

На правах рукописи

**У Мэнюань**

**Взаимодействие электромагнитного излучения с суспензиями нано- и  
субмикронных частиц – фундаментальные и прикладные аспекты**

Специальности: 1.3.8. Физика конденсированного состояния

1.3.6. Оптика

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

*У Мэнюань*

Москва — 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
**Чернега Николай Владимирович**

Официальные оппоненты: **Маслова Наталья Сергеевна**,

доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», доцент кафедры квантовой электроники физического факультета

**Евтушенко Геннадий Сергеевич**,

доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы, главный научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»

Защита диссертации состоится « 05 » июня 2024 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.331.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», по адресу: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайтах <https://bmstu.ru/>, <https://kf.bmstu.ru/>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » 2024 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
24.2.331.06,  
канд. техн. наук, доцент



Лоскутов Сергей Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Под действием электромагнитного излучения большой интенсивности в конденсированных средах могут происходить процессы, приводящие к изменению их свойств. Результат взаимодействия может носить статический или динамический характер. В первом случае трансформация характеристик среды сохраняется после прекращения воздействия на систему, а во втором случае изменение существует только в процессе действия излучения. Вторичное излучение, включая вынужденные рассеяния различного типа, возникающие в среде, несет в себе информацию об этих изменениях. Под вторичным излучением, возникающим в веществе под действием мощного лазерного излучения, в первую очередь подразумеваются вынужденные рассеяния света различного типа в жидкостях и твердых телах: вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) (фотон-оптические фононы), вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ) (фотон-акустические фононы) и вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние (ВНКР) (фотон-локальные акустические колебания нанообъекта). Возникновение акустических волн в жидкости, изменения кристаллической решетки в кристаллах, колебания молекул, механические колебания наноразмерных частиц в наноматериалах, являющиеся результатом фотон-фононного взаимодействия, существенно изменяют спектральные, временные и пространственные характеристики вторичного излучения.

Его анализ позволяет получать информацию о состоянии системы в реальном масштабе времени и реализовать направленное изменение её параметров. Исследования этих процессов являются весьма актуальными, так как помимо получения фундаментальной информации о характеристиках среды, трансформируемых в процессе её взаимодействия с излучением, результаты работы являются востребованными для реализации целого ряда практических приложений. Одним из наиболее важных практических приложений является создание динамических структур в гетерогенных средах с целью управления параметрами когерентного излучения. Этот процесс, как правило, реализуется с использованием вынужденных рассеяний света.

Использование рассеяния света для преобразования электромагнитного излучения создает новые возможности управления лазерным излучением, что весьма существенно для большого количества практических приложений в научных исследованиях, в промышленности, медицине, а также в повседневной жизни.

Лазеры на основе вынужденного комбинационного рассеяния позволяют генерировать мощные импульсы различной длины волны. Получение высококачественного пространственного распределения наносекундных импульсов было достигнуто с помощью вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в режиме обращения волнового фронта. Реализация модуляции

добротности с помощью вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна, позволяет выбирать режимы и оптимизировать работу лазера путем управления временными характеристиками лазерного излучения. Кроме того, вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние открывает возможность создания источника направленного лазерного излучения с высокой эффективностью преобразования и обладающего заданным спектральным распределением. В неоднородных средах, таких как суспензии нано- и субмикронных частиц, фотон-фононные взаимодействия отличаются от аналогичных процессов в сплошных средах. Это связано как с появлением пространственного ограничения в нано- и субмикронных системах, обусловленного размерами частиц, так и с созданием обратной связи. Понимание и оптимизация фотон-фононных взаимодействий в неоднородных средах могут привести к разработке новых методов и технологий, улучшающих характеристики оптических сигналов, что имеет большое значение для различных областей науки и техники.

**Степень разработанности темы диссертации.** В литературном обзоре приведено подробное описание нелинейно-оптических эффектов, возникающих в процессе взаимодействия электромагнитного излучения с конденсированными средами. Экспериментальные исследования, проведенные в диссертационной работе, посвящены изучению процессов, происходящих в суспензиях наноразмерных частиц под действием лазерного излучения. Возникающие в суспензии акустические волны и локализованные акустические колебания наночастиц приводят к возбуждению вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна и вынужденного низкочастотного комбинационного рассеяния света. Теоретически показана и экспериментально подтверждена возможность управления характеристиками лазерного излучения с помощью этих эффектов. Все поставленные в работе задачи успешно выполнены, поставленная цель достигнута.

**Целью работы** является исследование физики процессов, происходящих в неоднородных средах под действием мощного лазерного излучения оптического диапазона, и определение влияния этих процессов на характеристики вторичного излучения, возникающего в этих системах.

В соответствии с заявленной целью были поставлены и решены следующие задачи:

1. Экспериментальное исследование процессов генерации гиперзвукового возбуждения в суспензиях нано- и субмикронных частиц различной физической природы, формирование когерентного акустического возбуждения среды, приводящего к возникновению вынужденных рассеяний света (ВНКР и ВРМБ).

2. Экспериментальное исследование внутрирезонаторного ВНКР в суспензиях различных нано- и субмикронных частиц и сопоставление полученных результатов с ВНКР вне лазерного резонатора.

3. Исследования влияния характеристик неоднородной среды (физическая природа, размер, форма, концентрация частиц) на параметры рассеянного излучения в процессах вынужденных рассеяний.

**Объекты исследования.** В качестве объектов исследования были выбраны монодисперсные водные суспензии нано- и субмикронных частиц полистирола, аморфного кварца, алмаза, золота и серебра.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Впервые систематически исследовано внутрирезонаторное вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние света в водных суспензиях различных наночастиц.

2. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность создания когерентного акустического возбуждения систем нано- и субмикронных частиц, позволяющего реализовать режим модуляции добротности с получением импульсов в диапазоне от десятков наносекунд до микросекунд при внутрирезонаторном ВНКР.

3. Впервые экспериментально реализован режим синхронизации мод при внутрирезонаторном ВНКР в водной суспензии наночастиц.

**Теоретическая и практическая значимость работы** определяется следующим:

1. Разработаны физические основы процесса формирования когерентного акустического возбуждения гетерогенной системы и продемонстрирована возможность практического применения этого эффекта для управления спектральными и временными характеристиками электромагнитного излучения в широком спектральном диапазоне при модуляции добротности с улучшением качества пространственного распределения пучка.

2. Экспериментально показана возможность управления спектральными и временными характеристиками лазерного излучения в широком диапазоне с использованием метода синхронизации мод при внутрирезонаторном низкочастотном комбинационном рассеянии света.

**Методология и методы исследования.** В качестве методологической основы использовано фотон-фононное взаимодействие в водных суспензиях монодисперсных нано- и субмикронных частиц. Для исследования особенностей фотон-фононного взаимодействия использовались методы спектроскопии вынужденного низкочастотного комбинационного рассеяния и вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна, а также современные методы физики конденсированного состояния.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. В водной суспензии субмикронных частиц диоксида кремния при воздействии импульсного лазерного излучения оптического диапазона формируется тепловая решетка, обеспечивающая обратную связь и, как следствие, вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна в направлениях вперед и назад с коэффициентом преобразования выше 10%.

2. Использование неоднородных сред для реализации внутрирезонаторного вынужденного низкочастотного комбинационного рассеяния в качестве модуляторов добротности в твердотельном лазере на рубине позволяет

направленно менять длительность импульсов излучения в диапазоне от нескольких десятков наносекунд до микросекунд с существенным улучшением качества пространственного распределения пучка.

3. Внутрирезонаторное вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние в суспензии нано- и субмикронных частиц позволяет реализовать режим синхронизации мод.

**Достоверность** полученных результатов обеспечена надёжностью применяющихся экспериментальных и теоретических методов, совпадением результатов аналитических расчётов с экспериментальными данными, а также аprobацией работы в научных статьях и докладах на всероссийских и международных конференциях.

**Личный вклад автора.** Все представленные в диссертации оригинальные результаты получены автором самостоятельно или при его участии. Автор работы принимал непосредственное участие на всех этапах исследования: в постановке цели и задач, при разработке оптимальных методов решения, в анализе полученных экспериментальных результатов, при написании статей и представлении результатов работы на всероссийских и международных конференциях. Наряду со своим научным руководителем автор принимал активное участие в анализе полученных экспериментальных результатов и написании научных статей по теме диссертации.

**Аprobация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Школа молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» (Москва, 2021 г.), International Conference on Ultrafast Optical Science (Москва, 2021 г.), VII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» (Москва, 2021 г.), XI Всероссийская конференция «Необратимые процессы в природе и технике» (Москва, 2021 г.), V Всероссийская конференция «Физика водных растворов» (Москва, 2022 г.), 20th International Conference Laser Optics (Санкт-Петербург, 2022 г.), ICPPP21 International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena (Bled (Slovenia), 2022 г.), The International Conference on Advanced Materials Science and Engineering 2022 (Osaka (Japan), 2022 г.), XII Международная конференция «Фотоника и информационная оптика» (Москва, 2023 г.), IX Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» (Москва, 2023 г.).

**Публикации.** Всего по теме диссертации опубликовано 3 статьи в рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 7 работ в сборниках трудов международных и всероссийских конференций. Список статей приводится в конце авторефера.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и заключения и списка литературы. Полный объём диссертации

составляет 119 страниц, в том числе 40 рисунков и 3 таблицы. Библиография содержит 154 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках диссертации, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приводится обзор литературы по теме диссертации, представлен анализ литературы, посвященной фотон-фононным взаимодействиям в различных конденсированных системах, а также методам модуляции добротности и синхронизации мод.

**В второй главе** приводится описание образцов. В качестве объектов исследования были использованы водные суспензии с различной концентрацией частиц различных типов (диэлектрических, полупроводниковых, металлических) и размеров (наноразмерных и субмикронных), таких как полистирол, аморфный кварц, алмаз, золото, серебро. Все суспензии, которые использовались, являются монодисперсными. Достаточная монодисперсность частиц обеспечивает возбуждение вынужденного низкочастотного комбинационного рассеяния в суспензиях этих частиц. Для возбуждения вынужденного рассеяния концентрация суспензий варьируется в диапазоне  $10^8\text{--}10^{14}/\text{см}^3$  в зависимости от цели работы, экспериментального устройства и размера частиц.

**В третьей главе** были подробно изучены физические процессы, возникающие в суспензиях различных частиц при взаимодействии с импульсным лазерным излучением и приводящие к вынужденному рассеянию света (ВНКР и ВРМБ) в направлении вперед и назад.

Принципиальная схема экспериментальной установки для наблюдения вынужденного рассеяния света в направлениях вперед и назад представлена на Рисунке 1. Лазерное излучение фокусировалось линзой (3) в кварцевую кювету (4) с исследуемой суспензией наночастиц. Сигнал, возникающий в кювете, и часть возбуждающего излучения, проходящего через кювету, попадали в правый интерферометр Фабри-Перо (5) в виде слабо расходящегося пучка. Излучение, рассеянное назад, регистрировалось левым интерферометром (5) одновременно с сигналом лазера, отраженным от зеркала (10). После интерферометров (5) сигналы рассеянного излучения подавались на камеры (6) и записывались в виде интерферограмм. Система регистрации (9) использовалась для контроля характеристик возбуждающего излучения, таких как спектр, длительность и энергия импульса.

Так как основной целью работы было исследование рассеяний в низкочастотной области спектра, все спектры регистрировались интерферометрами Фабри-Перо с областью дисперсии от  $0,2\text{ см}^{-1}$  до  $1,67\text{ см}^{-1}$  в

зависимости от частотного сдвига рассеянного излучения. Спектры получались в виде интерферограмм в форме систем колец.

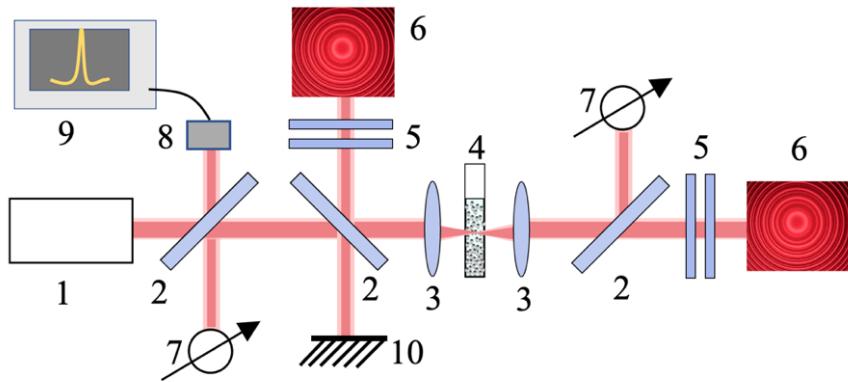


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки для наблюдения направленного вперёд и назад вынужденного рассеяния света в водной суспензии сферических наночастиц: 1 — лазер; 2 — стеклянные пластины; 3 — линзы; 4 — кювета, заполненная водной суспензией частиц; 5 — интерферометры Фабри-Перо; 6 — камеры; 7 — измерители мощности излучения; 8 — детектор характеристик излучения лазера; 9 — система регистрации; 10 — диэлектрическое зеркало

Были проведены исследования вынужденного рассеяния света в направлениях вперёд и назад в водных суспензиях, содержащих частицы аморфного кварца с размерами 100 и 200 нм в воде, при концентрациях  $10^{10}$ – $10^{13}$ /см<sup>3</sup>. На Рисунке 2 представлены спектры вынужденного рассеяния света в направлениях вперёд и назад для водной суспензии аморфных сферических наночастиц  $\text{SiO}_2$  диаметром 100 нм с концентрацией  $2,9 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>, возбуждаемые излучением второй гармоники Nd-YAG лазера с длительностью импульса 10 нс и энергией импульса 9 мДж.

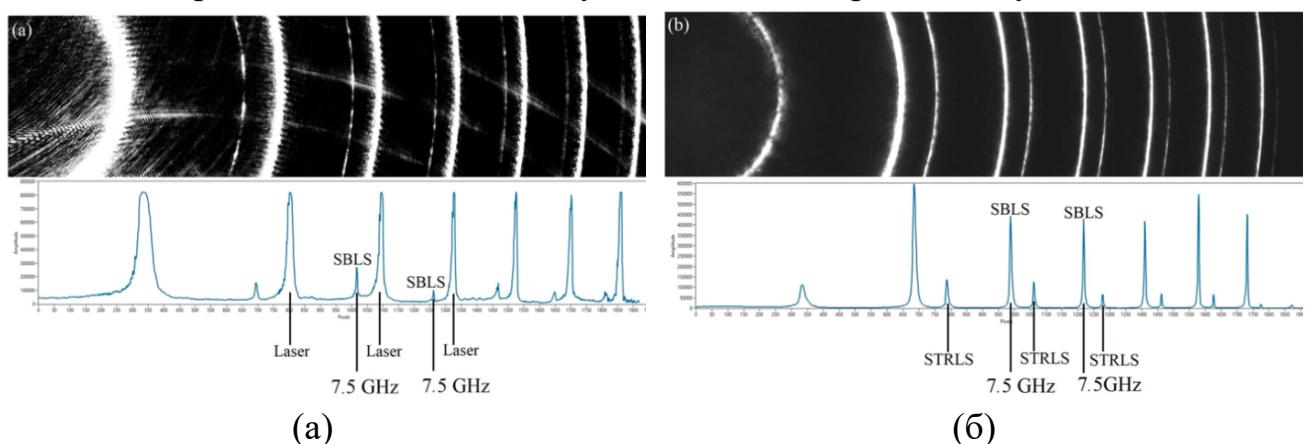


Рисунок 2. Спектры вынужденного рассеяния света в водной суспензии частиц кварца диаметром 100 нм при геометрии рассеяния вперед (а) и назад (б). Laser — лазерная линия, SBLS — линия ВРМБ, STRLS — линия ВТР, цифры возле линий — сдвиг частоты в ГГц

Основным результатом, полученным в данных экспериментах, является обнаружение рассеянного излучения в направлении вперед, то есть попутно с

накачкой, и имеющего спектральное смещение относительно лазерного излучения, соответствующее смещению излучения ВРМБ в воде, которое, как известно, возбуждается только в направлении назад. Причиной возникновения ВРМБ вперед является наличие неоднородностей в активной среде. Нелинейное (двухфотонное) поглощение света вблизи поверхности частиц суспензии приводит к образованию в системе тепловой решетки и, соответственно, к появлению вынужденного теплового рассеяния света (ВТР) в направлении назад. Данное излучение является накачкой для ВРМБ, которое в данном случае совпадает по направлению с исходным лазерным излучением. В результате при освещении активной среды одномодовым излучением второй гармоники Nd-YAG лазера наблюдалось направленное вперед и назад вынужденное рассеяние света с частотным сдвигом около 7,5 ГГц, соответствующим вынужденному рассеянию Мандельштама-Бриллюэна в воде. При этом эффективность преобразования составляет около 10%.

Также было проведено исследование ширины линии ВРМБ. На Рисунке 3(а, б) представлено сравнение ширины линий возбуждающего излучения и ВРМБ по двум направлениям. В результате установлено, что наименьшее значение спектральной ширины наблюдается для ВРМБ, направленного "вперед".

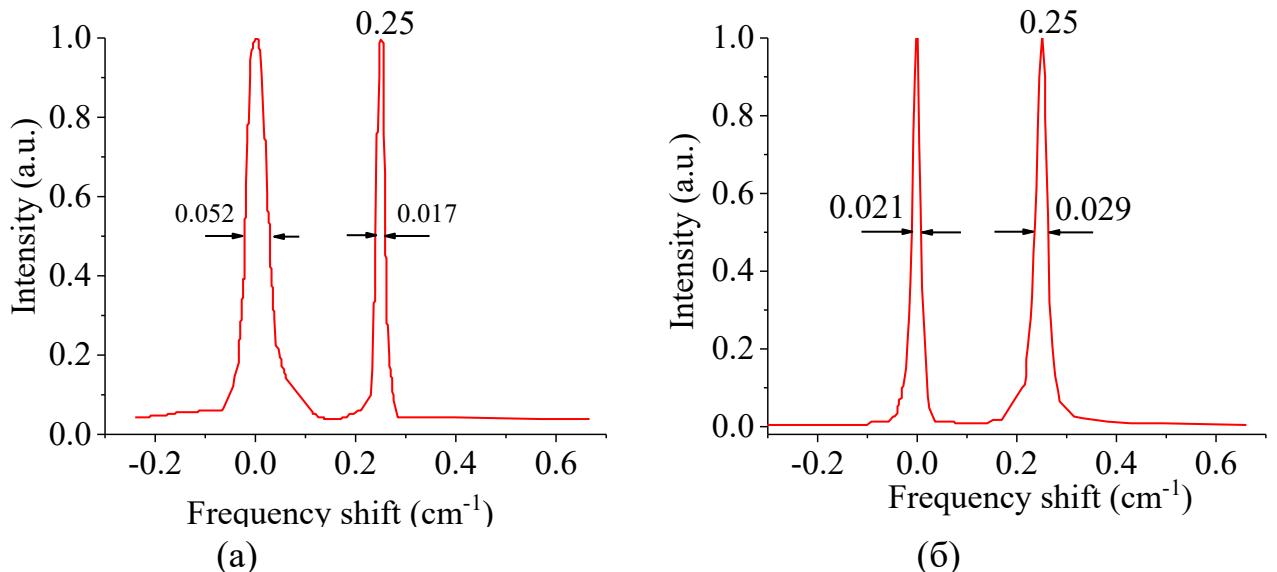


Рисунок 3. Нормированные спектры ВРМБ в суспензии сферических аморфных наночастиц  $\text{SiO}_2$  размером 100 нм для геометрий вперед (а) и назад (б)

Аналогичные результаты также были получены в суспензиях частиц полистирола размером 100 и 300 нм при возбуждении рубиновым лазером с длиной волны 694,3 нм. Таким образом, в суспензии частиц наблюдалось ВРМБ в направлении вперед, что отличается от традиционных результатов экспериментов, при которых ВРМБ было обнаружено только в обратном направлении.

Концентрация частиц в суспензии оказывает влияние на порог ВРМБ. При высокой концентрации, особенно когда концентрация частиц превышает критическое значение, возможно подавление ВРМБ, и в суспензиях частиц наблюдается только ВНКР. Отметим, что пороговые значения концентрации,

соответствующие резкому повышению порога возбуждения ВРМБ, определяются морфологией частиц суспензии и свойствами жидкости. В качестве примера на Рисунке 4 приведены спектры ВНКР, полученные для водной суспензии наночастиц полистирола размером 300 нм с концентрацией  $1,8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$  при возбуждении рубиновым лазером с длиной волны 694,3 нм.

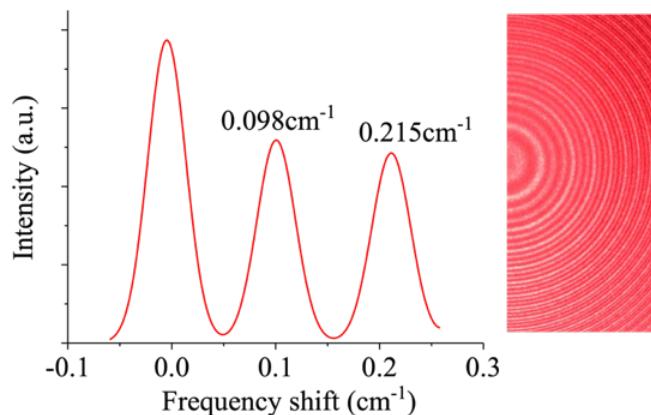


Рисунок 4. Спектр ВНКР в суспензии полистирола 300 нм, на вставке справа показана интерферограмма Фабри-Перо, соответствующая этому спектру

При данных значениях концентрации для данного размера частиц ВРМБ не возбуждалось (порог возбуждения не достигался) и в спектре рассеянного излучения присутствовало только излучение ВНКР (как в направлении вперед, так и в направлении назад). Как видно из Рисунка 4, в спектре присутствуют две компоненты вынужденного низкочастотного комбинационного рассеяния, соответствующие дышащей ( $l = 0$ ) и квадрупольной ( $l = 2$ ) сферическим модам собственных акустических колебаний частиц ( $l$  — квантовое число углового момента), при этом максимальная эффективность преобразования энергии накачки в ВНКР достигала 57%. Это намного больше, чем для ВРМБ. Таким образом, в дополнение к спектральным приложениям, метод ВНКР, благодаря своей высокой эффективности преобразования с частотным сдвигом в гигагерцовом и терагерцовом диапазонах, может использоваться как источник бигармонической накачки.

**В четвёртой главе** приведены результаты по экспериментальной реализации внутрирезонаторного ВНКР, в частности, была исследована зависимость сдвига частот внерезонаторного и внутрирезонаторного ВНКР от размера сферических частиц в водной суспензии.

**В разделе 4.1** описывается методика эксперимента для возбуждения и регистрации внутрирезонаторного вынужденного низкочастотного комбинационного рассеяния в водной суспензии монодисперсных частиц, также приведены спектры внутрирезонаторного ВНКР для наночастиц полистирола диаметром 200 нм (см. Рисунок 5).

Для возбуждения и регистрации спектров внутрирезонаторного ВНКР кювета с суспензией (4) помещалась внутрь лазерного резонатора вместо классического

модулятора с раствором криптоцианина. В этом случае осциллограф использовался для регистрации длительности излучения, возникающего при внутрирезонаторном ВНКР. Осцилограммы свободной генерации рубинового лазера также регистрировались при удалении как модулятора с криптоцианином, так и кюветы (4). При экспериментальном исследовании внутрирезонаторного ВНКР было обнаружено, что частотный сдвиг практически такой же, как во внerezонаторном случае. Однако во внутрирезонаторном ВНКР по сравнению с внerezонаторным повышается вероятность наблюдения ВНКР и увеличивается коэффициент преобразования.

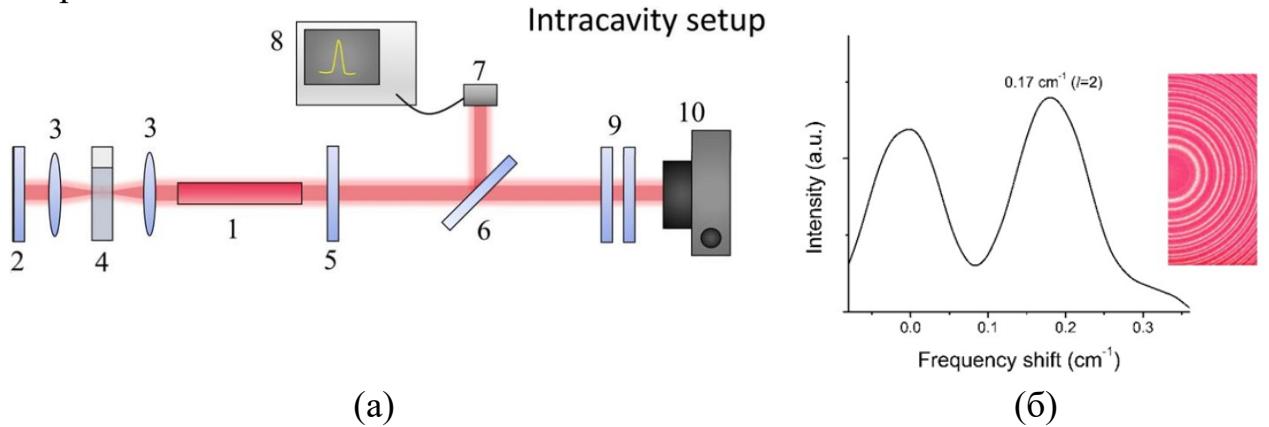


Рисунок 5. Схема экспериментальной установки для возбуждения и регистрации внутрирезонаторного ВНКР в водной суспензии монодисперсных сферических частиц: 1 — кристалл рубина, 2 — непрозрачное зеркало (95%); 3 — линзы; 4 — кювета, заполненная водной суспензией частиц; 5 — выходное зеркало (10%); 6 — стеклянная пластина; 7 — фотодиод; 8 — осциллограф; 9 — интерферометр Фабри-Перо; 10 — цифровая фотокамера (а). Спектр внутрирезонаторного ВНКР в суспензии полистирола (размер частиц 200 нм), соответствующий квадрупольной моде колебаний частицы ( $l=2$ ) (б)

На Рисунке 6 приведена зависимость сдвига частоты внerezонаторного и внутрирезонаторного ВНКР от размера сферических частиц полистирола в водной суспензии. Согласно модели упругой сферы Лэмба, частоты колебаний сферической частицы обратно пропорциональны диаметру частиц. Как видно из этого рисунка, значение собственной частоты определенной акустической моды (определенной квантовым числом орбитального углового момента  $l$ ) линейно зависит от обратного размера частицы. Отклонение формы наночастиц от сферической, а также влияние среды и окружающих наночастиц могут приводить к небольшому различию между экспериментальными и теоретическими значениями частотных сдвигов ВНКР. При этом сдвиги частот внerezонаторного и внутрирезонаторного ВНКР практически одинаковы, но интенсивность внутрирезонаторного ВНКР больше, чем при внerezонаторном возбуждении из-за многократного внутрирезонаторного отражения.

Таким образом, как внутрирезонаторное, так и внerezонаторное ВНКР можно эффективно использовать для получения информации о морфологии исследуемой

системы, а также для определения распределения наночастиц по размерам. Помимо спектроскопических приложений, помещая образец внутрь резонатора лазера, можно модулировать излучение в гига- и терагерцовом диапазоне частот на выходе лазера. Внутрирезонаторное ВНКР может быть использовано для реализации режимов модуляции добротности и синхронизации мод лазера.

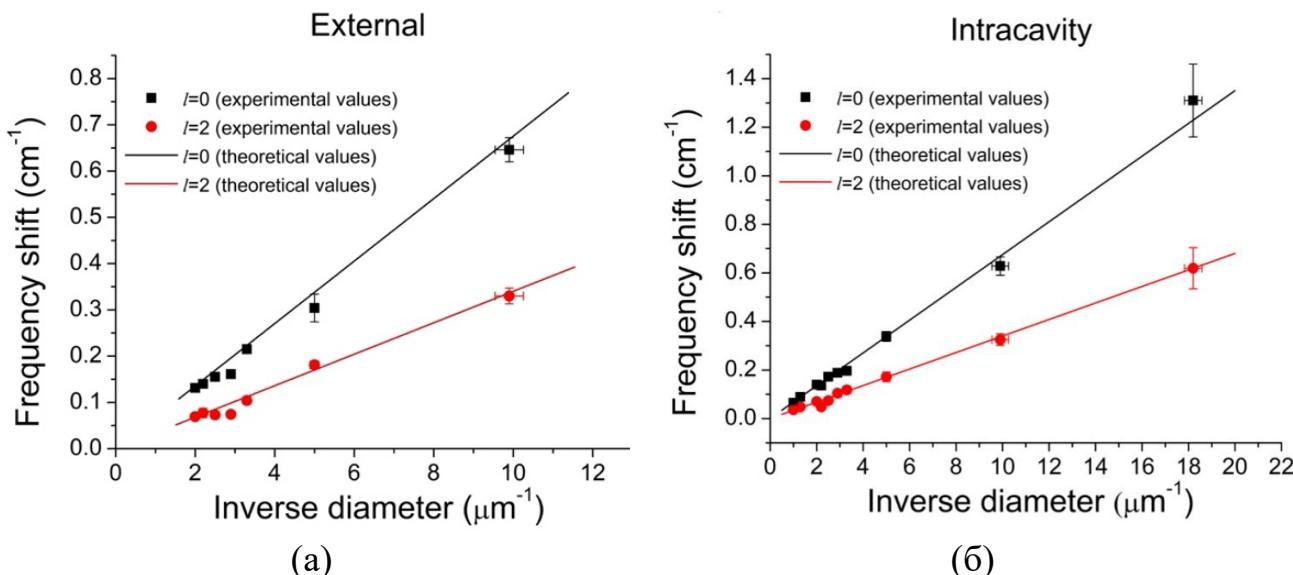


Рисунок 6. Экспериментальная и теоретическая зависимость сдвига частот внerezонаторного (а) и внутрирезонаторного (б) ВНКР от размера сферических частиц полистирола в водной суспензии

**В пятой главе** приведены результаты исследований по использованию внутрирезонаторного ВНКР, возбуждаемого в водной суспензии различных нано- и субмикронных частиц, для модуляции добротности и синхронизации мод, а также изучена зависимость временных и частотных параметров излучения от характеристик частиц.

При использовании внутрирезонаторного ВНКР, как и при вынужденных рассеяниях других типов (например ВРМБ), возможна реализация режима модуляции добротности. Помещая кювету с суспензией частиц в резонатор лазера (см. Рисунок 5), при изменении концентрации частиц в суспензии можно наблюдать переход от режима свободной лазерной генерации к режиму модуляции добротности. На Рисунке 7 показана временная зависимость излучения лазера для свободной генерации рубинового лазера (возникающей при отсутствии кюветы или при низкой концентрации частиц в суспензии) и для модуляции добротности при внутрирезонаторном ВНКР в водной суспензии наночастиц полистирола.

Временная структура лазерного импульса, генерируемого во внутрирезонаторной установке, определяется морфологией используемой системы субмикронных частиц и их концентрацией. Все используемые в экспериментах образцы практически не поглощали на длине волны генерации 694,3 нм, а возбуждение когерентных акустических колебаний частиц происходило за счет пондеромоторного взаимодействия.

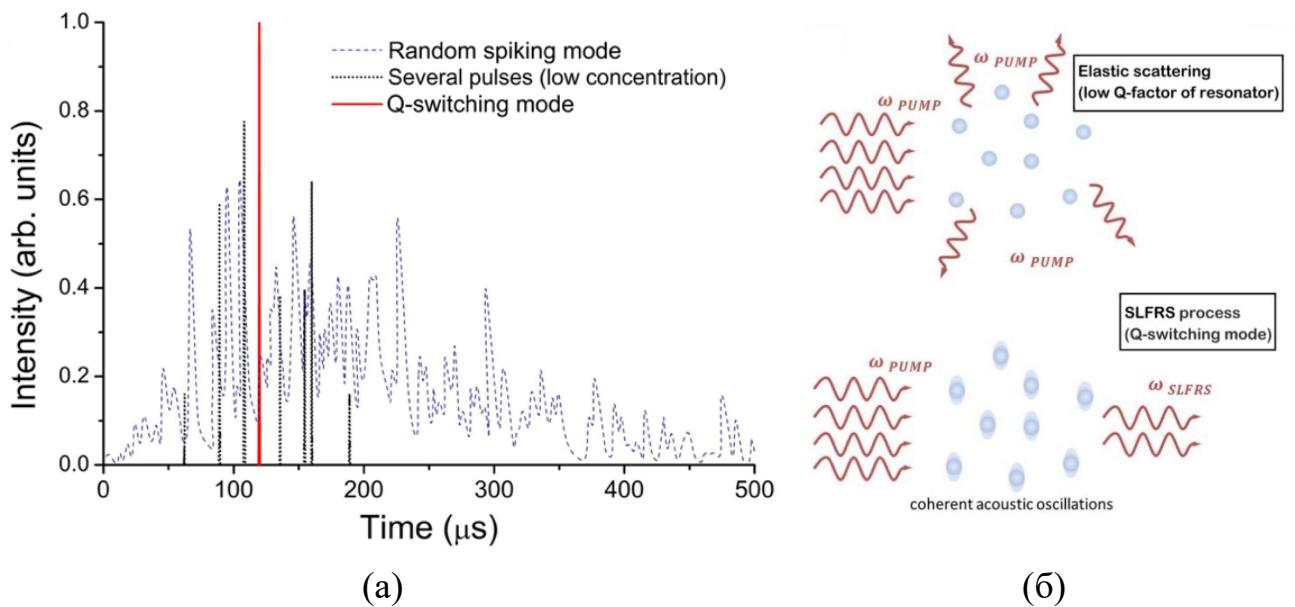


Рисунок 7. Модуляция добротности, полученная с помощью внутрирезонаторного ВНКР в водной суспензии полистирола, и свободная генерация (а). Схематическое изображение механизма модуляции добротности при помещении внутри резонатора суспензии частиц (б)

В случае режима модуляции добротности с использованием внутрирезонаторного ВНКР излучение лазера определяется в первую очередь морфологией используемых частиц. На Рисунке 8 показана типичная временная динамика лазерных импульсов при использовании суспензии частиц золота и полистирола. Размер используемых частиц одинаков. Как видно из приведенного рисунка, длительность импульса сильно зависит от типа используемых частиц. В экспериментах были получены импульсы различной длительности от десятков наносекунд до микросекунд при использовании суспензии частиц различной природы.

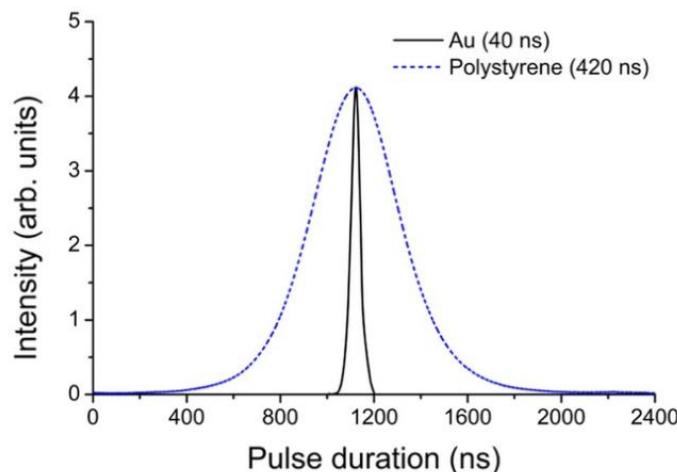


Рисунок 8. Типичная временная динамика лазерных импульсов в режиме модуляции добротности при использовании суспензий частиц золота и полистирола, одинаковых по размеру (100 нм), внутри резонатора

Длительность импульса зависит также от размера частиц. Как видно из Рисунка 9(а), с увеличением размера частиц длительность импульса в режиме модуляции добротности увеличивается. Длительность импульса определяется параметрами акустических колебаний, которые в свою очередь определяются размером и акустическими характеристиками частиц. На Рисунке 9(б) представлена расчетная зависимость мнимой части собственной частоты колебаний, отвечающей за затухание колебаний различных мод, от размера частиц полистирола.

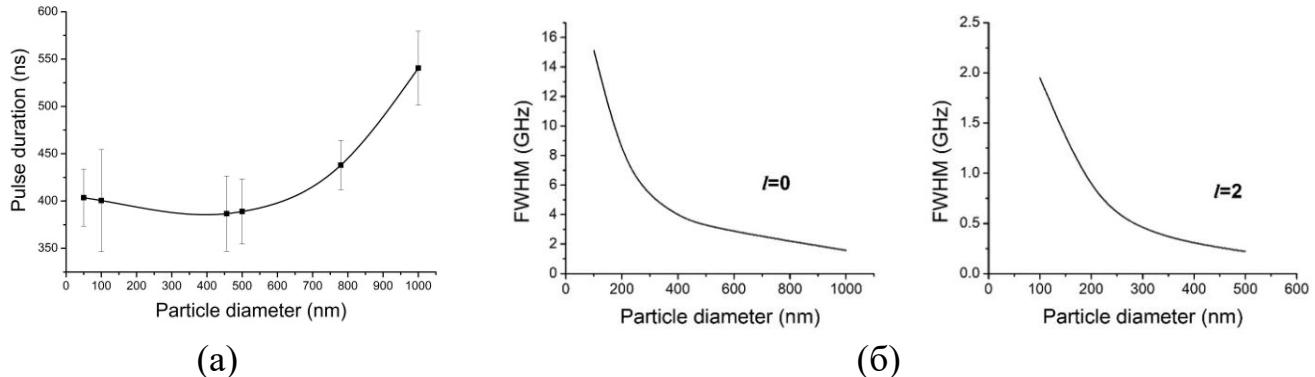


Рисунок 9. Зависимость длительности импульса в режиме модуляции добротности от размера частиц полистирола (а), и зависимость мнимой части частоты собственных колебаний, ответственной за затухание двух типов мод ( $l=0$ ,  $l=2$ ), от размера частиц полистирола (б)

Мнимая часть характеристической частоты колебаний становится меньше с увеличением размера частиц для обеих мод  $l = 0$  и  $l = 2$ , то есть затухание в двух модах становится меньше. Отметим, что экспериментально полученная зависимость длительности импульса лазерной генерации при использовании для модуляции добротности внутриструнаторного ВНКР в супензии полистирольных частиц демонстрирует её увеличение при увеличении размера частиц.

Кроме того, длительность импульса зависит от концентрации частиц. На Рисунке 10 показано, что с увеличением концентрации частиц золота в водной супензии длительность импульса уменьшается.

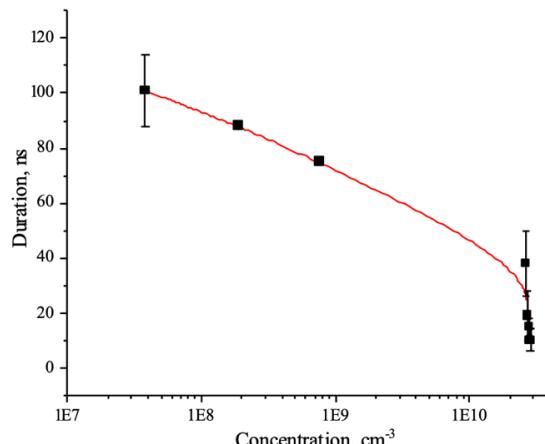


Рисунок 10. Зависимость длительности импульса от концентрации водной супензии частиц золота

Увеличение концентрации частиц от  $10^7$  см $^{-3}$  до  $10^{10}$  см $^{-3}$  приводит к уменьшению длительности импульса в десять раз.

Модуляция добротности с использованием внутрирезонаторного ВНКР имеет много преимуществ по сравнению с пассивной модуляцией добротности, основанной на применении насыщающихся поглотителей (в случае рубинового лазера, это, как правило, раствор криптоцианина в этаноле). Например, энергия импульса в режиме модуляции добротности при использовании водной суспензии частиц SiO<sub>2</sub> составляла 0,5–0,6 Дж, что в два раза превышало энергию импульса при использовании модулятора на красителе (криптоцианине) при одинаковых параметрах накачки.

Отметим, что при модуляции добротности с использованием вынужденных рассеяний света (прежде всего ВРМБ) из-за эффекта обращения волнового фронта происходит существенное улучшение пространственной структуры излучения. При использовании эффекта внутрирезонаторного вынужденного низкочастотного комбинационного рассеяния для модуляции добротности пространственная структура лазерного излучения становится более однородной, по сравнению со случаем использования для модуляции добротности раствора криптоцианина в этаноле. На Рисунке 11 приведено пространственное распределение излучения лазера при использовании для модуляции криптоцианина (см. Рисунок 11, а) и водной суспензии частиц диоксида кремния (см. Рисунок 11, б).

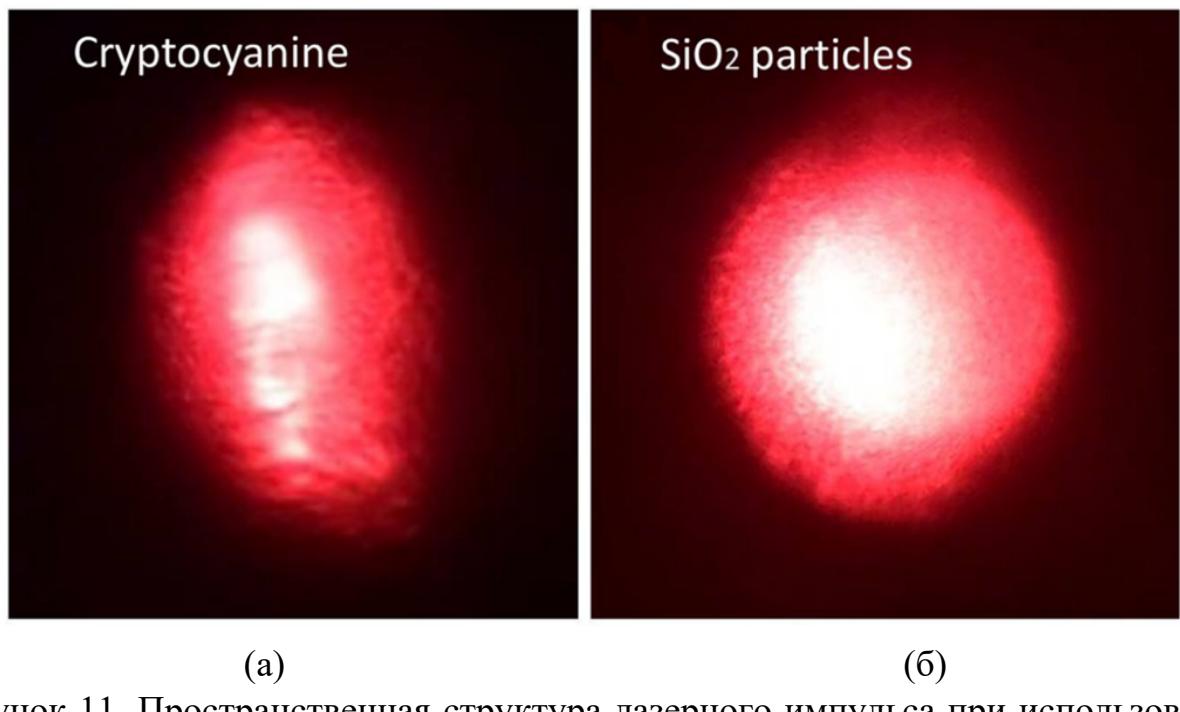


Рисунок 11. Пространственная структура лазерного импульса при использовании модулятора с раствором криптоцианина в этиловом спирте (а) и при использовании суспензии частиц SiO<sub>2</sub> в качестве модулятора (б) при одинаковом уровне интенсивности накачки

Таким образом, метод модуляции добротности с использованием внутрирезонаторного ВНКР имеет ряд преимуществ по сравнению с

классическими методами пассивной модуляции добротности, а именно, широкий диапазон длительностей лазерного излучения, независимость процесса от длины волны излучения, простота экспериментальной реализации, отсутствие эффекта фотохимической деградации, свойственной насыщающимся поглотителям, более однородная структура лазерного излучения. Данные преимущества делают механизм внутрирезонаторного ВНКР очень перспективным для использования в качестве пассивных модуляторов в различных лазерных системах.

Кроме модуляции добротности, внутрирезонаторное ВНКР может быть использовано для реализации режима синхронизации мод. Как известно, для получения ультракоротких лазерных импульсов методом пассивной синхронизации мод используются быстрые поглотители. Режим синхронизации мод может быть также реализован и при внутрирезонаторном ВНКР света.

На Рисунке 12 показан импульс в режиме синхронизации мод для суспензии частиц полистирола диаметром 300 нм в схеме внутрирезонаторного ВНКР без фокусировки, т.е. без линз (3) (см. Рисунок 5) и суспензии частиц серебра диаметром 30 нм при фокусировке. Длительность отдельного пичка составила величину менее 3 нс, что на два порядка меньше длительности импульса в режиме модуляции добротности.

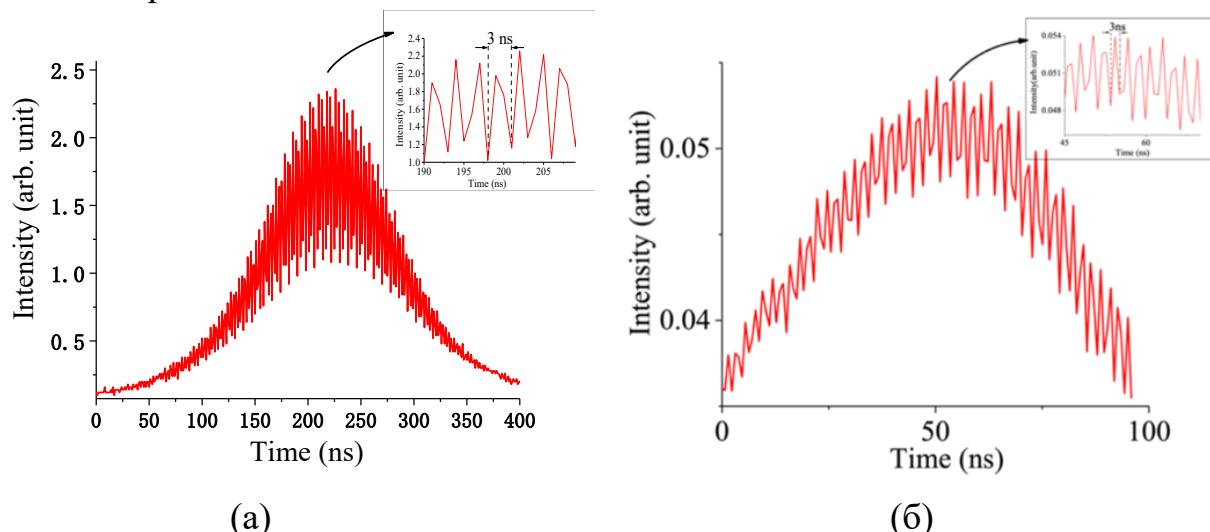


Рисунок 12. Синхронизация мод, полученная с помощью внутрирезонаторного ВНКР в суспензии частиц полистирола с размером 300 нм (а) и серебра с размером 30 нм (б)

Таким образом, использование субмикронных систем частиц различной физической природы во внутрирезонаторной конфигурации ВНКР позволяет не только получить информацию об акустических свойствах частиц и их размерах, но и реализовать эффективную лазерную модуляцию добротности и синхронизацию мод. Применение внутрирезонаторного ВНКР, возбуждаемого в системах различных нано- и субмикронных частиц различной морфологии, позволяет варьировать параметры лазерного излучения в широких пределах.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы, состоящие в следующем.

1. Проведено детальное исследование процесса взаимодействия суспензий нано- и субмикронных частиц различной природы с импульсным электромагнитным излучением, приводящего к вынужденному низкочастотному комбинационному рассеянию света в схемах внутри и вне резонатора. Показано, что частотные сдвиги (лежащие в гигагерцовом диапазоне) стоксовых компонент, полученные при использовании обеих схем, совпадают и соответствуют расчетным значениям, полученным по теории Лэмба.

2. Обнаружен и исследован процесс возникновения тепловой решетки из-за двухфотонного поглощения света в водных суспензиях частиц  $\text{SiO}_2$  и полистирола, приводящий к возникновению обратной связи, что обуславливает генерацию вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в направлении вперед и назад.

3. Детально экспериментально исследована модуляция добротности при внутрирезонаторном ВНКР в водных суспензиях нано- и субмикронных частиц полистирола, алмаза,  $\text{SiO}_2$  и золота. Показана зависимость длительности импульса лазерного излучения от морфологии используемых частиц.

4. Впервые экспериментально обнаружена синхронизация мод при внутрирезонаторном ВНКР в водных суспензиях нано- и субмикронных частиц полистирола и серебра.

В ближайшей перспективе предполагается провести подробное исследование эффекта синхронизации мод при внутрирезонаторном ВНКР в зависимости от условий возбуждения и характеристик используемых образцов. Большой интерес также представляет изучение пространственной структуры лазерного излучения во внутрирезонаторных схемах возбуждения рассеяния света. Результаты этих исследований могут быть использованы для целого ряда практических приложений.

### **Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:**

1. Forward and backward stimulated Brillouin scattering in aqueous suspension of  $\text{SiO}_2$  spherical nanoparticles / Mengyuan Wu [et al.] // Applied Physics Letters. 2020. V. 117. №14. P.141101 (0.46 п.л. / 0.38п.л.).

2. Raman Scattering Enhancement Based on High-Pressure High-Temperature Diamonds / Mengyuan Wu [et al.] // Journal of Russian Laser Research. 2021. V. 42. №6. P. 671-676 (0.69 п.л. / 0.34 п.л.).

3. Stimulated low-frequency Raman scattering of light: an effective way to laser Q-switching / Mengyuan Wu [et al.] // Optics and Laser Technology. 2022. V. 156. P. 108559 (0.81 п.л. / 0.65п.л.).

4. Горелик В. С., Wu Mengyuan. Комбинационное рассеяние света в микроструктурированном полистироле // Необратимые процессы в природе и

технике: Труды одиннадцатой Всероссийской конференции. Часть II. М., 2021. С. 232-235 (0.25 п.л. / 0.14 п.л.).

5. Глобулярный фотонный кристалл как перспективная среда для получения гигантского комбинационного рассеяния / Мэнюань У [и др.] // Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2021: Сборник научных трудов VII Международной конференции. Часть I. М., 2021. С. 205-206 (0.23 п.л. / 0.07 п.л.).

6. Intracavity Stimulated low-frequency Raman scattering – a spectroscopy method in the gigahertz frequency range / Mengyuan Wu [et al.] // UltrafastLight-2021: Book of Abstracts of the V International Conference on Ultrafast Optical Science. М., 2021. P.195-196 (0.23 п.л. / 0.07 п.л.).

7. Photon-phonon interaction in submicron particles systems–new method of Q-switching / Mengyuan Wu [et al.] // ICPPP21: Book of Abstracts of the International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena. Bled (Slovenia), 2022. P. 221-222 (0.23 п.л. / 0.11 п.л.).

8. Модуляция добротности при внутрирезонаторном вынужденном низкочастотном комбинационном рассеянии в водных суспензиях наночастиц / Мэнюань У [и др.] // Физика водных растворов: Сборник трудов 5-ой Всероссийской конференции. М., 2022. С. 67 (0.12 п.л. / 0.08 п.л.).

9. Управление временными характеристиками когерентного излучения с помощью внутрирезонаторного низкочастотного комбинационного рассеяния света / Мэнюань У [и др.] // XII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М., 2023. С. 106-107 (0.23 п.л. / 0.09 п.л.).

10. Резонанс Фано поляритонных сингулярностей Ван Хова на краях стоп-зоны фотонного кристалла / Мэнюань У [и др.] // Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2023: Сборник научных трудов IX Международной конференции. М., 2023. С. 196 (0.12 п.л. / 0.11 п.л.).

У Мэнюань

Взаимодействие электромагнитного излучения с суспензиями нано- и субмикронных частиц – фундаментальные и прикладные аспекты

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 03.04.2024

Объём: 1 усл. п. л.

Тираж: 100 экз. Заказ №\_\_\_\_\_

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана  
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1  
(499) 263-60-45 [press.bmstu.ru](http://press.bmstu.ru)