

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева

Российской академии наук

д. ф.-м.н., член-корреспондент РАН

Н.Н. Колачевский

«28» декабря 2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Гришина Михаила Ярославовича «Спектроскопия спонтанного и вынужденного комбинационного рассеяния нано- и пикосекундных лазерных импульсов в воде», представленную на соискание учёной

степени кандидата физико-математических наук по специальности

01.04.21 – Лазерная физика

Диссертационная работа М.Я. Гришина «Спектроскопия спонтанного и вынужденного комбинационного рассеяния нано- и пикосекундных лазерных импульсов в воде» посвящена изучению особенностей процессов, протекающих при комбинационном рассеянии лазерных импульсов нано- и пикосекундной длительности в воде.

Актуальность работы. Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КР) является эффективным неразрушающим методом изучения строения вещества и поэтому высоко востребована в исследованиях сложных объектов. Особый интерес представляет изучение воды и водных растворов, которые являются основой существования живых организмов и растений. С другой стороны, акватории Земли являются основным аккумулятором энергии и смягчают вариации климата. Одной из спектральных особенностей воды является то, что в спектре спонтанного КР доминирует интенсивная полоса аномально большой ширины (до 400 см^{-1}), соответствующая валентным О-Н колебаниям (ОН-полоса). Температурная деформация ОН-полосы широко применяется для дистанционного измерения температуры воды как в условиях лаборатории, так и в натурных экспериментах. Кроме того, известно, что ОН-полоса меняет форму при изменении давления в воде, что даёт возможность дистанционного измерения давления по спектрам КР.

Особый интерес для исследования физических свойств воды представляет вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР). Важная особенность ВКР в том, что нарастание его интенсивности имеет экспоненциальную зависимость от накачки, и даже малые изменения оптических свойств среды оказывают существенное влияние на процесс генерации ВКР, что делает его чувствительным инструментом для исследования физических свойств вещества.

Таким образом, изучение физических свойств воды методами спонтанного и вынужденного комбинационного рассеяния пико- и наносекундных импульсов при различных воздействиях на воду является актуальным и представляет как научный, так и практический интерес.

Структурно диссертация состоит из введения, списка публикаций автора, четырёх глав, заключения и списка литературы.

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований.

В **первой главе** приводится обзор литературы по теме спектроскопии спонтанного КР в воде. Описываются существующие модели, объясняющие структуру и аномально большую ширину OH-полосы. Рассмотрено влияние температуры и давления на форму огибающей OH-полосы. Проведён обзор литературы на тему дистанционного лазерного измерения температуры воды по спектрам спонтанного КР. Приведены сведения об использовании лазерной спектроскопии в дистанционном зондировании, в том числе при зондировании природных водоёмов. Приведены сведения о вынужденном комбинационном рассеянии света, рассмотрена теория этого явления и особенности в изменениях пороговой энергии ВКР в различных исследуемых образцах, при различной длительности импульсов накачки и фокусировке пучка накачки в объём образца либо на поверхности. Также рассмотрены опубликованные в литературе результаты исследований спектрального состава компонент ВКР.

Во **второй главе** представлены схемы и описания экспериментальных установок, использованных в работе для спектроскопии спонтанного и вынужденного комбинационного рассеяния света. Описаны основные компоненты компактного спектрометра комбинационного рассеяния, и приведены характеристики использованных лазеров.

В **третьей главе** представлены результаты исследований по спектроскопии спонтанного КР в условиях лаборатории и натурного эксперимента. Рассмотрено дистанционное измерение температуры воды с помощью спектроскопии спонтанного КР. Проведено сравнение точности измерения температуры по деформации профиля OH-полосы в спектре КР альтернативными методами. Обсуждается использование частоты гравитационного центра OH-полосы (полученной с помощью метода «взвешивания») как параметра порядка структурных перестроек комплексов молекул H₂O (числа водородных связей в единице объёма). Представлены результаты экспериментов по спектроскопии спонтанного комбинационного рассеяния света в воде при воздействии акустическими полями с сильным перепадом давления в фокусе ультразвукового пучка. Приведены результаты натурных экспериментов по лазерному дистанционному зондированию пресноводной акватории в условиях высокой концентрации фитопланктона («цветение воды»), а также результаты лабораторных экспериментов по обнаружению кавитационных следов гребного винта.

В **четвёртой главе** представлены результаты экспериментальных исследований зависимости пороговой энергии ВКР от положения перетяжки фокусированного пучка

пикосекундных импульсов накачки относительно границы раздела жидкость/воздух. Было обнаружено, что при перемещении перетяжки пучка лазерных импульсов длительностью 15 пс из объёма воды через открытую поверхность зависимость пороговой энергии ВКР от расстояния между перетяжкой и поверхностью имеет N-образный вид с падением порога в ~30 раз, когда перетяжка пучка расположена на поверхности воды. Предложено объяснение наблюдаемого явления с привлечением механизма распределённой обратной связи в объёме образца при ВКР-генерации. Приведены результаты исследования спектрального состава и пространственной структуры пучков ВКР при рассеянии вперёд. Предложено объяснение наблюдаемой спектральной и пространственной структуры излучения ВКР при рассеянии вперёд. На основе данных спектральных измерений и геометрии эксперимента проведены расчёты и предложена схема четырёхволновой параметрической генерации двух первых стоксовых и антистоксовых компонент ВКР.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Диссертация М.Я. Гришина представляет собой последовательное и целостное исследование, изложенное хорошим научным языком. Достоинством диссертации является проведение широкого круга экспериментов по спектроскопии спонтанного и вынужденного КР водных образцов в лабораторных и натурных условиях.

Полученные в работе результаты имеют важную научную и практическую значимость. Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КР) является мощным неразрушающим методом изучения строения вещества. Исследованные в работе особенности спонтанного и вынужденного КР нано- и пикосекундных лазерных импульсов в воде открывают новые возможности для изучения структуры воды, а также для создания новых источников когерентного излучения с низким порогом генерации.

Все результаты, представленные автором, являются новыми. Достоверность результатов обеспечена публикацией основных результатов в высокорейтинговых рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК и апробацией на международных конференциях. Экспериментальные данные, полученные в работе, не только не противоречат данным, полученным другими исследователями, но также демонстрируют преимущество применяемых автором подходов в решении поставленных задач.

Результаты работы могут быть использованы в российских научных организациях, занимающихся исследованиями и практическим применением спектроскопии комбинационного рассеяния света, например в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова и Институте океанологии им П.П. Ширшова РАН.

По диссертации М.Я. Гришина имеются следующие замечания:

1. Одним из главных результатов Главы 4 является обнаружение необычных N-образных зависимостей порога ВКР. Из рисунка 25 (стр.63) видно, что N-образные характеристики

- для воды, тяжёлой воды и жидкого азота отличаются крутизной участков подъёма и спада порога. Нет должного объяснения того, чем могут быть обусловлены данные различия.
2. В описании установки для экспериментов по вынужденному комбинационному рассеянию (ВКР, Глава 2, параграф 2.4, стр.35) нет точного пояснения, как определялся порог ВКР. Учитывая важность этого параметра, необходимо точное описание экспериментальной процедуры его измерения.
 3. В разделе «Научная новизна» на стр.6 раздела Введение в пункте 6 заявлено достижение синхронизированной гребёнки узкополосных компонент ВКР. Корректность использования термина «гребёнка» для данного случая требует пояснений.
 4. В разделе 3.4.2, описывающем лазерное дистанционное зондирование кавитационных следов гребного винта, на рисунках 22, 23 и 24 присутствует разрыв в данных от 5 ч до 18 ч. Необходимо объяснение данного разрыва.
 5. Обнаруженный эффект многократного падения порога ВКР автор объясняет влиянием границы раздела жидкость/воздух и распределённой обратной связью. Данное объяснение необходимо было проверить добавлением поверхностно-активного вещества к образцу (масло, бензин и т.д.) и вариацией оптической длины образца (высота столба жидкости).
 6. Раздел 3.1.1, стр.41. На Рис.9(б) для экспериментальных точек не указаны погрешности измерений.

Указанные замечания не снижают общую высокую оценку работы. Диссертационная работа М.Я. Гришина содержит ряд новых результатов, представляющих несомненный фундаментальный и практический интерес. Результаты работы М.Я. Гришина прошли широкую апробацию и опубликованы в 13 статьях в рецензируемых изданиях, входящих в список, рекомендованный ВАК, а также неоднократно докладывались на семинарах и международных конференциях. Тематика диссертационной работы соответствует специальности 01.04.21 «Лазерная физика».

Диссертация Гришина М. Я. является законченным циклом научных работ, выполненных на высоком уровне. Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации и достоверно отражает основные результаты работы.

Диссертация Гришина Михаила Ярославовича «Спектроскопия спонтанного и вынужденного комбинационного рассеяния нано- и пикосекундных лазерных импульсов в воде» полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21- Лазерная физика.

Доклад Гришина Михаила Ярославовича на тему «Спектроскопия спонтанного и вынужденного комбинационного рассеяния нано- и пикосекундных лазерных импульсов в воде»

по материалам кандидатской диссертации был представлен на заседании I секции Ученого Совета Отделения оптики 15.12.2021 г.

Отзыв ведущей организации составлен ведущим научным сотрудником доктором физико-математических наук Чернега Н.В. и одобрен на заседании I секции Ученого Совета Отделения оптики 15.12.2021 г. (Протокол №25 от 15.12.2021 г.)

Высококвалифицированный ведущий научный сотрудник лаборатории «Когерентная оптика», ФИАН

д.ф.-м.н., доцент

Email: tchera@lebedev.ru

Телефон: +7(499)132-65-51

Н.В. Чернега

Руководитель Отделения Оптики ФИАН,

Председатель Ученого Совета Отделения Оптики ФИАН

Высококвалифицированный главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.

Email: vlebedev@lebedev.ru

Телефон: +7(499)132-69-23

В.С. Лебедев

ПОДПИСИ СОТРУДНИКОВ ФИАН УДОСТОВЕРЯЮ:

Ученый секретарь ФИАН, к.ф.-м.н.

Телефон: +7(499) 132-69-78

Email: kolobov@lebedev.ru

А.В. Колобов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Адрес: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53