

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

На правах рукописи

Шевченко Михаил Александрович

**ВЫНУЖДЕННОЕ НИЗКОЧАСТОТНОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ
РАССЕЯНИЕ СВЕТА В СИСТЕМАХ НАНОРАЗМЕРНЫХ И
СУБМИКРОННЫХ ЧАСТИЦ**

специальность 1.3.6. – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2021 год

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

Научный руководитель:

Чернега Николай Владимирович, доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты:

Никитин Сергей Юрьевич, доктор физико-математических наук, Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, доцент кафедры общей физики и волновых процессов

Образцова Елена Дмитриевна, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН), заведующий лабораторией

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Защита состоится 20 декабря 2021 года в 11 час.00 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.262.01 на базе Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института имени П.Н. Лебедева РАН и на сайте <http://lebedev.ru/>.

Автореферат разослан «__»_____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.262.01,
доктор физико-математических наук

А.С. Золотко

Общая характеристика работы

Работа посвящена экспериментальному исследованию взаимодействия импульсного лазерного излучения с системами наноразмерных и субмикронных частиц, обладающих собственными акустическими частотами в гигагерцовом диапазоне.

Актуальность работы. Одним из центральных вопросов в исследованиях нано- и субмикронных объектов является их физическая характеристика, либо с целью решения фундаментальных проблем, таких как влияние эффектов локализации на их электронные характеристики, или для того, чтобы выявить новые свойства, которые могут быть использованы в различных технологических приложениях. Особое место в этих исследованиях занимает изучение колебательной динамики пространственно ограниченных систем, в зависимости от таких существенных особенностей частиц и их агрегатов, как размер, форма, взаимодействие с окружающей средой, кристалличность, упругие характеристики и др. Знание колебательной динамики позволяет существенно расширить возможности использования систем нано- и субмикронных частиц для задач нанопотоники, электроники и многочисленных биомедицинских приложений.

Для экспериментального определения упругих свойств нано- и субмикронных частиц, которые во многом определяют их колебательную динамику, обычно используется низкочастотное комбинационное рассеяние (НКТ) света [1,2]. НКТ представляет собой неупругое рассеяние света, обусловленное взаимодействием электромагнитного излучения с собственными акустическими колебаниями частиц и, соответственно, определяется морфологией системы. Спектр НКТ несет в себе информацию об упругих характеристиках системы, как самих частиц, так и их окружения. Эти параметры определяются по спектральному смещению рассеянного излучения [3]. Форма спектральной линии рассеянного излучения позволяет получить информацию о распределении частиц по размерам [4].

Теоретическое описание так называемых лэмбовских мод (названных в честь математика Х. Лэмба) [5], успешно примененное для нахождения собственных частот нано- и субмикронных частиц, позволило создать адекватное теоретическое описание процесса НКТ. Подход, основы которого были разработаны в [6], позволил существенно улучшить совпадение экспериментальных результатов с расчетными с учетом затухания акустического возбуждения по различным каналам. Вынужденный режим НКТ – вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние света (ВНКТ) [7,8] представляет собой процесс рассеяния электромаг-

нитного излучения на когерентно осциллирующих на собственных частотах нано- или субмикронных частицах. Фазировка частиц, участвующих в процессе ВНКР, осуществляется за счет поля переизлучения, а затравкой являются спонтанно рассеянные фотоны за счет спонтанного НКР. Отметим, что ВНКР (также, как и НКР) наблюдалось для частиц (субмикронных и наноразмерных) различной физической природы и находящихся в различных системах, как упорядоченных, так и неупорядоченных. Как правило, в качестве неупорядоченных систем исследуются суспензии частиц или случайно распределённые в твердотельной матрице частицы.

Примером упорядоченных систем являются структуры типа фотонных кристаллов, например, синтетические опаловые матрицы. Структура опаловой матрицы представляет собой кубическую гранецентрированную решётку, образованную глобулами диоксида кремния, размеры которых обычно находятся в диапазоне от 100 до 400 нм. Структуры с плотной упаковкой очень эффективны в качестве активной в смысле ВНКР среды. Эффективность преобразования волны накачки в волну ВНКР может достигать 70 процентов [9,10]. Таким образом, ВНКР (и его спонтанный аналог НКР) являются процессами, позволяющими получать из анализа спектров важную информацию о морфологии систем наноразмерных и субмикронных частиц. В частности, данные процессы могут быть использованы для дистанционного зондирования и идентификации биологических систем различного типа, в том числе вирусов. Учитывая высокую эффективность процесса ВНКР, данный процесс может быть использован в качестве эффективного перестраиваемого источника бигармонической накачки с возможностью перестройки разностной частоты в диапазоне от единиц гигагерц до терагерца. Такие источники могут быть использованы как для фундаментальных задач спектроскопии систем, обладающих собственными частотами в гига- и терагерцовой областях, так и для практических задач, таких как генерация электромагнитного излучения в гига- и терагерцовых областях спектра [11], а также реализация селективного и резонансного воздействия на биологические системы.

Целью данной работы являлось исследование процессов взаимодействия электромагнитного излучения с системами наноразмерных и субмикронных частиц различной природы включая биологические, получение информации о характеристиках ВНКР в таких системах и изучение возможности их использования в качестве активных сред для генерации электромагнитного излучения СВЧ диапазона при оптической накачке.

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

1. Экспериментальная реализация схемы внутрирезонаторного ВНКР в суспензии субмикронных частиц и сравнение полученных результатов с результатами численного расчета с использованием модели Лэмба.

2. Проведение экспериментов по исследованию генерации спектральной гребенки с разностной частотой в гигагерцовом диапазоне частот при возбуждении бигармонической накачкой в системах субмикронных частиц.

3. Экспериментальное исследование ВНКР в биологических системах, а именно, в ряде вирусов растений и демонстрация возможности использования ВНКР для их идентификации.

4. Экспериментальная демонстрация генерации излучения СВЧ диапазона при оптической накачке в синтетических опалах. Расчет собственных акустических частот исследуемых систем и экспериментальное определение значений этих частот методом ВНКР.

Научная новизна работы:

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Впервые экспериментально реализовано внутрирезонаторное ВНКР света при использовании суспензии нанометровых и субмикронных частиц полистирола.
2. Экспериментально реализована оригинальная схема генерации спектральной гребенки с разностной частотой в гигагерцовом диапазоне при использовании бигармонической накачки. Показано, что эффективная генерация высших стоксовых и антистоксовых компонент возникает при совпадении разностной частоты бигармонической накачки с собственной акустической частотой активной в смысле ВНКР моды.
3. Впервые реализовано ВНКР в ряде биологических систем (вирусов). Показано, что ВНКР может быть использовано для идентификации соответствующих систем.
4. Получена генерация электромагнитного излучения СВЧ диапазона при оптической накачке. Показано, что частоты электромагнитного излучения СВЧ совпадают с собственными акустическими частотами системы.

Научная и практическая значимость работы:

1. ВНКР, возбуждаемое вне резонатора, а также внутрирезонаторное, являются эффективным источником информации о морфологии систем наноразмерных и субмикронных частиц различной физической природы, включая биологические. Анализ спектров ВНКР позволяет также получить информацию об акустических свойствах матрицы, в которой находятся частицы.
2. Учитывая высокую эффективность ВНКР, этот процесс можно использовать качестве источника бигармонической накачки с возможностью перестройки разностной частоты в гига- и терагерцовом диапазонах. Используя излучение ВНКР в качестве бигармонической накачки, можно экспериментально получать частотные гребёнки с разностной частотой в терагерцовом диапазоне при несущей частоте видимого диапазона.
3. Системы упорядоченных диэлектрических субмикронных частиц, а именно, синтетические опаловые матрицы, могут применяться для генерации электромагнитного излучения СВЧ диапазона на частотах, соответствующих частотам собственных акустических колебаний глобул, образующих матрицу, при оптической накачке. Зависимость собственной акустической частоты от размеров глобулы, а также от параметров среды, заполняющей пустоты матрицы, открывает возможность перестройки частоты генерируемого излучения СВЧ диапазона.

Положения, выносимые на защиту:

1. Использование сред, способных к эффективной генерации вынужденного низкочастотного комбинационного рассеяния (ВНКР) света внутри лазерного резонатора, приводит к интенсивной генерации первого и высших порядков рассеяния и к модуляции добротности лазера.
2. Эффективная генерация антистоксовой компоненты ВНКР возникает при использовании бигармонической накачки в случае совпадения её разностной частоты с собственной частотой системы. Увеличение интенсивности бигармонической накачки приводит к генерации частотной гребенки, состоящей из стоксовых и антистоксовых компонент высших порядков.

3. ВНКР является эффективным инструментом для анализа и идентификации частиц и структур субмикронных и нанометровых масштабов, в том числе биологических объектов.
4. Системы частиц наноскопических и мезоскопических масштабов, способные к эффективной генерации низкочастотного комбинационного рассеяния света, являются источником электромагнитного излучения СВЧ диапазона при оптической накачке на частотах, совпадающих с их собственными акустическими частотами.

Достоверность результатов

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается использованием сертифицированного высокоточного оборудования, воспроизводимостью, согласием результатов расчетов и теоретического моделирования с экспериментальными данными, докладами на международных конференциях и публикациями в ведущих мировых научных журналах.

Личный вклад автора

Автором лично были выполнены экспериментальные исследования, а также проведен детальный анализ и интерпретация полученных результатов. Им были сформулированы основные выводы проведенных исследований и защищаемые положения. Наряду со своим научным руководителем автор принимал активное участие при написании научных статей по теме диссертации.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались автором на 20 международных и всероссийских конференциях:

1. XIII Международная конференция по импульсным лазерам и применениям лазеров AMPL-2017, 10-15 сентября 2017 года, Томск.
2. Photonics Europe, Strasbourg, France, 22 - 26 April 2018
3. Laser Ultrasonics 2018, University of Nottingham, Nottingham, UK, 9-13 July 2018.

4. International School of Quantum Electronics; Progress in Photoacoustic and Photo-thermal Phenomena: Focus on Biomedical, Nanoscale, NDE and Thermophysical Phenomena and Technologies, Erice-Sicily, Italy, September 6-12, 2018.
5. X Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики – 2018». Санкт-Петербург. 15-19 октября 2018.
6. XVIII International conference “Laser Optics” ICLO 2018, Saint-Petersburg, June 4-8, 2018.
7. Конференция «Физика водных растворов», ИОФ РАН 12 декабря 2018 г.
8. Десятая Всероссийская конференция «Необратимые процессы в природе и технике», 29-31 января 2019 г., Москва, МГТУ им.Н.Э. Баумана.
9. 20th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, July 7-12, 2019, Moscow, Russia.
10. Imaging and Applied Optics Congress, June 24-27, 2019, Munchen, Germany.
11. International Congress on Ultrasonics, Bruges, Belgium, 3-6 September 2019.
12. XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications, Tomsk, 11 December 2019.
13. IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике, Москва, НИЯУ МИФИ, 29-31 января 2020 г.
14. VI Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз», Москва, 11-14 февраля 2020.
15. International Conference Laser Optics (ICLO), Saint Petersburg, 2-6 ноября 2020 г.
16. XII Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики – 2020». Санкт-Петербург. 19-23 октября 2020.
17. Школа молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике БПИО-2020», Москва, 24-26 ноября 2020 г.
18. 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Москва, 2020 г.
19. Одиннадцатая Всероссийская конференция «Необратимые процессы в природе и технике», 26-29 января 2021 г., Москва, МГТУ им.Н.Э. Баумана.

20. VII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз», Москва, 23-26 марта 2021 г.

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 7 статьях в научных журналах, индексируемых международными базами данных Web of Science и Scopus, 28 публикациях в тезисах докладов и трудах конференций. Полный список печатных работ, в которых опубликованы основные результаты диссертации, представлен на стр. 23-28.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы из 73 наименований. Полный объем диссертации составляет 102 страницы, включая 33 рисунка и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулированы актуальность, практическая значимость, а также цели и задачи работы. Приводятся защищаемые положения и перечисляются основные результаты. Реферативно изложено содержание работы.

В **первой главе** приводится обзор теоретических и экспериментальных исследований НКР. Рассмотрены основные теоретические подходы, применяемые для описания процесса НКР. Акцентируется внимание на влиянии матрицы, в которой находятся активные в смысле НКР частицы. Рассмотрены основные практические приложения НКР, обуславливающие интерес к этому направлению и его практическую значимость. Приведен обзор современных работ по ВНКР.

Во **второй главе** приводятся результаты экспериментальных исследований свойств ВНКР, возбуждаемого в различных суспензиях с целью определения влияния на параметры ВНКР распределения частиц по размерам.

В работе для возбуждения ВНКР в исследуемых объектах использовался твердотельный лазер на рубине, работающий в режиме модуляции добротности, с длиной волны генерации 694.3 нм, длительностью импульса 20 нс, шириной линии генерации 0.015 см^{-1} , расходимостью пучка $3.5 \cdot 10^{-4}$ рад и максимальной энергией в импульсе 0.4 Дж.

Для определения влияния распределения частиц по размерам на эффективность процесса ВНКР использовались суспензии LaF_3 , синтезированные в различных условиях.

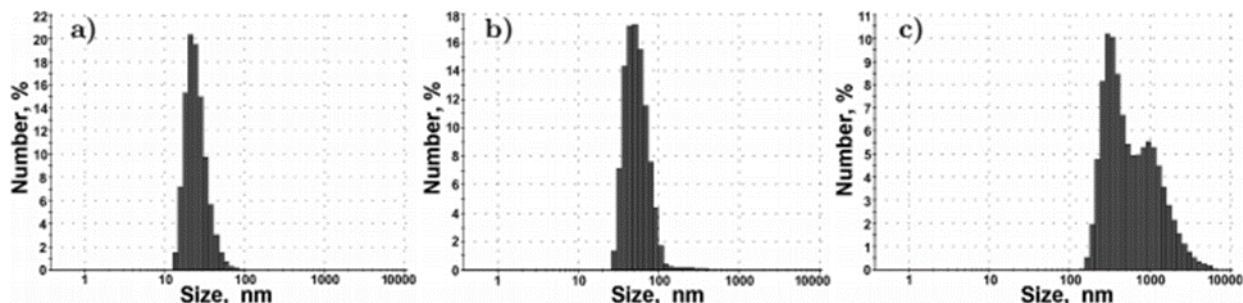


Рис.1. Распределение частиц по размерам для различных образцов суспензий LaF_3 .

Форма и вид распределений по размерам для используемых в эксперименте суспензий приведены на Рис.1. Показано, что эффективность преобразования волны накачки в волну ВНКР, а также энергетический порог возбуждения определяются шириной и формой распределения частиц по размерам. Так, для приведенных на рисунке 1 распределений, порог возбуждения ВНКР для случаев а) и в) составлял $0,05 \text{ ГВт} / \text{см}^2$, а эффективность преобразования 27 % и 22 % соответственно. Порог возбуждения для случая с), соответствующего двухмодальному распределению по размерам, был выше значения оптического пробоя среды. ВНКР происходит более эффективно в образцах с узким распределением частиц по размерам. Наличие нескольких максимумов в распределении частиц по размерам существенно повышает энергетический порог возбуждения.

Для изучения влияния внешней среды на параметры ВНКР были проведены эксперименты в водной суспензии частиц SiO_2 сферической формы с радиусом 150 нм. Изображение СЭМ и распределение исследуемых частиц по размерам приведено на Рис.2.

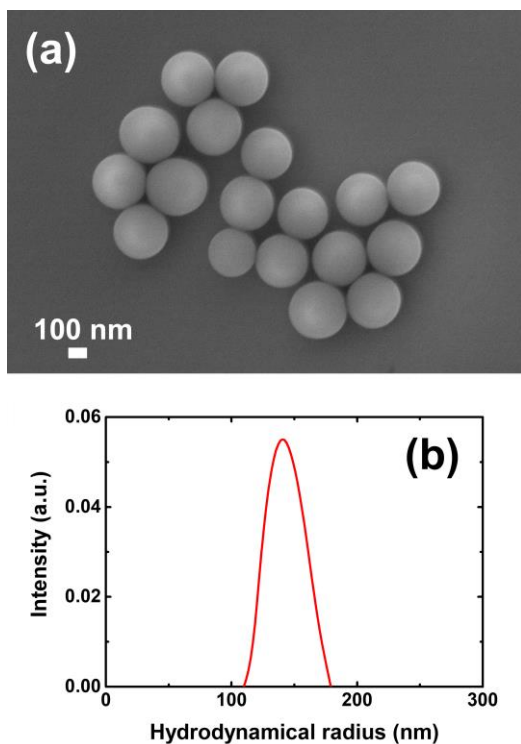


Рис.2 Изображение СЭМ суспензии частиц SiO_2 (a) и распределение по размерам, полученное с помощью ДРС (b).

С применением подхода развитого Лэмбом, но с учетом характеристик окружающей частицы среды был произведен расчет собственных частот кварцевых глобул и показано, к какому типу акустической моды относится экспериментально зарегистрированная компонента ВНКР. Рассчитано время затухания колебаний, вызванное окружающей средой. Продемонстрировано хорошее согласие экспериментальных данных с расчетными. На Рис. 3 приведен экспериментально зарегистрированный спектр ВНКР, а на рисунке 4 показаны результаты расчета значений частот для различных мод с учетом внешней среды.

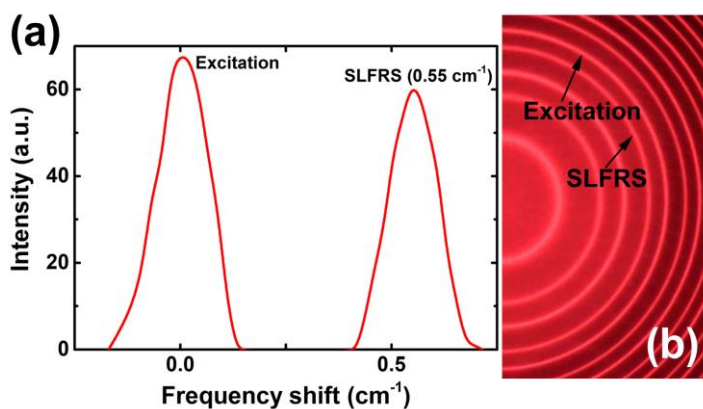


Рис. 3 а) Спектр ВНКР, зарегистрированный в суспензии кварцевых глобул; б) соответствующая интерферограмма Фабри-Перо.

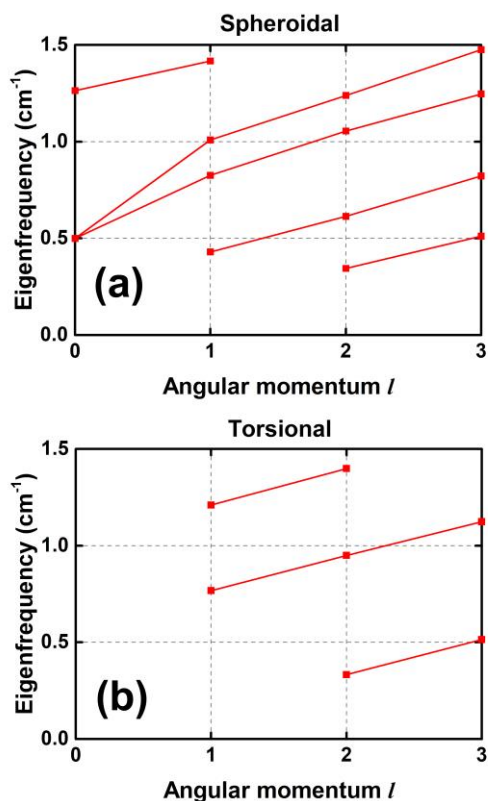


Рис. 4 Рассчитанные собственные акустические частоты для кварцевых глобул в воде, соответствующие различным типам мод.

Процесс ВНКР эффективно может происходить не только в системах субмикронных и наноразмерных частиц, но и в тонких пленках. Причем, морфология образца с тонкой пленкой будет определять частотное смещение ВНКР. Экспериментально ВНКР в тонких пленках было реализовано при взаимодействии импульсного лазерного излучения с собственными акустическими колебаниями графитизированного слоя различной толщины в объеме монокристаллического алмаза.

Также в данной главе приводятся описание и данные экспериментов, демонстрирующие принципиальную возможность генерации ВНКР внутри резонатора лазера. Как известно, внутрирезонаторная спектроскопия комбинационного рассеяния света представляет собой эффективный метод спектрального исследования различных веществ. Внутрирезонаторная спектроскопия ВНКР позволяет получать данные из анализа спектра о морфологии систем субмикронных и наноразмерных частиц.

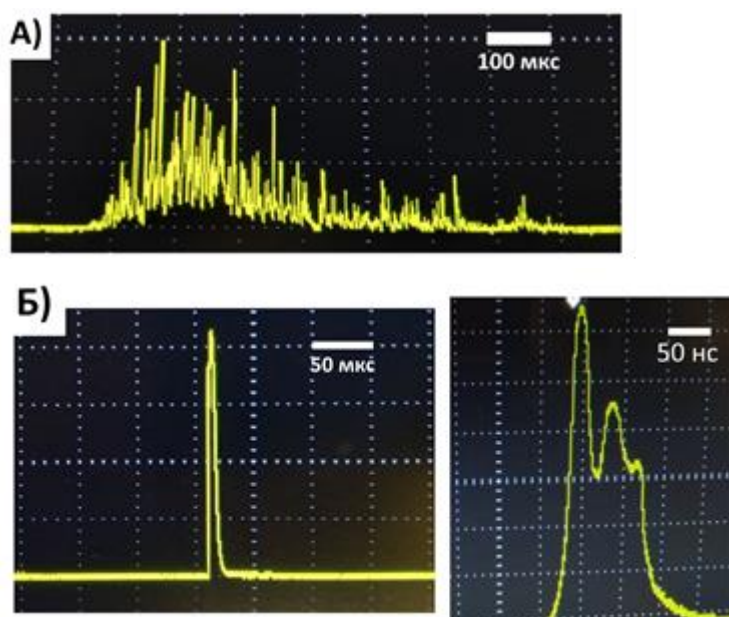
Экспериментально была реализована схема внутрирезонаторного ВНКР с использованием лазера на рубине. При помещении суспензий субмикронных частиц

латекса внутрь лазерного резонатора в регистрировавшихся на выходе спектрах имелись линии, частотные сдвиги которых соответствовали собственным частотам находящихся в резонаторе частиц. Также, при определенных условиях, спектры имели вид частотных гребенок, состоящих из нескольких эквидистантных компонент, соответствующих стоксовым компонентам ВНКР.

Таким образом, метод внутрирезонаторного возбуждения ВНКР в нано- и субмикронных системах позволяет существенно понизить порог эффекта и использовать его в целях спектроскопии для анализа морфологии подобных систем, а также в качестве источника спектральных гребёнок с модуляцией в диапазоне от нескольких гигагерц до терагерца, в зависимости от морфологии используемых систем.

Также, кроме регистрации компонент ВНКР при внутрирезонаторном возбуждении, был экспериментально реализован режим модуляции добротности излучения для рубинового лазера при использовании систем частиц субмикронного размера в качестве пассивного модулятора (Рис.5).

Одним из механизмов модуляции может выступать возбуждение когерентных акустических колебаний частиц с последующим переизлучением на смещенной компоненте, соответствующей собственной частоте колебаний. В этом смысле действие среды аналогично увеличению пропускания, приводящему к увеличению добротности лазерного резонатора при использовании просветляющегося модулятора. В таком случае длительность импульса будет определяться характеристиками акустического возбуждения в среде.



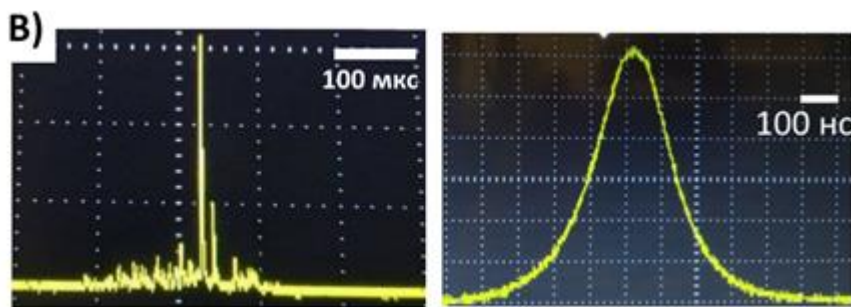


Рис. 5 А) Режим свободной генерации;

Б) режим модуляции добротности при использовании в качестве модулятора суспензии наночастиц золота;

В) режим модуляции добротности при использовании в качестве модулятора добротности частиц SiO_2 размером 200 нм.

В третьей главе приводятся экспериментальные результаты по реализации ВНКР в биологических объектах: вирусах растений различной формы и агрегатах глобулярных белков (Рис.6).

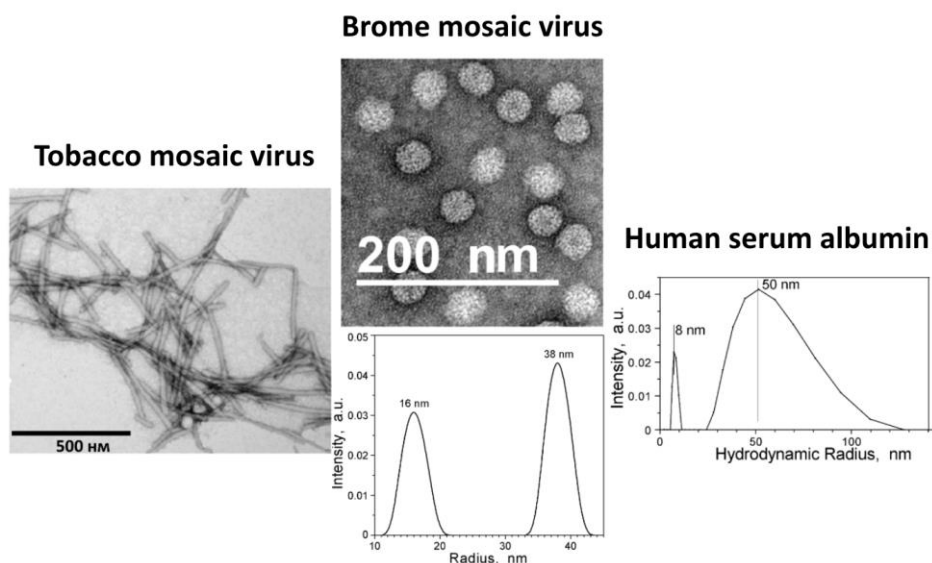


Рис. 6 Характеризация биологических объектов, используемых в экспериментах по ВНКР - вирус табачной мозаики (TMV), вирус мозаики кобры (BMV), альбумин (HSA)

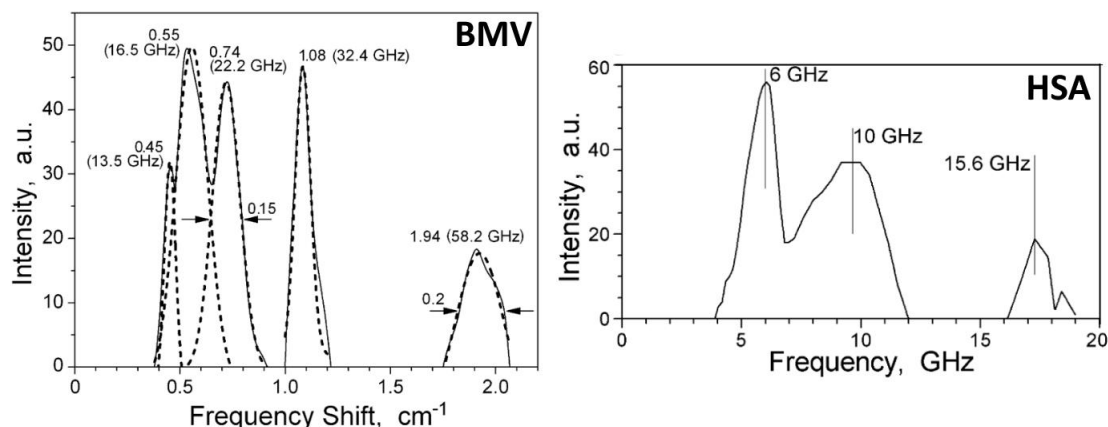


Рис. 7 Спектры ВНКР для вируса мозаики костра и альбумина.

Объектами исследований были вирусы растений цилиндрической формы - вирус табачной мозаики (TMV), картофельный вирус (PVA, PVX); формы близкой к сферической - вирус мозаики цветной капусты (CaMV), вирус мозаики костра (BMV); а также глобулярные белки - человеческий (HSA) и бычий альбумин (BSA) (Рис.7)

Продемонстрирована принципиальная возможность эффективной генерации ВНКР в подобных системах с коэффициентом преобразования до 55%. Для вирусов методом Лэмба и Дубровского были рассчитаны собственные частоты колебаний, также проведено компьютерное моделирование методом конечных элементов. Все результаты находятся в согласии с полученными экспериментальными данными. Также был определен тип возбуждаемых колебательных мод исследуемых объектов. В таблице 1 для исследованных систем приведены характеристики ВНКР, а именно, максимальная эффективность преобразования (η), пороговое значение интенсивности (P), собственные частоты (ν), размеры частиц.

Табл. 1 Параметры ВНКР для различных биологических объектов

Образец	η %	P ГВт/см ²	ν ГГц	DxL нм
TMV	5	0.07	60	18x300
TMV	5	0.07	9; 13.5	18x300
PVA	10	0.03	9, 18	15x730
PVX	10	0.035	6, 12	13.5x715
CMV	20	0.10	58	35
CMV	20	0.10	6	35
HSA	55	0.10	6, 10, 15	50
BSA	25	0.10	8.7, 16.5	46
BMV	35	0.10	13.5, 16.5, 22,2 32,4, 58,2	28

Т. к. вирусы представляют собой составной объект, состоящий из белковой оболочки и РНК-ядра, их собственные частоты будут определяться свойствами каждой из компонент. Для вируса мозаики костра (ВМВ) было проведено моделирование, в котором вирус представлялся в виде составной частицы, обладающей оболочкой, в результате чего была оценена скорость звука в РНК-ядре вируса, составившая 3700-3800 м/с, что сравнимо с значением, полученным для ДНК (3400-3800 м/с). Скорость звука в ядре является важной характеристикой вирусных систем, зачастую определяющей их жесткость. Также были вычислены коэффициенты усиления ВНКР для радиальной и квадрупольной акустических мод вируса из спектральной ширины соответствующих линий, которые составили 0,175 и 0,024 см/МВт.

Таким образом, показано, что ВНКР может быть использовано для исследования упругих характеристик отдельных компонент составных сложных объектов, которыми являются, в частности, вирусы.

Четвертая глава посвящена воздействию оптической бигармонической импульсной накачки на субмикронную систему, собственная частота которой совпадает с разностной частотой возбуждающих компонент.

В качестве объекта исследования использовалась водомасляная эмульсия со средним диаметром капель масла 300 нм. Распределение исследуемых частиц по размерам приведено на Рис. 8.

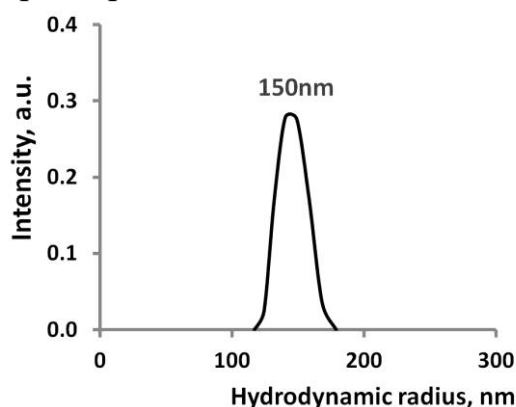


Рис.8 Гидродинамические радиусы частиц масла, измеренные с помощью ДРС.

В качестве источника бигармонической накачки выступало ВНКР, возбуждаемое в различных субмикронных системах.

Показано, что при совпадении разностной частоты бигармонической накачки с собственной частотой субмикронных частиц исследуемой эмульсии происходит

генерация высших стоксовых и анти-стоксовых компонент в виде низкочастотной гребенки в гигагерцовом диапазоне частот. Физическим механизмом, обеспечивающим эффективное влияние бигармонической накачки на исследуемые системы, является пондеромоторное взаимодействие.

При фокусировании в суспензию излучения, состоящего из двух компонент со сдвигом, совпадающим с собственной частотой капли (Рис.9), в спектре ВНКР появляется анти-стоксова компонента, при этом порог генерации в несколько раз ниже, чем при генерации бигармонических компонент. При повышении интенсивности бигармонической накачки в спектре появляются стоксовы и анти-стоксовы линии более высоких порядков. На Рис. 10 приведены спектры ВНКР при использовании для их возбуждения бигармонической накачки с разностной частотой, совпадающей с собственной акустической частотой капель эмульсии. Увеличение энергии импульса бигармонической накачки приводит к увеличению числа эквидистантных спектральных компонент, соизмеримых по интенсивности.

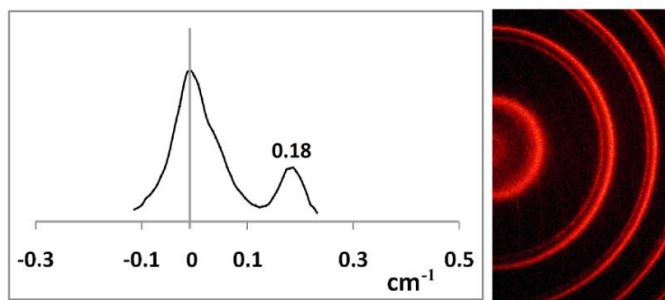
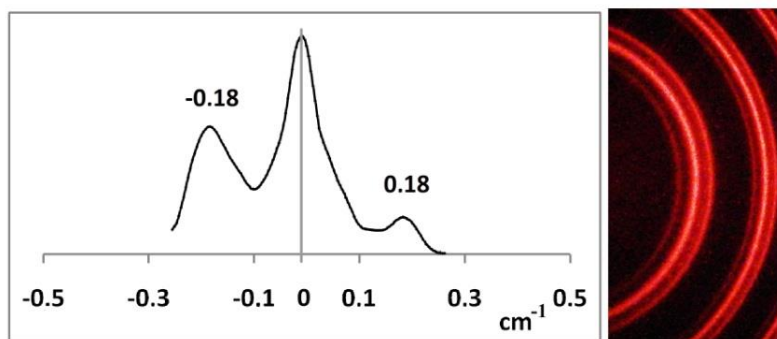


Рис. 9 Спектр бигармонической накачки с разностной частотой, совпадающей с собственной частотой масляной капли. Порог возбуждения- $0,1 \text{ ГВт} / \text{см}^2$. На вставке справа показана интерферограмма Фабри-Перо, соответствующая этому спектру.



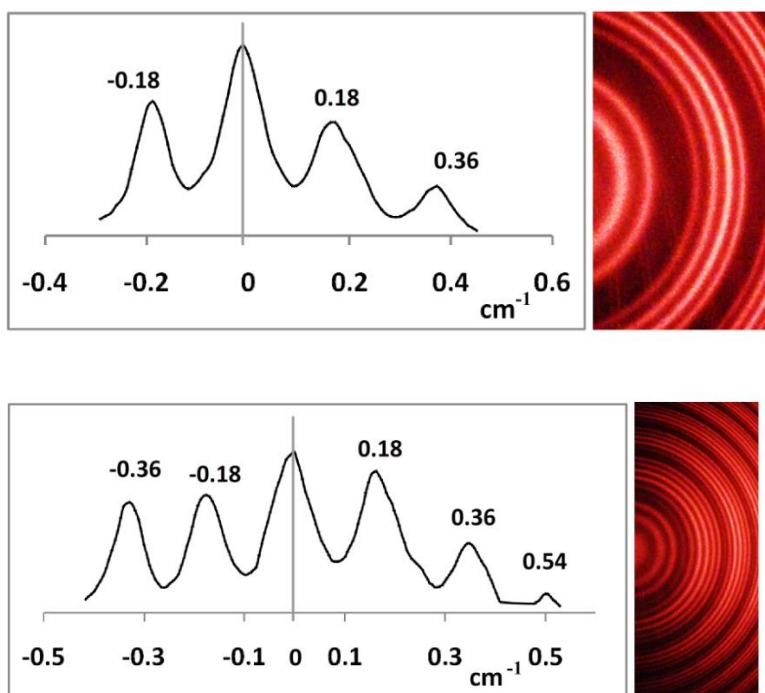


Рис. 10 Спектры ВНКР, зарегистрированные на выходе из суспензии при резонансной бигармонической накачке с увеличением ее интенсивности.

Высокая эффективность процесса генерации антистоксовой компоненты не связана с движением населенностей по колебательным уровням при лазерном возбуждении, а обусловлена индукцией бигармонической накачкой когерентного дипольного момента в объеме активной среды.

Таким образом, показана эффективность использования ВНКР в качестве источника бигармонического возбуждения для селективного резонансного воздействия на субмикронную систему. Результатом такого воздействия является когерентное возбуждение акустических колебаний в системе, приводящее к получению частотной гребенки с модуляцией в гигагерцовом диапазоне.

В пятой главе предлагается и экспериментально подтверждается новый метод генерации излучения в СВЧ диапазоне при оптической накачке нано и субмикронных систем.

Как известно, диэлектрическая наночастица в электрическом поле приобретает дипольный момент

$$\vec{P} = \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right) R^3 \vec{E}_{loc}$$

где $n = n_2/n_1$, n_1 -показатель преломления окружающей среды, n_2 -показатель преломления наночастицы, R -радиус наночастицы, $\vec{E}_{loc}$ – локальное поле, действующее на наночастицу. Если частица находится в электромагнитном поле, то на неё действует пондеромоторная сила $F \sim E^2$. Если электромагнитное поле состоит из двух волн с разностью частот Ω , то возникает компонента пондеромоторной силы, осциллирующая на этой частоте. В результате действия пондеромоторной силы на частицу произойдёт раскачка механических колебаний этой частицы на частоте Ω . Учитывая, что частица имеет дипольный момент в поле, она может излучать на этой частоте. Существует возможность резонансной раскачки механических колебаний частицы при условии совпадения её собственной акустической частоты с частотой пондеромоторной силы. Собственные акустические частоты частиц легко рассчитываются с помощью подхода, развитого в работах Лэмба [1]. Источником же электромагнитного излучения, содержащего две спектральные компоненты, сдвинутые на частоту собственного акустического колебания, может быть процесс вынужденного низкочастотного комбинационного рассеяния света (ВНКР) [7-9]. Наличие двух спектральных компонент в спектре электромагнитного излучения, падающего на частицу, приводит к резонансной раскачке собственных акустических колебаний частицы.

Таким образом, воздействие мощных лазерных импульсов на систему нано- или субмикронных частиц может приводить к когерентному возбуждению собственных акустических колебаний данной системы на частотах, лежащих в тера- или гигагерцовом диапазонах соответственно. Если в качестве такой системы выступает синтетическая опаловая матрица, то в результате колебаний происходит разрыв силоксановых связей между кварцевыми глобулами, и на их поверхности образуется заряд. Кроме того, возможна поляризация глобул вследствие их дефор-

мации в процессе колебаний на несимметричных модах. Образование зарядов, осциллирующих с частотой собственных колебаний частиц, должно приводить к генерации излучения в гигагерцовом диапазоне, мощность которого $P \sim q^2 w^4$, где P - мощность излучения, w - ускорение колеблющегося заряда q .

Подобный механизм генерации электромагнитного излучения описан в работах по радиоизлучению грозových облаков, где в качестве излучателя выступают заряженные колеблющиеся капли воды субмикронного размера.

В главе приводится описание эксперимента и полученные в результате данные по регистрации СВЧ сигнала при возбуждении синтетической опаловой матрицы фемтосекундными лазерными импульсами.

В качестве накачки использовался титан-сапфировый фемтосекундный лазер (длительность импульса 35 фс, максимальная энергия в импульсе 50 мДж, частота 10 Гц, длина волны 800 нм). Для регистрации излучения СВЧ диапазона использовалась широкополосная рупорная антенна. В процессе накачки ультракороткими лазерными импульсами опаловых матриц были зарегистрированы спектры СВЧ излучения в гигагерцовом диапазоне (Рис.11), представляющие собой набор спектральных линий, наиболее интенсивные из которых совпадали с частотами, полученными в экспериментах по ВНКР в данных системах, а именно 16,5 ГГц, 11,4 ГГц, 1,5 ГГц, 0,75 ГГц.

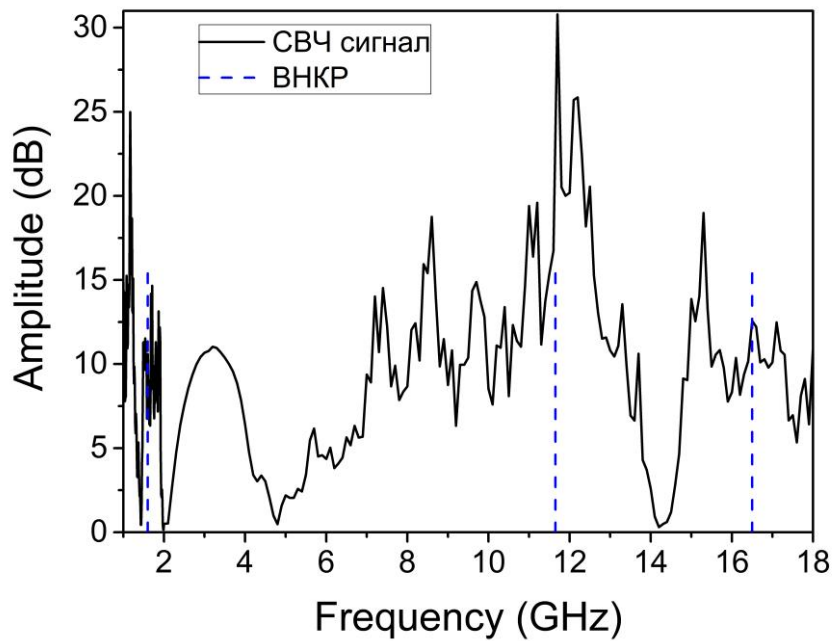


Рис. 11 Спектр СВЧ, полученный с помощью широкополосной рупорной антенны, и соответствующие компоненты ВНКР.

Первые две частоты соответствуют собственным акустическим частотам кварцевых глобул. Отметим, что при ВНКР в опаловых матрицах, в спектре рассеянного излучения, помимо компонент, соответствующих собственным акустическим частотам кварцевых глобул, регистрируются частотные компоненты, соответствующие колебаниям двух, трех и более сфер (1,5 ГГц и 0,75 ГГц). Результаты численного расчета акустических частот для случаев 1, 2, 3 и 12 кварцевых глобул, находящихся в контакте, представлены на Рис. 12. Как видно из рисунка, при увеличении числа контактов (и, соответственно, числа глобул) число частот существенно увеличивается, в том числе и в низкочастотной части спектра. Часть этих частот может проявляться в спектре ВНКР (являются комбинационно активными).

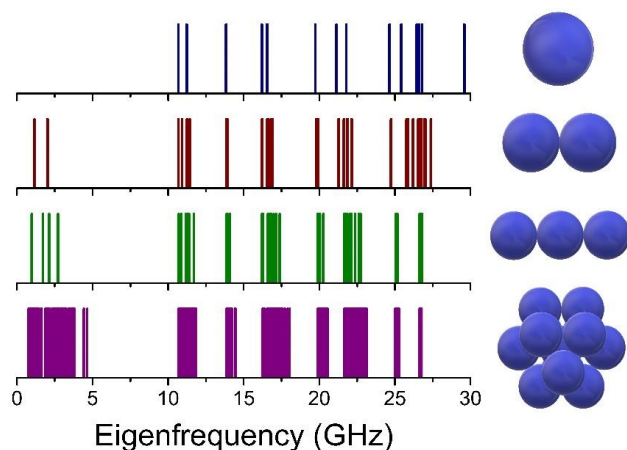


Рис. 12 Собственные акустические частоты для 1,2,3 и 12 сфер, полученные при моделировании методом конечных элементов.

Если вместо опаловой матрицы использовать объемный кварц, в спектре СВЧ наблюдается равномерный фон без выраженных линий. Следовательно, наличие отдельных компонент в спектре СВЧ, совпадающих с собственными частотами опаловой матрицы, определенными с помощью ВНКР, свидетельствует о генерации радиоволнового излучения за счет акустических колебаний диэлектрических частиц. Длительность импульсов СВЧ составляла несколько наносекунд, что также согласуется с возможным временем жизни акустических колебаний в таких системах.

В заключении приведены основные результаты работы, состоящие в следующем:

1. На примере суспензии частиц LaF_3 субмикронных размеров экспериментально установлена зависимость эффективности процесса вынужденного низкочастотного комбинационного рассеяния (ВНКР) света от параметров функции распределения частиц по размерам. Установлено влияние окружающей среды на частотные характеристики ВНКР.
2. Предложена и экспериментально реализована схема внутрирезонаторного ВНКР. Показано, что наряду с возможностью использования этого процесса для спектральных исследований систем наноскопических и мезоскопических масштабов, он может быть применен для создания источника излучения с заданным спектральным распределением, определяемым морфологией используемых частиц. С помощью внутрирезонаторного ВНКР реализован режим модуляция добротности.

3. ВНКР в биологических объектах субмикронных размеров (в том числе в ряде вирусов растений) является эффективным способом получения информации об их упругих характеристиках. Этот процесс вынужденного рассеяния света позволил генерировать двухчастотное излучение с разностной частотой, совпадающей с собственной акустической частотой этих объектов (ряда вирусов растений).
4. Использование бигармонической накачки, полученной в процессе ВНКР, для возбуждения системы диэлектрических субмикронных частиц позволило реализовать генерацию спектральной гребенки с разностной частотой в гигагерцовом диапазоне. Такая генерация происходит при совпадении разностной частоты бигармонической накачки с собственной акустической частотой частиц.
5. Предложен и экспериментально реализован новый способ генерации электромагнитного излучения СВЧ диапазона в системах диэлектрических частиц при оптической накачке.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных журналах, индексируемых в базе данных Web of Science и Scopus:

1. Shevchenko, M. A., Karpov, M. A., Kudryavtseva, A. D., Rozinskii, D. V., Tcherniega, N. V., & Umanskaya, S. F. (2021). Electromagnetic microwave generation by acoustic vibrations gives rise to nanoradiophotonics. *Scientific Reports*, 11(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87389-3>
2. Shevchenko, M. A., Chaikov, L. L., & Tcherniega, N. V. (2021). Coherent Stokes and anti-Stokes high-order components generation by biharmonic pumping via stimulated low-frequency Raman scattering. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 245, 118902. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.118902>
3. Tcherniega, N. V., Pershin, S. M., Bunkin, A. F., Donchenko, E. K., Karpova, O. V., Kudryavtseva, A. D., V N Lednev, T V Mironova, M A Shevchenko, M A Stokov & Zemskov, K. I. (2018). Laser excitation of gigahertz vibrations in Cauliflower mosaic viruses' suspension. *Laser Physics Letters*, 15(9), 095603. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/aad28d>
4. Тареева, М. В., Дравин, В. А., Хмельницкий, Р. А., Чернега, Н. В., Кудрявцева, А. Д., Шевченко, М. А., & Литвинова, А. О. (2019). Вынужденное низкочастотное комбинационное рас-

- сеяние света в монокристаллическом алмазе с заглубленным графитизированным слоем. *Оптика и спектроскопия*, 126(3), 370-373. URL- <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/47380> [переводная версия: Tareeva, M. V., Dravin, V. A., Khmelnitskii, R. A., Chernega, N. V., Kudryavtseva, A. D., Shevchenko, M. A., & Litvinova, A. O. (2019). Stimulated Low-Frequency Raman Scattering in a Single-Crystal Diamond with a Buried Graphitized Layer. *Optics and Spectroscopy*, 126(3), 290-293. <https://doi.org/10.1134/S0030400X19030226>]
5. Safronikhin, A. V., Ehrlich, H. V., Lisichkin, G. V., Kudryavtseva, A. D., Mironova, T. V., Shevchenko, M. A., M. A. Stokov, N. V. Tcherniega & Zemskov, K. I. (2018). Stimulated Low-Frequency Raman Scattering in LaF₃ Suspensions. *Journal of Russian Laser Research*, 39(3), 294-301. <https://doi.org/10.1007/s10946-018-9721-5>
 6. Шевченко, М. А., Гребенкин, В. И., Тареева, М. В., Кудрявцева, А. Д., Чайков, Л. Л., & Чернега, Н. В. (2018). Внутррезонаторное вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние света. *Краткие сообщения по физике Физического института им. ПН Лебедева Российской Академии Наук*, 45(12). URL-http://ksf.lebedev.ru/outputfile_mainpage.php?id=4308 [переводная версия: Shevchenko, M. A., Grebenkin, V. I., Tareeva, M. V., Kudryavtseva, A. D., Chaikov, L. L., & Tcherniega, N. V. (2018). Intracavity Stimulated Low-Frequency Raman Scattering. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 45(12), 397-398. <https://doi.org/10.3103/S1068335618120072>]
 7. Karpova, O. V., Arkhipenko, M. V., Pershin, S. M., Karpov, M. A., Kudryavtseva, A. D., Mironova, T. V., [V. I. Savichev](#), [M. A. Shevchenko](#), [N. V. Tcherniega](#) & Umanskaya, S. F. (2021). Stimulated low-frequency raman scattering in brome mosaic virus. *Journal of Russian Laser Research*, 42(1), 106-113. <https://doi.org/10.1007/s10946-020-09935-0>

В материалах научных конференций:

1. M.V. Tareeva, V. A. Dravin, R.A. Khmelnitsky, A. D. Kudryavtseva, M. A. Shevchenko, M. A. Stokov, Nikolay V. Tcherniega, K.A. Tsarik, “ Stimulated light scatterings in submicron single crystal diamond films implanted with light ions”, SPIE, Photonics Europe, Strasbourg, France, 22 - 26 April 2018, Proc.SPIE 10684, Nonlinear Optics and its Applications, 2018, 106842D (14 May 2018); doi: 10.1117/12.2307722; <https://doi.org/10.1117/12.2307722>
2. Anatolii S. Averyushkin, Anatoly N. Baranov, Nikolay A. Bulychev, Mishik A. Kazaryan, Anna D. Kudryavtseva, Mikhail A. Shevchenko, Maxim A. Stokov, Nikolay V. Tcherniega, Konstantin I. Zemskov, "Stimulated low-frequency Raman scattering in aqueous suspension of nanoparticles", Proceedings of SPIE Vol. 10614, 106140K (2018) SPIE Digital Library, doi:

10.1117/12.2303491, XIII Международная конференция по импульсным лазерам и применениям лазеров AMPL-2017, 10-15 сентября 2017 года, Томск.

3. Nikolay A. Bulychev, Mishik A. Kazaryan, Anna D. Kudryavtseva, Mariya V. Kuznetsova, Tatyana F. Limonova, Mikhail A. Shevchenko, Nikolay V. Tcherniega, Konstantin I. Zemskov, "Anti-Stokes luminescence in nanoscale systems", Proceedings of SPIE Vol. 10614, 106140N (2018) SPIE Digital Library, doi: 10.1117/12.2303482, XIII Международная конференция по импульсным лазерам и применениям лазеров AMPL-2017, 10-15 сентября 2017 года, Томск
4. M. A. Karpov, A. D. Kudryavtseva, T. V. Mironova, D. V. Rozinskii, M. A. Shevchenko, N. V. Tcherniega and K. I. Zemskov, "Coherent ultrasonic vibrations excited in nanomaterials by laser pulses at low temperatures and nonlinear effects, connected with this phenomenon", Programme and abstract book, Laser Ultrasonics 2018, 9-13 July 2018, University of Nottingham, Nottingham, UK. Organised by the IOP Physical Acoustic Group. Co sponsored by the IOP Optical group, <http://lu2018.iopconfs.org> IOP Institute of Physics
5. A.D. Kudryavtseva, T.V. Mironova, M.A. Stokov, M.A. Shevchenko, N.V. Tcherniega, K.I. Zemskov, "Laser Excitation of Coherent Gigahertz Vibrations in Biological Nanoobjects", International School of Quantum Electronics; Progress in Photoacoustic and Photothermal Phenomena: Focus on Biomedical, Nanoscale, NDE and Thermophysical Phenomena and Technologies, Erice-Sicily, September 6-12, 2018, P. 46.
6. Maria V. Tareeva, Valery A. Dravin, Roman A. Khmelnitsky, Anna D. Kudryavtseva, Michael A. Shevchenko, Maxim A. Stokov, Nikolay V. Tcherniega, Konstantin A. Tsarik, "High Efficient Phonon Mode Excitation in Submicron Single Crystal Diamond Films with Buried Graphitized Layer Build-in", International School of Quantum Electronics; Progress in Photoacoustic and Photothermal Phenomena: Focus on Biomedical, Nanoscale, NDE and Thermophysical Phenomena and Technologies, Erice-Sicily, September 6-12, 2018, P. 21.
7. К.И. Земсков, А.Д. Кудрявцева, Т.В. Миронова, В.И. Савичев, М.А. Строков, Н.В. Чернега, М.А. Шевченко, «Вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние в вирусах растений», Сборник трудов X Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2018». Санкт-Петербург. 15-19 октября 2018 / Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова. – СПб: Университет ИТМО, 2018. С. 444-446, ISBN 978-5-7577-0588-0 ББК 22.34. Оптика. <http://www.fn.bmstu.ru/faculty-basic-sciences/news-and-events-fs>
8. К.И. Земсков, М.А. Карпов, А.Д. Кудрявцева, М.В. Кузнецова, Т.В. Миронова, Д.В. Розинский, М.А. Строков, Н.В. Чернега, М.А. Шевченко, «Антистоксова криолюминес-

- ценция в синтетических опаловых матрицах», Сборник трудов X Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2018». Санкт-Петербург. 15-19 октября 2018 / Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова. – СПб: Университет ИТМО, 2018. С. 165-167, ISBN 978-5-7577-0588-0 ББК 22.34. Оптика.
<http://www.fn.bmstu.ru/faculty-basic-sciences/news-and-events-fs>
9. S.M. Pershin, N.V. Tcherniega, A.F. Bunkin, E.K. Donchenko, O.V.Karpova, A.D. Kudryavtseva, T.V. Mironova, M.A. Strokov, M.A. Shevchenko, K.I. Zemskov, “Laser Excitation of Coherent Gigahertz Vibrations in Plant Viruses”, Proceedings of the XVIII International conference “Laser Optics” ICLO 2018, Saint-Petersburg, June 4-8 2018, P. 277.
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8435836&tag=1>
 10. К.В. Коваленко, С.В. Кривохижа, А.Д. Кудрявцева, М.В. Тареева, Л.Л. Чайков, Н.В. Чернега, М.А. Шевченко, «Структура частиц водной эмульсии: исследование оптическими методами», Тезисы докладов конференции Физика водных растворов, ИОФ РАН 12 декабря 2018 г., г. Москва, 2018, стр.16-17. <http://www.gpi.ru/conferences/pws-2018/pws-2018-abstracts-6.pdf>
 11. В.И. Савичев, К.И. Земсков, А.Д. Кудрявцева, Н.В. Чернега, М.А. Шевченко, «Когерентное акустическое возбуждение биологических наночастиц в гигагерцовом диапазоне», Труды десятой Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике», 29-31 января 2019 г., Москва, МГТУ им.Н.Э. Баумана, ISBN 978-5-7038-5086-2, Часть II, С. 80-83.
 12. М.В. Кузнецова, К.И. Земсков, А.Д. Кудрявцева, Н.В. Чернега, М.А. Шевченко, «Генерация узконаправленного УФ и рентгеновского излучения в наноматериалах при оптической накачке», Труды десятой Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике», 29-31 января 2019 г., Москва, МГТУ им.Н.Э. Баумана, ISBN 978-5-7038-5086-2, Часть II, С. 57-60.
 13. Anna Kudryavtseva, Maxim Karpov, Vladimir Savichev, Mikhail Shevchenko, Nikolay Tcherniega, “Laser Excitation of Coherent Gigahertz Acoustic Vibrations in Albumin”, Book of abstracts, The 20th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, July 7-12, 2019, Moscow, Russia, 66-67. ISBN 9785604118719
 14. Maria Tareeva, Anna Kudryavtseva, Maxim Karpov, Mikhail Shevchenko, Nikolay Tcherniega, “Intracavity stimulated low-frequency Raman scattering”, Book of abstracts, The 20th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, July 7-12, 2019, Moscow, Russia, 172-173. ISBN 9785604118719

15. Anna Kudryavtseva, Aleksey Belyanin, Vladimir Borisov, Maxim Karpov, Mikhail Shevchenko, Nikolay Tcherniega, Konstantin Zemskov, "Anti-Stokes Cryoluminescence in Nanomaterials" Proceedings of the CLEO/Europe-EQEC Conference 2019, Munchen, June 23-27, 2019, 978-1-7281-0469-0/19/\$31.00 c 2019 IEEE. DOI: [10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8872748](https://doi.org/10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8872748)
16. A.D. Kudryavtseva, M.A. Shevchenko, N.V. Tcherniega, "Nanomaterials – Effective Nonlinear Filters for Real-Time Image Processing", Proceedings of the Imaging and Applied Optics Congress, June 24-27, 2019, Munchen, Germany (Imaging and Applied Optics 2019 (COSI, IS, MATH, pcAOP) © OSA 2019).
17. Anna Kudryavtseva, Leonid Chaikov, Michael Shevchenko, Maria Tareeva, Nikolay Tcherniega, "Intracavity low-frequency Raman spectroscopy - new method for acoustic properties of nanosystems study", Abstract Book, 2019, International Congress on Ultrasonics, Bruges, Belgium, 3-6 September 2019, P. 527.
18. M.A. Shevchenko, N.V. Tcherniega, A.D. Kudryavtseva, E.A. Slyusareva, M.A. Kazaryan, "Determination of the parameters of associates in dimethylformamide using stimulated low-frequency Raman scattering", Proc. SPIE 11322, XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications, 113222H (11 December 2019); 5 PAGES <https://doi.org/10.1117/12.2550825> ISSN: 0277-786X [10.1117/12.2550825](https://doi.org/10.1117/12.2550825)
19. С.Ф. Уманская, А.Д. Кудрявцева, Н.В. Чернега, М.А. Шевченко «Наночастицы рубина: получение и оптические свойства», IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике, Сборник научных трудов, М.: НИЯУ МИФИ, С. 107-108 (2020). ISBN 978-5-7262-2648-4.
20. А.Н. Маресев, С.Ф. Уманская, В.С. Горелик, А.Д. Кудрявцева, А.В. Скрабатун, М.А. Шевченко, Н.В. Чернега, «Вынужденное комбинационное рассеяние света в суспензии субмикронных частиц алмаза», VI Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз», 2020, Сборник научных трудов, Часть 2, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2020, ISBN 978-5-7262-2655-2, стр. 82-83.
21. A.D.Kudryavtseva, V.I.Savichev, M.A.Shevcherko, N.V.Tcherniega, S.F.Umanskaya, « Effective Coherent Anti-Stokes Components Generation Using Biharmonic Pumping in the Giga-hertz Range» International Conference Laser Optics (ICLO), Saint Petersburg, 2-6 November 2020, pp. 1-1, doi: 10.1109/ICLO48556.2020.9285443.
22. М.В. Тареева, М. А. Шевченко, А.Н. Баранов, Н. В. Чернега, А. Д. Кудрявцева, С. Ф. Уманская, «Двухфотонно-возбуждаемая люминесценция в полиэтилене и тефлоне»

23. *Сборник трудов XII Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2020». Санкт-Петербург. 19-23 октября 2020 / Под ред. проф. С.А. Козлова. – СПб: Университет ИТМО, 2020. Стр. 109-111, ISBN 978-5-7577-0634-4.*
24. А.Н. Маресев, А.А. Матрохин, А.А. Нариц, М.А.Шевченко, А.Д. Кудрявцева, С.Ф. Уманская, Н.В.Чернега, «Нелинейно-оптические свойства наночастиц $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ », Тезисы докладов школы молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике БПИО-2020», Москва, 24-26 ноября 2020 г., стр. 60-61.
25. А.Н. Маресев, А.А. Нариц, М. А. Шевченко, С.Ф. Уманская, Н.В. Чернега, «Влияние температуры и длительности импульса накачки на параметры генерации в комбинационно-активных порошковых средах», 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Москва, 2020 г., Сборник тезисов, ISBN: 978-5-7417-0754-8.
26. В. С. Горелик, Н. В. Чернега, М. А. Шевченко, С. Ф. Уманская, А. Ю. Пятыхев, «Сверх-рассеяние света в диэлектрических средах при импульсном лазерном возбуждении», Труды 11 Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе техники», Москва, 26-29 января 2021 г., Часть II, ISBN 078-5-7038-5084-8, С. 164-167.
27. В.С. Горелик, Н.В. Чернега, А.В. Скрабатун, М.А. Шевченко, С.Ф. Уманская, А.Ю. Пятыхев, «Вынужденное комбинационное рассеяние света в тонкой поликристаллической пленке бромата натрия», Труды 11 Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе техники», Москва, 26-29 января 2021 г., Часть II, ISBN 078-5-7038-5084-8, С. 168-171.
28. С.Ф. Уманская, М.А. Шевченко, А.Д. Кудрявцева, М.А. Карпов, Д.В. Розинский, Н.В. Чернега, «Генерация СВЧ при оптической накачке в системах субмикронных частиц», Труды 11 Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе техники», Москва, 26-29 января 2021 г., Часть II, ISBN 078-5-7038-5084-8, С. 176-179.

Список использованной литературы:

- 1 E. Duval, A. Boukenter, and B. Champagnon, Phys. Rev. Lett., 56, 2052 (1986).
2. M. Ivanda, K. Babocsi, C. Dem, et al., Phys. Rev. B, 67, 235329 (2003).
3. M. Montagna, Phys. Rev. B, 77, 045418 (2008).
4. M. Ivanda, A. Hohl, M. Montagna, et al J. Raman Spectroscopy 37, 161 (2006).
5. H. Lamb, Proc. London Math. Soc., 13, 189 (1882).

6. V. A. Dubrovsky and V. S. Morozhnik, *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Fizika Zemli*, 7, 29 (1981).
7. N. Tcherniega and A. Kudryavtseva, *J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech.*, 3, 513 (2009).
8. N. Tcherniega, M. Samoylovich, A. Kudryavtseva, et al., *Opt. Lett.*, 35, 300 (2010).
9. A. Kudryavtseva, N. Tcherniega, M. Samoylovich, and A. Shevchuk, *Int. J. Thermophys.*, 33, 2194 (2012).
10. N. Tcherniega, K. Zemskov, V. Savranskii, et al, *Opt. Lett.*, 38, 824 (2013).
11. Yuzo Sasaki, Hiroyuki Yokoyama, and Hiromasa Ito *Optics Express* Vol. 12, Issue 14, pp. 3066-3071 (2004)