

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

На правах рукописи
УДК 535.36

Тареева Мария Вячеславовна

**НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФОТОННЫХ
КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ОПАЛОВ**

специальность 01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва

2012

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

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук Чернега Николай Владимирович,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Научный консультант:

доктор физико-математических наук, профессор Горелик Владимир Семёнович,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Мурзин Владимир Николаевич
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук.

доктор физико-математических наук, профессор Быков Владимир Павлович
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук.

Ведущая организация:

ОАО Центральный научно- исследовательский технологический институт
«Техномаш», г. Москва

Защита состоится 26 марта 2012 г. 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 Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Автореферат разослан «___» _____ 2012г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.023.03

А.С. Шиканов

Общая характеристика работы

Актуальность работы

После первых теоретических работ [1-4], посвященных фотонным кристаллам (ФК), эти кристаллы привлекают большое внимание исследователей в связи с их уникальными свойствами. В настоящее время можно утверждать, что ФК открыли новую главу в нелинейной оптике.

Фотонными кристаллами принято называть пространственно упорядоченные системы со строго периодической модуляцией диэлектрической проницаемости в масштабах порядка длины волны видимого или ближнего инфракрасного диапазонов.

Для ФК с трансляционным периодом, сравнимым с длиной волны видимого диапазона, оптические свойства тесно связаны с шириной фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ). Внутри ФЗЗ разрешенные уровни энергии отсутствуют. В то же время вблизи краёв ФЗЗ реализуется аномально высокая плотность фотонных состояний. Высокая локализация электромагнитного поля на краях ФЗЗ может приводить к значительному увеличению нелинейного взаимодействия поля с веществом, что при благоприятных условиях должно привести к повышению эффективности различных нелинейных оптических эффектов [5]. В настоящее время известны также структуры, близкие к фотонным кристаллам, периодичность которых нарушена [4,6-12].

Примерами одномерных ФК могут служить дифракционные решетки, многослойные интерференционные фильтры, диэлектрические зеркала [13-16]. Большой интерес представляют трёхмерные ФК, характеризующиеся наличием запрещенных зон во всех направлениях.

Постоянное совершенствование электронно-оптических схем и создание компактных устройств для обработки сигналов на всех длинах волн, требует разработки нанокompозитных материалов с управляемыми оптическими свойствами. Такая задача может быть решена на основе использования ФК.

Разнообразие модификаций ФК открывает различные пути для оптического возбуждения материальных сред и манипуляции параметрами излучения. В частности, открывается возможность изменения параметров спонтанной эмиссии вблизи ФЗЗ. Такой эффект может быть использован для улучшения эффективности полупроводниковых лазеров [17], светоизлучающих диодов [18] и эффективных антенн [19].

ФК характеризуются дисперсией, существенно превышающей дисперсию обычных призм [20,21]. Это обеспечивает возможность создания новых спектральных элементов на основе ФК.

С использованием ФК могут быть созданы элементы волноводных оптоэлектронных устройств, светофильтры [22], оптические переключатели [23], высоко отражающие селективные зеркала, высокочастотные резонаторы и целый ряд других важных устройств [14,15]. Имеются также определённые перспективы для использования ФК при создании квантовых компьютеров [23].

Таким образом, ФК являются уникальными объектами для эффективного управления параметрами распространения светового поля и его взаимодействия с веществом. Особенности структуры искусственных опалов открывают возможность их использования при создании принципиально новых оптоакустических устройств, приборов квантовой электроники и оптических приборов нового поколения. При этом многообразии способов получения многомерных ФК позволяет создавать оригинальные структуры, с помощью которых можно наблюдать различные нелинейно-оптические эффекты.

В этой связи особую роль играют трехмерные ФК, характеризующиеся присутствием ФЗЗ в определённых кристаллографических направлениях (так называемых "стоп-зонах"). Синтетический опал, названный так по аналогии с известным природным минералом [24-27], в заданных кристаллографических направлениях проявляет свойства одномерного фотонного кристалла. Структура синтетического опала представляет собой кубическую гранцентрированную решётку, сформированную близкими по диаметру шарами (глобулами) кремнезёма (диоксида кремния, SiO_2), размеры которых обычно находятся в диапазоне от 100 до 1000 нм [25,26]. Трансляционный период трёхмерной сверхрешётки в опалах близок к длинам волн оптического диапазона ($d \sim 1$ мкм).

Синтетические опалы представляются перспективными как несущие матрицы в спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) света. В этом случае за счет высокой плотности фотонных состояний на краях ФЗЗ для возбуждающего излучения с частотой, близкой к частотам ФЗЗ кристалла, должно наблюдаться увеличение коэффициента преобразования возбуждающего излучения в рассеянное. Такое использование ФК открывает возможности для увеличения контраста в спектрах КР без увеличения мощности источника возбуждающего излучения [28].

Трансляционный период решетки синтетического опала, составляющий порядка длины волны видимого света, соответствует стоячим акустическим волнам гигагерцевого диапазона. При определенных условиях это приводит к высокой локализации фотонов и фононов, и как следствие, к возрастанию эффективности фотон-фононного взаимодействия нанокмозитов на основе синтетических опаловых матриц. Таким образом, синтетический опал можно рассматривать не только как фотонный, но и как фононный кристалл. Это открывает перспективы использования таких материалов при создании оптоакустических устройств.

Возбуждение собственных колебаний в наночастицах изучалось ранее несколькими группами. Объектами таких исследований чаще всего являлись ме-

таллические и полупроводниковые наночастицы, дисперсно или периодически внедренные в аморфную матрицу, например, в стекло.

Морфологический резонанс в синтетических опалах исследовался целым рядом исследователей [27-37]. В частности, работе [29] были получены спектры неупругого низкочастотного рассеяния лазерного излучения с длиной волны 514,5 нм на синтетическом опале, сформированном кварцевыми глобулами. Однако, как в этой работе, так и в других исследованиях в этой области, процессы рассеяния носили спонтанный характер.

В связи с этим особый интерес представляет возможность реализовать вынужденный режим рассеяния, обусловленный морфологическими особенностями трёхмерного ФК на основе синтетического опала для обратной и прямой геометрий рассеяния.

Цели диссертационной работы:

1. Определение условий эффективной генерации вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в трёхмерных ФК на основе синтетических опалов и демонстрация влияния параметров ФЗЗ на процесс генерации ВКР.

2. Сравнение ВКР, возбуждаемого в жидкостях, инфльтрованных в синтетические опалы (наноструктурированных жидкостях) и ВКР, возбуждаемого в образцах чистых жидкостей.

3. Исследование особенностей взаимодействия мощного лазерного излучения с собственными акустическими колебаниями глобул диоксида кремния, образующих синтетические опалы и нанокмозиты на их основе.

4. Определение условий эффективной генерации вынужденного рассеяния в синтетических опалах и нанокмозитах на их основе, обусловленного взаимодействием мощного лазерного излучения с собственными акустическими колебаниями глобул, составляющих исследуемые образцы.

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Экспериментально установлено, что в результате взаимодействия импульсного лазерного излучения наносекундного диапазона длительности с синтетическими опаловыми матрицами, инфльтрованными нитробензолом, водой или этанолом, возникает вынужденное комбинационное рассеяние света (ВКР).

2. Экспериментально показано, что использование в качестве образцов для возбуждения ВКР нанокмозитов на основе синтетических опаловых матриц диоксида кремния, инфльтрованных комбинационно активными жидкостями, существенно повышает эффективность преобразования возбуждающего излучения в рассеянное (ВКР) по сравнению с не наноструктурированной жидкостью.

3. Экспериментально установлено, что условием эффективной генерации ВКР является совпадение частоты возбуждающего лазерного излучения с

окрестностью высокочастотного края ФЗЗ синтетического опала, а частоты первой стоксовой компоненты – с окрестностью низкочастотного края.

4. В результате взаимодействия излучения мощного твердотельного лазера на рубине с объёмными синтетическими опаловыми матрицами, впервые экспериментально было обнаружено вынужденное рассеяние, со спектральным смещением в гигагерцовом диапазоне частот, обладающее порогом и высокой эффективностью преобразования падающего излучения в рассеянное (коэффициент преобразования может достигать 60%). Экспериментально было зарегистрировано рассеяние «вперед» (попутно с накачкой) и «назад» (навстречу накачке).

5. Экспериментально показано, что наблюдаемое явление, названное вынужденным глобулярным рассеянием света (ВГР), обусловлено морфологией объёмных синтетических опалов и является по своей сути результатом оптоакустического взаимодействия возбуждающего лазерного излучения с собственными колебаниями кварцевых глобул, образующих синтетический опал.

6. Экспериментально продемонстрировано, что наблюдаемое ВГР не является известным вынужденным рассеянием Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ) в используемых в образцах нанокompозитов молекулярных жидкостях.

Практическая ценность

1. Использование для возбуждения вынужденного комбинационного рассеяния в качестве образцов нанокompозитов на основе синтетических опаловых матриц, инфильтрованных комбинационно - активными жидкостями, при определенных условиях позволяет реализовать вынужденное комбинационное рассеяние с высокой эффективностью преобразования возбуждающего излучения в рассеянное по сравнению с не наноструктурированной жидкостью.

Такое использование синтетических опалов открывает возможности для увеличения контраста в спектрах комбинационного рассеяния за счёт уменьшения мощности прошедшего сквозь образец возбуждающего излучения и увеличения мощности рассеянного излучения. Это позволит снизить мощность источника возбуждающего излучения без ухудшения качества получаемых спектров, а также сократить длину активной среды.

Для точной настройки на частоту, соответствующую ФЗЗ ФК, заполненного исследуемым веществом, в качестве источника возбуждающего излучения предлагается использовать, например, полупроводниковый лазер.

2. ВГР может быть использовано в качестве источника когерентной бигармонической накачки для задач спектроскопии.

3. Фотонные кристаллы на основе синтетических опалов могут применяться для генерации мощных гиперзвуковых колебаний в материальных средах, что может быть с успехом использовано при создании оптоакустических устройств.

Защищаемые положения

1. При взаимодействии импульсного лазерного излучения с трехмерными фотонными кристаллами (синтетическими опаловыми матрицами, инфильрованными комбинационно активными жидкостями) возникает ВКР с порогом возникновения генерации, существенно меньшим, чем пороги ВКР для исходных жидкостей.

2. Параметры фотонной запрещенной зоны определяют значение порога генерации ВКР и эффективность преобразования волны накачки в волну ВКР. Условием для получения низкопороговой генерации ВКР с максимальной эффективностью преобразования является близость частоты возбуждающего лазерного излучения к высокочастотному краю стоп-зоны фотонного кристалла, а частоты первой стоксовой компоненты – к низкочастотному краю этой зоны.

3. При взаимодействии излучения твердотельного лазера на рубине работающего в режиме модуляции добротности с собственными колебаниями сфер диоксида кремния, образующих синтетические опаловые матрицы возникает новый тип вынужденного рассеяния света - вынужденное глобулярное рассеяние (ВГР). Данный тип вынужденного рассеяния света наблюдается как в прямом, так и в обратном направлениях.

4. Наблюдаемые частотные сдвиги ВГР соответствуют модам частот собственных колебаний глобул аморфного кварца (диоксида кремния, SiO_2), из которых построен глобулярный фотонный кристалл (синтетический опал) и лежат в гигагерцовом диапазоне частот.

Личный вклад автора

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

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на следующих международных и всероссийской конференциях: на Десятой юбилейной международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков», Москва, 2009; на VIII-й международной конференции "Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы", Ульяновск, 2006; на VII-й международной научной конференции "Лазерная физика и оптические технологии", Минск, 2008 (приглашённый доклад); на международной конференции «Laser Optics-2006», Санкт-Петербург, 2006; на конференции «Optics East-2006», Бостон, США, 2006; на Четвертой международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики (ФПО-2006)» в рамках Четвертого международного конгресса «ОПТИКА-XXI», Санкт-Петербург, 2006; на Четвертой Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике», Москва, 2007 (приглашённый доклад); на VI-й международной конференции «Лазерная физика и оптические технологии» Гродно, республика Беларусь, 2006.

По результатам диссертации опубликовано 13 работ, в числе которых 4 статьи, опубликованных в реферируемых журналах. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитируемой литературы, состоящего из 212 наименований. Работа содержит 153 страницы, в том числе 34 рисунка и 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулированы актуальность и практическая значимость работы, а также ее цели и задачи. Приводятся основные положения, выносимые на защиту. Реферативно изложено содержание работы.

В **первой главе** проводится обзор теоретических и экспериментальных направлений исследований ФК в контексте особенностей их структуры и перспектив их использования. В п.1.1 дается обзор оптических характеристик ФК. Особое внимание уделяется технологии производства (п. 1.2) и свойствам образцов ФК (п. 1.3), использовавшихся в данной работе. Показано, что метод естественной седиментации, использовавшийся для производства образцов синтетических опалов, дает наиболее совершенную структуру в направлении роста $[111]$, в связи с чем, именно данное направление в кристалле используется для возбуждения и исследования нелинейных оптических свойств синтетических опалов и нанокompозитов на их основе.

Во **второй главе** приводится описание методики эксперимента по исследованию нелинейных оптических явлений в синтетических опалах и нанокompозитах на их основе. В качестве источника излучения для возбуждения нелинейных оптических явлений в ФК на основе синтетических опалов использовался твердотельный лазер на рубине с длиной волны генерации 694.3 нм, длительностью импульса, измеренной на половине высоты пика $\tau = 20$ нс, шириной линии генерации 0.015 см^{-1} , расходимостью пучка $3.5 \cdot 10^{-4}$ рад и максимальной энергией в импульсе 0.4 Дж. В некоторых экспериментах использовалось излучение второй гармоники пикосекундного Nd:YAG лазера (типа LS-2151), длительность импульса 70 пс, максимальная энергия в импульсе 35 мДж).

Спектральные измерения проводились с помощью спектрографа СТЭ-1 и волоконного спектрометра FSD – 8.

Низкочастотные спектры рассеянного излучения регистрировались с помощью интерферометра Фабри-Перо с различными базами, что позволяло варьировать область дисперсии в широком диапазоне от $0,42 \text{ см}^{-1}$ до $1,67 \text{ см}^{-1}$.

В **третьей главе** рассматриваются особенности наблюдения ВКР в синтетических опалах и нанокompозитах на их основе. В п. 3.1 и п. 3.2 приводится краткое теоретическое описание ВКР и перспективы его наблюдения в ФК. В п.

3.3 приводятся результаты экспериментального наблюдения ВКР в ФК на основе синтетических опаловых матриц, которые обсуждаются в п.3.4.

Для наблюдения ВКР в синтетических опаловых матрицах, образцы были инфильтрованы различными комбинационно активными жидкостями. Экспериментально было обнаружено ВКР в синтетических опалах, инфильтрованных нитробензолом, водой и этанолом. Была получена генерация 1-й и 2-й стоксовой компонент на длинах волн 765,8 нм и 853,7 нм соответственно для нитробензола (см. Рис.1). Т.о. впервые было реализовано ВКР в ФК на основе синтетических опалов, инфильтрованных нитробензолом с коэффициентом преобразования по энергии 5-6% . При этом расходимость пучка ВКР была близка к расходимости пучка возбуждающего излучения.

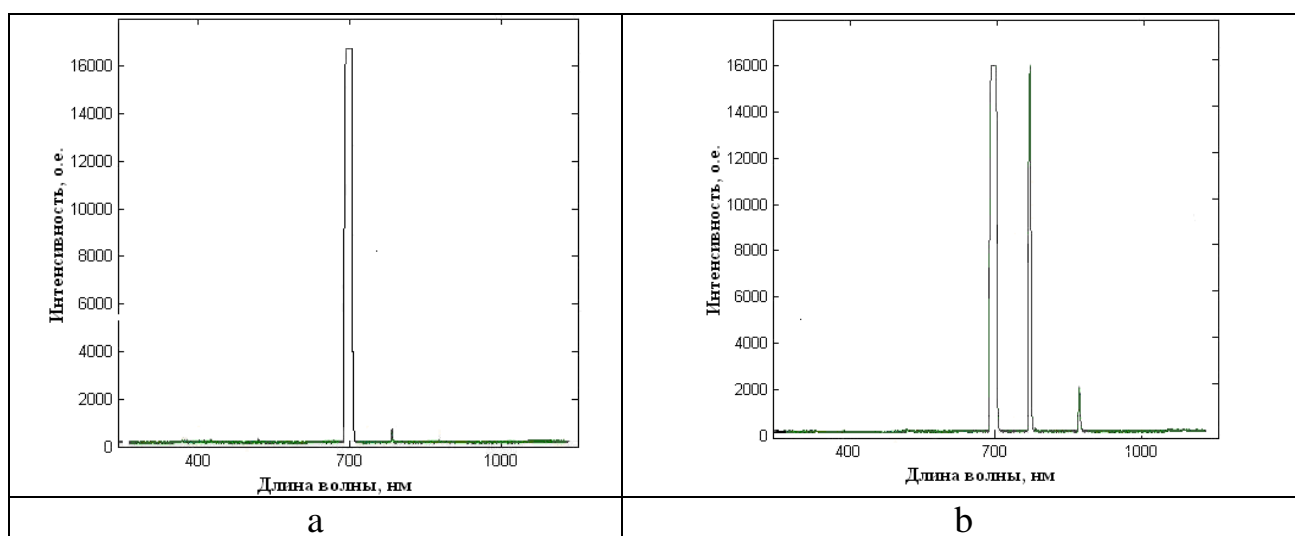


Рис.1. Спектр ВКР, возбуждаемого в синтетическом опале, инфильтрованном нитробензолом), в направлении назад. Мощность возбуждающего излучения: (а) $0.14 \text{ ГВт}/\text{см}^2$; (б) $0.15 \text{ ГВт}/\text{см}^2$.

При использовании в качестве источника возбуждения второй гармоники пикосекундного Nd:YAG лазера в спектре рассеянного света в опаловой матрице мы наблюдали стоксовую компоненту на длине волны в диапазоне 647-650 нм, что соответствует частотному сдвигу относительно возбуждающей линии на 3340 см^{-1} . Спектральная ширина стоксового спутника уменьшается по мере возрастания возбуждающей мощности. Порог возбуждения ВКР в направлении назад в опалах, инфильтрованных водой, существенно меньше, чем в чистой воде.

Похожие результаты были получены для ФК, инфильтрованных этанолом, демонстрирующим очень низкий порог возбуждения ВКР с двумя спутниками.

Порог возбуждения ВКР в опаловых матрицах, инфильтрованных жидкостями, оценивается как $0,10 \text{ ГВт}/\text{см}^2$.

ВКР в нанокompозитах возбуждалось в существенно меньших объемах нелинейной среды (инфильтрация до 22% объема образца), чем в чистой жидкости. Было получено снижение порога возбуждения ВКР в опале инфильтрован-

ном КР активной жидкостью (нитробензолом) в ~ 20 раз по сравнению с порогом возбуждения в самой жидкости.

В Табл.1 представлены параметры эксперимента по наблюдению ВКР в опале инфильтрованном нитробензолом. Показано, что эффективная генерация ВКР, реализованная в экспериментах имела место из-за наличия определенной ФЗЗ, положение которой можно подобрать путем выбора образца с соответствующим диаметром формирующих его глобул.

Таблица 1. Параметры возбуждения ВКР в образцах синтетического опала, инфильтрованного нитробензолом: длина волны первой стоксовой компоненты ВКР, A_s ; положение ФЗЗ синтетического опала, $A_{\PhiЗЗ}$; диаметр глобул, образующих ФК, D . Коэффициент преобразования энергии ~5-6%.

Вещество	A_s , нм	$A_{\PhiЗЗ}$, нм	D , нм	ВКР
Нитробензол $C_6H_5NO_2$	<u>765,8</u>	483,07	200	нет
		555,5	230	нет
		627,99	260	нет
		<u>724,605</u>	<u>300</u>	присутствует
		772,95	320	нет

Четвертая глава посвящена ВГР в синтетических опалах. В п. 4.1 приводятся и обсуждаются результаты экспериментального наблюдения ВГР света в нанокompозитах на основе синтетических опаловых матриц. В п. 4.2 приводится описание существующей теоретической модели собственных механических колебаний однородной упругой сферической частицы. Далее (п. 4.3) рассматриваются бриллюэновский и комбинационный механизмы рассеяния света на осциллирующей упругой сфере – общие закономерности (п. 4.3.1), а также особенности рассеяния света на однородной упругой сфере размером сравнимым с длиной волны падающего излучения (п. 4.3.2).

В результате рассеяния излучения мощного твердотельного лазера на объёмных синтетических опалах и опалах, инфильтрованных различными молекулярными жидкостями, возникает вынужденное рассеяние с высокой эффективностью преобразования (до 60 %), состоящее в возникновении одной или двух узких стоксовых компонент, сдвинутых относительно частоты возбуждающего излучения на десятые доли о см.

Данное рассеяние, обусловленного взаимодействием мощного лазерного излучения с собственными акустическими колебаниями глобул, составляющих исследуемые образцы, наблюдается как в прямом, так и в обратном направлениях.

Ширина линии наблюдаемого ВР, названного нами глобулярным, не превышает значения ширины линии возбуждающего излучения.

Для незаполненной опаловой матрицы обнаруживается лишь одна компонента Стокса, наблюдаемая для геометрии рассеяния назад (см. Рис.2).

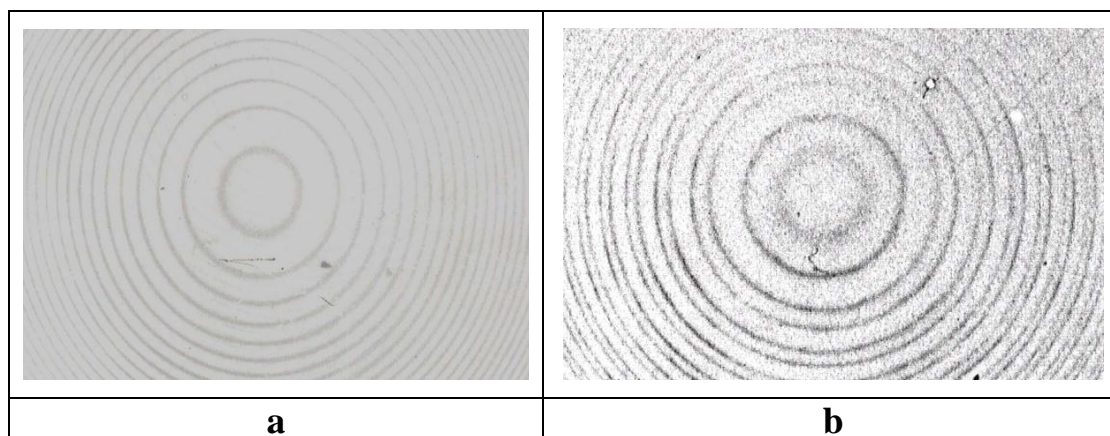


Рис.2. Интерферограмма спектра ВГР: (а) ВГР в чистом опале при геометрии рассеяния «назад». (б) ВГР в опале, заполненном ацетоном, при геометрии рассеяния «вперед». Область дисперсии интерферометра 0.833 см^{-1} .

Для прямой геометрии рассеяния при комнатной температуре наблюдалась только одна стоксовая компонента ВГР с частотным сдвигом около 0.4 см^{-1} как для ацетона, так и для этанола. На Рис.2.б представлена интерферограмма ВГР в опале, заполненном ацетоном. Здесь лазерному излучению соответствует кольцо большего диаметра.

Порог возникновения эффекта и число линий в спектре, а также их относительная интенсивность зависят от состава образца, температуры образца, геометрии эксперимента и энергии возбуждения (см. Табл.2).

Таблица 2. Значения параметров ВГР (сдвигов частот, $\Delta\nu$) для прямой и обратной геометрий эксперимента при различных температурах в сравнении со значениями собственных частот колебаний кварцевых глобул, образующих синтетические опалы, а также значения параметров ВРМБ комбинационно-активных жидкостей, использовавшихся для заполнения опаловых нанокомпозигов.

образец	Геометрия рассеяния	$\Delta\nu, \text{см}^{-1}$		$\nu, \text{ГГц}$	
		Эксперимент	Расчет	Эксперимент	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 0,65	0,44 0,68	12,0 19,5	13,2 20,4
опал + этанол	вперед	0,37	0,44	11,1	13,2
	назад	0,39 0,63	0,44 0,68	11,7 18,9	13,2 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

Для сравнения приведены также значения параметров ВРМБ комбинационно-активных жидкостей, использовавшихся для заполнения опаловых нанокompозитов.

Теоретические значения значений частот рассчитывались на основе известной работы Лэмба о собственных частотах упругой свободной сферы, при этом в качестве значений скоростей продольной и поперечной звуковых волн принимались значения для аморфного кварца.

Из Табл.3, видно, что наблюдаемые сдвиги частоты первой стоксовой компоненты ВГР относительно частоты возбуждающего излучения однозначно определяются частотам собственных колебаний глобул аморфного кварца и, соответственно, диаметром этих глобул.

Таблица 3. Частотные сдвиги $\Delta\nu_i$ ВГР и положение максимума (стоп-зоны) $\Lambda_{\phi 33}$ в спектре ВГР при прямой геометрии рассеяния в зависимости от размера сфер при нормальном падении возбуждающего излучения.

Образец	$\Delta\nu_i$, ГГц Эксперимент	Диаметр сфер ¹ $D \pm 5$, нм	$\Lambda_{\phi 33}$, нм Эксперимент
опал + этанол	5,1	315	656
	6,6	290	628
	7,8	270	575
	11,1	245	540

Т.о. частотный диапазон данного возбуждения определяется как акустическими характеристиками сред, используемых для заполнения образцов (см. Табл.2), так и геометрическими размерами наноглобул, формирующих опаловые матрицы (см. Табл.3).

¹ По данным электронной микроскопии.

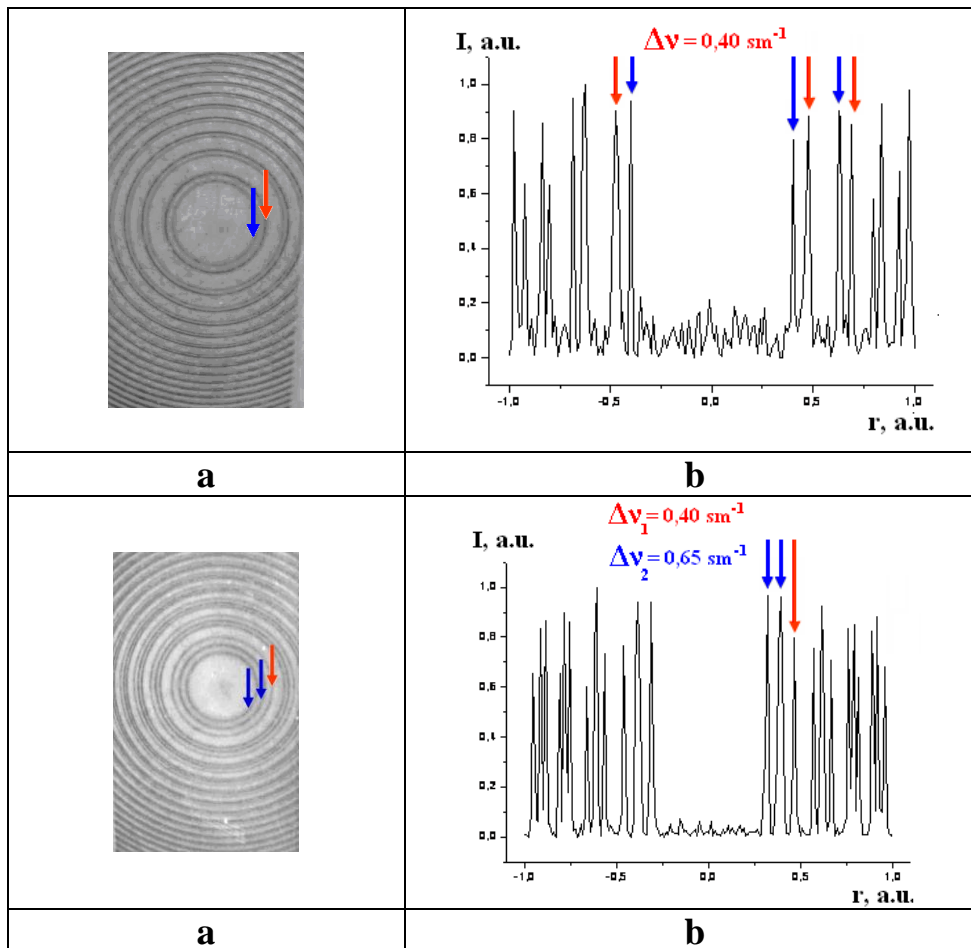


Рис.4. Интерферограммы (а) и спектры (б) ВГР в опале, заполненном ацетоном. Геометрия рассеяния "назад". Область дисперсии интерферометра 1.67 см^{-1} . Плотность мощности 0.12 ГВт/см^2 (вверху) и 0.21 ГВт/см^2 (внизу).

Во всех исследованных образцах наблюдалось ВГР «назад» с высокой эффективностью преобразования (см. Рис.4). Число компонент в спектре наблюдаемого ВГР света зависело от мощности возбуждающего излучения. Существенному повышению эффективности преобразования волны накачки в рассеянную волну и понижению порога ВГР способствовало заполнение опаловой матрицы молекулярными жидкостями и снижение температуры образцов до температуры жидкого азота.

На Рис.5 представлена зависимость интенсивности ВГР от интенсивности накачки.

Высокое значение коэффициента преобразования волны накачки в рассеянную волну (до 60 %) говорит о большой интенсивности гиперзвукового возбуждения среды. Верхний предел интенсивности составляет величину порядка 10^{-4} от интенсивности возбуждающего лазерного излучения.

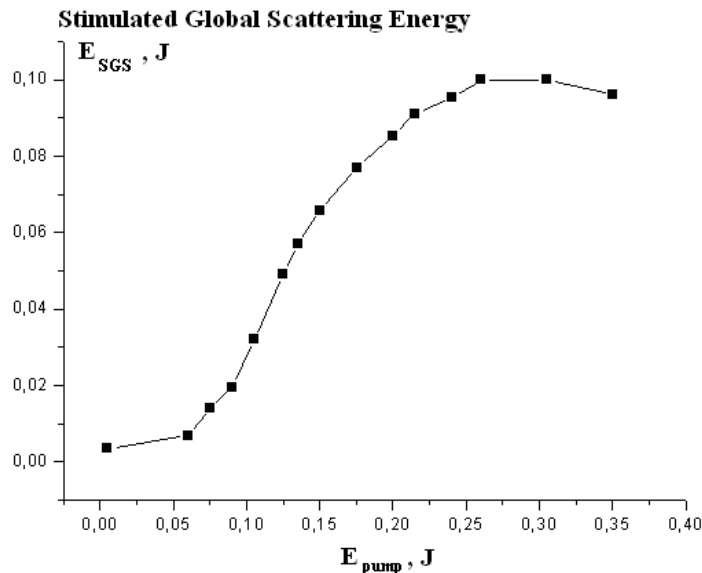


Рис.5. Зависимость энергии ВГР E_{SGS} от энергии накачки E_{pump} (в джоулях) для искусственного опала с диаметром глобул, равным 245 нм

Заключение.

По итогам работы достигнуты следующие результаты:

1. Впервые было реализовано ВКР в трехмерном фотонных кристаллах – синтетических опаловых матрицах, инфильтрованных КР активными жидкостями (нитробензолом, водой и этанолом).

2. Условием эффективной генерации ВКР во всех исследованных образцах является положение частоты возбуждающего лазерного излучения в окрестности высокочастотного края ФЗЗ синтетического опала, а частоты первой стоксовой компоненты – вблизи низкочастотного края. Изменением положения фотонной запрещенной зоны меняется эффективность преобразования и значение порога генерации. Реализовано двадцатикратное понижение порога возбуждения ВКР в образце синтетического опала инфильтрованного нитробензолом по сравнению с порогом возбуждения ВКР в нитробензоле.

3. В работе впервые было обнаружено вынужденное рассеяние света в ФК, обусловленное морфологическими особенностями структуры. Данное рассеяние, обусловленного взаимодействием мощного лазерного излучения с собственными акустическими колебаниями глобул, составляющих исследуемые образцы, и наблюдающееся как в прямом, так и в обратном направлениях, было названо вынужденным глобулярным рассеянием (ВГР).

4. Частотные сдвиги наблюдаемого ВГР относительно частот возбуждающего излучения качественно соответствуют частотам собственных колебаний глобул аморфного кварца (диоксида кремния, SiO_2), из которых построен глобулярный ФК (синтетический опал). Во всех исследованных образцах наблюда-

лось ВГР с высокой эффективностью преобразования (максимальный коэффициент преобразования достигает 60%). Существенному повышению эффективности преобразования волны накачки в рассеянную волну и понижению порога ВГР способствовало заполнение опаловой матрицы молекулярными жидкостями и охлаждение образцов до температуры жидкого азота.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По материалам диссертации опубликовано 13 работ, в числе которых 4 статьи, опубликованных в реферируемых российских и зарубежных изданиях, 1 монография, а также тезисы 8-ми докладов на всероссийских и международных конференциях:

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

2. V.S.Gorelik, A.D. Kudryavtzeva, V.A. Orlovich, M.D. Tareeva N.V. Chernega, A.I.Vodchitz, Stimulated Raman scattering of light in artificial opal, filled by water // JRLR, –2011. –V32. -N 3. –pp.129-138

3. Горелик В.С., Кудрявцева А.Д., Чернега Н.В. и Тареева М.В. Спектральные и энергетические характеристики вынужденного глобулярного рассеяния света // Краткие сообщения по физике. Рос. акад. наук, Физ. ин-т им. П. Н. Лебедева. –2010. –N 11. –с.3 -9.

4. Комбинационное рассеяние – 80 лет исследований: Коллективная монография. Редактор– Владимир Семёнович Горелик. –Москва: Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН. –2008. –588с. 285-294

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

6. Gorelik V.S., Kudryavtseva A.D., Tareeva M.V. and Tcherniega N.V. Stimulated globular scattering in photonic crystals // SPIE Proceedings. Laser Optics 2006: Wavefront Transformation and Laser Beam Control, Leonid N.Soms, Editor. –2007. – Vol.6613. –6613OG. –pp.1-7

7. Горелик В.С., Кудрявцева А.Д., Тареева М.В., Чернега Н.В., Вынужденное глобулярное рассеяние света в трехмерных фотонных кристаллах // Труды Четвертой Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике», Москва –2007. –ч. II. –с. 557-560

8. Горелик В.С., Кудрявцева А.Д., Тареева М.В., Чернега Н.В., Шевчук А.С., Вынужденные рассеяния света в наноструктурированных средах // Труды VII Международной научной конференции "Лазерная физика и оптические технологии", Минск. –2008. –с.272-275

9. Горелик В.С., Кудрявцева А.Д., Тареева М.В., Чернега Н.В., Вынужденное рассеяние света в опалах. // Материалы VI-й международной конференции

«Лазерная физика и оптические технологии», Гродно, республика Беларусь. – 2006. –ч.1. –с.250-251

10. Горелик В.С., Кудрявцева А.Д., Тареева М.В., Чернега Н.В. Трёхмерные фотонные кристаллы – новые материалы для нелинейной оптики // Труды Десятой юбилейной международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков», Москва. –2009 –с.42-45

11. Горелик В.С., Кудрявцева А.Д., Тареева М.В., Чернега Н.В., Вынужденное глобулярное рассеяние света в трехмерных фотонных кристаллах // Труды VIII Международной конференции "Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы", Ульяновск. –2006. –с.155

12. Esakov A.A., Gorelik V.S., Kudryavtseva A.D., Tareeva M.V. and Tcherniega N.V. Stimulated globular scattering and photonic flame effect: new nonlinear optics phenomena // SPIE Proceedings, Photonic Crystals and Photonic Crystal Fibers for Sensing Applications II. –Henry H. Du, Ryan Bise; Eds. –2006. –Vol. 6369. –pp. 6369 OE1 - 6369 OE12

13. Горелик В.С., Кудрявцева А.Д., Тареева М.В., Чернега Н.В. Вынужденное глобулярное рассеяние света в фотонных кристаллах // Труды Четвертой международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики (ФПО-2006)» в рамках Четвертого международного конгресса «ОПТИКА-XXI», Санкт-Петербург. –2006. –с.66-68

ЛИТЕРАТУРА

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

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

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

[4] E. Yablonovitch, T.J. Gmitter, K.M. Leung. Photonic band structure: The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms // Phys. Rev. Lett. –1991. –Vol.67. –p.2295-2298

[5] Sakoda K., Optical Properties of Photonic Crystals // –2nd ed (Berlin: Springer). – 2005. – Sakoda K., Optical Properties of Photonic Crystals // –2nd ed (Berlin: Springer). –2005. –223 p. –ISSN 0342-4111

[6] Soukoulis C. M., Photonic Band Gap Materials // Dordrecht: Kluwer–Academic Publishers. –ed. 1996. –271 p.

[7] Busch K., Lokes S., Wehrspohn, R.B., Foll, H., Photonic Crystals, Advanced in Design, Fabrication and Characterization // New York: Wiley/VCH, Weinheim. – ed.2004

[8] Joannopoulos J.D., Meade R.D. and Winn J.N., Photonic Crystals // Princeton, NJ: Princeton University Press. –1995

[9] Bowden C.M., Dowling J.P. and Everitt N.O. (ed.), Development and applications of materials exhibiting Photonic Band Gaps // J. Opt. Soc. Am. B –1993. –10. – pp.279-413

- [10] Kurizki G. and Haus J.W., Photonic band gap structures. // *J. Mod. Opt.* –ed. 1994. –Vol.41. –pp.171-404
- [11] Bertolotti M., Bowden C. M. and Sibilia C., Nanoscale Linear and Nonlinear Optics // New York: AIP conference proceedings. –ed.2001. –Vol.560
- [12] Florescu L., Busch K. and John S., Spatially Inhomogeneous Gain Modification in Photonic Crystals // *J. Opt. Soc. Am. B.* –2002. –Vol.19. –p.2215
- [13] Борн М., Вольф Э., Основы оптики // 2-е изд.. –М.: Наука. –1973. – 720 с.: ил.
- [14] Burstein E., Weisbuch C., Confined Electrons and Photons // *New Physics and Applications.* –1995. –Plenum Press, N.Y.
- [15] Joannopoulos J.D., Villeneuve P.R., Fan S.. Photonic crystals: putting a new twist on light // *Nature.* –1997. –Vol.386. –pp.143-149
- [16] Lupu A., Carencu A., Win P., Sik H., Boulet, P., Carre, M., Slempek, S. Spectral response apodization of Bragg-like optical filters with anovel grating chirp design // *OFC/IOOC apos.* –1999. –Vol.2. –pp.271-273
- [17] Lodahl P., von Diel A.F., Nikolaev I.S., Irman A., Overgaag K., Vanmalkelberg D. and Vos W., Controlling the dynamics of spontaneous emission from quantum dots by photonic crystals // *Nature.* –2004. –Vol.430. –pp.654-657
- [18] Nikolaev I. S., Lodahl P. and Vos W. L. Quantitative analysis of directional spontaneous emission spectra from light sources in photonic crystals // *Phys. Rev. A.* –2005. –Vol.71. –p.53813
- [19] Centini M., D’Aguanno G., Scalora M., Bloemer M.J., Bowden C.M., Sibilia C., Mattiucci N. and Bertolotti M., Dynamics of counterpropagating pulses in photonic crystals: Enhancement and suppression of stimulated emission processes // *Phys. Rev. E.* –2003. –Vol.67. –p.36617
- [20] Kosaka H., Kawashima T., Tomita A. et al. Superprism phenomena in photonic crystals: Toward microscale lightwave circuits // *J. Lightwave Technology.* –1999. –Vol.17. –pp.2032-2038
- [21] Kosaka H., Kawashima T., Tomita A. et al. Self-collimating phenomena in photonic crystals // *Appl. Phys. Lett.* –1999. –Vol.74. –pp.1212-1214
- [22] K. Busch, N. Vats, S. John, and B. C. Sanders, Radiating dipoles in photonic crystals // *Phys. Rev. E.* –2000. –Vol.62. –pp.4251-4260
- [23] Londergan J.T., Carini J.P., Murdock D.P., Binding and Scattering in Two-Dimensional Systems: Application to Quantum Wires, Waveguides and Photonic Crystals // *Lect. Note in Phys., Springer-Verlag, New York.* –1999. –Vol. 60
- [24] 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
- [25] Богомолов В.Н., Павлова Т.М. Трехмерные кластерные решетки // *ФТП.* –1995. –Vol.29. –Issue 5-6. –p.826

- [26] 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. –Vol.38. –Issue 3. –pp.111-120
- [27] Wijnhoven J.E.G.J., W.L. Vos, Preparation of photonic crystals made of air spheres in titania // Science. –1998. –Vol.28. –pp.802-804
- [28] Горелик В.С., Оптика глобулярных фотонных кристаллов //–М.:ФИАИ. –2006. – 67 с. : ил.
- [29] Kuok M.H., Lim H.S., Ng S.C., Liu N.N., and Wang Z.K., Brillouine Study of the Quantization of Acoustic Modes in Nanospheres // Phys. Rev. Lett. –2003. –Vol.90. –p.255502
- [30] Tanaka A., Onari S., and Arai T., Low-frequency Raman scattering from CdS microcrystals embedded in a germanium dioxide glass matrix // Phys. Rev. B. –1993. –Vol.47. –p.1237
- [31] Fujii M., Kanzaea Y., Hayashi S., and Yamamoto K., Raman scattering from acoustic phonons confined in Si nanocrystals // Phys. Rev. B. –1996. –Vol.54. –p.R8373
- [32] Duval E., Boukenter A., and Champagnon B., Vibration Eigenmodes and Size of Microcrystallites in Glass: Observation by Very-Low-Frequency Raman Scattering // Phys. Rev. Lett. –1986. –Vol.56. –p.2052
- [33] Ikezawa M., Okuno T., Masumoto Y., and Lipovskii A.A., Complementary detection of confined acoustic phonons in quantum dots by coherent phonon measurement and Raman scattering // Phys. Rev. B. –2000. –Vol.64. –pp.201315
- [34] 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
- [35] Saviot L., Champagnon B., Duval E., Kudriavtsev I.A., and Ekimov A.I., Size dependence of acoustic and optical vibrational modes of CdSe nanocrystals in glasses // J. Non-Cryst. Solids. –1996. –Vol.197. –p.238
- [36] Denisov E.P., Karpov S.V., Kolobkova E.V., Novikov B.V., Suslikov A.I., Fedorov D.L. and Yastrebova M.A., Specific features in low-frequency vibrations of nanocrystals in fluorophosphate glassy matrices // Phys. Solid. State. –1999. –Vol.41. –p.1194
- [37] Roy A., and Sood A.K., Growth of CdS_xSe_{1-x} nanoparticles in glass matrix by isochronal thermal annealing: Confined acoustic phonons and optical absorption studies // Solid State Commun. –1995. –Vol.97. –p.97
- [38] Deiguez A., Romano-Rodriguez A., Vila A., and Morante J.R., The complete Raman spectrum of nanometric SnO₂ particles // J. Appl. Phys. –2000. –Vol.90. –p.1550
- [39] Nandakumar P., Vijayan C., Rajalakshmi M., Arora A.K., and Y.V.G.S. Murti, Raman spectra of CdS nanocrystals in Nafion: longitudinal optical and confined acoustic phonon modes // –Physica E (Amsterdam). –2001. –Vol.11. –Issue 4. –pp.377-383