

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Бурханов Илья Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ХАРАКТЕРА РАССЕЯНИЯ
СВЕТА НА ЧАСТИЦАХ ЛАТЕКСА И АЛМАЗА В ВОДНЫХ
СУСПЕНЗИЯХ**

Специальность 01.04.05 — оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

Работа выполнена в Отделении оптики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
Чайков Леонид Леонидович
(Физический институт им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук)

Официальные оппоненты: **Шипилов Константин Федорович**,
доктор физико-математических наук, ученый
секретарь Научного центра волновых
исследований Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института общей
физики им. А.М. Прохорова Российской
академии наук (НЦВИ ИОФ РАН);

Прудковский Павел Андреевич,
кандидат физико-математических наук,
доцент физического факультета Федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Московский
государственный университет имени
М.В. Ломоносова» (МГУ)

Ведущая организация: Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана

Защита диссертации состоится 9 октября 2017 г. в 12 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д002.023.03 на базе Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991 Москва, Ленинский проспект д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук и на сайте www.lebedev.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 002.023.03
доктор физико-математических наук

А. С. Золотько

Общая характеристика работы

Работа посвящена экспериментальному обнаружению и исследованию нелинейного (вынужденного) режима концентрационного рассеяния света на субмикронных частицах в жидкостях, его особенностей для частиц различных размеров и составов, а также изучению величин и направления спектральных сдвигов линии рассеяния и измерению коэффициента его усиления для частиц различных размеров, сравнению этих сдвигов и коэффициентов усиления, измеренных экспериментально, с теоретическими оценками.

Актуальность работы. В настоящее время для исследования размеров частиц во взвесах широко применяется метод динамического рассеяния света (ДРС). Рассеяние света на частицах имеет целый ряд особенностей, которые часто не учитываются в измерениях, но которые могут сильно исказить получаемый результат. Такими особенностями являются например наличие потока в жидкостях и вынужденное рассеяние света.

У каждого типа спонтанного рассеяния (СР) света имеется свой аналог в виде вынужденного рассеяния (ВР), а именно вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) [1], вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ) [2], вынужденное рассеяние крыла линии Рэлея (ВРКЛР) [3], вынужденное температурное рассеяние (ВТР, на флуктуациях/вариациях энтропии) [2; 4-6]. Недавно было открыто вынужденное глобулярное рассеяние (ВГР, низкочастотное комбинационное рассеяние на собственных колебаниях частиц) [7; 8], а также вынужденное рассеяние Ми-Брэгга, связанное с изменением среднего показателя преломления среды за счет изменения свойств частиц [9-11]. Однако вынужденное концентрационное рассеяние (ВКоРС) на флуктуациях/вариациях концентрации частиц в жидкостях до сих пор не было экспериментально обнаружено. Работа является актуальной потому что факт обнаружения нелинейного (вынужденного) режима концентрационного рассеяния света дополняет картину, свойственную другим типам рассеяния (ВКР, ВРМБ, ВРКЛР, ВТР, ВГР), где для каждого спонтанного процесса рассеяния удалось наблюдать его вынужденный режим. ВКоРС на вариациях концентрации частиц в жидкостях можно назвать и вынужденным диффузионным рассеянием света (ВДРС), поскольку его частотный сдвиг, как и время релаксации флуктуаций концентрации частиц, определяется коэффициентом их диффузии. Нужно отметить, что в ранней работе [10] о вынужденном рассеянии Ми-Брэгга авторы предложили в качестве объяснения

также и концентрационный механизм ВР, от которого впоследствии отказались. В результате ВКоРС иногда называют также вынужденным рассеянием Ми, что терминологически не совсем правильно.

Спектральные линии спонтанного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна и комбинационного рассеяния смещены относительно линии возбуждающего света. Линии ВКР и ВРМБ смещены примерно на такую же величину. Линии спонтанного деполяризованного (на флуктуациях анизотропии) рэлеевского рассеяния и рассеяния на флуктуациях энтропии не сдвинуты относительно возбуждающего света, а только уширены. При этом, однако, линии ВРКЛР и ВТР сдвинуты приблизительно на половину ширины линии соответствующего спонтанного рассеяния. Этот сдвиг связан с тем, что коэффициент усиления ВТР и ВРКЛР пропорционален как коэффициенту спонтанного рассеяния, так и плотности состояний, линейно зависящей от частотного сдвига [12; 13]. Таким образом, частотный сдвиг рассеянного света, равный полуширине линии спонтанного рассеяния, для таких видов рассеяния является важнейшим признаком появления вынужденного рассеяния. Вторым важным признаком появления вынужденного рассеяния является нелинейный рост интенсивности рассеянного света.

Попытки исследования вынужденного концентрационного рассеяния (ВКоРС) – аналога спонтанного концентрационного рассеяния (СКоРС) на флуктуациях концентрации веществ, составляющих раствор, предпринимались неоднократно. Так в [14] в бинарных растворах хинолин-этиловый спирт и нитробензол – CCl_4 было зафиксировано резкое увеличение светимости объёма рассеяния при переносе фильтра из возбуждающего пучка в положении перед камерой при отсутствии разрешаемого спектрального сдвига рассеянного света, и авторы сделали вывод о наблюдении ВКоРС. В [15] в бинарных газовых смесях в схеме с использованием мощного лазера и сверхрегенеративного усиления рассеянного света с помощью интерферометра Фабри-Перо в спектре рассеянного света была обнаружена линия, частотный сдвиг которой $\sim 0.033\text{--}0.042\text{ см}^{-1}$ авторы связали с наличием ВКоРС. В [16] Бломбергеном и сотрудниками был измерен частотный сдвиг ВКоРС в смеси He-He $\sim 0.005\text{--}0.022\text{ см}^{-1}$, и в смеси He-SF₆ $\sim 0.005\text{--}0.018\text{ см}^{-1}$. На основе этих экспериментов была разработана соответствующая теория ВКоРС в смеси газов [17].

Попытки измерения ВКоРС в водных растворах лутидинов предпринимались в [18], но частотный сдвиг рассеянного света измерить не удалось при разрешении 0.003 см^{-1} . По временной зависимости интенсивности рассеяния авторы

сделали заключение о вынужденном рассеянии на несмещенной частоте, которое интерпретировали как ВКоРС в растворе. Однако ВКоРС на нано- и субмикронных частицах в жидкости так и не было обнаружено. В работе [19] нам удалось, нетрадиционным для исследований ВР методом, измерить частотный сдвиг ВКоРС. Поэтому работа является актуальной для общей картины перехода от спонтанного рассеяния света в вынужденный режим.

В последнее время было обнаружено нелинейное рассеяние на золотых нанотрубках в воде, на нанокристаллах CdSe/Cds/ZnS в хлороформе и на наночастицах Au, Au/Ag и Ag в толуоле [9-11], но в этих взвесьях также не удалось измерить сдвиг спектральной линии вынужденного рассеяния при разрешении до 0.005 см^{-1} , хотя и был получен нелинейный рост интенсивности рассеяния назад. По росту интенсивности и появлению специфического пика на временной зависимости интенсивности ВР авторы [9-11], так же как и авторы [18], сделали вывод о наблюдении вынужденного рассеяния на частицах. В [9] авторы предположили возможность как «зависящего от интенсивности пространственного перераспределения наночастиц золота» (т.е. ВКоРС на частицах в жидкости), так и изменения среднего показателя преломления среды за счёт поверхностно-плазмонного резонанса на частицах. Однако после того, как в [10] им не удалось зафиксировать ВР на наночастицах платины, в своих последующих работах [12] они склонились ко второму варианту.

Таким образом, частотный сдвиг ВКоРС был ранее измерен только в газовых смесях. Ни в жидких растворах, ни во взвесьях частиц в жидкости измерить и даже обнаружить такой частотный сдвиг не удавалось, так как для жидких растворов полуширина линии спонтанного рассеяния назад (и величина спектрального сдвига линии ВР) составляет 0.3–3 МГц, что существенно меньше, чем для газов. Для частиц в жидкости этот сдвиг еще меньше и составляет $\sim 30\text{--}12000$ Гц. В [9-15; 18] авторы использовали обычный для исследования ВР способ спектральных измерений с помощью интерферометра Фабри-Перо, разрешения которого явно недостаточно для измерения указанных частотных сдвигов.

Для измерения таких сдвигов подходящим является метод корреляционной спектроскопии, который позволяет измерять частотные сдвиги от 1 до 10^5 Гц. При этом нужно использовать непрерывный лазер, а не мощный импульсный, к чему все привыкли при исследовании вынужденного рассеяния. Поэтому актуальность нашей работы с методической точки зрения определяется необходимостью разработки новой методики исследования малых сдвигов вынужденного рассеяния.

Первые попытки зафиксировать частотный сдвиг и нелинейный рост интенсивности вынужденного диффузионного (концентрационного) рассеяния света на субмикронных частицах в жидкости с помощью непрерывного лазера и коррелятора были предприняты нами во взвесьях наночастиц кремния в масле и алмаза в воде [19].

В результате интерференции возбуждающего пучка и рассеянной назад волны создается интерференционная решетка интенсивности, в пучности которой при определенной амплитуде решетки начинают затягиваться частицы [20]. Эта периодическая структура из частиц увеличивает интенсивность рассеянного света и, следовательно, увеличивается амплитуда интерференционной картины, в которую начинают затягиваться все больше частиц. На самом деле такая периодическая структура частиц в жидкости представляет собой волну, которая движется относительно жидкости [21]. Направление движения волны относительно возбуждающего пучка определяет направление частотного сдвига спектральной линии ВКоРС. Поэтому работа актуальна с точки зрения разработки нового метода определения направления спектрального сдвига с помощью корреляционной спектроскопии в условиях потока.

В настоящее время появляется множество новых композитных материалов, наносистем и других объектов, в которых происходят процессы с большими характерными временами. Таким образом, настоящая работа актуальна с точки зрения фундаментальной науки как дополнение к общей картине перехода от спонтанного рассеяния света в режим вынужденного рассеяния, с методической точки зрения как разработка нового метода исследования вынужденного рассеяния с малыми частотными сдвигами и метода определения знака этих сдвигов и с практической точки зрения как работа, с одной стороны определяющая пределы применимости широко используемого метода динамического рассеяния света (ДРС), особенно при измерениях рассеяния назад при щуповых измерениях, а с другой стороны расширяющая возможности корреляционной спектроскопии для определения не только величины, но и направления частотного сдвига в потоке жидкости или в движущемся объекте.

Цель работы – получить нелинейное рассеяние (ВКоРС) на субмикронных частицах различных видов и размеров в различных оптических схемах, измерить спектральные сдвиги ВКоРС на субмикронных частицах в жидкости, сравнив их с теоретическими значениями, показать нелинейный рост интенсивности рассеяния с ростом интенсивности возбуждающего излучения и таким об-

разом экспериментально показать переход рассеяния на субмикронных частицах в жидкости в нелинейный (вынужденный) режим.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать методику и создать оптическую схему рассеяния назад для регистрации малых частотных сдвигов (~ 100 Гц) и интенсивности вынужденного рассеяния света с помощью корреляционной спектроскопии и непрерывного лазера.
2. Экспериментально получить корреляционные функции ВКоРС на субмикронных агрегатах наночастиц алмаза и измерить частотный сдвиг линии ВР, зафиксировать нелинейный рост интенсивности рассеянного назад света при увеличении мощности возбуждающего света.
3. Разработать методику и экспериментально реализовать световодную оптическую схему рассеяния назад для регистрации полных частотных сдвигов (~ 1000 Гц) в условиях конвекции при наблюдении ВКоРС с одновременным независимым измерением скорости потока жидкости.
4. Экспериментально получить корреляционные функции ВКоРС на субмикронных частицах латекса разных размеров в жидкости в условиях конвекции, определить величину и направление спектрального сдвига ВКоРС, зафиксировать нелинейный рост интенсивности рассеянного назад света при увеличении мощности возбуждающего света в световодной схеме.
5. Получить аппроксимационные формулы для определения величины спектральных сдвигов ВКоРС на субмикронных частицах в жидкости из корреляционной функции с косинусоидальной составляющей для определения спектральных сдвигов линий ВКоРС на субмикронных частицах в жидкости при наличии и в отсутствие конвекционного потока жидкости.
6. Оценить теоретические значения спектральных сдвигов ВКоРС на субмикронных частицах в жидкости и коэффициента усиления g для используемых в эксперименте взвесей по известным соотношениям и сопоставить с экспериментально полученными значениями спектральных сдвигов и коэффициентов усиления g .

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Разработана и применена методика регистрации малых частотных сдвигов (~ 100 Гц) нелинейного и вынужденного рассеяния света с помощью метода корреляционной спектроскопии и непрерывного лазера.

2. Разработана и применена методика измерения малых частотных сдвигов (~ 1000 Гц) нелинейного и вынужденного рассеяния с одновременным измерением скорости потока жидкости при регистрации вынужденного рассеяния света в направлении потока и в противоположном направлении для определения знака частотного сдвига.
3. Показано, что при увеличении мощности возбуждающего лазерного излучения в корреляционной функции рассеянного света появляется косинусоидальная компонента, то есть в спектре появляется сдвинутая линия, измерен спектральный сдвиг этой линии и показано, что измеренные частотные сдвиги соответствуют полуширинам спонтанного рассеяния на флуктуациях концентрации частиц для взвесей с различными частицами.
4. Показана нелинейность в интенсивности света, рассеянного частицами в жидкости, при увеличении мощности возбуждающего лазерного излучения.
5. Измерен спектральный сдвиг линии вынужденного концентрационного рассеяния света на субмикронных частицах в жидкости.
6. Экспериментально измерен коэффициент усиления g вынужденного концентрационного рассеяния света для взвеси субмикронных частиц алмаза и латекса в жидкости.
7. Экспериментально показано наличие стоксова и антистоксова спектрального сдвига линии вынужденного концентрационного рассеяния света на субмикронных частицах в жидкости и зависимость направления сдвига от размера частиц.
8. Таким образом показан переход концентрационного рассеяния на субмикронных частицах в жидкости в вынужденный режим.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальный метод регистрации спектральных линий нелинейного или вынужденного режима концентрационного рассеяния света во взвесах субмикронных частиц в жидкостях, основанный на использовании корреляционной спектроскопии и непрерывного лазера, позволяющий измерять малые сдвиги спектральной линии вынужденного рассеяния света ~ 10 Гц – 20 кГц.
2. Методика определения знака частотного сдвига света, рассеянного взвесью частиц в нелинейном или вынужденном режиме в потоке жидкости по

разности полной скорости концентрационной волны и скорости конвекции жидкости, измеряемой методом Доплера.

3. Частотный сдвиг линии вынужденного режима концентрационного рассеяния света меняет знак в зависимости от радиуса частиц.
4. Экспериментально обнаружен нелинейный режим концентрационного рассеяния света во взвесьях субмикронных частиц в жидкостях, по нелинейному характеру зависимости интенсивности света, рассеянного взвесью, от мощности возбуждающего излучения, по наличию частотного сдвига спектральной линии рассеяния, близкого к полуширине линии спонтанного рассеяния света и по изменению знака этого сдвига в зависимости от размера субмикронных частиц в жидкости, указывающий на начальную фазу перехода рассеяния в вынужденный режим.

Научная и практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы имеют научное, методическое и прикладное значение.

Научная значимость работы определяется экспериментальным обнаружением нелинейного или вынужденного режима концентрационного рассеяния света на субмикронных частицах в жидкости, которое дополняет картину, свойственную всем другим типам рассеяния, где для каждого спонтанного процесса рассеяния ранее удалось наблюдать его вынужденный режим.

Методическое значение заключается в новом способе получения величины и направления спектрального сдвига линии рассеянного света в условиях потока жидкости с помощью одновременного измерения корреляционной функции рассеянного света и скорости потока доплеровским методом. Меняя направления вектора рассеяния q на противоположное, можно точно определять направление частотного сдвига вынужденного рассеяния в условиях потока. Это новый способ получения информации о спектральных сдвигах при измерении корреляционных функций, которые обычно дают только величину сдвига. Данный способ в целом ряде случаев проще и дешевле в реализации, чем метод со сдвинутым изначально по частоте опорным пучком.

Прикладное значение заключается в том, что вынужденное концентрационное рассеяние света на субмикронных частицах в жидкости изменяет вид и время когерентности корреляционной функции, что ведет к искажению результатов измерений размеров частиц, измеряемых широко распространенным методом динамического рассеяния света. Показано, что наличие такого вида ВКоРС

на субмикронных частицах в жидкости определяет границы применимости широко используемых коммерческих приборов для определения размеров частиц в жидкостях методом динамического рассеяния света, особенно в световодных схемах, и определяет тип лазеров, мощность излучения и оптические схемы, которые не должны использоваться для таких измерений. Например, из полученных результатов следует, что при измерениях размеров частиц в жидкости методом ДРС, для частиц с радиусом 400 нм и объемной концентрацией $7 \times 10^{-4} \%$ при линзе, фокусирующей пучок возбуждающего излучения, с фокусом 10 см нельзя использовать лазер с мощностью более 15 мВт. Кроме того, наличие вынужденного рассеяния указывает на возможность создания решетки концентрации и следовательно на возможность создания периодических структур частиц в жидкости, которые могут быть зафиксированы в процессе отверждения жидкости для получения новых композиционных материалов.

Личный вклад автора. Диссертация представляет собой результат самостоятельной научной работы автора, выполненной под руководством его научного руководителя. Личный вклад автора диссертации состоит в участии в обсуждении постановки задач, в подборе и анализе литературы по теме диссертации, в совместном с соавторами анализе полученных результатов и написании статей. Автор участвовал в разработке и сборке всех оптических схем и самостоятельно создал часть компонентов для регистрации ВКоРС на субмикронных частицах в жидкости, проводил юстировку этих установок и все измерения, подготавливал экспериментальные образцы, обработал и аппроксимировал все полученные результаты. Он получил формулы аппроксимации для обработки полученных результатов, формулу затягивающей силы, действующей на частицы в жидкости, которая изменяет знак для различных размеров частиц и определяет направление сдвига.

Апробация работы. Результаты работы лично докладывались автором на семинарах Оптического отдела ФИАН, на 6 международных и 4 всероссийских конференциях и представлены в сборниках трудов: VII Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» (Санкт-Петербург, 2012); XIV Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики» (Звенигород, 2012); 11-th International Conference «Correlation Optics'13» (Chernivtsi, Ukrain, 2013); V Всероссийская молодежная конференция «Фундаментальные и инновационные вопросы современной физики» октября (ФИАН, Москва 2013); III Международная молодежная научная школа-конференция Современные проблемы физики и

технологий (Москва 2014); XV Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики» (ФИАН, Москва 2014); IX Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика–2015» (12-16 октября, Санкт-Петербург, 2015); VI Всероссийская молодежная конференция «Фундаментальные и инновационные вопросы современной физики» (16-21 ноября ФИАН, Москва, 2015); 2-я международная конференция «Плазменные, лазерные исследования и технологии» (25-27 января, НИЯУ МИФИ, Москва, 2016); V Международная молодежная научной школы-конференции «Современные проблемы физики и технологий» (НИЯУ МИФИ. Москва, 2016).

Результаты работ были отмечены 3 дипломами за высокий научный уровень проводимых исследований УНК ФИАН, 2014–2016 г.

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 5 работах в рецензируемых научных журналах, индексирующихся в Scopus или Web of Science, и 9 публикациях в трудах конференций и сборниках. Список публикаций автора приведен в конце автореферата.

Достоверность и обоснованность результатов определяется соответствием экспериментальных результатов, полученных на различных экспериментальных оптических схемах и для различных частиц различных размеров, а также согласием результатов теоретических предсказаний с экспериментальными данными, тестовыми измерениями на оптической установке размеров частиц методом ДРС, воспроизводимостью результатов измерений. Достоверность результатов подтверждена публикациями в ведущих рецензируемых оптических научных журналах, таких как «Optics Communications» и «Квантовая Электроника».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка литературы. Объем диссертации составляет 130 страниц, включая 67 рисунков и 4 таблицы. Список литературы включает в себя 79 наименований.

Краткое содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи, необходимые для ее решения, показана новизна, а также научная, практическая и методическая ценность работы, представлены положения, выносимые на защиту, и описана структура диссертации.

Глава 1 посвящена обзору имеющейся литературы по теме диссертации.

В разделах 1.1–1.9 описана теория спонтанного рассеяния света и история открытия этого явления. Показан спектр спонтанного молекулярного рассеяния, приведены значения характерных спектральных сдвигов и ширин спектральных линий, времен релаксации и коэффициента усиления для различных видов вынужденных рассеяний. Раздел 1.10 описывает признаки вынужденного рассеяния. Во-первых, это существование нелинейного роста интенсивности рассеянного света при росте мощности возбуждающего излучения $I_{st} = I_{sp} e^{I_L g L}$, где I_{st} , I_{sp} , I_L – интенсивность вынужденного, спонтанного рассеяния и возбуждающего излучения, g – коэффициент усиления, L – длина взаимодействия I_L и I_{st} . Во-вторых, для тех видов рассеяния, спектральные линии которых в спонтанном режиме не сдвинуты относительно частоты возбуждающего излучения (спонтанного рассеяния крыла линии Рэлея, рассеяния на флуктуациях энтропии), это наличие частотного сдвига спектральной линии вынужденного рассеяния, близкого к полуширине линии соответствующего спонтанного рассеяния, как для ВТР, ВРКЛР. Для рассеяния на флуктуациях концентрации частиц эта полуширина $\Gamma_{sp} = Dq^2$, где D – коэффициент диффузии, q – модуль волнового вектора рассеяния.

Разделы 1.11–1.17 кратко описывают классические виды вынужденных рассеяний и их особенности. В разделе 1.18 описывается процесс возникновения ВКОРС на частицах в жидкости, показывается, что возмущение концентрации имеет вид волны и представлен теоретически предсказанный коэффициент усиления g ВКОРС [21].

В разделе 1.19 приводится вывод градиентной силы F_e , действующей на сферическую частицу в жидкости в интерференционной решетке интенсивности возбуждающего излучения и рассеянного назад света:

$$F_e = \alpha(\varepsilon_P - \varepsilon_L) \frac{4\pi I_L \sqrt{\zeta_g} \pi}{c k^2} [2kR \cos(2kR) - \sin(2kR)] \cos(2kx_0), \quad (1)$$

где α – поляризуемость среды, ε_P , ε_L – диэлектрические проницаемости частицы и среды, c – скорость света, ζ_g – коэффициент отражения от решетки концентрации, k – волновой вектор, R – радиус частицы, x_0 – начальное положение частицы в интерференционной картине. Показано, что затягивающая сила F_e имеет нули при определенных радиусах частиц R , и от радиуса частицы R зависит ее знак (Рис. 1), который определяет, в максимумы или минимумы интерференционной картины будут затягиваться частицы, от чего зависит направление спек-

трального сдвига линии ВКорС. Также показана зависимость затягивающей силы F_e от мощности накачки и начального положения частицы в интерференционной картине. В разделе 1.20 описан процесс затягивания в пучности интерференционной картины частиц, в диаметр которых укладывается несколько периодов интерференционной решетки. При значении выражения (1) для затягивающей силы $F_e > 0$ частица затягивается в максимум интерференционной картины, а при $F_e < 0$ в минимум.

Глава 2 посвящена описанию методов получения корреляционных функций на используемых в настоящей работе экспериментальных установках для регистрации вынужденного рассеяния, подготовке образцов и теоретическим оценкам коэффициентов усиления g ВКорС и коэффициента отражения света от интерференционной решетки.

В разделах 2.1–2.4 описано получение корреляционной функции и размеров частиц методом динамического рассеяния света. Существует три метода получения информации о корреляционной функции $g^{(1)}(\tau)$ – гомодинамирование, гетеродинамирование и метод самобиений, которым мы пользуемся для определения размеров частиц. Показана связь корреляционной функции со спектральными характеристиками и коэффициента диффузии D со спектральной шириной рассеянного света. Разделы 2.5–2.7 описывают работу коррелятора и программного обеспечения для получения корреляционных функций и подготовку взвесей. Раздел 2.8 описывает используемые в работе экспериментальные установки, самая оригинальная из которых представлена на Рис. 2. Раздел 2.9 описывает методику определения знака частотного сдвига при наличии конвекционного потока жидкости.

В разделе 2.10 показано, что наличие или отсутствие концентрационной волны практически не сказывается на корреляционной функции при доплеровских измерениях, поскольку для пересекающихся красных лучей концентрационная волна условию Брэгга, конечно, не удовлетворяет, а рассеяния красного света на разных частицах оказывается некогерентным. В разделе 2.11 описана проверка линейности детекторов интенсивности падающего излучения.

В разделе 2.12 выводится вид корреляционной функции вынужденного рассеяния света в условиях покоя жидкости в объеме рассеяния:

$$G^{(1)}(\tau) = I_{sp}^2 \exp(-2\Gamma_{sp}\tau) + I_{st}^2 \exp(-2\Gamma_{st}\tau) + 2I_{sp}I_h \exp(-\Gamma_{sp}\tau) + \quad (2)$$

$$+ 2I_{st}I_h \exp(-\Gamma_{st}\tau) \cos(\Omega_{st}\tau) + \langle I_{sp} + I_{st} + I_h \rangle^2,$$

где $G^{(I)}(\tau)$ – функция корреляции интенсивности рассеянного света, Γ_{sp} – полуширина линии спонтанного рассеяния, Γ_{st} – полуширина линии вынужденного рассеяния, Ω_{st} – частотный сдвиг спектральной линии ВКОРС, I_h – интенсивность опорного пучка. Первое слагаемое соответствует спонтанному рассеянию света назад, второе – вынужденному рассеянию, третье – биениям спонтанного рассеяния света и опорного пучка, четвертое – биениям вынужденного рассеяния света и опорного пучка. Косинусоидальная компонента в корреляционной функции определяет наличие и величину спектрального сдвига линии вынужденного рассеяния света.

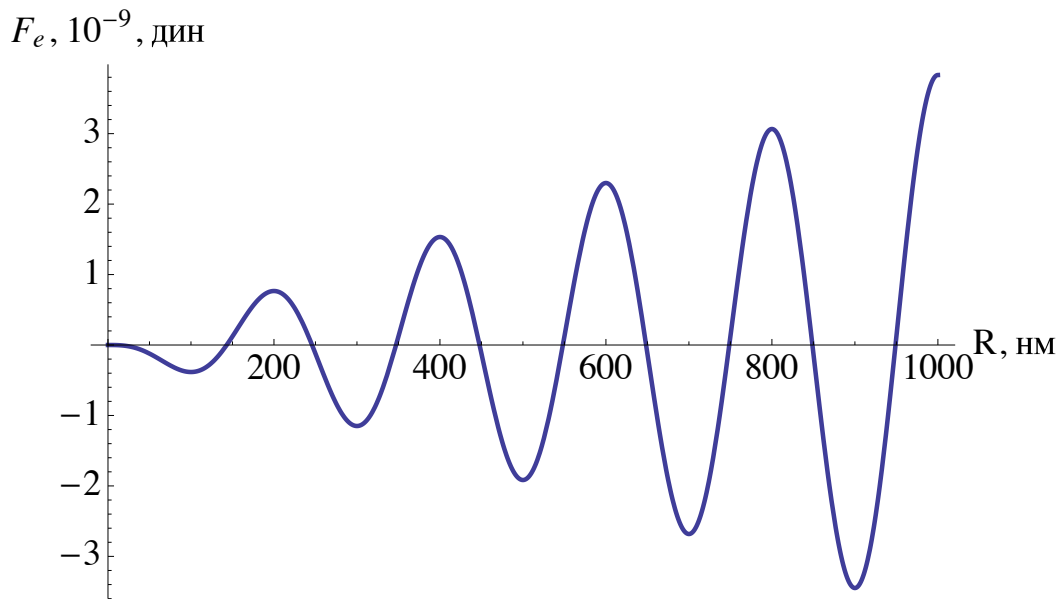


Рисунок 1 – Зависимость затягивающей силы F_e , действующей на частицу латекса в воде в интерференционной решетке интенсивности возбуждающего излучения и рассеянного назад света от размера частицы R , при $\zeta_g = 1$ и $\cos(2kx_0) = 1$.

В разделе 2.13 выводится вид корреляционной функции вынужденного рассеяния света в условиях потока жидкости в объеме рассеяния.

В разделе 2.14 оценивается эффективное расстояние от конца световодного щупа до точки регистрации корреляционной функции, равное ~ 2.5 мм. В разделах 2.15–2.18 описывается коэффициент отражения спонтанного и вынужденного рассеяния назад и сравнивается диффузионная сила $F_{dif} = \frac{k_B T}{N_v} q \delta N_v$, размывающая решетку, и затягивающая сила F_e (1). Здесь k_B – постоянная Больцмана, T – температура, N_v – концентрация частиц, δN_v – отклонение от N_v в интерференционной решетке. Порог ВКОРС оценивается из решения уравнения $F_{dif} = F_e$. Оказывается, что при $P_{las} = 10$ мВт решения нет, а при 25 мВт есть. Кроме того, концентрация частиц будет изменять угол наклона сплошной

линии F_{dif} и следовательно при большей концентрации частиц порог ВКоРС снижается.

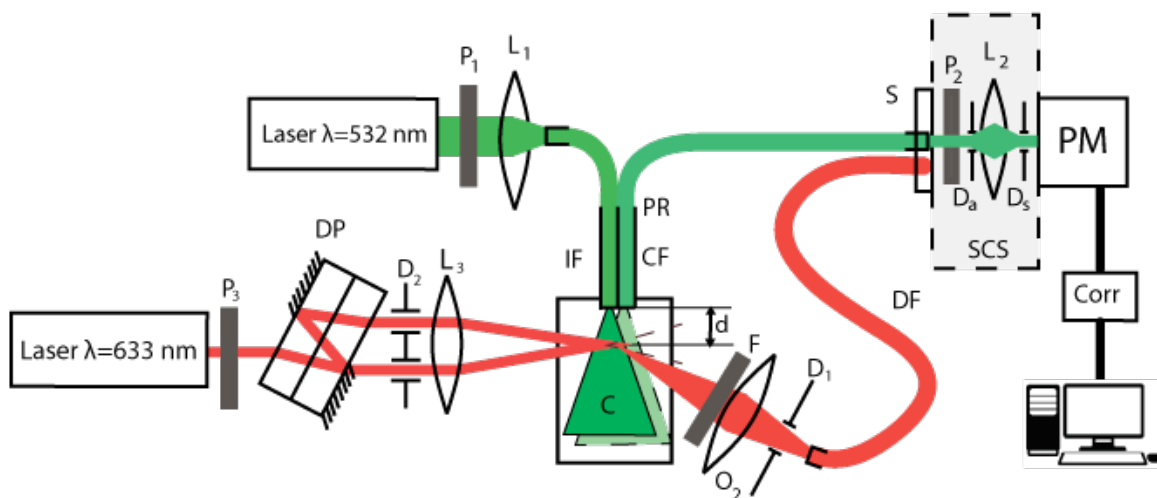


Рисунок. 2 – Оптическая схема со световодным шупом и измерением скорости потока Допплеровским методом. *Laser* – непрерывные лазеры с $\lambda = 532$ и 633 нм; P_i – поляризаторы; L_i – линзы, PR – световодный шуп, IF – освещающий световод, C – кювета, CF – собирающий световод, S – переключатель световодов, SCS – система обеспечения пространственной когерентности, D_a – апертурная диафрагма, D_s – катодная диафрагма (перед ФЭУ), PM – фотоумножитель, $Corr.$ – коррелятор, DP – раздвоитель пучка 50/50%, D_1 – диафрагма на входе в доплеровский световод DF (прицельная), D_2 – двойная диафрагма, F – красный фильтр, DF – световод, передающий доплеровский сигнал, d – расстояние между концом световодного шупа и пересечением двух лучей ~ 2.5 мм.

В разделах 2.17–2.19 приводится оценка коэффициента усиления g в приближении, аналогичном приближению ВРМБ зеркала, и приводятся оценки коэффициента усиления g для взвесей латекса и алмаза из работы [21]:

$$g^T = \frac{64\pi^3}{3cn_L} \frac{1}{\lambda\eta} \alpha^2 C_V \frac{1}{qR} (\sin(qR) - qR\cos(qR)) \frac{\Omega}{\Gamma_{sp}^2 + \Omega^2}, \quad (3)$$

где n_L – показатель преломления воды, λ – длина волны, η – вязкость, $q = 2k$ – волновой вектор рассеяния, C_V – объемная концентрация, Ω – частотная отстройка. Раздел 2.20 схематично показывает вид спектров спонтанного и вынужденного рассеяния света и форму коэффициента усиления g вынужденного рассеяния.

В Главе 3 по корреляционным функциям рассеянного наночастицами света показано появление смещенной спектральной линии при мощности лазера

$P_{las} > 17$ мВт, а также измерены коэффициенты усиления ВКоРС и описаны дополнительные эксперименты для подтверждения наблюдаемого эффекта.

Разделы 3.1–3.4 посвящены изучению ВКоРС во взвеси наночастиц кремния в масле и алмаза в воде. Показано, что при увеличении мощности $P_{las} > 17$ мВт в корреляционной функции появляется косинусоидальная составляющая, которая усиливается при увеличении P_{las} (Рис. 3а). Полученные корреляционные функции аппроксимированы выражением $\ln G^{(2)}(\tau) = \ln [A \exp(-\Gamma_{sp}\tau) + B \exp(-\Gamma_{st}\tau) \cos(-\Omega_{st}\tau) + F]$ и определен спектральный сдвиг линии ВКоРС на взвеси агрегатов алмаза с $R = 1200$ нм в воде $\Omega_{st}^E = 240 \pm 20$ с⁻¹. Теоретическая оценка этого сдвига линии ВКоРС дает величину $\Gamma_{sp} = \Omega_{st}^T = Dq^2 = 207 \pm 13$ с⁻¹. Показан нелинейный рост интенсивности рассеянного света I_L при росте мощности накачки P_{las} (Рис. 3б) и получено значение коэффициента усиления $g^E = (1.44 \pm 0.11) \times 10^{-2}$ см/Вт ВКоРС для взвеси алмаза с радиусом $R = 1200$ нм и объемной концентрацией $C_v = 3.4 \times 10^{-3}$ %, которое неплохо согласуется с теоретической оценкой по формуле (3) $g^T = 5 \times 10^{-3}$ см/Вт.

Разделы 3.5–3.6 посвящены изучению ВКоРС во взвеси латекса радиусом $R = 480$ нм и объемной концентрацией $C_v = 5 \times 10^{-5}$ % в воде на световодной установке [28]. Получены корреляционные функции с косинусоидальной компонентой (Рис. 4а), период которой меняется из-за конвекции. Зафиксирован нелинейный рост интенсивности рассеянного света I_L при росте мощности накачки P_{las} (Рис. 4б), из которого получено значение коэффициента усиления ВКоРС $g^E = (5.4 \pm 0.5) \times 10^{-2}$ см/Вт, которое согласуется с теоретической оценкой $g^T = 3.5 \times 10^{-2}$ см/Вт, полученной по формуле (3).

Разделы 3.7–3.10 посвящены изучению взвесей латекса с радиусами $R = 375, 480, 750$ нм в воде и концентрацией $C_v = 7 \times 10^{-4}$ % на световодной установке (Рис. 2) в условиях конвекционного потока при двух направлениях возбуждающего пучка: вертикально вверх и вниз. По периоду косинусоидальной компоненты T_{532} корреляционной функции, измеренной на зеленом лазере через световод CF (Рис. 2), вычисляется полная скорость концентрационной волны ВКоРС:

$$V_{exp} = \frac{\Omega_{exp} c}{2\omega_0} = \frac{\Omega_{exp} \lambda_{532}}{4\pi n_L} = \frac{\lambda_{532}}{2T_{532} n_L}, \quad (4)$$

где λ_{532} – длина волны возбуждающего излучения. Полная скорость концентрационной волны V_{tot} включает в себя как скорость концентрационной решетки V_{gr} так и скорость конвекционного потока V_c .

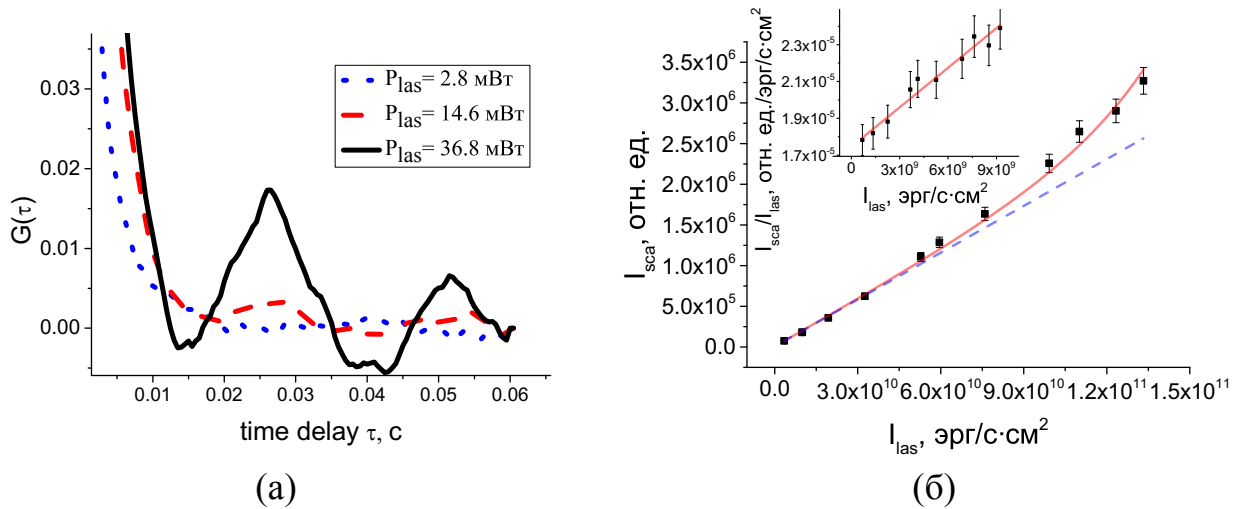


Рисунок 3: (а) – Функция корреляции света $G(\tau)$, рассеянного назад взвесью наночастиц алмаза с радиусом 1200 нм и объемной концентрацией $C_V = 3.4 \times 10^{-3}\%$ в воде при различных мощностях P_{las} возбуждающего пучка; (б) – Аппроксимация роста относительной интенсивности рассеяния ВКоРС в зависимости от мощности накачки P_{las} для взвеси алмаза формулой $I_{st} = I_{sp} \exp[gI_L L]$. Пунктирная линия $I_S = AI_L$, где $A = (I_S / I_L)$ при $I_L \rightarrow 0$.

Одновременно с измерением корреляционной функции рассеянного назад света, доплеровским методом по корреляционным функциям рассеяния двух скрещенных пучков He-Ne лазера через световод DF (Рис. 2) определялась скорость конвекционного потока V_c .

Значения скоростей V_{tot} и V_c представлены на Рис. 5. При постоянном направлении скорости конвекционного потока V_c вертикально вверх, направление скорости V_{gr} концентрационной волны ВКоРС меняется при различных положениях возбуждающего излучения. Видно, что между полной скоростью концентрационной решетки V_{tot} и скоростью конвекционного потока V_c после 17 мВт устанавливается постоянная разница. По разности этих скоростей V_{tot} и V_c из выражения:

$$\Omega_{st}^E = \frac{4\pi n_L V_{gr}}{\lambda_{532}} = \frac{4\pi n_L |V_{tot} - V_c|}{\lambda_{532}}, \quad (5)$$

определены величины экспериментальных спектральных сдвигов линий ВКоРС для частиц латекса радиусами $R = 375, 480, 750$ нм.

Если для частиц латекса радиусами $R = 375$ и 750 нм $V_{tot} > V_c$ при направлении возбуждающего излучения вниз и $V_{tot} < V_c$ при направлении возбуждаю-

шего излучения вверх, то для частиц латекса радиусом $R = 480$ нм ситуация обратная, и $V_{tot} < V_c$ при направлении возбуждающего излучения вниз, $V_{tot} > V_c$ при направлении возбуждающего излучения вверх. Это говорит о том, что сдвиг вынужденного рассеяния на частицах латекса радиусом $R = 480$ нм стоксов, что согласуется с теоретической оценкой (1; 3), а на частицах латекса радиусом $R = 375$ и 750 нм антистоксов. Результаты по экспериментально полученным величинам спектральных сдвигов и их сравнение с теорией приводятся на Рис. 6а. Рис. 6б показывает зависимость величины спектральных сдвигов ВКоРС Ω_{st}^E от мощности возбуждающего излучения P_{las} , где видно, что для всех образцов при мощности возбуждающего пучка $P_{las} > 17$ мВт $I_L > 6 \times 10^9$ с×см/эрг наблюдается установившийся режим ВКоРС.

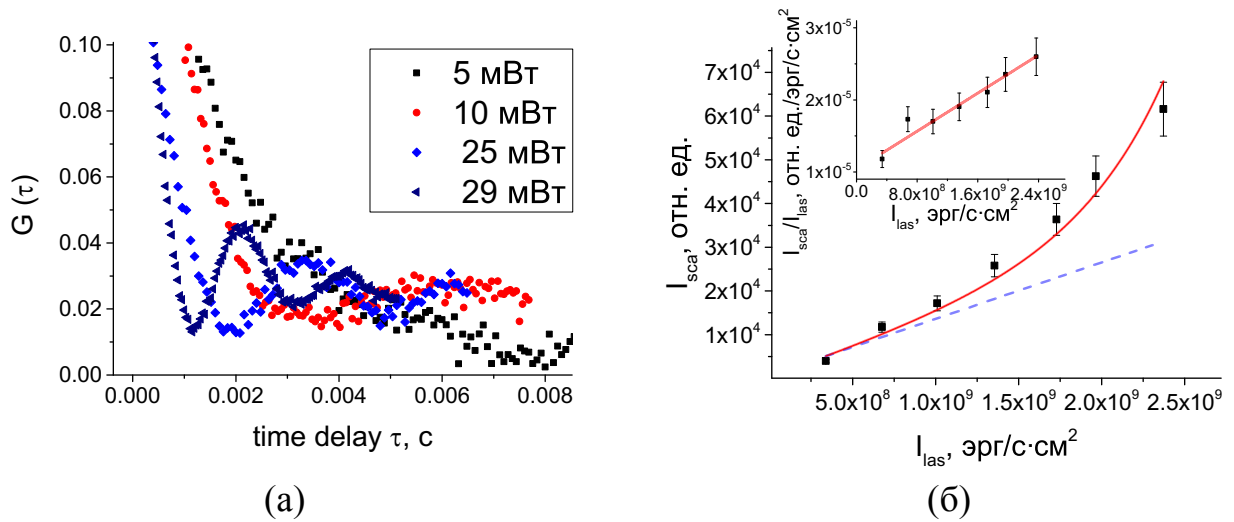


Рисунок 4: (а) – Корреляционные функции рассеянного света, полученные в оптической схеме со световодом на частицах латекса радиусом $R = 480$ нм и объемной концентрацией $C_v = 5 \times 10^{-3} \%$ при мощностях возбуждающего пучка $P_{las} = 5, 10, 25, 29$ мВт; (б) – Аппроксимация формулой $I_{st} = I_{sp} \exp[gI_L L]$ роста относительной интенсивности рассеяния ВКоРС от мощности накачки P_{las} для взвеси латекса. Пунктирная линия $I_S = AI_L$, где $A = (I_S/I_L)$ при $I_L \rightarrow 0$.

Величина спектральных сдвигов линий ВКоРС для частиц латекса $R = 375$ нм – $\Omega_{st}^{E(Lat375nm)} = 800 \pm 46 \text{ с}^{-1}$, для $R = 480$ нм – $\Omega_{st}^{E(Lat480nm)} = 642 \pm 55 \text{ с}^{-1}$ и для $R = 750$ нм – $\Omega_{st}^{E(Lat750nm)} = 419 \pm 18 \text{ с}^{-1}$. Теоретические оценки для частиц латекса соответственно составляют $\Omega_{st}^{T(Lat375nm)} = 616 \pm 56 \text{ с}^{-1}$, $\Omega_{st}^{T(Lat480nm)} = 478 \pm 44 \text{ с}^{-1}$, $\Omega_{st}^{T(Lat750nm)} = 308 \pm 28 \text{ с}^{-1}$, что несколько меньше экспериментальных значений.

Раздел 3.11 посвящен проверке исключения возможности влияния рассеянного назад света на модовую и временную структуру излучения лазера путем добавления в оптическую схему оптической развязки, пропускающей свет назад не более, чем 10^{-5} интенсивности рассеянного света. Показано, что как при

наличии развязки, так и в ее отсутствие период косинусоидальной компоненты не изменяется, и, следовательно, величина частотного сдвига не меняется.

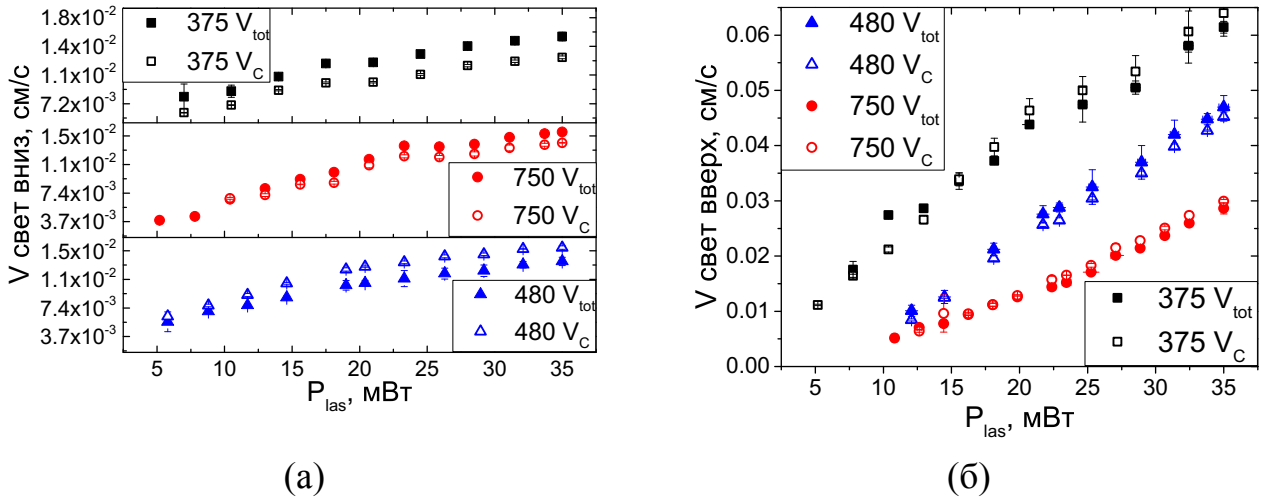


Рисунок 5: – Полная скорость концентрационной волны ВКоРС вместе с конвекционным потоком V_{tot} и скорость конвекционного потока V_C для взвесей частиц латекса радиусами $R = 375, 480, 750$ нм при направлении возбуждающего света вертикально вниз (а) и вверх (б).

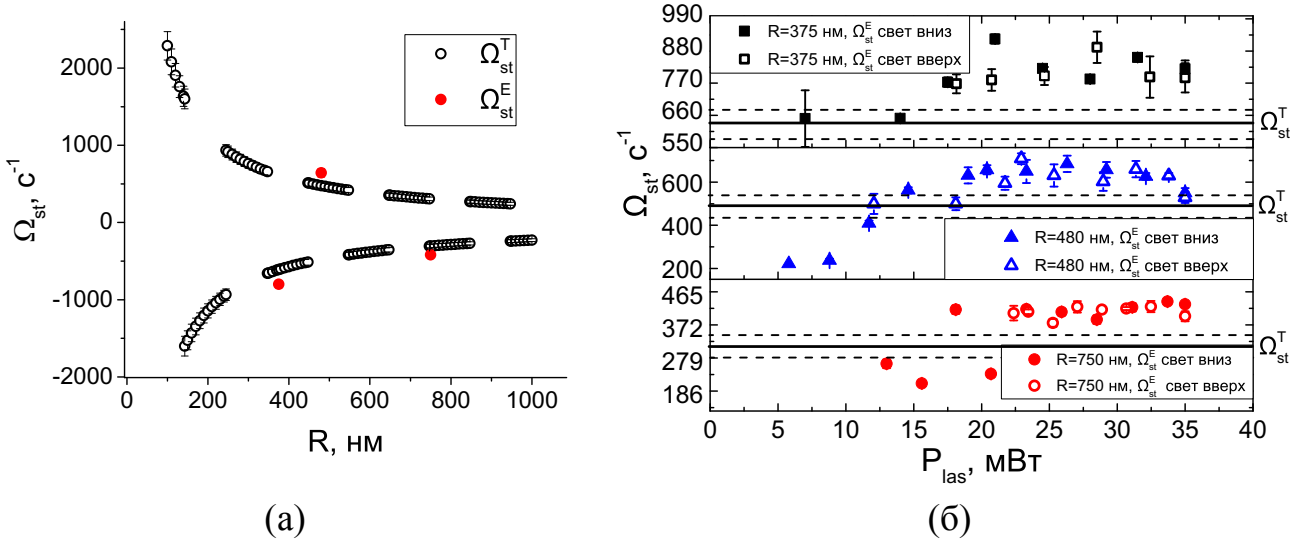


Рисунок 6: (а) – Полые круговые точки – теоретическое значение спектрального сдвига $\Omega_{st}^T = Dq^2$, Сплошные круговые точки – вычисленные из периода косинусоидальной компоненты спектральные сдвиги ВКоРС Ω_{st}^E из экспериментальных корреляционных функций для частиц с радиусами $R = 375, 480, 750$ нм; (б) – Точки – вычисленные из экспериментальных корреляционных функций по формуле (5) спектральные сдвиги ВКоРС Ω_{st}^E для взвесей частиц латексов радиусами $R = 375, 480, 750$ нм. Горизонтальные линии показывают теоретический расчет величины сдвига ВКоРС Ω_{st}^T : сплошная – среднюю величину, пунктирные – среднее отклонение. За счет погрешности измерения температуры и вязкости. Видно, что при мощности возбуждающего пучка $P_{las} > 17$ мВт наблюдается установившийся режим ВКоРС.

В разделе 3.12 проводится проверка возникновения обнаруженного нелинейного (вынужденного) режима концентрационного рассеяния в поперечном резонаторе для частиц латекса с радиусом $R = 100$ нм и объемной концентрацией $C_v = 1.4 \times 10^{-4}$ % в воде, при мощности лазера $P_{las} = 35$ мВт. Показано, что при попадании в моду резонатора наблюдается спектральный сдвиг ВКоРС под углом 90 градусов, составляющий $\Omega_{100nm}^E(90^\circ) = 1122 \pm 21 \text{ с}^{-1}$, что согласуется с теоретической оценкой $\Omega_{100nm}^T(90^\circ) = 1184 \pm 37 \text{ с}^{-1}$.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты:

1. Разработана методика и создана оптическая схема для определения малых частотных сдвигов (~ 100 Гц) и интенсивности нелинейного или вынужденного рассеяния света методом корреляционной спектроскопии с использованием непрерывного лазера.
2. Разработана методика определения направления спектрального сдвига линии нелинейного или вынужденного рассеяния методом корреляционной спектроскопии при наличии потоков жидкости по измеренным скорости потока и полному частотному сдвигу линии вынужденного рассеяния в направлениях вдоль и против потока.
3. Зафиксирован нелинейный рост интенсивности света, рассеянного частицами в жидкости в 2 различных оптических схемах во взвесах микронных агрегатов наночастиц алмаза с радиусом 1200 нм в воде и субмикронных частиц латекса с радиусом 480 нм в воде.
4. Зафиксировано появление спектральной линии, соответствующей линии вынужденного рассеяния света, сдвинутой относительно возбуждающего излучения на частоту, близкую к полуширине линии спонтанного концентрационного рассеяния $\Gamma = Dq^2$, на частицах в жидкости для 4 различных взвесей.
5. Экспериментально показано, что для частиц латекса радиусом $R = 375$ и 750 нм сдвиг антистоксов, а для частиц латекса радиусом $R = 480$ нм стоксов, что полностью согласуется с теоретическим описанием зависимости направления спектрального сдвига ВКоРС от радиуса частиц R .
6. Экспериментально измерены коэффициенты усиления ВКоРС для взвеси агрегатов наночастиц алмаза и взвеси субмикронных частиц латекса, которые удовлетворительно согласуются с теоретическими оценками.

7. Обнаружен режим нелинейного концентрационного рассеяния света на частицах в жидкости, указывающий на начальную фазу перехода рассеяния в вынужденный режим, что подтверждается:
- а) экспоненциальным ростом интенсивности рассеянного света при увеличении мощности возбуждающего пучка;
 - б) появлением спектральной линии рассеянного света с частотным сдвигом, близким к полуширине линии спонтанного рассеяния света на флуктуациях концентрации частиц;
 - в) изменением знака частотного сдвига в зависимости от размера частиц, совпадающего с ранее предсказанным теоретически;
 - г) удовлетворительным согласием полученных экспериментально значений коэффициентов усиления ВКоРС с предсказанными теоретическими.

Публикации по результатам диссертационной работы

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus:

1. Burkhanov I.S., Krivokhizha S.V, Chaikov L.L. Stokes and anti-stokes stimulated Mie scattering on nanoparticle suspensions of latex // Optics Communications. — 2016. — Vol. 381. — P. 360–364.
2. Бурханов И.С., Кривохижа С.В., Чайков Л.Л. Вынужденное концентрационное (диффузионное) рассеяние света на наночастицах жидкой суспензии // Квантовая электроника. — 2016 — Т. 46. — № 6. — С. 548–554.
3. Бурханов И.С., Чайков Л.Л. Экспериментальная проверка возможности обнаружения вынужденного «диффузионного» рассеяния на частицах в жидкости // КСФ. — 2012. — Т. 39. — № 3. — С. 22.
4. Burkhanov I.S., Krivokhizha S.V, Chaikov L.L. Influence of convection on the stimulated concentration light scattering // Journal of Physics: Conference Series 735. – 2016. – P. 012022.
5. Burkhanov I.S., Krivokhizha S.V., Chaikov L.L. The spectra of stimulated concentration scattering (Mie scattering) on nanoparticles latex suspension in the presence of convection // Journal of Physics: Conference Series 747. — 2016. — P. 012055.

Публикации в материалах научных конференций:

1. Экспериментальная проверка возможности обнаружения вынужденного «диффузионного» рассеяния на частицах в жидкости / Бурханов И.С., Чайков Л.Л. // VII Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» «ФПО – 2012» НИУИТМО, Санкт-Петербург. — 2012. — С. 69–71.
2. Экспериментальная проверка возможности обнаружения вынужденного «диффузионного» рассеяния на частицах в жидкости / Бурханов И.С., Чайков Л.Л. // XIV Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики» 11–15 ноября, Звенигород, ФИАН, Москва. — 2012. — С. 59–60.
3. Вынужденное диффузионное рассеяния света на вариациях концентрациях частиц в жидкости / Бурханов И.С., Чайков Л.Л. // V Всероссийская молодежная конференция «Фундаментальные и инновационные вопросы современной физики» ФИАН, Москва. — 2013. — С. 34.
4. Stimulated diffusion light scattering on variations of particles concentration in liquids / Burkhanov I.S., Chaikov L.L. // 11-th International Conference «Correlation Optics'13», Ukrain, Proc. SPIE 9066. — 2013.— P. 906610.
5. Вынужденное концентрационное рассеяния света на вариациях концентрациях частиц в жидкости / Бурханов И.С., Чайков Л.Л. // XV Школа молодых ученых “Актуальные проблемы физики” ФИАН, Москва. — 2014. — С. 69–70.
6. Особенности вынужденного диффузионного рассеяния света на вариациях концентрации наночастиц в жидкости / Бурханов И.С., Чайков Л.Л. // III Международная молодежная научная школа-конференция Современные проблемы физики и технологий, Москва. — 2014. — С. 248–249.
7. Влияние конвекции на вынужденное концентрационное рассеяние света / Бурханов И.С., Кривохижа С.В., Чайков Л.Л. // IX Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика - 2015» 12-16 октября, НИУИТМО, Санкт-Петербург. — 2015. — С. 256–258.
8. Вынужденное диффузионное рассеяние света на вариациях концентрации наночастиц в жидкости при наличии конвекции / Бурханов И. С., Чайков Л. Л. // VI Всероссийская молодежная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики, 15-20 ноября, Москва. — 2015 — С. 60.
9. Вынужденное концентрационное рассеяние света (ВКорС) на частицах в жидкости: стокс и анти-стокс. / Бурханов И.С., Кривохижа С.В., Чайков Л.Л.

// Современные проблемы физики и технологий. V-я Международная молодежная научная школа-конференция, 18–23 апреля, Тезисы докладов. Часть 1. М.: НИЯУ МИФИ, Москва. — 2016. — С. 376.

Список литературы

- [1] Бломберген Н. Вынужденное комбинационное рассеяние света // УФН. — 1969. — Т. 97. — № 2. — С. 307–352.
- [2] Старунов В.С., Фабелинский И.Л. Вынужденное рассеяние Манделъштама-Бриллюэна и вынужденное энтропийное (температурное) рассеяние света // УФН. — 1969. — Vol. 98. — С. 441–491.
- [3] Маш Д.И., Морозов В.В., Старунов В.С., Фабелинский И.Л. Вынужденное рассеяние света крыла линии Релея // Письма в ЖЭТФ. — 1965. — Vol. 2. — № 1. — С. 41.
- [4] Jirauschek C., Jeffrey E.M. and Faris G.W. Electrostrictive and thermal stimulated Rayleigh spectroscopy in liquids // Phys. Rev. Lett. — 2001. — Vol. 87. — № 23. — P. 233902.
- [5] Зайцев Г.И., Кызыласов Ю.И., Старунов В.С., Фабелинский И. Л. Вынужденное температурное рассеяние света в жидкостях // Письма в ЖЭТФ. — 1967. — Vol. 6. — № 8. — С. 802.
- [6] Кызыласов Ю.И., Старунов В.С., Фабелинский И.Л. Вынужденное энтропийное (температурное) рассеяние света в жидкостях // Письма в ЖЭТФ. — 1970. — Vol. — № 11. — С. 110.
- [7] Горелик В.С., Кудрявцева А.Д., Чернега Н.В. Вынужденное глобулярное рассеяние света в трехмерных фотонных кристаллах // КСФ. — 2006. — № 8. — С. 43–50.
- [8] Тареева М.В., Горелик В.С., Кудрявцева А.Д., Чернега Н.В. Спектральные и энергетические характеристики вынужденного глобулярного рассеяния света // КСФ. — 2010. — №11. — С. 3–9.
- [9] Guang S. He, Ken-Tye Yong, and Prasad P.N. Observation of stimulated Mie-Bragg scattering from large-size-gold-nanorod suspension in water // Phys. Rev. A. — 2012. — Vol. 85. — № 4. — P. 043839.
- [10] Guang S. He, Wing-Cheung Law, Alexander Baev, Sha Liu, Mark T. Swihart. Nonlinear optical absorption and stimulated Mie scattering in metallic nanoparticle suspensions // J. Chem. Phys. — 2013. — Vol. 138. — № 2. — P. 024202.

- [11] Guang S. He, Wing-Cheung Law, Liwei Liu, Xihe Zhang, and Paras N. Prasad. Stimulated Mie scattering in nanocrystals suspension // *Appl. Phys. Lett.* — 2012. — Vol. 101. — № 1. — P. 011110.
- [12] Шуберт М., Вильгельми Б. О рассеянии лазерного излучения на молекулах и в твердых телах (обзор) // *Квант. электрон.* — 1974 — Vol. 1. — № 5. — С. 1056–1080.
- [13] Фабелинский И. Л. Спектры света молекулярного рассеяния и некоторые их применения // *УФН.* — 1994. — Vol. 164. — № 9. — С. 897–93.
- [14] Беспалов В.И., Кубарев А.М. // *Письма в ЖЭТФ.* — 1967. — Т.6. — № 2. — С. 500.
- [15] Арефьев И.М., Морозов В.В. Вынужденное концентрационное рассеяние света // *Письма в ЖЭТФ.* — 1969. — Vol. 9. — № 8. — С. 448.
- [16] Lowdermilk W.H., Bloembergen N. Stimulated Concentration Scattering in the Binary-Gas Mixtures Xe-He and SF₆-He // *Phys. Rev. A.* — 1972. — Vol. 5. — №3. — P. 1423.
- [17] Bloembergen N., Lowdermilk W.H., Matsuoka M., Wang C.S. Theory of Stimulated Concentration Scattering // *Phys. Rev. A.* — 1971. — Vol. 3. — № 1. — P. 404.
- [18] Давыдов М.А., Шипилов К.Ф., Вынужденное концентрационное рассеяние света в расслаивающихся растворах // *Письма в ЖЭТФ.* — 1990. — Т. 52. — № 3. — С. 789–792.
- [19] Бурханов И.С., Чайков Л.Л. Экспериментальная проверка возможности обнаружения вынужденного «диффузионного» рассеяния на частицах в жидкости // *КСФ.* — 2012. — Т. 39. — № 3. — С. 22.
- [20] Zemanek P., Jonas A. Simplified description of optical forces acting on a nanoparticle in the Gaussian standing wave // *J. Opt. Soc. Am. A.* — 2002. — Vol. 19. — № 5. — P. 1025–1034.
- [21] Афанасьев А.А., Рубинов А.Н., Михневич С.Ю., Ермолаев И.Е., Теория вынужденного концентрационного рассеяния света в жидкой суспензии прозрачных микросфер // *Оптика и спектроскопия.* — 2007. — Т. 102. — № 1. — С. 106–121.
- [22] Burkhanov I.S., Krivokhizha S.V, Chaikov L.L. Stokes and anti-Stokes stimulated Mie scattering on nanoparticle suspensions of latex // *Optics Communications.* — 2016. — Vol. 381. — P. 360–364.