

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

На правах рукописи
УДК 535.36

Чернега Николай Владимирович

Вынужденное рассеяние света в наноразмерных системах

специальность 01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Москва 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им.П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Научный консультант: Горелик Владимир Семёнович,
Заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Жижин Герман Николаевич,

Заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно - технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук

Бункин Николай Фёдорович,

Доктор физико-математических наук, профессор,

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана».

Першин Сергей Михайлович,

Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова"

Защита состоится 30 марта 2015г. в 12 часов на заседании Диссертационного Совета Д 002.023.03 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им.П.Н. Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук и на сайте <http://www.lebedev.ru>.

Автореферат разослан «___»_____2014г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 002.023.03 _____ (М.А. Казарян)

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Исследования особенностей нелинейного взаимодействия электромагнитного излучения с веществом составляют основу современной оптики, позволяя не только получать информацию о фундаментальных особенностях этого взаимодействия, но и находить многочисленные практические применения в различных областях науки и техники. Среди широкого спектра нелинейно-оптических эффектов вынужденные рассеяния (ВР) света различного типа занимают исключительно важное место: на их основе созданы многочисленные преобразователи частоты когерентного излучения, позволяющие осуществлять эффективное изменение частоты исходного лазерного излучения; с помощью ВР - компрессоров созданы источники пикосекундных лазерных импульсов; методы обращения волнового фронта при вынужденном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна используются для коррекции волнового фронта лазерного излучения и формирования пучков когерентного излучения с наперёд заданными амплитудно-фазовыми характеристиками. Широкое применение явлений нелинейной оптики для решения большого числа практических задач определяет необходимость не только дальнейших исследований методов повышения эффективности нелинейно-оптических взаимодействий различных типов, но также выявление и изучение новых физических механизмов, приводящих к такому повышению.

Одним из способов увеличения эффективности нелинейно-оптического взаимодействия, в том числе вынужденных рассеяний света, является использование наноразмерных систем. Ярким примером такого использования является поверхностно-усиленное комбинационное рассеяние света – эффект заключающийся в гигантском резонансном увеличении сечения комбинационного рассеяния света возбуждаемое в молекулах находящихся на поверхности металлических наноструктур [1].

Современное развитие методов производства наноструктур с заданными

ми оптическими характеристиками позволяет, при их использовании в нелинейно-оптических экспериментах, существенно повысить эффективность нелинейно-оптических взаимодействий, в том числе вынужденных рассеяний света. Особое место среди таких систем занимают структуры с регулярной пространственной модуляцией диэлектрической проницаемости на масштабе длины волны электромагнитного излучения - фотонные кристаллы.

Со времен первых теоретических работ, посвященных фотонным кристаллам (ФК), их структура и оптические свойства стали объектом интенсивных экспериментальных и теоретических исследований [2-4]. Для сред, обладающих пространственной модуляцией диэлектрической проницаемости на масштабе, сравнимом с длиной волны электромагнитного излучения, оптические свойства определяются параметрами фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ). Запрет на распространение оптических мод и подавление спонтанной эмиссии внутри ФЗЗ приводит к аномально высокой плотности фотонных состояний, локализованной на низкочастотном и высокочастотном краях ФЗЗ [5]. Это обстоятельство открывает возможность существенного повышения эффективности протекания нелинейно-оптических эффектов, прежде всего вынужденных рассеяний света, в таких системах.

Одномерные ФК, которыми фактически являются многослойные интерференционные фильтры или диэлектрические зеркала [6], активно использовались в оптике до появления самого термина «фотонный кристалл». Наибольший интерес, как с фундаментальной точки зрения, так и с точки зрения возможных практических приложений, в настоящее время представляют двумерные и трехмерные ФК. В трехмерных структурах при определенных условиях возможна реализация полной ФЗЗ, то есть области частот электромагнитных волн, для которых существует запрет на распространение во всех возможных направлениях. Синтетические опаловые матрицы, являются удобным объектом для экспериментального изучения оптических свойств трехмерных фотонных кристаллов [7,8]. Структура синтетического опала представляет собой кубическую гранецентрированную решётку, обра-

зованную одинаковыми по диаметру шарами (глобулами) кремнезёма (диоксида кремния - SiO_2), размеры которых обычно находятся в диапазоне от 100 до 600 нм. Трансляционный период трёхмерной решётки в опалах находится в диапазоне длин волн оптического диапазона и, следовательно, ФЗЗ синтетических опалов находятся в видимом диапазоне спектра. Особенности структуры искусственных опалов, отработанные технологии производства и возможность изменения положения ФЗЗ инфильтрацией образцов средами с различными показателями преломления и типами нелинейности делают эти системы весьма перспективными для использования в качестве нелинейно-оптических сред.

Современное развитие оптоэлектроники требует разработки высокоэффективных, компактных устройств для обработки сигналов в широком диапазоне длин волн. Фотонные кристаллы, обладающие рядом уникальных свойств, могут быть использованы для решения большого количества научно-технических задач в этом направлении.

Для решения практических задач, связанных с передачей и хранением оптической информации, важную роль играет разработка методов преобразования характеристик сложных световых полей, дающих возможность восстановления и обработки оптических изображений. Применение вынужденного рассеяния (ВР) света для преобразования параметров когерентного излучения является весьма перспективным, поскольку дает возможность изменять в широких пределах длину волны излучения с высокой эффективностью преобразования и управлять амплитудно-фазовыми характеристиками преобразованного излучения одновременно на нескольких частотах [9]. Существенное влияние на параметры вынужденного рассеяния света оказывают такие нелинейные эффекты как двухфотонное поглощение, высокочастотный Керр-эффект, также другие виды оптических процессов, возникающие в нелинейных средах под действием лазерного излучения с высокой плотностью мощности. В связи с этим представляется существенным рассмотрение конкуренции различных видов нелинейных рассеяний, зависимости их характеристик

от условий возбуждения, а также выбор оптимальных параметров схем и оптимальных энергетических и геометрических условий возбуждения различных видов вынужденного рассеяния света. Особое место в этих исследованиях занимает поиск новых сред, которые позволили бы существенно увеличить эффективность нелинейно-оптического взаимодействия и понизить пороги возникновения исследуемых нелинейных эффектов. В диссертации экспериментально исследовались два типа таких сред: пространственно упорядоченные системы со строго периодической модуляцией диэлектрической проницаемости на масштабах порядка длины волны видимого диапазона спектра (фотонные кристаллы), и неупорядоченные системы, а именно, суспензии наночастиц различных типов.

Неупорядоченные системы на основе диэлектрических, полупроводниковых и металлических наночастиц, дисперсно внедренных в различные диэлектрические матрицы, а также суспензии наночастиц различных типов обладают более высокими значениями нелинейных восприимчивостей, чем соответствующие объемные образцы [10, 11]. Этот факт обуславливает огромный интерес к изучению нелинейно-оптических свойств таких сред.

Одним из многочисленных методов исследования наноразмерных систем, наряду с различными микроскопическими методиками, является использование низкочастотного комбинационного рассеяния (КР) света [12]. Низкочастотное КР в полупроводниковых, диэлектрических и металлических нанообъектах, представляющее собой неупругое рассеяние света на локализованных акустических фононах, дает важную информацию об их динамике. Сдвиг частоты рассеянного света определяется собственными частотами структурных неоднородностей исследуемой системы [13]. При малой интенсивности возбуждающего излучения процессы рассеяния носят спонтанный характер. Как известно, любому спонтанному типу рассеяния света можно, при определенных условиях, поставить в соответствие вынужденный тип рассеяния. В связи с этим, особый интерес представляет собой возможность

реализовать вынужденный режим рассеяния, обусловленный морфологическими особенностями наноразмерных систем.

Цели диссертационной работы:

1. Экспериментальное исследование вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) света в трехмерных фотонных кристаллах на основе синтетических опаловых матриц, инфильтрованных КР - активными средами. Определение условий повышения эффективности генерации и понижения порога ВКР и экспериментальное изучение влияния параметров ФЗЗ на процесс ВКР.

2. Определение условий эффективной генерации вынужденного рассеяния в синтетических опалах, нанокompозитах на их основе и поликластерных тонких пленках, обусловленного взаимодействием мощного лазерного излучения с собственными акустическими колебаниями структурных единиц, составляющих исследуемые образцы.

3. Исследование ВР света, возникающего при взаимодействии импульсного лазерного излучения и суспензий наночастиц различных типов.

4. Разработка способов преобразования амплитудно-фазовых характеристик лазерного излучения с помощью нелинейно – оптической фильтрации на основе двухфотонного поглощения, высокочастотного Керр-эффекта и ВКР.

Научная новизна

1. Впервые экспериментально получено вынужденное комбинационное рассеяние света в трехмерных фотонных кристаллах. Показано, что использование в качестве образцов для возбуждения ВКР нанокompозитов на основе синтетических опаловых матриц, инфильтрованных комбинационно - активными жидкостями, существенно повышает эффективность преобразования возбуждающего излучения в ВКР и понижает порог возбуждения по сравнению с однородной жидкостью. Экспериментально установлено, что условием

эффективной генерации ВКР является совпадение частоты возбуждающего лазерного излучения и первой стоксовой компоненты, соответственно, с высокочастотной и низкочастотной границами фотонной запрещенной зоны нанокompозита.

2. Обнаружен новый тип вынужденного рассеяния света в твердотельных наноразмерных системах – вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние света. Экспериментально было исследовано рассеяние в упорядоченных структурах – нанокompозитах на основе синтетических опаловых матриц и неупорядоченных структурах – поликластерных пленках различной природы. Этот тип рассеяния возникает в результате взаимодействия импульсного лазерного излучения с локализованными акустическими колебаниями структурных единиц, образующих исследуемые образцы. Спектральное смещение первой стоксовой компоненты рассеяния относительно возбуждающего излучения для исследуемых систем лежит в гигагерцовом диапазоне частот. Вынужденное рассеяние этого типа характеризуется низким порогом возбуждения и высокой эффективностью преобразования возбуждающего излучения в рассеянное (максимальное значение коэффициента преобразования, реализованное экспериментально, составило величину $\approx 60\%$). Экспериментально зарегистрировано рассеяние «вперед» (попутно с накачкой) и «назад» (навстречу накачке).

3. Обнаружено и исследовано вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние света в суспензиях наночастиц различных типов. Данный тип рассеяния является результатом взаимодействия лазерного излучения с локализованными акустическими возбуждениями наночастиц.

4. Созданы оптические схемы, позволяющие осуществлять обработку оптического изображения на частоте возбуждающего излучения и, одновременно, на частотах нескольких стоксовых компонент. Определены оптимальные условия работы предлагаемых оптических схем для визуализации фазовых объектов и повышения контраста изображений амплитудно-фазовых объектов.

Практическая ценность

1. Вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние света представляет собой эффективный источник когерентной бигармонической накачки, позволяющий осуществлять перестройку разностной частоты от нескольких гигагерц до терагерца. Такой источник электромагнитного излучения может быть использован в спектроскопии наносистем различной природы, собственные частоты которых лежат в данном диапазоне. Также, учитывая высокую интенсивность данного источника, он может найти широкое применение для генерации как электрических сигналов, так и электромагнитного излучения в гига и терагерцовом диапазонах.

2. При создании и разработке ВКР - преобразователей использование в качестве активной среды образцов нанокompозитов на основе синтетических опаловых матриц, инфильтрованных комбинационно - активными жидкостями, при определенных условиях позволяет реализовать вынужденное комбинационное рассеяние с более высокой эффективностью преобразования возбуждающего излучения в рассеянное и более низким порогом возбуждения рассеяния по сравнению с однородными образцами.

3. Вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние света, как и другие типы вынужденных рассеяний света, может быть использовано для преобразования амплитудно-фазовых характеристик световых полей. Разработанные и предложенные в диссертации схемы оптической обработки изображения одновременно на частоте возбуждающего излучения и на нескольких стоксовых частотах вынужденного комбинационного рассеяния света позволяют осуществлять визуализацию фазовых объектов и повышать контраст в изображении слабопоглощающих свет объектов. Использование для аналогичных целей новых типов вынужденного рассеяния света существенно расширит диапазон применения таких схем для решения практических задач связанных с обработкой оптического изображения.

Защищаемые положения

1. При совпадении частоты возбуждающего лазерного излучения с высокочастотным краем стоп-зоны фотонного кристалла (синтетической опаловой матрицы, инфильтрованной комбинационно активной жидкостью), а частоты первой стоксовой компоненты с низкочастотным краем этой зоны реализуются условия существенного снижения порога вынужденного комбинационного рассеяния света. Экспериментально было реализовано двадцатикратное понижение порога вынужденного комбинационного рассеяния света, возбуждаемого в синтетической опаловой матрице, инфильтрованной нитробензолом, по сравнению с порогом ВКР в самом нитробензоле.

2. При взаимодействии импульсного лазерного излучения с собственными акустическими колебаниями субмикронных частиц, образующих твердотельные образцы синтетических опаловых матриц и поликластерных пленок, возникает новый тип вынужденного рассеяния света - вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние света

3. Из полученных экспериментальных данных о спектральных свойствах вынужденного низкочастотного рассеяния света следует, что частотные характеристики рассеянного излучения (спектральное смещение рассеянной компоненты) определяются размером частиц, составляющих исследуемые образцы, и их упругими характеристиками. Для исследованных образцов смещение первой стоксовой компоненты относительно спектрального положения линии накачки лежит в гигагерцовом диапазоне.

4. При взаимодействии импульсного лазерного излучения с суспензиями наночастиц различной природы возникает вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние света

5. Вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние света представляет собой источник бигармонической накачки с возможностью перестройки разностной частоты в гига- и терагерцовом диапазоне. Конкрет-

ное значение разностной частоты определяется морфологией используемых образцов.

6. Использование вынужденного рассеяния света в системах оптической обработки информации с помощью амплитудно-фазовой фильтрации Фурье-спектров оптических изображений различных объектов позволяет осуществлять визуализацию фазовых объектов, повышение контраста в изображении слабопоглощающих свет объектов и инверсию контраста в изображении амплитудных объектов.

Личный вклад автора

Все результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично или при его непосредственном участии и руководстве.

Апробация работы

Основные результаты диссертации неоднократно докладывались на следующих международных и всероссийских конференциях: XVIII Всесоюзной школе по физическим основам голографии, (Ленинград, 1987), International Quantum Electronic Conference (IQEC'94), (Anaheim, California, 1994.), OSA Annual Meeting, (Dallas, Texas, USA, 1994), XV International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, (1995), международной конференции Лазерная физика-95, (1995 г, Аштарак, Армения), IV научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков», (Москва 1997), Международной конференции "Комбинационное рассеяние-70 лет исследований," (Москва 1998), XVI International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO'98), (Moscow, Russia, 1998), OSA Annual Meeting and Exhibit "Optics in High-Tech Industries", (USA, 1999), V международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков», 23-25 июня 1999, (Москва, 1999.), *Optics in the New Millenium*", OSA Annual Meeting (2000, USA), VII International Conference on Raman Spectroscopy, (Beijing, China, 2000), Международном оптическом конгрессе «Оптика», конференции

"Фундаментальные проблемы оптики", (Санкт-Петербург, 2000), Международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков», (Москва, 2001), Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике», (Москва, 2001), OSA Annual Meeting, (Long Beach, California, 2001), V Международной конференции "Прикладная оптика-2002", (Санкт-Петербург, 2002), VII международной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков", (Москва, 2003), II Всероссийской конференции "Необратимые процессы в природе и технике" (2003 г., Москва), International conference Frontiers in Optics 2004, Laser Science XX, (USA, 2004), III Всероссийской конференции "Необратимые процессы в природе и технике (Москва, 2005), VIII международной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков", (Москва, 2005), VIII Международной конференции "Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы", (Ульяновск, 2006), IV Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики (ФПО-2006)» в рамках IV Международного конгресса «Оптика XXI », (С-Пб, 2006), VI Международной конференции, «Лазерная физика и оптические технологии» (Гродно, Беларусь, 2006), Конференции "Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики (Демидовские чтения)" (Москва-Екатеринбург-Томск, 2006), XI Международном симпозиуме "Нанопизика и наноэлектроника", (Нижний Новгород, 2007), Photonics 2007, XII International conference of photon scattering in condensed matter, (Paris, 2007), European Conference on Nonlinear Optical Spectroscopy (ECONOS 2007), Всероссийском семинаре "Юрий Николаевич Денисюк - основоположник отечественной голографии", (Санкт-Петербург, 2007), ICONO/LAT, (Minsk, Belarus, 2007), XIII Международной научно-технической конференции (Москва, МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2007), IV Всероссийской конференции "Необратимые процессы в природе и технике", (Москва, 2007), Международном оптическом конгрессе «ОПТИКА XXI», (Санкт-Петербург, 2008), VII Международной конференции «Лазерная физика и оптические технологии», (Минск, 2008), XIV Международной научно-

технической конференции "Высокие технологии в промышленности России». (Москва, 2008), Научно-практической конференции «Голография в России и за рубежом. Наука и практика», (Санкт-Петербург, 2008), VII European Conference on Nonlinear Optical Spectroscopy (ECONOS-2008), V Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике» (Москва, 2009), International Conference on Photonics, Nanotechnology and Computer Applications (ICOPNAC – 2009) (India, 2009), XIII Международном Симпозиуме Нанопфизика и наноэлектроника», (Нижний Новгород, 2009), VIII European Conference on NonLinear Spectroscopy and XXVIII European CARS Workshop (ECONOS-2009); (Italy, 2009), X юбилейной международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков», (Москва, 2009), XV Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России» Москва, 2009), XXII Международного симпозиума «Тонкие пленки в электронике» (Москва, 2009), IX European conference on nonlinear optical spectroscopy, XXIX European CARS Workshop, ECONOS 2010, (Germany, 2010), Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России (Материалы и устройства функциональной электроники и микрофотоники)», (Москва, 2010), XXII International Conference on Raman Spectroscopy – ICORS (USA, 2010), II Nanotechnology International Conference and Exhibition, (Tel Aviv, Israel, 2010), XVI International conference on Photoacoustic and Photo-thermal Phenomena, (Yucatan, Mexico, 2011), XVIII Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России (Материалы и устройства функциональной электроники и микрофотоники)» (Москва, 2012), XVI International Conference on Laser Optics (St.Petersburg, 2012), IX Международной научной конференции «Лазерная физика и оптические технологии» (Белоруссия, 2012), Advanced Photonics, OSA Optics & Photonics Congress (USA, 2012), ECONOS conference (UK, 2012), XXIII International Conference on Raman Spectroscopy “Raman – home coming” (India, 2012), III Международной научной конференции «Наноструктурные материалы –

2012: Россия – Украина - Беларусь» (Санкт-Петербург, 2012), XVIII Symposium on Thermophysical Properties, (Boulder, USA, 2012), International Conference on Nonlinear Optics (ICONO-2013) (Moscow, 2013), International Conference CLEO-PR & OECC/PS (Kyoto, Japan, 2013), III International Symposium on Laser Ultrasonics and Advanced Sensing (LU 2013) (Yokohama Japan, 2013), XI International Conference on Material Chemistry (MC 11) (University of Warwick, UK, 2013), Всероссийской конференции «Комбинационное рассеяние – 85 лет исследований» и IV Сибирском семинаре «Спектроскопия комбинационного рассеяния света», (Красноярск, 2013),

По результатам диссертационной работы опубликовано 32 статьи в рецензируемых журналах. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 248 страниц, включая 66 рисунков и 16 таблиц. Список литературы содержит 292 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цели и задачи, показаны новизна и практическая значимость работы. Приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен обзор литературы, посвященной теоретическому и экспериментальному исследованию субмикронных и наноразмерных систем в оптике. Рассмотрены свойства фотонных кристаллов с учетом особенностей определяемой их структурой. Показаны перспективы их использования для решения практических задач, связанных с управлением характеристиками когерентного излучения. Особое внимание уделено технологии производства и свойствам образцов синтетических опаловых матриц, которые использовались в данной работе. Рассмотрены основные оптические

свойства таких систем, обусловленные фотонной запрещенной зоной. Отмечено, что акустические свойства наноразмерных и субмикронных систем проявляются в спектрах спонтанного рассеяния света.

Во **второй главе** приведены результаты экспериментальных исследований ВКР в нанокompозитах на основе синтетических опаловых матриц. Рассмотрены основные способы повышения эффективности преобразования и понижения порога ВКР. Показано, что использование в качестве активной среды фотонных кристаллов, с учетом свойств фотонной запрещенной зоны, может существенно понизить порог возбуждения ВКР. Описана методика эксперимента по исследованию вынужденного рассеяния света в синтетических опалах и нанокompозитах на их основе.

В качестве источника излучения использовался твердотельный лазер на рубине работающий в режиме модуляции добротности с длиной волны генерации 694.3 нм, длительностью импульса, измеренной на половине высоты пика 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. Также, использовалось излучение второй гармоники пикосекундного Nd:YAG лазера (тип LS-2151), длительность импульса 70 пс, максимальная энергия в импульсе 35 мДж.

Для проведения спектральных измерений использовались спектрограф СТЭ-1 и спектрометра FSD – 8.

В качестве активной среды использовались синтетические опаловые матрицы, инфильтрованные различными комбинационно - активными жидкостями. Для всех образцов осуществлялась характеристика, а именно, определялось положение фотонной запрещенной зоны. Целью характеристики было определение образцов нанокompозитов, высокочастотный край фотонной запрещенной зоны которых соответствовал частоте излучения накачки, а низкочастотный край ФЗЗ соответствовал частоте первой стоксовой компоненты ВКР. Измерения проводились при освещении образцов перпендикулярно ростовой плоскости (111).

При использовании в качестве источника возбуждающего излучения лазера на рубине, работающего в режиме модуляции добротности, существенное понижение порога ВКР было реализовано для нанокompозита, представляющего собой синтетическую опаловую матрицу с размером глобул 300 нм, инфильтрованную нитробензолом. Была получена генерация 1-й и 2-й стоксовой компонент на длинах волн 765,8 нм и 853,7 нм (см. Рис.1).

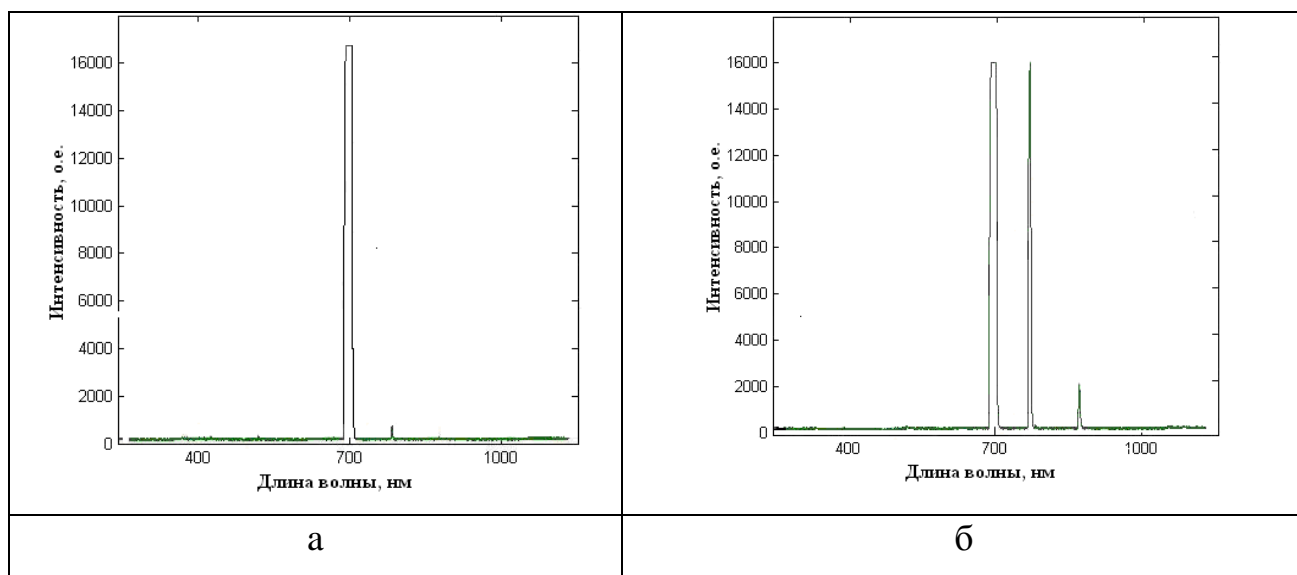


Рис.1. Спектр ВКР, возбуждаемого в синтетическом опале, инфильтрованном нитробензолом, в направлении назад. Мощность возбуждающего излучения: (а)- 0,10 ГВт/см²; (б)- 0,15 ГВт/см²

Для этого образца спектральное положение частот возбуждающего излучения и первой стоксовой компоненты соответствовало положению низкочастотного и высокочастотного краев ФЗЗ. При этом было реализовано существенное (до 20 раз) понижение порога возбуждения ВКР по сравнению с однородным образцом бензола и с инфильтрованными нитробензолом опаловыми матрицами при других диаметрах глобул. Таким образом, впервые было реализовано вынужденное комбинационное рассеяние света в трехмерных фотонных кристаллах на основе синтетических опалов, инфильтрованных нитробензолом с коэффициентом преобразования по энергии ~6% . Расходимость пучка вынужденного комбинационного рассеяния была близка к расходимости излучения накачки.

В Табл.1 представлены результаты эксперимента по наблюдению ВКР в опале, инфильтрованном нитробензолом. Использовались нанокompозиты с различным размером глобул и, следовательно, с различным положением фотонной запрещенной зоны. Генерация ВКР была получена для образца в котором частоты первой стоксовой компоненты ВКР и накачки соответствовали краям фотонной запрещенной зоны. В образцах, в которых не выполнялось это соответствие, ВКР не возбуждалось.

| Вещество | Λ_c , нм | $\Lambda_{\text{фзз}}$, нм | D, нм | ВКР |
|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------|--------------|
| Нитробензол $C_6H_5NO_2$ | <u>765,8</u> | 483,07 | 200 | отсутствует |
| | | 555,5 | 230 | отсутствует |
| | | 627,99 | 260 | отсутствует |
| | | <u>724,605</u> | <u>300</u> | присутствует |
| | | 772,95 | 320 | отсутствует |

Таблица 1. ВКР в синтетических опаловых матрицах, инфильтрованных нитробензолом: длина волны первой стоксовой компоненты ВКР - Λ_c ; положение ФЗЗ нанокompозита - $\Lambda_{\text{фзз}}$; диаметр глобул, образующих ФК - D. Максимальный коэффициент преобразования по энергии составил 6%.

При использовании для возбуждения второй гармоники пикосекундного Nd:Yag лазера, в качестве активной среды изучались нанокompозиты, представляющие собой синтетические опаловые матрицы с диаметром глобул 200 нм, 230 нм, 250 нм и 270 нм, инфильтрованные комбинационно - активными жидкостями (ацетоном, этанолом, бензолом, CCl_4 , водой). Генерация ВКР была реализована для воды, этанола и ацетона в образцах нанокompозитов с размером глобул 250 нм; при этом максимальное снижение порога было реализовано для нанокompозита, инфильтрованного водой. Согласно соотношению (2.2) для опалов с диаметром глобул 250 нм, инфиль-

трованных водой спектральное положение ФЗЗ имеет значение $\lambda_{\phi 33} = 586$ нм. Спектральная ширина соответствующей стоп-зоны составляет около 100 нм по основанию. В этом случае выполняется условие для существенного снижения порога возбуждения первой стоксовой компоненты ВКР для опала, инфильтрованного водой, и возбуждаемой лазерным излучением с длиной волны 532 нм. Экспериментально было реализовано понижение порога в 12 раз.

Как и в случае с нитробензолом, во всех исследованных образцах опалов, инфильтрованных водой, ВКР возбуждалось в случае, когда частота лазерного излучения была близка к ФЗЗ на высокочастотном краю зоны, а первая стоксовая компонента была близка к низкочастотному краю ФЗЗ. Этот случай соответствует расположению центра фотонной запрещенной зоны между возбуждающей линией и первой стоксовой компонентой.

В случае опалов инфильтрованных этанолом и ацетоном было реализовано понижение порога в 10 раз.

Таким образом, при возбуждении ВКР в нанокompозитах на основе синтетических опалов, при использовании для возбуждения лазерного излучения пикосекундного и наносекундного диапазона длительностей, было получено существенное понижение порога ВКР (до 20 раз) по сравнению с порогом ВКР, возбуждаемом в соответствующей комбинационно - активной жидкости.

Третья глава посвящена изучению вынужденного низкочастотного рассеяния света в твердотельных наноразмерных системах, а именно вынужденному глобулярному рассеянию света (ВГР) в синтетических опалах и вынужденному рассеянию света в тонких пленках, обусловленному взаимодействием лазерного излучения с морфологически зависимым резонансом. В этой главе приводятся результаты экспериментальных исследований этого типа рассеяния света в нанокompозитах на основе синтетических опаловых матриц и поликластерных пленках. Рассматриваются возможные физические причи-

ны, и определяется вклад бриллюэновского и комбинационного механизмов в наблюдаемый тип рассеяния света.

В результате взаимодействия импульсного лазерного излучения с синтетическими опаловыми матрицами и нанокомпозитами, представляющими собой опалы, инфильтрованные различными молекулярными жидкостями, возникает вынужденное рассеяние с высокой эффективностью преобразования (до 60 %). В спектре излучения прошедшего через образец и (или) отраженного от него, появляются одна или несколько спектральных компонент в стоксовой области спектра. Спектральное смещение рассеянного излучения относительно частоты накачки составляет величину около нескольких десятых см^{-1} . Данный эффект является пороговым. Пороговое значение интенсивности лазерного излучения определяется характеристиками используемого образца.

Такой вид рассеяния, обусловленный взаимодействием мощного лазерного излучения с собственными акустическими колебаниями глобул, наблюдается как в направлении попутно с накачкой («вперед»), так и в направлении навстречу накачке («назад»). При этом спектральное смещение соответствующих стоксовых компонент одинаково для двух направлений распространения.

Спектральная ширина линии наблюдаемого ВГР по порядку величины близка к ширине линии возбуждающего излучения ($0,01\text{см}^{-1}$).

Для опаловой матрицы без заполнения (для образцов с различным размером глобул) возбуждается одна стоксова компонента, наблюдаемая для геометрии рассеяния «назад». Для ряда нанокомпозитов, полученных на основе опаловых матриц, были проведены измерения параметров ВГР как для направления «вперед», так и для направления «назад». При инфильтрации опаловой матрицы жидкостями с показателем преломления, близким к значению показателя преломления плавленого кварца, образец становился практически прозрачным. В условиях эксперимента для этих целей использовались ацетон и этанол.

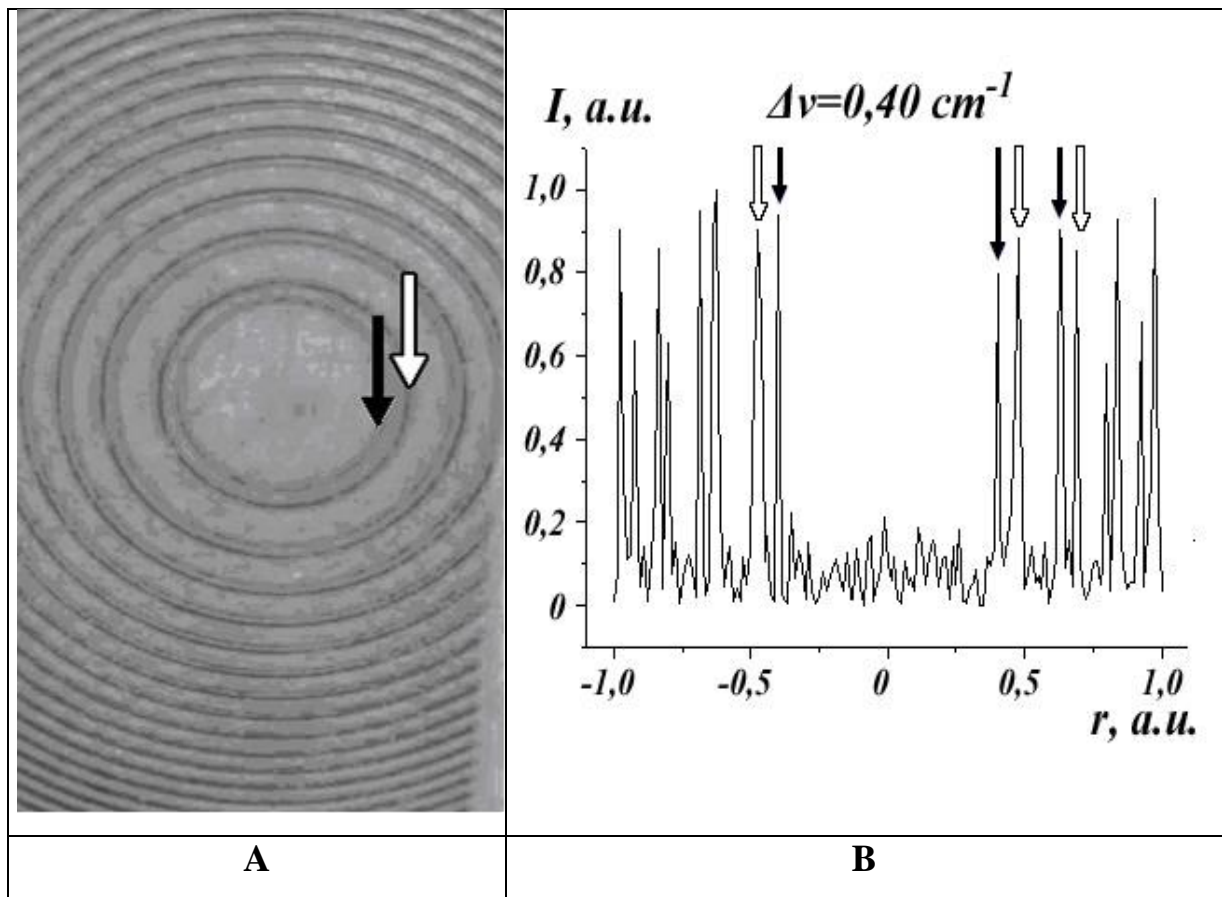


Рис.2 Интерферограмма (а) и спектр (б) ВГР в опале, заполненном ацетоном. Геометрия рассеяния "назад". Область дисперсии интерферометра $1,67 \text{ см}^{-1}$. Лазерному излучению ($\lambda=694,3 \text{ нм}$) соответствует кольцо большего диаметра (отмечено светлыми стрелками на спектре), кольцо меньшего диаметра соответствует излучению ВГР (отмечено темными стрелками). Плотность мощности накачки $0,12 \text{ ГВт/см}^2$. Спектральный сдвиг стоксовой компоненты относительно возбуждающего излучения составляет $\approx 0,40 \text{ см}^{-1}$.

Для геометрии рассеяния «вперёд» при комнатной температуре наблюдалась только одна стоксова компонента ВГР с частотным сдвигом около 0.4 см^{-1} для образцов синтетических опаловых матриц инфильтрованных как ацетоном, так и этанолом. На Рис.2 представлена интерферограмма вынужденного глобулярного рассеяния в опале, заполненном ацетоном.

Порог ВГР, число стоксовых компонент и эффективность преобразования определяются как свойствами образца, так и его температурой (Таблица 2).

| образец | Геометрия рассеяния | $\Delta\nu, \text{см}^{-1}$ Эксперимент | $\Delta\nu, \text{см}^{-1}$ Расчет | $\nu, \text{ГГц}$ Эксперимент | $\nu, \text{ГГц}$ Расчет |
|---|---------------------|--|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| Комнатная температура (293 К) | | | | | |
| Аморфный кварц | назад (ВРМБ) | ~ 1 | - | - | - |
| ацетон | назад (ВРМБ) | 0,16 | - | - | - |
| этанол | Назад (ВРМБ) | 0,17 | - | - | - |
| опал | Назад | 0,44 | 0,44 | 13,2 | 13,2 |
| опал + ацетон | Вперед | 0,40 | 0,44 | 12,0 | 13,2 |
| | Назад | 0,40 | 0,44 | 12,0 | 13,2 |
| | | 0,65 | 0,68 | 19,5 | 20,4 |
| опал + этанол | Вперед | 0,37 | 0,44 | 11,1 | 13,2 |
| | назад | 0,39 | 0,44 | 11,7 | 13,2 |
| | | 0,63 | 0,68 | 18,9 | 20,4 |
| Температура жидкого азота (77 К) | | | | | |
| опал + этанол | Вперед | 0,40 | 0,44 | 12 | 13,2 |
| | | 0,77 | 0,68 | 23,1 | 20,4 |
| | | 1,13 | 1,07 | 33,9 | 32,1 |

Таблица 2. Значения сдвига частоты ВГР ($\Delta\nu$) для прямой и обратной геометрий эксперимента при различных температурах в сравнении со зна-

чениями собственных частот колебаний кварцевых глобул, образующих синтетические опалы, а также значения параметров ВРМБ комбинационно-активных жидкостей, использовавшихся для заполнения опаловых наноконструкций.

В таблице приведены также значения частотного смещения вынужденного рассеяния Манделъштама Бриллюэна в плавленом кварце и в жидкостях, использовавшихся для заполнения опаловых наноконструкций. Значения собственных частот кварцевых глобул, образующих опаловую матрицу, рассчитывались на основе известной работы Лэмба о собственных частотах упругой свободной сферы, при этом в качестве значений скоростей продольной и поперечной звуковых волн принимались величины известные для аморфного кварца. Инфильтрация синтетических опаловых матриц жидкостью незначительно меняет значение частоты.

Для определения зависимости частоты смещения первой стоксовой компоненты ВГР от размеров глобул используемых наноконструкций были проведены измерения для наноконструкций, представляющих собой опаловые матрицы с различным размером глобул, инфильтрованные этанолом (Таблица 3). Спектральные сдвиги частоты первой стоксовой компоненты ВГР относительно частоты возбуждающего излучения определяются частотами собственных колебаний глобул аморфного кварца и, соответственно, диаметром этих глобул.

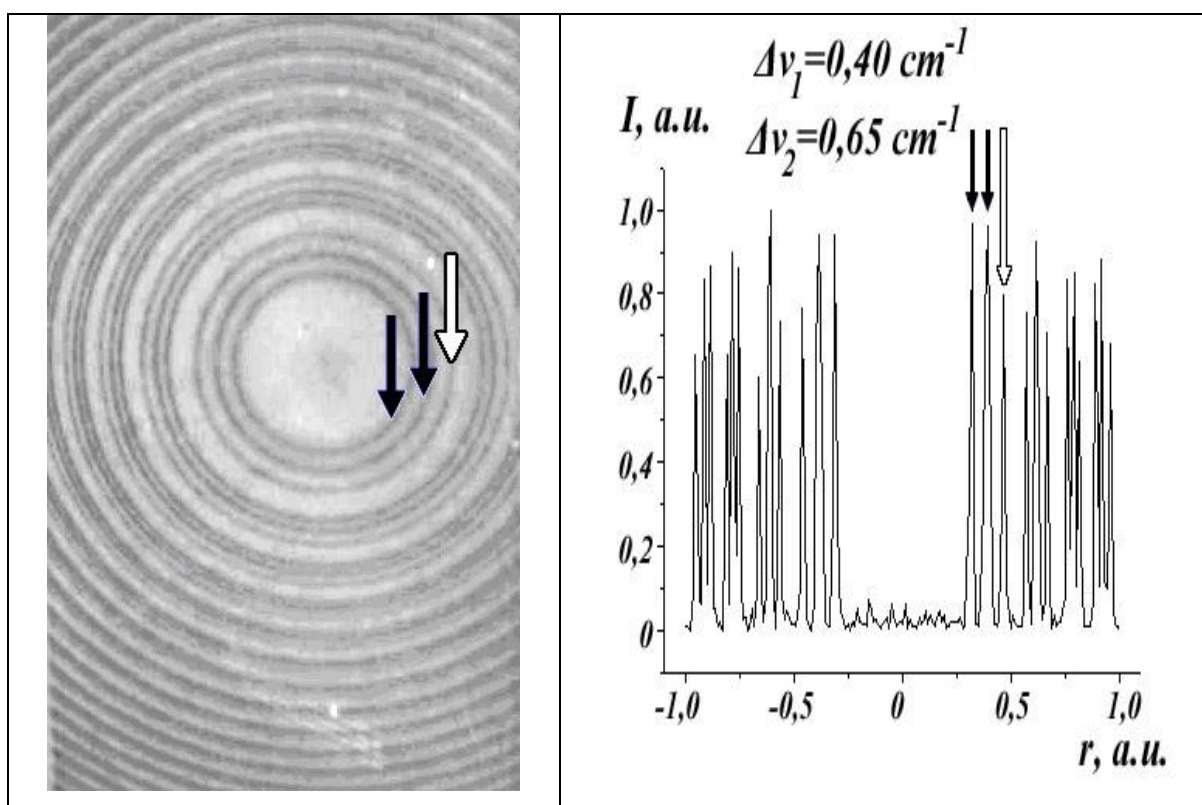
| Образец | $\Delta \nu_i$, ГГц Эксперимент | Диаметр сфер ¹ $D \pm 5$, нм | $\Lambda_{\phi 33}$, нм Эксперимент |
|-------------------------------|-------------------------------------|---|---|
| Опал инфильтрованный этанолом | 5,1 | 315 | 656 |
| | 6,6 | 290 | 628 |
| | 7,8 | 270 | 575 |

¹ По данным электронной микроскопии.

| | | | |
|--|------|-----|-----|
| | 11,1 | 245 | 540 |
|--|------|-----|-----|

Таблица 3. Частотные сдвиги $\Delta\nu$; ВГР и положение максимума (стоп-зоны) $\Lambda_{\text{ФЗЗ}}$ в спектре ВГР при прямой геометрии рассеяния в зависимости от размера сфер при нормальном падении возбуждающего излучения.

Таким образом, частотное смещение ВГР относительно частоты излучения накачки определяется прежде всего размерами наноглобул, формирующих опаловые матрицы (см. Табл.3). Инфильтрация образца жидкостью приводит к незначительным отличиям частоты смещения ВГР, что обусловлено изменением его акустических свойств (см. Табл.2). В Табл.3 также приведены значения фотонной запрещённой зоны образца. Следует отметить, что наличие структуры, определяющей наличие ФЗЗ, не влияет на частотные характеристики процесса ВГР.



| | |
|----------|----------|
| A | B |
|----------|----------|

Рис.3. Интерферограмма (a) и спектр (b) ВГР в опале, заполненном ацетоном. Геометрия рассеяния "назад". Область дисперсии интерферометра $1,67 \text{ см}^{-1}$. Лазерному излучению ($\lambda=694,3 \text{ нм}$) соответствует кольцо большего диаметра. Интенсивность лазерного излучения $0,21 \text{ ГВт/см}^2$.

Для всех исследованных образцов нанокompозитов было зарегистрировано вынужденное глобулярное рассеяние света с высокой эффективностью преобразования. Количество стоксовых компонент в спектре рассеянного света определяется мощностью возбуждающего излучения. На Рис.3 показаны интерферограмма и спектр ВГР, содержащий две стоксовых компоненты, в опаловой матрице инфильтрованной ацетоном для направления рассеяния навстречу накачке. Интенсивность лазерного излучения, соответствующая появлению второй стоксовой компоненты составляла величину $0,21 \text{ ГВт/см}^2$. Понижение температуры исследуемых образцов до температуры жидкого азота приводило к повышению эффективности преобразования волны накачки в рассеянную волну и понижению порога возбуждения ВГР. На Рис.4 приведена зависимость энергии излучения ВГР от энергии накачки.

Высокая эффективность преобразования энергии накачки в энергию рассеянной волны, достигающее 60 %, свидетельствует о большой интенсивности акустического возбуждения среды в гигагерцовом диапазоне частот. Максимально возможное значение интенсивности акустического возбуждения в исследуемой среде составляет величину порядка 10^{-4} от интенсивности возбуждающего лазерного излучения.

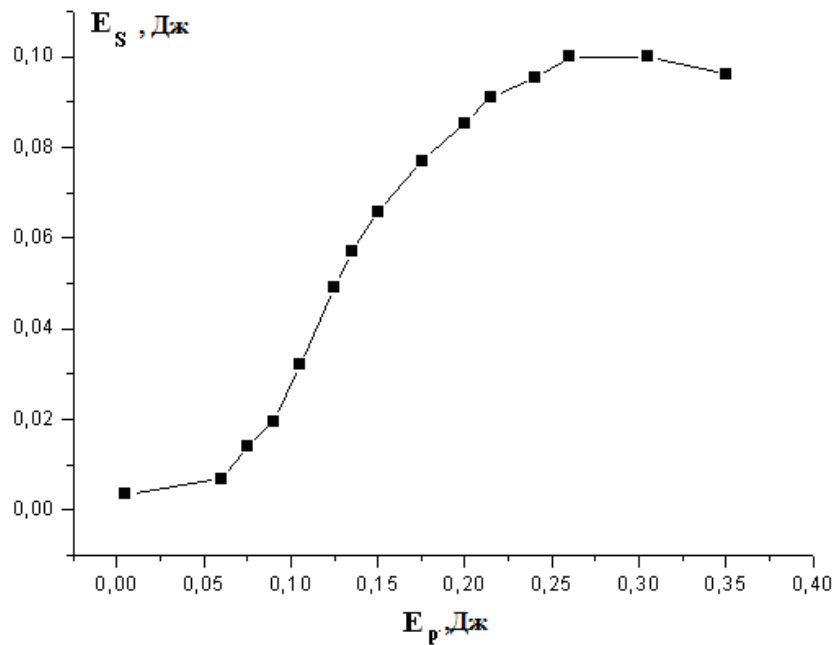


Рис.4. Зависимость энергии ВГР E_s от энергии накачки E_p (в джоулях) для искусственного опала с диаметром глобул, равным 245 нм.

В этой главе также приведены также результаты по экспериментальному исследованию морфологически зависимого акустического резонанса в тонких пленках. Исследовалось взаимодействие акустических колебаний в пленках различного типа, отличающихся составом и условиями получения, с излучением твердотельного лазера на рубине. Такой лазер характеризовался длиной волны генерации 694,3 нм, шириной линии генерации $0,015\text{см}^{-1}$, длительностью импульса 20 нс и максимальной энергией 0,4-0,5 Дж. Нелинейное взаимодействие лазерного излучения с акустическими колебаниями приводило к возникновению вынужденного низкочастотного комбинационного рассеяния (ВНКР) света. Подобные эффекты генерации электромагнитных волн в оптической или терагерцовой областях спектра для тонких пленок получили название морфологически зависимых резонансов.

Используемая при этом экспериментальная установка приведена на рис.6. Так как собственные акустические частоты, соответствующие размерам и упругим характеристикам нанокристаллитов, составляющих исследуемые образцы, лежат в гигагерцовой области спектра, в качестве основного спектрального прибора для анализа свойств (ВНКР) использовался интерферо-

метр Фабри-Перо. Излучение рубинового лазера фокусировалось в исследуемый образец. Регистрация спектров и энергии электромагнитного излучения проводилась с использованием схемы, показанной на рис.5.

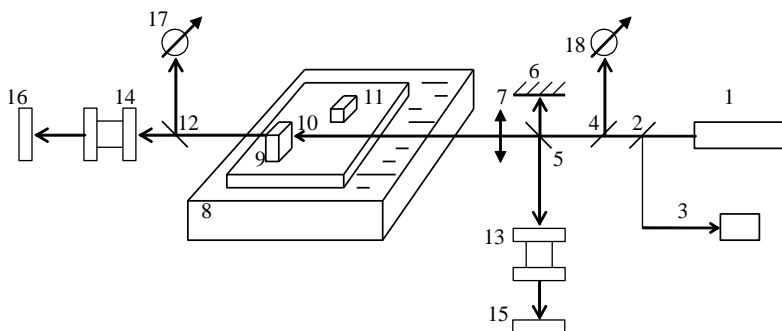


Рис.5. Экспериментальная схема. 1 лазер на рубине; 2, 4, 5, 12 – пластинка из кварцевого стекла; 3 – система контроля параметров лазера; 6 - зеркало; 7 – система фокусировки; 8 – ячейка для жидкого азота; 9 – подложка из меди; 10, 11 – образцы; 13, 14 – интерферометр Фабри - Перо; 15, 16 – системы регистрации спектра; 17,18 – системы измерения рассеянной световой энергии в прямом и обратном направлениях.

Измерения проводились для пленок AlN и InSnOx на подложках из кварцевого стекла, пленок кремнезема - регулярных упаковок наносфер (РУН), а также для алмазоподобной углеродной пленке (АУП) на подложке из природного алмаза. Все измерения проводились при температуре жидкого азота, что позволяло существенно повысить порог разрушения образцов. При достижении интенсивности лазерного импульса, соответствующей пороговому значению, в спектре рассеянного света регистрировались дополнительные спектральные компоненты, смещенные относительно частоты возбуждающего излучения на величину, равную частоте собственных акустических колебаний агрегатов, составляющих исследуемые образцы. Для рассеянного излучения, регистрировавшегося как в направлении попутном с накачкой («вперед»), так и в направлении навстречу накачке («назад»), частотное сме-

щение рассеянного излучения было одинаковым. Ширина спектра рассеянной волны была соизмерима с шириной спектра возбуждающего излучения. Расходимость рассеянной волны, из-за малого спектрального смещения была измерена только для рассеяния «назад» и составляла величину 10^{-3} рад. В таблице 4 приведены характерные размеры наноструктурированности пленок в виде волокон или глобул полученные по данным электронной микроскопии (растровые электронные микроскопы (РЭМ) *CARL ZEISS LEO 1430 VP* и *Tesla BS-350*, просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) *JEM 200C*), а также рассчитанные по измеренной частоте колебаний и предполагаемой скорости их распространения. Как видно таблицы 4, характерный размер структуры, рассчитанный по экспериментально измеренным частотным сдвигам первой стоксовой компоненты, находится в удовлетворительном согласии с результатами, полученными из данных по электронной микроскопии. Для образцов одинакового химического состава, но с различными размерами агрегатов, увеличение размеров последних ведет к уменьшению частотного сдвига рассеянной волны по отношению к частоте возбуждающего излучения. Это свидетельствует о размерном характере наблюдаемого эффекта.

| <i>N</i> | <i>Пленка/подложка</i> | <i>Эффективность преобразования</i> | <i>Пороговое значение интенсивности накачки, ГВт/см²</i> | <i>Частоты акустических колебаний, ГГц</i> | <i>Характерный размер, мкм</i> | <i>Характерный размер наноструктуризации, мкм (по данным электронной микроскопии)</i> |
|----------|------------------------|-------------------------------------|---|--|--------------------------------|---|
| <i>1</i> | <i>AlN/стекло</i> | <i>10</i> | <i>0,16</i> | <i>8,1</i> | <i>0,82</i> | <i>0,8</i> |
| <i>2</i> | <i>AlN/стекло</i> | <i>10</i> | <i>0,16</i> | <i>6,0</i> | <i>1,1</i> | <i>1</i> |
| <i>3</i> | <i>InSnOx</i> | <i>12</i> | <i>0,14</i> | <i>8,7</i> | <i>0,44</i> | <i>0,7</i> |

| | | | | | | |
|---|-------------------|------|------|------|------|------|
| | /стекло | | | | | |
| 4 | InSnOx /стекло | 12 | 0,14 | 6,3 | 0,61 | 0,82 |
| 5 | InSnOx /стекло | 11 | 0,15 | 5,1 | 0,75 | 0,95 |
| 6 | ППА/алмаз | 20 | 0,1 | 10,2 | 1,1 | 0,8 |
| 7 | ППА/алмаз | 19,5 | 0,12 | 7,2 | 1,36 | 0,9 |
| 8 | РУН/стекло | 8 | 0,11 | 7,2 | 0,27 | 0,25 |

Таблица 4. Характеристики вынужденного рассеяния света, возникающего в тонких пленках: максимальный коэффициент преобразования по энергии, пороговое значение мощности, частотное смещение стоксовой компоненты относительно возбуждающей, средний размер структурной составляющей, рассчитанный по измеренному частотному смещению, средний размер структурной составляющей по данным электронной микроскопии.

В четвертой главе приведены результаты по исследованию вынужденного низкочастотного комбинационного рассеяния света в суспензиях наночастиц различных типов.

Суспензии наночастиц различных типов обладают более высокими значениями нелинейных восприимчивостей, чем соответствующие объемные образцы. В связи с этим такие материалы являются весьма перспективными для использования в качестве активных сред в оптоэлектронике. Одним из многочисленных методов исследования наноразмерных систем, наряду с различными микроскопическими методиками, является использование низкочастотного комбинационного рассеяния (НКР) света, впервые экспериментально реализованного в 1986 году. НКР возникает в результате взаимодействия электромагнитного излучения с наночастицами с размером, меньшим длины волны возбуждающего света. Под действием возбуждающего излучения воз-

никает дипольный момент, осциллирующий с частотой поля накачки. Энергия тепловых осцилляций составляет величину порядка kT , а их частотный спектр определяется набором собственных частот наночастицы и является дискретным. Взаимодействие исходного электромагнитного поля с полем осциллирующего диполя приводит к возникновению неупругого рассеяния как и при спонтанном комбинационном рассеянии на внутримолекулярных колебаниях молекул. НКР в полупроводниковых, диэлектрических и металлических нанобъектах, представляющее собой неупругое рассеяние света на локализованных акустических фононах, дает важную информацию о динамике их колебаний. Сдвиг частоты рассеянного света определяется собственными частотами структурных неоднородностей исследуемой системы. Следует отметить, что при этом отсутствует зависимость величины частотного сдвига от угла между волновыми векторами возбуждающего и рассеянного света, в отличие от рассеяния света на акустических фононах в однородной среде (рассеяния Мандельштама-Бриллюэна). Вид спектрального распределения НКР определяется распределением наночастиц по размерам. Данный тип рассеяния может быть использован для определения формы и размеров наночастиц в различных системах.

Нелинейное взаимодействие сильной лазерной волны с изначально слабыми полями НКР может приводить к возникновению вынужденного низкочастотного комбинационного рассеяния света. В частности, в синтетических опаловых матрицах, представляющих собой трехмерные структуры фрактального типа, образованные из плотноупакованных монодисперсных сфер кремнезёма с характерным диаметром 200 - 700 нм, было обнаружено вынужденное рассеяние света со смещением частоты относительно частоты накачки на величину порядка нескольких десятых долей см^{-1} (Глава 3). Данное смещение частоты определяется значением собственной частоты наносфер, образующих опаловую матрицу.

В Главе 3 были приведены результаты экспериментов по исследованию вынужденного рассеяния света, вызванного взаимодействием лазерного излучения с локализованными акустическими модами структурных неоднородностей. Были приведены результаты для поликластерных алмазных пленок, пленок нитрида алюминия (AlN), оксида индия и олова (ITO), а также пленок кремнезема (регулярных упаковок наносфер SiO_2). Все эти материалы можно охарактеризовать средними размерами структурных неоднородностей, которые определяются условиями роста. Размеры неоднородностей – порядка нескольких сотен нанометров соответствуют акустическим частотам, лежащим в гигагерцовом диапазоне. Существенно расширить этот спектральный диапазон (до терагерцового) помогло использование образцов с наночастицами размером от десяти до сотен нанометров.

В работах, которые составляют основу данной главы, сообщается о свойствах вынужденного рассеяния света, вызванных взаимодействием лазерного излучения с суспензиями наночастиц различного типа. В качестве образцов использовались водные суспензии наночастиц серебра, золота, сульфида цинка, фторида лантана.

Для приготовления суспензии наноразмерного ZnS использовали гептагидрат сульфата цинка, нонагидрат сульфида натрия (Sigma-Aldrich, 99%) и L-глицин (Reanal) без дополнительной очистки. Глицин использовался для модифицирования наночастиц ZnS, что предотвращало их агрегацию. Для приготовления всех растворов использовали дистиллированную воду. Синтез проводился при комнатной температуре. В 20 мл водного раствора глицина добавляли капли по 0.03 мл 0.5 М растворов $ZnSO_4$ и Na_2S . В результате получали оптически прозрачную суспензию. Гистограмма распределения наночастиц ZnS по размерам приведена на рис. 6.

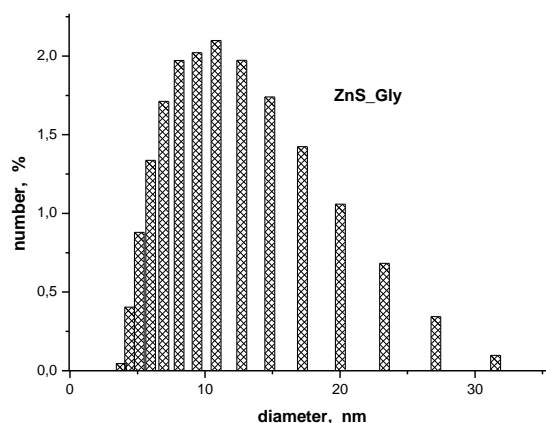
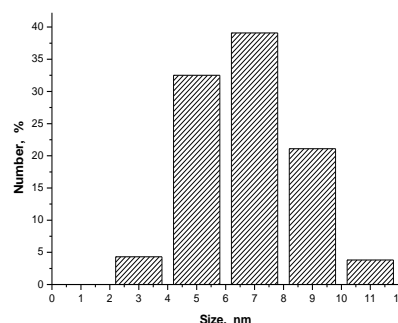
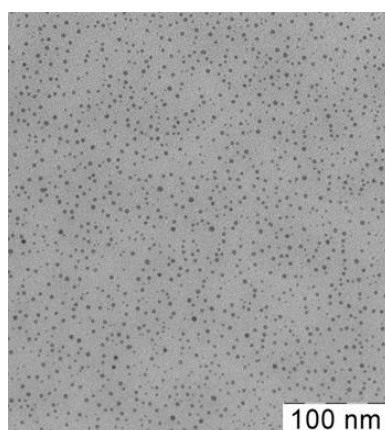
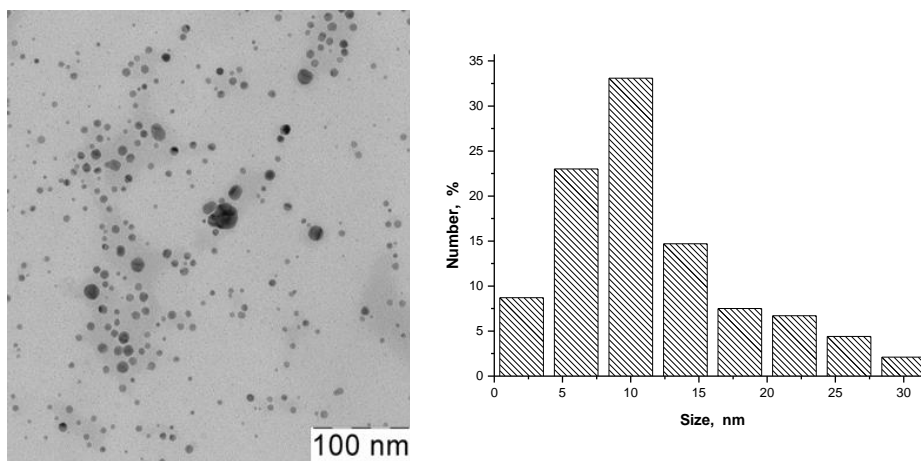


Рис. 6. Гистограмма распределения наночастиц ZnS по размерам.

Получение суспензий наночастиц золота и серебра осуществлялось по стандартной схеме [см. текст диссертации]. На рис. 7 приведены микрофотографии суспензий наночастиц золота и серебра и гистограммы распределения наночастиц по размерам. Приготовление наночастиц LaF₃ осуществлялось следующим образом. Раствор аминокислоты в 100 мл воды нейтрализовался NaOH (до pH, равного 8.5). Раствор нагревался до 75⁰C. Растворы LaCl₃ (или смесь LaCl₃ и Eu(NO₃)₃) в 20 мл воды и NaF в 20 мл воды добавлялись по каплям в раствор аминокислоты, который во время синтеза непрерывно перемешивался при 75⁰C. Все реактивы, использованные для синтеза, имели марку ЧДА. Количества реагентов, использованных для синтеза, приведены в таблице 5.



а



б

Рис.7. Электронная микрофотография и гистограмма распределения наночастиц по размерам для суспензии золотых (а) и серебряных (б) наночастиц.

| Образец | LaCl ₃ | Eu(NO ₃) ₃ | NaF | Глицин |
|---------|---------------------------|-----------------------------------|---------------------|----------------------|
| I | $4.95 \cdot 10^{-3}$ | $5 \cdot 10^{-5}$ | $5 \cdot 10^{-3}$ | $5 \cdot 10^{-3}$ |
| II | $1.67 \cdot 10^{-3}$ | — | $5 \cdot 10^{-3}$ | $1.67 \cdot 10^{-3}$ |
| III | $4.9997826 \cdot 10^{-3}$ | $0.2174 \cdot 10^{-6}$ | $1.5 \cdot 10^{-2}$ | $5 \cdot 10^{-3}$ |

Таблица 5. Количество (в молях) реагентов, использованных для синтеза коллоидных растворов LaF₃

Все коллоидные растворы исследовались в том же виде, в котором были получены. Распределение частиц в коллоидных растворах по размерам исследовалось с помощью метода динамического рассеяния света (DLS) на анализаторе Zetasizer Nano ZS (Malvern).

Схема соответствующей экспериментальной установки приведена на рис.8. В качестве источника возбуждения нелинейных эффектов использовался рубиновый лазер (1) с модулированной добротностью (длина волны генерации $\lambda = 694.3$ нм, длительность лазерного импульса $\tau = 20$ нс; максимальная энер-

гия в импульсе $E_{\max} = 0.3$ Дж, расходимость $3.5 \cdot 10^{-4}$ рад, ширина линии генерации 0.015 см^{-1}).

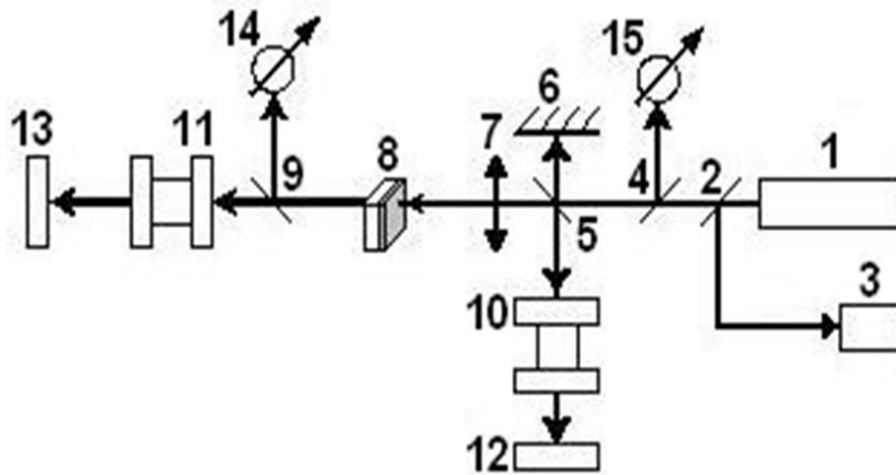


Рис.8. Схема экспериментальной установки для изучения вынужденного низкочастотного рассеяния света в суспензиях.

Возбуждающее излучение фокусировалось в образцы (8) линзами (7). Полупрозрачные стеклянные пластины (9,5,4,2) направляли световые пучки на регистрирующие системы. Система (3) использовалась для контроля энергетических, пространственных и временных параметров возбуждающего лазерного излучения. Энергия излучения, прошедшего через образец и отраженного от него, измерялась с использованием калиброванных светодиодов (14) и (15). Спектры ВНКР в направлениях вперед и назад регистрировались с помощью интерферометров Фабри-Перо (11, 10) с переменной базой, что позволяло варьировать область дисперсии в широких пределах, от $0,42 \text{ см}^{-1}$ до 16.67 см^{-1} . Измерения проводились для линз с различными фокусными расстояниями (50, 90, 150 мм), при различных положениях исследуемого образца относительно фокусирующей оптики и для различных энергий возбуждающего излучения. Это позволяло проводить измерения для различных плотностей мощности на входе в исследуемый образец и для различных распределений поля внутри образца. Длина кюветы с исследуемой средой составляла 3 сантиметра.

Во всех исследованных образцах наблюдалось ВНКР при достижении лазерным излучением порогового значения. Экспериментально эффект проявлялся в появлении в спектре прошедшего образец и отраженного от образца излучения стоксовой линии со смещением относительно линии возбуждающего излучения на величину от 0.17 до 14.5 см^{-1} , определяемую собственными частотами колебаний наночастиц, лежащими в гигагерцовом или терагерцовом диапазонах. Эффективность преобразования возбуждающего излучения в рассеянное достигла 27% . Расходимость и ширина линии рассеянного света были близки к соответствующим величинам возбуждающего излучения. Порог возникновения эффекта зависел от характеристик образца. На рис. 9 представлен спектр первой стоксовой компоненты ВНКР, возбуждаемой в суспензии наночастиц серебра.

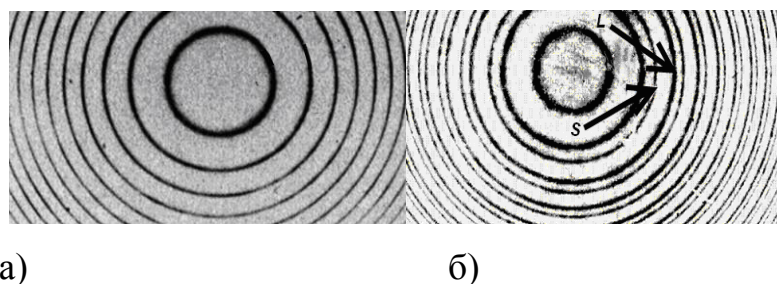


Рис.9. Интерферограмма излучения ВНКР, возбуждаемого в суспензии наночастиц серебра а) интенсивность накачки меньше порога возбуждения – кольца на интерферограмме соответствуют лазерному излучению б) интенсивность накачки превышает пороговое значение. Две системы колец на интерферограмме, соответствуют лазерному излучению (L) и излучению первой стоксовой компоненты ВНКР(S).

Появление второй системы колец соответствует излучению ВНКР. При этом частотные смещения стоксовой компоненты относительно частоты лазерного излучения для рассеяния вперед и назад совпадали.

В таблице 6 приведены максимальная эффективность преобразования (η), пороговое значение интенсивности (P), частотное смещение первой стоксовой компоненты (ν) и размер частицы (D) в суспензии, соответствующий максимальной концентрации.

| Образец | η % | P ГВт/см ² | ν ГГц | D нм |
|------------------------------|-------------|----------------------------|--------------|-----------|
| ZnS | 10 | 0.1 | 430 | 10 |
| LaF ₃ (образец 1) | 27 | 0.05 | 6.3 | 50 |
| LaF ₃ (образец 2) | 22 | 0.05 | 5.1 | 80 |
| Au | 19 | 0.09 | 435 | 7.1 |
| Ag | 20 | 0.1 | 330 | 9.9 |

Таблица 6. Основные характеристики ВНКР света в исследованных суспензиях

При используемых интенсивностях лазерного излучения другие типы вынужденного рассеяния в исследуемых суспензиях не наблюдались.

Все исследованные суспензии можно охарактеризовать размером наночастиц (D), которым соответствует максимальная концентрация. В случае несимметричного распределения наночастиц по размерам именно эта величина, а не среднее значение размера, определяет частотное смещение ВНКР. Характерный размер D , константы Ламэ, плотность материала наночастицы, а также соответствующие характеристики жидкости задают значения частоты ВНКР в суспензии.

Рассматривая наночастицу как свободную упругую сферу, можно показать, что её осцилляции можно описать двумя типами мод – сфероидальными и торсионными. По правилам отбора для комбинационного рассеяния на наночастицах в спектрах могут проявляться только сфероидальные моды с четным угловым моментом (l). Экспериментально в спектрах спонтанного низкочастотного рассеяния регистрируются моды со значениями углового момента $l = 0$ (сферическая) и с $l = 2$ (квадрупольная). Соответствующие частоты определяются следующими выражениями: $\nu_c = \frac{\xi_c \nu_l}{D}$ и $\nu_k = \frac{\xi_k \nu_l}{D}$, где ν_l ,

v_i - значение продольной и поперечной скоростей звука в сплошной среде, ξ_c , ξ_k - константы, определяемые свойствами среды. Значение констант ξ_c , ξ_k близко к единице, поэтому часто для оценки значения частоты используют величину равную отношению скорости звука к диаметру наночастицы. Наиболее точно сферической форме соответствуют наночастицы металлов, прежде всего золота и серебра. Для золотых наночастиц значения этих констант составляют величины 0.94 и 0.845, а для серебряных наночастиц 0.90 и 0.83 соответственно. Для наночастиц, используемых в настоящих экспериментах, значения частот сферической моды составляют 439.4 и 332.6 ГГц для золота и серебра соответственно, что очень близко к экспериментально полученным величинам смещения первой стоксовой компоненты в суспензиях золотых и серебряных наночастиц (см. Таблицу 6).

Наночастицы ZnS, используемые в эксперименте, были модифицированы глицином, что позволяло избежать их агрегации. По результатам, полученным методом динамического рассеяния света (ДРС), распределение наночастиц по размерам сохранялось более суток с момента приготовления суспензии. В суспензии наночастиц немодифицированного ZnS агрегация и дальнейшее осаждение, приводящее к существенному изменению распределения наночастиц по размерам, начинались через 15-20 минут после приготовления суспензии. В течение этого времени параметры ВНКР, возбуждаемого в суспензии наночастиц немодифицированного ZnS, совпадали с параметрами ВНКР, возбуждаемого в суспензии наночастиц ZnS, модифицированного глицином. Смещение частоты первой стоксовой компоненты ВНКР, возбуждаемого в суспензии наночастиц модифицированного ZnS, составило 430 ГГц. Для наночастиц ZnS, используемых в настоящих экспериментах, минимальное значение частоты сферической моды составляет 475.6 ГГц. Несовпадение значений частот обусловлено двумя основными причинами. Первая состоит в том, что окружающая наночастицы среда может существенно влиять на значение

собственных акустических частот наночастицы даже в том случае, когда величины продольной и поперечной скоростей звука, а также плотности наночастицы и окружающей среды существенно отличаются.

Вторая причина несовпадения измеренной и рассчитанной частот – это несовершенство сферической формы частиц. Отклонение формы наночастиц от сферической может приводить к нарушению правил отбора и появлению в спектре низкочастотного рассеяния частот, соответствующих торсионным колебаниям с нечетным угловым моментом.

Форма наночастиц LaF_3 существенно отличалась от сферической. Исследовались три образца суспензий наночастиц LaF_3 , отличающиеся средним размером и формой распределения наночастиц по размерам. Третий образец имел в распределении два максимума в районе 250 и 1100 нм и в нем ВНКР не возбуждалось. Это связано с большой шириной распределения по размерам и наличием двух максимумов. Эффективная генерация первой стоксовой компоненты ВНКР наблюдалась в первом и во втором образцах.

Отметим принципиальную разницу между ВНКР и процессом вынужденного рассеяния света на акустических фонах в сплошной среде – ВРМБ. В случае ВРМБ выполнение законов сохранения энергии и импульса, обуславливающее зависимость частотного смещения рассеянной волны от волнового вектора, приводит к тому, что рассеяние происходит только в направлении «назад» (волновой вектор рассеянной волны составляет угол 180° с волновым вектором волны накачки). Для спонтанного низкочастотного рассеяния отсутствует зависимость частоты рассеянной волны от волнового вектора возбуждающего излучения и, соответственно, ВНКР распространяется в направлениях как «вперед» (сонаправленно с волной накачки), так и «назад» с одинаковыми частотными сдвигами.

В пятой главе приводятся результаты экспериментальных исследований, посвященных изучению процессов регистрации, восстановления и обработки оптической информации нелинейно-оптическими методами. Описаны раз-

личные схемы, предложенные автором для обработки оптической информации на основе вынужденных рассеяний света; определены их оптимальные параметры, показаны преимущества различных схем для определенных экспериментальных условий. Особое внимание уделено описанию экспериментов по восстановлению и обработке изображений амплитудных и фазовых объектов при ВР света одновременно на нескольких частотах с использованием нелинейно-оптической фильтрации их Фурье-спектров. Схема такого процесса может быть представлена в следующем виде:

$$\mathbf{O}(\mathbf{x},\mathbf{y}) \xrightarrow{\mathbf{T}\mathbf{F}} \mathbf{S}(\mathbf{u},\mathbf{v}) \xrightarrow{\mathbf{T}} \mathbf{S}_R(\mathbf{u},\mathbf{v}) \xrightarrow{\mathbf{T}\mathbf{F}^{-1}} \mathbf{O}'(\mathbf{x},\mathbf{y})$$

Здесь $\mathbf{O}(\mathbf{x},\mathbf{y})$ -- поле накачки после прохождения объекта, $\mathbf{T}\mathbf{F}$ - Фурье-преобразование осуществляемое линзой, $\mathbf{S}(\mathbf{u},\mathbf{v})$ - поле пространственных частот в излучении накачки, \mathbf{T} - преобразование накачки в ВКР, $\mathbf{S}_R(\mathbf{u},\mathbf{v})$ - поле пространственных частот ВКР, $\mathbf{T}\mathbf{F}^{-1}$ - обратное преобразование Фурье, $\mathbf{O}'(\mathbf{x},\mathbf{y})$ - поле рассеянного излучения, строящее изображение объекта. Экспериментально данный процесс был реализован с помощью схемы, показанной на рисунке 10.

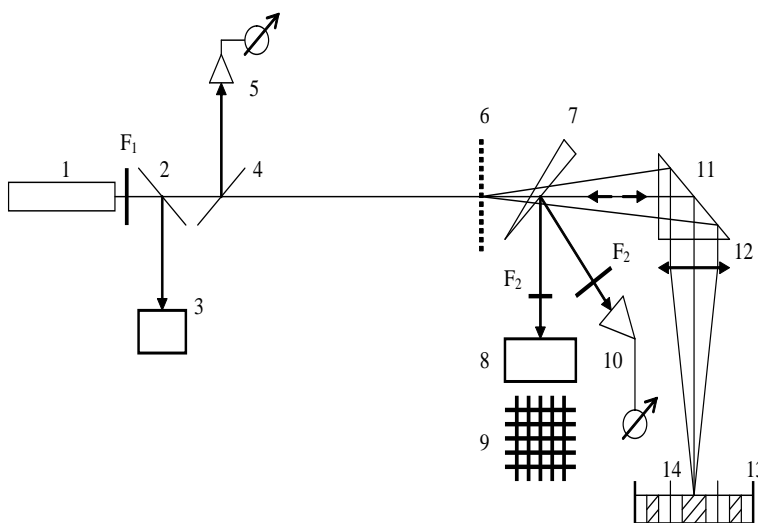


Рис.10 Схема экспериментальной установки

Излучение лазера 1 проходило через объект 6, помещенный в передней фокальной плоскости линзы 12, фокусирующей световой пучок в кювету с нелинейной средой 13. Использовались как амплитудные объекты (металлические сетки с толщиной проволоки от 0,1 до 0,5 мм и величиной ячейки от 0,1 до 1,5 мм), так и фазовые (в том числе фотографические изображения сеточек, обработанные по специальной отбеливающей методике). Для того чтобы исключить влияние окон и избежать их разрушения, излучение направлялось в открытую кювету призмой 11. Толщина активной среды была меньше длины фокальной перетяжки. В этом случае области среды, освещенные лазерным излучением, представляли собой дискретные объемы, соответствующие разным компонентам Фурье-спектра (заштрихованные области на рисунке). Таким образом, ВР возбуждалось в пространственно независимых объемах среды, соответствующих различным компонентам Фурье-спектра объекта в свете накачки. Излучение ВР в направлении назад клином 7 отводилось на системы регистрации энергии 10 и изображения 8. Изображение 9 регистрировалось с помощью ПЗС-матрицы или фотопластинки. Регистрировался также Фурье-спектр восстановленного изображения. Селективные фильтры F_2 выделяли нужные спектральные компоненты. Параметры возбуждающего излучения регистрировались с помощью систем 3 и 5. Энергия лазерного излучения варьировалась нейтральными фильтрами F_1 .

В качестве источников возбуждения использовались вторая гармоника Nd:YAG лазера с длиной волны 530 нм, длительностью импульса 25 пс и максимальной энергией 5 мДж или рубиновый лазер с длиной волны 690 нм, длительностью импульса 20 нс и максимальной энергией 0.2 Дж.

Восстановление изображения объектов и их Фурье-спектров при ВКР и ВРМБ было получено для целого ряда нелинейных сред, таких как ацетон, бензол, нитробензол, сероуглерод, этанол, вода. На рисунке 11 приведены изображения фазового объекта и его Фурье-спектра, восстановленные в пуч-

ках первой (в) и второй (а) стоксовых компонент колебания 992 см^{-1} и в пучке первой стоксовой компоненты колебания 3064 см^{-1} в бензоле (б).

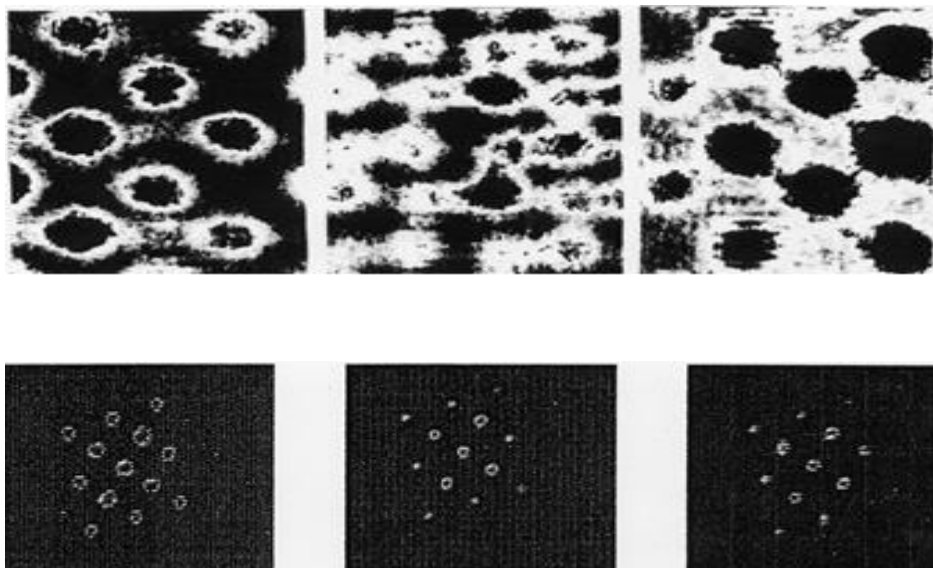


Рис.11. Изображения фазового объекта и его Фурье-спектра, восстановленные одновременно на различных стоксовых компонентах ВКР в бензоле.

Приведенные результаты показывают, что использование данной схемы позволяет осуществлять восстановление и обработку изображений объектов при вынужденных рассеяниях света одновременно на нескольких частотах. Метод может найти применение для исследования амплитудных и фазовых неоднородностей веществ в реальном масштабе времени. Обсуждается роль сопутствующих нелинейных эффектов. В главе приведен обширный экспериментальный материал по исследованию эффективности процесса ВКР в зависимости от условий возбуждения. Предлагаются возможности использования описанных схем для практических приложений.

Заключение.

Основные научные результаты, полученные автором в процессе выполнения диссертационной работы, являются новыми и состоят в следующем:

1) Впервые было реализовано ВКР в трехмерном фотонном кристалле (синтетической опаловой матрице, инфильтрованной нитробензолом) с ко-

эффицентом преобразования по энергии 6%. Показано, что при соответствующем выборе параметров фотонного кристалла, а именно, в случае попадания частоты возбуждающего лазерного излучения в окрестность высоко-частотного края ФЗЗ синтетического опала, а частоты первой стоксовой компоненты – в окрестность низкочастотного края, возможно существенное понижение порога ВКР. Экспериментально было реализовано 20 кратное понижение порога ВКР в синтетических опаловых матрицах, инфильтрованных комбинационно - активными жидкостями по сравнению с чистыми молекулярными жидкостями.

2) В работе впервые было получено вынужденное рассеяние света нового типа в твердотельных наноразмерных структурах. Данное вынужденное рассеяние света является результатом взаимодействия лазерного излучения с собственными акустическими колебаниями наноразмерных структурных единиц, составляющих исследуемые образцы. Рассеяние возбуждается как в прямом, так и в обратном, по отношению к накачке, направлении. Смещение частоты рассеяния относительно частоты накачки одинаково для прямого и обратного направлений рассеяния. Это смещение частоты определяется морфологией образцов. Понижение температуры образцов до температуры жидкого азота повышало эффективность преобразования волны накачки в рассеянную волну и понижало порог возникновения вынужденного рассеяния. Высокое значение эффективности преобразования волны накачки, а также возможность перестройки частотного смещения рассеянной волны относительно частоты накачки открывает перспективу использования данного процесса в схемах для генерации сигналов в гигагерцовом диапазоне в качестве бигармонической накачки.

3) Обнаружен новый тип вынужденного рассеяния света - вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние света в суспензиях наночастиц различной природы, имеющих размер от 7 до 160 нм. Вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние света обусловлено взаимодействием ла-

зерного излучения с собственными акустическими колебаниями элементов структуры. Частоты компонент рассеянного света соответствуют собственным колебаниям элементов структуры, лежащим в гигагерцовом и терагерцовом диапазонах. Изменяя состав образцов и характерный размер элементов структуры, можно целенаправленно менять частотный сдвиг между накачкой и рассеянным излучением. Таким образом, ВНКР представляет собой источник бигармонической накачки для решения целого ряда практических задач.

4) Предложены и экспериментально реализованы схемы обработки оптического изображения с использованием нелинейно – оптической фильтрации в области его Фурье-спектра. С использованием предложенных схем получены: визуализация фазовых и слабопоглощающих свет объектов, инверсия контраста в изображении амплитудных объектов. Определены основные механизмы, обеспечивающие амплитудно-фазовую фильтрацию в области Фурье-спектра объекта.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По материалам диссертации было опубликовано 32 статьи в рецензируемых российских и зарубежных изданиях.

1. Ng. Phu Xuan, J.L. Ferrier, J. Gazengel, G. Rivoire, G.L. Brekhovskikh, A.D.Kudryavtseva, A.I. Sokolovskaya, and N.V.Tcherniega, “Changes in the structures of light beams induced by nonlinear optical phenomena: application to phase contrast and image processing”, *Optics Communications*, V. 68, P. 244-249, 1988.

2. Н.В. Чернега, Г.Л. Бреховских, А.Д. Кудрявцева, Б.П. Кирсанов, А.И. Соколовская, «Преобразование амплитудно-фазовых характеристик сфокусированного лазерного излучения с помощью нелинейно-оптических явлений в ацетоне и жидком азоте», *Квантовая электроника*, Т. 16, № 12, С.2530-2537, 1989.

3. А.Д. Кудрявцева, А.И. Соколовская, Н.В. Чернега, Ж. Ривуар, Н.Ф.Суан, С.Эр-раймейни, "Восстановление при вынужденных рассеяниях света изображений транспарантов и фазовых объектов по их Фурье-спектру", Краткие сообщения по физике ФИАН, № 1-2, С. 10-14, 1994.

4. A.D. Kudryavtseva, A.I. Sokolovskaya, N.V. Tcherniega, "Image reconstruction at stimulated scatterings by Fourier-spectrum", Laser Physics, V. 5, No 1, P. 142-146, 1995.

5. A.D.Kudryavtseva, A.I.Sokolovskaya, N.V.Tcherniega. " Frequency filtering in a spatial spectrum of an object on the base of nonlinear optics phenomena: method of real-time image processing ", Journal of Russian Laser Research., V.17, № 3, P.247-258, 1996.

6. А.Д.Кудрявцева, А.И.Соколовская, Н.В.Чернега, «Восстановление амплитудно-фазовой информации при вынужденных рассеяниях света», Оптический журнал, Т. 64, № 4, С. 95-100, 1997.

7. N.Tcherniega, A.Sokolovskaya, A.D.Kudryavtseva, R.Barille, G.Rivoire. "Backward stimulated Raman scattering in water", Optics Communications, V.181, P.197-205, 2000.

8. Anna Kudryavtseva and Nikolai Tcherniega, "Spatial, spectral and temporal characteristics of the stimulated scattering of light in water," Journal of Russian Laser Research, V. 23, N 3, P. 288-297, 2002.

9. V.S.Gorelik, A.D.Kudryavtseva, and N.V.Tcherniega "Stimulated infrared emission under excitation of condensed molecular dielectrics with giant pulses of a ruby laser", Journal of Russian Laser Research, V.27, N 2, P. 81-91, 2006.

10. В.С.Горелик, А.Д.Кудрявцева, Н.В.Чернега, "Вынужденное глобальное рассеяние света в трехмерных фотонных кристаллах", Краткие сообщения по физике ФИАН, № 8, стр.43-50, 2006.

11. N.V.Tcherniega, A.D.Kudryavtseva, "Photonic flame effect", Journal of Russian Laser Research, V.27, N 5, стр.400-409, 2006.

12. В.С.Горелик, А.Д.Кудрявцева, М.В.Тареева, Н.В.Чернега, "Спектральные характеристики излучения кристаллов искусственного опала при эффекте фотонного пламени", Письма в ЖЭТФ, т.84, вып.9, стр.575-578, 2006.

13. V.S.Gorelik, A.D.Kudryavtseva, N.V.Tcherniega, A.I.Vodchits, Stimulated Globular Scattering of Laser Radiation in Photonic Crystals: Temperature Dependences", Journal of Russian Laser Research, V. 28, № 6, p. 500-508, 2007.

14. Н.В.Чернега, А.Д.Кудрявцева, М.И.Самойлович, "Эффект фотонного пламени", Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 8, С. 1-7, 2008.

15. V.S.Gorelik, A.D.Kudryavtseva, N.V.Tcherniega, "Stimulated Raman scattering in three-dimensional photonic crystals", Journal of Russian Laser Research, V. 29, № 6, С. 551-55, 2008.

16. Н.В.Чернега, А.Д.Кудрявцева, «Нелинейно-оптические свойства фотонных кристаллов», Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 7, стр.23-29, 2009.

17. N.V.Tcherniega, M.I.Samoylovich, A.D.Kudryavtseva, A.F.Belyanin, P.V.Pashchenko, and N.N.Dzbanovski, "Stimulated scattering caused by the interaction of light with morphology-dependent acoustic resonance", Optics Letters, V.35, Issue 3, P. 300-302, 2010.

18. М.И.Самойлович, Н.В.Чернега, А.Д.Кудрявцева, А.Ф.Белянин, С.М.Клещева, "Опаловые матрицы как метаматериал: оптико-акустические эффекты в решетчатых упаковках", Нано- и микросистемная техника, № 5 (118), С. 5-17, 2010.

19. М.В. Тареева, В.С. Горелик, А.Д. Кудрявцева, Н.В. Чернега, «Спектральные и энергетические характеристики вынужденного глобулярного рассеяния света», КСФ, № 11, С. 3 - 9, 2010.

20. Чернега Н.В., Самойлович М.И., Белянин А.Ф., Кудрявцева А.Д., Клещева С.М. Генерация электромагнитного и акустического излучений в

наноструктурированных системах // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 4. С. 21–31.

21. Н.В.Чернега, М.И.Самойлович, А.Д.Кудрявцева, А.Ф.Белянин, П.В.Пашенко, Н.Н.Дзбановский, «Нелинейно-оптические и акустические свойства тонких пленок», Неорганические материалы, 2011, Т. 47, № 9, С. 1-6.

22. В.С. Горелик, А.Д. Кудрявцева, М.В. Тареева, Н.В. Чернега, «О генерации пульсирующих акустических волн в глобулярных фотонных кристаллах», Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Серия «Естественные науки», 2(41), 2011, С. 3-15.

23. V.S.Gorelik, A.D.Kudryavtseva, V.A.Orlovich, M.V.Tareeva, N.V.Tcherniega, and A.I.Vodchits, “Stimulated Raman scattering of light in artificial opal filled by water”, Journal of Russian Laser Research , 2011, V.32, No 3, P. 277-286.

24. N.V. Tcherniega, K.I. Zemskov, V.V. Savranskii, A.D. Kudryavtseva, T. Shcherba, M. Zhilenko, H. Ehrlich, G. Lisichkin, “X-Ray generation induced by visible lasers in ZnS aqueous suspensions”, JRLR, 2011, V.32, No 3, P. 247-252.

25. Н.В.Чернега, А.Д.Кудрявцева, М.И.Самойлович, А.С.Шевчук, С.М.Клещева, "Вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние света в наноструктурах", Автометрия, Т. 48, № 3, С. 39-45, 2012.

26. A.D. Kudryavtseva, N.V. Tcherniega, M.I. Samoylovich, A.S. Shevchuk, “Photon-Phonon Interaction in Nanostructured Systems”, Journal of Thermophysics, 2012, Volume 33, Issue 10 (2012), Page 2194-2202

27. N. V. Tcherniega, A. D. Kudryavtseva, A. S. Shevchuk, I. S. Burkhanov, S. V. Krivokhizha, L. L. Chaikov, V. V. Savranskiy, D.Yu. Korobov, “Effective acousto-optical interaction in suspensions of nanodiamond particles”, Journal of Russian Laser Research, №5, 2012, стр. 496-502.

28. N.V.Tcherniega, K.I.Zemskov, V.V.Savranskii, A.D.Kudryavtseva, A.Yu.Olenin,, and G.V.Lisichkin, “Experimental observation of stimulated low

frequency Raman scattering in water suspensions of silver and gold nanoparticles”, Optics Letters, V. 38, N 6, March 15, 2013, P. 824-826

29. V.S. Gorelik, A.D. Kudryavtzeva, N.V. Tcherniega, A.I. Vodchits, V.A. Orlovich A method for reducing the stimulated Raman scattering threshold in liquids embedded into photonic crystals, Journal of Russian Laser Research , v.34, N1, 2013, pp 1-9,

30. А. И. Водчиц, Ю.П. Войнов, В. С. Горелик, А. Д. Кудрявцева, В. А. Орлович, Н. В. Чернега. Вынужденное комбинационное рассеяние света в легкой и тяжелой воде при пикосекундном лазерном возбуждении. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 12, С. 3 - 13, 2013

31. V.S. Gorelik, A.D. Kudryavtzeva, V.A. Orlovich, P.P. Sverbil, N.V. Tcherniega, A.I. Vodchits, Yu.P. Voinov, L.I. Zlobina Raman Scattering in Light and Heavy Waters, Journal of Russian Laser Research , v.34, N6, pp 523-530, 2013

32. Mikhail V. Vasnetsov, Tatiana N. Orlova, Vladimir Yu. Bazhenov, Aleksey V. Shevchuk, Anna D. Kudryavtseva, Nikolay V. Tcherniega, «Photonic bandgap examination in an immersed synthetic opal», Appl. Phys. B, Lasers and Optics, Appl. Phys. B, 2014, 116, pp 541–548

Цитируемая литература

[1] M. Fleischmann, P. J. Hendra, and A. J. McQuillan, “Raman spectra of pyridine adsorbed at silver electrode // Chem. Phys. Lett. . –1974. –26(2), 163–166

[2] Быков В.П., Спонтанное излучение в периодической структуре // ЖЭТФ. –1972. –т.62. –вып.2. с.505-513

[3] E. Yablonovitch, Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics // Phys. Rev. Lett. –1987. –Vol.58. –pp.2059-2062

[4] S. John, Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices // Phys. Rev. Lett. –1987. Vol.58. –pp.2486-2489

- [5] Sakoda K., *Optical Properties of Photonic Crystals* // –2nd ed (Berlin: Springer). –2005. –223 p. –ISSN 0342-4111
- [6] Борн М., Вольф Э., *Основы оптики* // 2-е изд.. –М.: Наука. –1973. – 720 с.
- [7] Astratov V.N. , Bogomolov V.N. , Kaplyanskii A.A. , Prokofiev A.V. , Samoilovich L.A. , Samoilovich S.M. , Vlasov Yu.A., *Optical spectroscopy of opal matrices with CdS embedded in its pores -quantum confinement and photonic band gap effects* // *Nuovo Cimento*. –1995. –Vol.D17. –pp.1349-1354
- [8] Балакирев В.Г., Богомолов В.Н., Журавлёв В.В., Кумзеров Ю.А., Петрановский В.П., Романов С.Г., Самойлович Л.А., *Трёхмерные сверхрешетки в матрицах опалов* // *Кристаллография*. –1993. –т.38. –в. 3. –с.111-120
- [9] Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. *Обращение волнового фронта* // М., Наука.-1985.-252 с.
- [10] C. Flytzanis, F. Hache, M.C. Klein, D. Ricard and P. Rousignol, *Nonlinear optics in composite materials* (Elsevier Science, Amsterdam, 1991).
- [11] В.А. Караванский, А.В. Симакин, В.И. Красовский, П.В. Иванченко, *Нелинейно-оптические свойства коллоидов наночастиц серебра, полученных методом лазерной абляции в жидкости*, *Квант. электроника*, 2004, **34** (7), 644–648.
- [12] Duval E., Boukenter A., and Champagnon B., *Vibration eigenmodes and size of microcrystallites in glass: observation by very-low-frequency scattering*, *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **56**,pp 2052-2055.
- [13] Verna P., Cordts W., Irmer G., and Monecke J.. *Acoustic vibrations of semiconductor nanocrystals in doped glasses* // *Phys. Rev. B*. –1999. –Vol.60. –p.5778