

## ОТЗЫВ

официального оппонента 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.

Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КР) является эффективным неразрушающим методом изучения различных сред, а также при исследованиях сложных объектов и служит одним из востребованных инструментов их высокоточной диагностики. Особый интерес представляет изучение воды и водных композиций в реальных условиях с живыми организмами и растениями. В более глобальном аспекте такие исследования важны, поскольку водные ресурсы Земли во многом определяют ее климат и являются энергетическим источником/резервуаром для многих динамических процессов, связанных с гидросферой Земли.

Одной из физической особенностей воды является то, что в спектре спонтанного КР доминирует интенсивная полоса аномально большой ширины (до  $400 \text{ см}^{-1}$ ), соответствующая валентным OH колебаниям (OH-полоса). Температурная деформация OH-полосы широко применяется для дистанционного измерения температуры воды, как в условиях лаборатории, так и в натурных экспериментах. Кроме того, известно, что OH-полоса меняет форму при изменении давления в воде, что даёт возможность дистанционного измерения давления по регистрируемым спектрам КР. Таким образом, эта характеристика может служить универсальным параметром для исследования динамических состояний в водосодержащих объектах.

Еще более информативным методом исследований в этом плане является вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР). Важная особенность ВКР в том, что это – пороговый эффект, и нарастание его интенсивности имеет экспоненциальную зависимость от интенсивности излучения накачки. Поэтому даже малые изменения оптических свойств среды оказывают существенное влияние на процесс генерации ВКР, что делает его чувствительным инструментом для исследования физических свойств различных сред.

При этом в лазерных исследованиях в условиях изменения длины волн излучения накачки и длительности ее импульсов появляется много новых принципиальных возможностей для исследования, в частности, воды. Несмотря, на

первый взгляд, на то, что такая простая и распространенная система как вода, хорошо изучена, но она остается объектом интенсивных междисциплинарных исследований со многими парадоксальными свойствами в разных ее состояниях.

Поэтому актуальность и значимость представляемой диссертационной работы не вызывает сомнений как в фундаментальном, так и в прикладном аспектах. Полученные в работе результаты имеют важную научную и практическую значимость. Исследованные в работе особенности спонтанного и вынужденного КР в поле 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 в различных приложениях.

Диссертация изложена хорошим научным языком; объём ее 85 страниц текста, включая 31 рисунок и 2 таблицы. Диссертация состоит из Введения, четырёх глав, Заключения. Список литературы включает в себя 168 наименований.

Наиболее важные и принципиальные результаты, полученные автором и приведенные в диссертационной работе, можно определить следующим образом.

Первое. Использование современных схем и экспериментальных установок, включающих ряд оригинальных элементов, например, компактного спектрометра комбинационного рассеяния для исследования воды, как в условиях лаборатории, так и при натурных измерениях с соответствующей регистрационной системой, включающей дифракционный спектрограф и детектор на базе ПЗС-матрицы с усилителем яркости. Это позволило проводить детальные количественные измерения спонтанного и вынужденного комбинационного рассеяния, как с борта исследовательского судна, так и при внешнем воздействии акустических полей в водном бассейне с сильным перепадом давления, например, в кавитационных режимах вблизи гребного винта.

Второе. Уникальные количественные измерения, выполненные по деформации профиля ОН-полосы в спектре КР разными альтернативными методами. Это дало возможность регистрировать такую принципиальную характеристику как мера деформации профиля ОН-полосы, которая является очень чувствительной к изменению температурных параметров и может служить их детектором.

Третье. Разработана методика бесконтактной регистрации профиля и амплитуды давления в количественных характеристиках для акустических полей в 50 МПа при импульсном режиме воздействия фокусированного ультразвукового пучка в водной

среде. Это есть инструмент управления при изучении разных явлений.

Четвертое. Получен уникальный эффект кардинального изменения порога ВКР-генерации при фокусировке лазерного пучка на границу раздела воздух-жидкость. Эффект наблюдали для жидкостей разной природы (вода, тяжелая вода и жидкий азот), что позволило подтвердить универсальную N-образную зависимость с кардинальным уменьшением порога генерации ВКР (до 30 раз). Объяснение данного эффекта дано в условиях возникновения дополнительного зеркала резонатора ВКР-лазера при френелевском отражении от границы раздела двух сред.

Пятое. Впервые выявлена генерация новой компоненты ВКР пикосекундных импульсов в воде в стоксовой и антистоксовой областях спектра со сдвигом  $3000\text{ cm}^{-1}$  одновременно с известной компонентой со сдвигом  $3430\text{ cm}^{-1}$  внутри контура OH полосы. Дано обоснование наблюдаемых особенностей спектра с привлечением механизма четырёхволнового смешения в условиях неколлинеарного взаимодействия излучения накачки и компонент ВКР с выполнением условий синхронизма на частотном сдвиге  $3000\text{ cm}^{-1}$  при рассеянии вперед. Отметим, что генерация этих компонент ВКР происходит без оптического пробоя при фокусировке лазерного пучка на поверхность воды, что имеет важное практическое значение.

Вместе с тем, диссертация имеет ряд недостатков.

По структуре.

1. Для экспериментальной диссертации (с принципиальными деталями при обсуждении результатов различных лазерных экспериментов) общий объем в 85 стр. (из которых вводная часть – фактически автореферат – в 17 стр., а список цитируемой литературы – 10 стр.) – это все же маловато. Тем более, когда оригинальные главы – гл.2 уместилась на 6 стр., а глава 4 – на 10 стр.

2. В ссылках литературы (168 наименований) явно недостаточно ссылок на отечественные оригинальные публикации в научных журналах на русском языке (в первых шести десятках ссылок их вообще нет), когда вклад в исследования КР и ВКР отечественных ученых являлся значительным. При этом в автореферате, в его начальной части по актуальности работы – она продемонстрирована с приведением 28 (!) ссылок на литературу.

По научной части.

3. Ключевое фундаментальное явление снижения порога ВКР до 30 раз на

границе раздела жидкость-воздух, которое было убедительно зарегистрировано автором, требует более детального рассмотрения и дискуссии, чем краткое утверждение (на стр. 64) о влиянии френелевского отражения и появления зеркала обратной связи возникающего комплексного резонатора ВКР-лазера. Такая связь часто сбивается на нестабильные режимы. Здесь необходимо было привести хотя бы цифровые данные о длине перетяжки при фокусировке лазерного пучка на эту границу раздела двух сред и – насколько критично ее смещение от этой границы. А для проверки роли такого сосредоточенного элемента оптического резонатора можно было в тестовых экспериментах отсечь этот отраженный от границы световой луч и/или проверить сделанное утверждение по пробному пучку слабого лазера (например, Не-Не лазера).

4. Описание деформации OH-полосы в спектре спонтанного комбинационного рассеяния (центральная по объему глава 3 – 24 страницы) с предложенными разными методами обработки спектров КР, которые требовали бы более детального сравнения, также проведено очень кратко без каких-либо математических соотношений. В этом дискуссионном вопросе, кроме не очень конкретного и абстрактного утверждения о «перескоке протона» (см., например, стр. 42) и переключений водородной связи (стр. 43), стоило бы остановиться и на структурной особенности, в частности для молекулы воды – «треугольник» с вершиной из атома кислорода и двумя атомами водорода в основании. В определенных схемах эксперимента в тонком поверхностном слое, по-видимому, можно говорить об «ориентированной» воде с большой нелинейностью, тем более, при лазерном излучении с короткой длительностью импульса. Это представляется как часть спирали (при наклонном падении света), и здесь возможно влияние симметрийных флуктуационных факторов в динамических процессах для определённой длительности воздействия. Не очень ясно, что имеет в виду автор под формированием льдоподобных структур в воде (стр. 43). Это что – ансамбли кластеров или реальный лед?

Отмеченные недостатки и замечания носят скорее технический характер и пожеланий на дальнейшую работу; они ни в коей мере не умаляют достоинства выполненной работы с рядом полученных приоритетных результатов. Это позволяет сделать вывод, что диссертационная работа М.Я. Гришина в целом содержит ряд новых результатов, представляющих несомненный фундаментальный и практический интерес. Результаты работы М.Я. Гришина прошли достаточную апробацию и опубликованы в

ведущих российских и зарубежных журналах, входящих в список, рекомендованный ВАК, включая 4 работы Q1 по классификации Web of Science, а также неоднократно докладывались на международных конференциях. Тематика диссертационной работы соответствует специальности 01.04.21 «Лазерная физика», а текст автореферата корректно и полно отражает её содержание.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а Гришин Михаил Ярославович заслуживает присуждения ему искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика».

Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики и прикладной математики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

АРАКЕЛЯН Сергей Мартиросович

## Контактные данные:

тел.: +7(4922)333369, e-mail: arak@vlsu.ru.



Подпись сотрудника ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» С.М. Аракеляна удостоверяю:

Ученый секретарь ВлГУ



Т.Г. Коннова

29.11.2021