света в биотканях, содержащих кремниевые наночастицы (КНЧ), на их эффективность при фотодиагностике подкожной опухоли. Представлены результаты расчета с помощью теории Ми рассеивающих и поглощающих свойств двухслойной и трехслойной моделей карциномы человека с введенными в нее кремниевыми наночастицами разных размеров. Следует отметить важность рассчитанных коэффициентов рассеяния и поглощения, а также фактора анизотропии для такой биоткани, так как измеренные другими методами указанные параметры, например, с помощью спектрофотометрии, неспособны учитывать вклады наночастиц всех размеров. А такой учет чрезвычайно важен при использовании КНЧ, полученных абляцией различных мишеней в различных буферных средах. Рассчитанные оптические параметры были использованы для численного моделирования объемного распределения объемной плотности поглощенного света биотканью при ее лазерном облучении пучком непрерывного неполяризованного излучения с однородным распределением интенсивности. Методом Монте-Карло были получены карты поглощения световой мощности двухслойной и трехслойной моделями опухоли. Проведен очень подробный и глубокий анализ зависимости поглощаемого опухолью света от целого ряда факторов: наличия и отсутствия КНЧ, свойств самих частиц (условий их синтеза, их размеров, оптических характеристик), оптических свойств биоткани, параметров лазерного излучения (длин волн, распределения интенсивности в пучке), глубины проникновения излучения в опухоль и здоровые ткани, концентрации КНЧ и др. Результаты этого анализа чрезвычайно важны и необходимы для создания КНЧ с оптимальными оптическими параметрами для обеспечения достаточного поглощения во всем объеме опухоли с целью ее эффективного нагрева.

Подобный тщательный анализ был проведен и для результатов расчета распределений температур в биоткани в условиях объемного распределения источников нагрева. Были получены температурные профили по глубине и ширине, которые позволили сделать важный вывод о теоретической возможности полного прогрева опухоли в присутствии КНЧ до температур, превышающих 42°C , и о недостаточном нагреве в случае облучения опухоли с такой же интенсивностью в отсутствие КНЧ. Полученная информация о кине-

тике нагрева биоткани необходима при разработке протокола проведения гипертермии, а также для разработки рекомендаций по оптимальному времени облучения опухоли, поскольку окружающие здоровые ткани нежелательно излишне нагревать.

Третья глава посвящена изучению теплового механизма в процессе лазерной фрагментации микрочастиц в воде посредством их облучения пикосекундными импульсами. Представлены теоретические результаты исследования влияния упругого рассеяния света на эффективность фазовых переходов в суспензиях микропорошка кремния при пикосекундном лазерном возбуждении. Создана численная модель распространения сфокусированного пикосекундного лазерного импульса в водной суспензии кремниевых микрочастиц (КМЧ) и методом Монте-Карло рассчитано распределение энергии, поглощенной частицами при облучении одним таким лазерным импульсом. С учетом рассчитанных по теории Ми диапазонов изменения коэффициентов рассеяния и поглощения суспензий КМЧ при изменении температуры от $T_0 = 300\text{K}$ до $T_{\text{исп}} = 3473\text{K}$ с помощью итеративной методики были получены пространственные распределения энтальпии и температур в суспензии. Следует отметить скрупулезный учет в расчетах изменений физических характеристик кремния (удельных теплот процессов и плотностей частиц) в условиях фазовых переходов - при нагреве кремния до температуры плавления, для полного расплава, для дальнейшего нагрева до температуры испарения и полного испарения. Значимыми результатами являются полученные зависимости масс расплава и испаренного кремния от концентрации исходных микрочастиц для двух длин волн лазерных импульсов (532 и 1064 нм), которые позволили оценить оптимальные концентрации микрочастиц в суспензиях с точки зрения минимального расхода субстрата для лазерной фрагментации и обеспечения достаточной эффективности плавления.

В четвертой главе приведены теоретические и экспериментальные результаты исследования влияния упругого рассеяния света на динамику фотонов и эффективность КРС в суспензиях субмикронных и микронных частиц. Объектами исследования служили суспензии порошков рутила (с диаметром 0.5 мкм) и фосфида галлия GaP (с диаметром 3 мкм) в диметилсульфоксиде. Методом Монте-Карло была рассчитана зависимость мощности отраженного суспензией сигнала от времени. Экспериментально с помощью оптического гетеродинамирования была определена динамика диффузного отражения света суспензиями диоксида титана и фосфида галлия в DMSO, что позволило рассчитать среднее время пребывания фотонов в суспензиях. Следует отметить высокое качество проведенного эксперимента: для повышения точности результатов кросс-корреляционные функции падающего фемтосекундного лазерного импульса и импульса, рассеянного суспензией в обратном направлении, измерялись по 10 раз. О высоком уровне полученных теоретических и экспериментальных результатов свидетельствует очень хорошее согласие

средних времен жизни фотонов для суспензий TiO_2 и просто хорошее согласие для суспензий GaP, а также корректное объяснение имеющихся небольших расхождений. Для выработки рекомендаций об оптимальных параметрах суспензии, обеспечивающих максимальный сигнал КРС суспензией в геометрии обратного рассеяния, было выполнено численное моделирование распространения света в исследуемых суспензиях с варьируемой объемной долей частиц. Расчеты распространения излучения в суспензиях в рамках модели независимых рассеивателей показали, что посредством изменения объемной доли частиц в суспензии, материалов частиц и буферной среды, а также длины волны облучения возможно повысить интенсивность обратно-рассеянного сигнала КРС до 7.5 раз.

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 апробирована публикациями в соответствующих исследовательской области научных журналах (в том числе высокорейтинговых) и докладами на конференциях различного уровня, что подтверждает высокую квалификацию автора. В работе получен ряд результатов, носящих как прикладной, так и фундаментальный характер. Результаты не вызывают сомнения с точки зрения их научной новизны, значимости и достоверности. Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается грамотным применением теоретических методов, использованием современных экспериментальных методов исследования и тщательностью проведения экспериментов. Задачи, поставленные в работе, выполнены полностью, выводы соответствуют полученным результатам.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

В то же время к работе имеется ряд замечаний:

1. В Главе 2 (стр.56) при исследовании влияния упругого рассеяния на эффективность фотопертермии опухоли, содержащей кремниевые наночастицы (КНЧ), сказано, что используемая модель предполагает: после введения в биоткань КНЧ содержатся только в области, соответствующей опухоли. На каком основании утверждается, что КНЧ попадают целенаправленно в опухоль и не находятся в здоровых клетках вокруг опухоли? Есть какие-нибудь доказательства или наблюдения этого эффекта?

2. В Главе 2 (стр. 59) указано, что значения коэффициентов поглощения μ_a , коэффициентов экстинкции μ_t , фактора анизотропии g для суспензий КНЧ были «восстановлены путем анализа данных измеренных спектров коллимированного пропускания, диффузного пропускания и отражения с использованием инверсного метода Монте-Карло ... и представлены в таблице 2.2.». К сожалению, описания проведения этих работ, представления полученных спектров, обработки спектрального материала

и т.д. нет в диссертации.

3. В целом, во всех Главах диссертационной работы для обоснования моделей и ее параметров при расчетах очень много различных характеристик извлекалось из литературы. Какой был критерий выбора этих характеристик, например, в случае, когда они для одной и той же ситуации противоречили друг другу или существенно различались?

4. Глава 3 (стр.85). При исследовании распространения сфокусированного пикосекундного лазерного импульса в водной взвеси кремниевых микрочастиц рассматривался пикосекундный импульсный лазер с параметрами: энергия 16 мДж, длительность импульса 34 пс, частота следования импульсов 10 Гц, длина волны 1064 нм. Это значит, что мощность в импульсе составляла примерно 470 МВт. Да еще лазерное излучение сфокусированное. В работе утверждается: «Для низкой частоты следования импульсов суспензия практически полностью остывает до первоначальной температуры за время между лазерными импульсами (0.1 с), поэтому при моделировании достаточно рассмотреть поглощение энергии одного лазерного импульса.» Корректно ли это предположение, для которого проведено моделирование в работе?

5. В Главе 4 (стр.114) спектры комбинационного рассеяния света взвесью микрочастиц в ДМСО были разложены на кривые Лоренца. Каким методом проводилось это разложение? Почему использовались именно функции Лоренца?

6. Текст не свободен от опечаток и пунктуационных ошибок. В ряде формул и Таблиц - (1.1.) (1.2а), (1.2б), Таблицы 2.1., 2.2. и др. - нет описания некоторых величин. Например, в формуле (1.1) не указано, что обозначают символы Θ , r , n , m .

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертационная работа Соколовской Ольги Игоревны является актуальным и высоко значимым научным исследованием, обладающим значительным потенциалом для развития результатов работы для практических применений в биомедицине. На защиту вынесено самостоятельное, оригинальное и завершенное научное исследование. Автор диссертации продемонстрировал высокую квалификацию на всех стадиях работы над диссертацией от теоретического моделирования, подготовки и проведения эксперимента до анализа и публикации результатов.

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

мым 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 — Соловская Ольга Игоревна — заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
кафедры квантовой электроники физического
факультета Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова

Доленко Татьяна Альдефонсовна

«3» июня 2024 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (495) 939-16-53

E-mail: chair@shg.phys.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена кандидатская диссертация:

01.04.03 Радиофизика, включая квантовую радиофизику

Адрес места работы:

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования
и науки «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносо-
ва» (МГУ им. М.В. Ломоносова), физический факультет

Телефон: +7 (495) 939-16-82; e-mail: info@physics.msu.ru

«Подпись Доленко Татьяны Альдефонсовны ЗАВЕРЯЮ»:

учёный секретарь физического
факультета МГУ им. М.В. Ломоносова
доктор физико-математических наук, доцент

Стремоухов С.Ю.