На правах рукописи

САПАРИНА Светлана Вячеславовна

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ НАНОРАЗМЕРНЫХ АМОРФНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК МЕТОДАМИ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

Специальность 01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Казань — 2022

Работа выполнена на кафедре оптики и нанофотоники ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Научный руководитель: Харинцев Сергей Сергеевич,

доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры оптики и нанофотоники Института физики ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Официальные оппоненты: Степанов Андрей Львович,

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН

Андреев Степан Николаевич,

доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой «Математика» ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук (ФИАН), г. Москва

Защита состоится «26» мая 2022 г. в 15 ч. 40 мин. на заседании диссертационного совета КФУ.01.02 при ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» по адресу: 420008, г. Казань ул. Кремлевская, д. 16а, ауд. 110.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского Казанского (Приволжского) федерального университета (Казань, Кремлевская, д. 35). Электронная версия размещена на официальных сайтах ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ (vak2.ed.gov.ru) и Казанского (Приволжского) федерального университета (kpfu.ru).

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь диссертационного совета:

д.ф.-м.н., профессор Камалова Д.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Данная работа посвящена изучению структурных дефектов аморфных углеродных пленок. В частности, эти пленки используются в качестве защитных покрытий оптических волокон.

В настоящее время в связи со стремительным развитием распределенных спектроскопических и акустических датчиков на основе оптоволокна появилась потребность в создании оптических волокон, которые были бы устойчивы к внешним экстремальным условиям ($T \approx 300^{\circ}C$, $p \approx 15$МПа). Как правило, в таких условиях оптические волокна сталкиваются с серьезными проблемами, которые могут включать механические напряжения, высокие температуры и давления, а также присутствие агрессивных химикатов. В частности, в таких средах молекулы воды и водорода начинают активно взаимодействовать с оболочкой и сердцевиной оптоволокна, что приводит к гигантскому росту оптических потерь, и, как следствие, к неэффективности использования оптоволоконных датчиков в целом.

Одним из путей решения этой проблемы является нанесение защитного покрытия из герметичного материала на поверхность оптоволокна. В основном для этих целей используются металлические, керамические и углеродные пленки. По сравнению с другими видами покрытий углеродные обладают высокой механической прочностью и значительными герметичными свойствами. Более того, толщина углеродного слоя составляет несколько нанометров, что позволяет избежать затухания сигнала при микро-изгибах оптоволокна.

Производство оптических волокон с углеродным покрытием осуществляется методом осаждения из газовой фазы. Нанесенный углеродный слой состоит из большого числа неупорядоченных углеродных кристаллов, образующих непрерывную структуру на поверхности стекловолокна. Особенности структуры углеродного слоя, в частности, такие как, степень упорядоченности, размеры, а также степень совершенства кристаллов влияют на защитные свойства углеродных покрытий. Однако, несмотря на существенные успехи, достигнутые в области технологии нанесения покрытий, до настоящего времени нет полного понимания

причин возникновения дефектов в углеродном слое, способствующих проникновению водорода и воды к поверхности оптоволокна.

Целью диссертационной работы является изучение дефектной структуры и химического состава тонких аморфных углеродных покрытий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Анализ морфологии и химического состава углеродных покрытий методами атомно-силовой микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света.

2. Измерение зависимости сопротивления углеродных покрытий от температуры в условиях окружающей среды и низкого вакуума.

3. Изучение структуры углеродных покрытий с высоким пространственным разрешением с помощью спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния света позволяет обнаружить аллотропные модификации углерода в защитном углеродном покрытии оптоволокна.

2. Гистерезис электрического сопротивления углеродных покрытий при нагреве и охлаждении их на воздухе обусловлен двумя механизмами: деинтеркаляцией воды из аморфного углерода и необратимой сорбцией гидроксильных групп краевыми дефектами углерода.

3. Метод гигантского комбинационного рассеяния с электронагревом образца позволяет повысить спектральное разрешение сильно перекрытых полос аморфного углерода и обнаружить химическую функционализацию краевых дефектов.

4. Дефекты в аморфных углеродных пленках при нормальных условиях функционализируются гидроксильными, карбоксильными и карбонильными группами.

Научная новизна:

1. С помощью спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света в защитных углеродных покрытиях было обнаружено наличие одностенных нанотрубок.

2. Впервые был обнаружен гистерезис электрического сопротивления и интенсивности комбинационного рассеяния света углеродных покрытий при многократных циклах их нагрева и охлаждения на воздухе.

3. Экспериментально зарегистрировано улучшение спектрального разрешения сильно перекрытых полос аморфного углерода с использованием метода ГКР с электронагревом образца.

4. Впервые интерпретирован спектр комбинационного рассеяния аморфного углеродного покрытия в области 1000-2000 $см^{-1}$.

Научная значимость и практическая ценность работы.

В рамках настоящей диссертационной работы было осуществлено комплексное исследование химического состава и структуры защитных углеродных покрытий оптоволокна. Впервые методом гигантского комбинационного рассеяния света в защитных покрытиях были обнаружены аллотропные модификации углерода, такие как, стеклообразный углерод, сажа и одностенные нанотрубки. Наличие этих аллотропных модификаций способствуют росту оптических потерь при передаче информации по оптоволокну.

С помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния с вариацией температуры образца и измерениям температурной зависимости электрического сопротивления углеродных покрытий была впервые обнаружена химическая функционализация дефектов углеродного слоя водород- и кислородсодержащими группами. Результаты данного исследования полезны для понимания взаимодействия воды и аморфного углеродного покрытия, что в дальнейшем поможет улучшить герметичные свойства углеродных покрытий при их эксплуатации в экстремальных условиях окружающей среды.

Более того, экспериментально удалось повысить спектральное разрешение сильно перекрытых полос аморфного углерода с помощью спектроскопии

гигантского комбинационного рассеяния с электронагревом образца. Развитие настоящего метода расширяет спектр методов ближнеполевой спектроскопии и микроскопии сверхвысокого пространственного разрешения.

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием сертифицированного научного оборудования, воспроизводимостью экспериментальных результатов, согласием ряда полученных результатов с данными других методов, комплексным сочетанием разнообразных экспериментальных методов исследования с теоретическими расчетами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 19 международных и 3 всероссийских конференциях: Международный конгресс по метаматериалам (Нью-Йорк, 2021); Международная конференция «МЕТАНАНО» (ИТМО, Санкт Петербург, 2020, 2021); Международная конференция «Прикладная оптика–2018» (ГОИ им.С.И. Вавилова, Санкт-Петербург, 2018); Международная конференция по фотонике и информационной оптике (МИФИ, Москва, 2016, 2019–2022); Международная конференция «Сканирующая Зондовая Микроскопия» (УФУ, Екатеринбург, 2017); Международная молодежная научная школа «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия» (КФУ, Казань, 2015–2017, 2019–2021); XII Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (КФТИ им. Завойского, Казань, 2021); Международная школа-конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Биомедицина, материалы и технологии XXI века» (КФУ, Казань, 2015); Всероссийская конференция по волоконной оптике «ВКВО-21» (ПГНИУ, Пермь, 2021); Итоговая научно-образовательная конференция студентов Института Физики (КФУ, Казань, 2016, 2017); Международная летняя научная школа по нанофотонике и метаматериалам (ИТМО, Санкт-Петербург, 2017).

Личный вклад автора. Все приведенные экспериментальные результаты были получены и обработаны лично автором, либо при ее непосредственном участии. Математическая обработка результатов экспериментов проводилась лично автором. Автор принимала активное участие в обсуждении результатов

исследования и в формулировке выводов, готовила их к публикации и представлению на научных конференциях и школах.

Публикации по теме диссертационной работы. Основные результаты работы опубликованы в 25 работах, 9 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК [A1-A9], 16 в сборниках тезисов и трудов международных и всероссийских конференций [A10-A25].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка авторских публикаций по теме диссертации и списка литературы, включающего 108 наименований. Объем диссертационной работы составляет 112 страниц, включая 41 иллюстрацию.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обсуждается актуальность проведенных исследований, формулируется цель, задачи и научная новизна работы, перечисляются основные положения, выносимые на защиту, а также дается краткое описание диссертации по главам.

В §1.1 **первой главы** рассмотрены механические и герметичные свойства оптических волокон и оптических волокон с углеродным покрытием. Показано, что нанесение тонкого защитного углеродного покрытия на поверхность оптоволокна позволяет существенно уменьшить оптические потери, вызванные водородными реакциями, а также предотвратить деградацию механической прочности оптоволокна.

В §1.2 описаны ключевые особенности процесса нанесения углеродного покрытия на поверхность оптоволокна методом химического осаждения из газовой фазы. Отмечено, что структурные особенности нанесенных углеродных покрытий зависят от условий синтеза, таких как температура реакции, тип используемого газа-прекурсора и скорость вытяжки волокна.

В §1.3 приведен литературный обзор исследований, посвященных изучению структурных дефектов и химического состава углеродных покрытий. Представлена модель для описания структуры углеродного покрытия.

Вторая глава посвящена исследованию поверхности и химического состава углеродных покрытий. В §2.1 приводится исследование морфологии углеродного покрытия различной толщины с помощью атомно-силовой микроскопии. Среднее значение шероховатости углеродных покрытий составило 0.3±0.1 нм. Показано, что шероховатость углеродного слоя медленно уменьшается с увеличением его толщины.

В §2.2 и 2.3 продемонстрировано исследование химического состава углеродных пленок различной толщины методом спектроскопии комбинационного рассеяния света. Было показано, что графитоподобная фракция углерода насыщается при толщине углеродного покрытия около 40-60 нм, в то время как неупорядоченная фракция начинает немного увеличиваться за пределами этого диапазона.

В §2.4 приведено исследование структуры углеродного покрытия с субволновым пространственным разрешением с использованием спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света (ГКР) (рисунок 1а). Методом ГКР было обнаружено наличие аллотропных модификаций в углеродном покрытии, в частности, таких как, стеклообразный углерод, сажа. Поскольку наличие углеродной сажи в структуре защитного слоя напрямую воздействует на механизм проникновения водорода и влаги к сердцевине оптического волокна, то для количественной оценки сажи в углеродных покрытиях был введен спектроскопический параметр.

Более того, результаты ГКР спектроскопии указали на наличие в составе углеродного покрытия еще одной аллотропной модификации – углеродных нанотрубок (УНТ) (по появлению низкочастотного *RBM* пика на 200 $см^{-1}$ в спектре ГКР (красная линия, рисунок 1б)). Средний размер УНТ составил примерно 1.8 нм. УНТ такого диаметра вполне могут служить транспортными каналами для

молекулярного водорода на поверхность оптоволокна, как схематично показано на рисунке 1в.

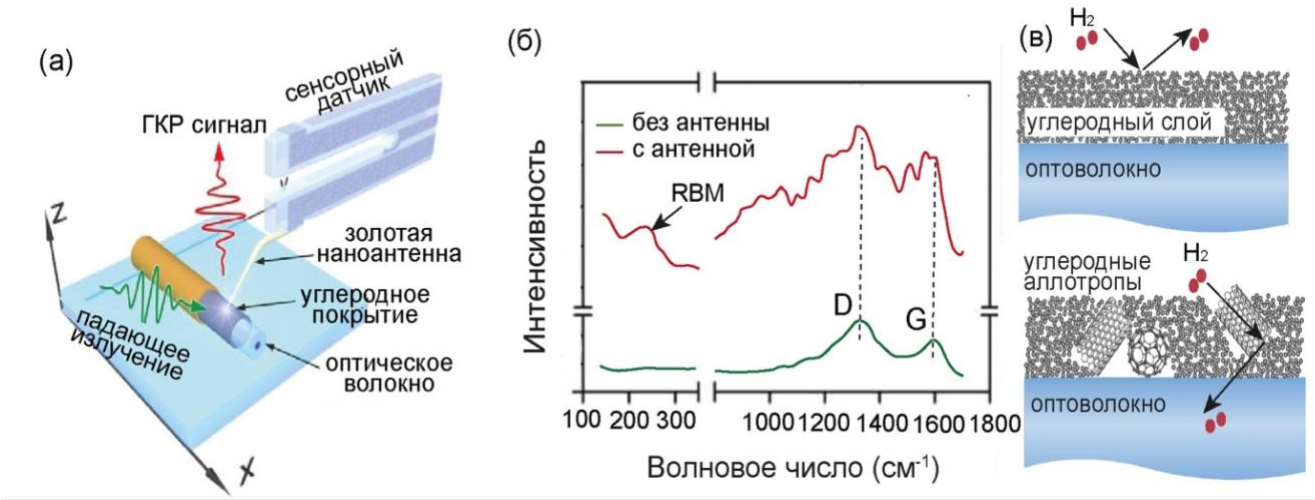

Рисунок 1. (а) Схема эксперимента по исследованию структуры углеродного покрытия методом спектроскопии ГКР; (б) Спектр КР (зеленая линия) и ГКР (красная линия) углеродного покрытия толщиной 33 нм; (в) Схематичное представление механизма проникновения молекулярного водорода через аллотропные модификации углерода к оптоволокну

Таким образом, с помощью метода спектроскопии ГКР было обнаружено наличие аллотропных модификаций углерода в защитном покрытии оптоволокна. Эти аллотропные модификации способствуют формированию дополнительных каналов транспорта молекулярного водорода в оптоволокно, что может служить одной из причин ухудшения прозрачности оптических волокон.

В §3.1 **третьей главы** приведено исследование зависимости электрического сопротивления аморфных углеродных пленок различной толщины от температуры. Впервые был обнаружен гистерезис относительного изменения сопротивления аморфных углеродных покрытий при их нагреве и охлаждения на воздухе (рисунок 2а). Показано, что гистерезис является незначительным при проведении аналогичных экспериментов в условиях низкого вакуума (рисунок 2б). Мы предполагаем, что гистерезис обусловлен взаимодействием поверхности углеродного слоя с молекулами воды.

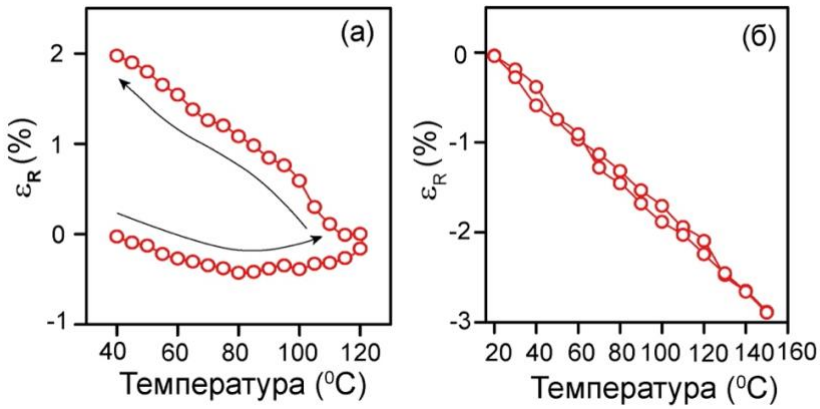

Рисунок 2. Зависимость относительного изменения сопротивления углеродного покрытия от температуры при его нагреве и охлаждении (а) на воздухе и (б) в условиях вакуума (10 мбар)

В §3.2 приведены энергетические барьеры адсорбции, десорбции и диссоциации воды на идеальную графеновую плоскость и графеновую плоскость с дефектами. Показано, что краевые / внутренние дефекты аморфного углерода способствуют снижению энергетических барьеров (до нескольких мэВ) для химической функционализации углеродного слоя ионами воды [3,4].

В §3.3 описано исследование химического состава аморфных углеродных покрытий методом спектроскопии КР при вариации температуры образца. На рисунке 3а показана карта ГКР, построенная по интенсивности линии на 3420 см$^{-1}$, соответствующей валентному колебанию -ОН групп. Белые точки на ГКР карте, показанные на вставке (рисунок 3а) с улучшенным пространственным разрешением, указывают на наличие связанной воды в структуре углеродного слоя. Спектры ГКР, снятые при различных температурах углеродного покрытия, показаны на рисунке 3б. Поведение ГКР спектров с ростом температуры свидетельствует об уменьшении содержания воды в углеродном покрытии с ростом температуры. Однако, деинтеркалляция воды из аморфного углерода, способствует уменьшению ширины его запрещенной зоны [5]. Мы предполагаем, что при нагреве часть воды также испытывает диссоциативную адсорбцию на краевых дефектах с образованием функциональных групп. В частности, для образования гидроксильной группы требуется преодолеть небольшой энергетический барьер, сопоставимый с тепловым возбуждением kT [4]. Мы считаем, что этот процесс является перспективным механизмом роста

сопротивления углеродной пленки после цикла ее нагрева и охлаждения в окружающем воздухе (рисунок 2а). Результаты спектроскопии КР с вариацией температуры образца также указали на наличие гистерезиса интенсивности полос КР, что свидетельствует в пользу об предполагаемой химической функционализации углеродного слоя.

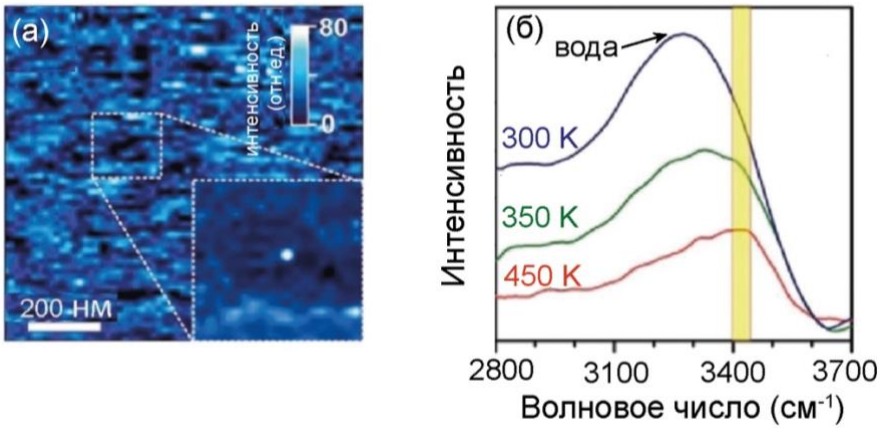

Рисунок 3. (а) Карта ГКР углеродного покрытия толщиной 31 нм, снятая на 3420 $см^{-1}$ (полоса валентных -ОН колебаний) при комнатной температуре; (б) Спектры ГКР того же покрытия в спектральном диапазоне 2800-3700 $см^{-1}$ при различных значениях температуры

Таким образом, впервые был обнаружен гистерезис электрического сопротивления углеродных покрытий при их нагреве и охлаждении в условиях окружающего воздуха. Показано, что гистерезис обусловлен двумя механизмами: деинтеркаляцией воды из аморфного углерода и необратимой сорбцией гидроксильных групп краевыми дефектами углерода.

Обнаружено, что полосы КР аморфного углерода имеют сложную структуру и требуют улучшенного спектрального разрешения. В **четвертой главе** продемонстрированы возможности спектроскопии ГКР для спектрального разрешения сильно перекрытых полос аморфного углерода. В §4.1 приведен расчет интенсивности ГКР при когерентном и некогерентном режимах. Показано, что в случае реализации когерентного режима рассеяния интенсивность полос ГКР становится выше.

В настоящей работе в качестве исследуемого образца мы использовали углеродное покрытие, размеры графитоподобных кристаллов которого составляли

примерно 20-30 нм. В экспериментах по изучению ГКР мы использовали золотую иглу, радиус закругления которой составлял около 20 нм. На рисунке 4а,б представлены спектры КР (рисунок 4а) и спектры ГКР, снятые при различных значениях приложенного напряжения, (рисунок 4б) аморфного углеродного покрытия. Видно, что по сравнению со спектрами КР спектры ГКР хорошо разрешены и разделены на несколько элементарных полос. Причем с ростом напряжения наблюдается усиление интенсивности всех полос ГКР. Такое поведение можно объяснить тем, что в отличие от теплового нагрева электронагрев имеет неоднородный характер из-за эффектов перколяции, которые создают чрезвычайно большую локальную плотность тока в точках, в которых соседние кристаллы находятся в прямом контакте. В этих точках температура может достигать сотни градусов, и, соответственно, процессы, происходящие в окрестностях этих точек, приводят, в частности, к тому, что дефекты кристаллов становятся свободными от воды. При воздействии света с субволновой локализацией такие графитоподобные кристаллы начинают излучать пространствеенно когерентный свет.

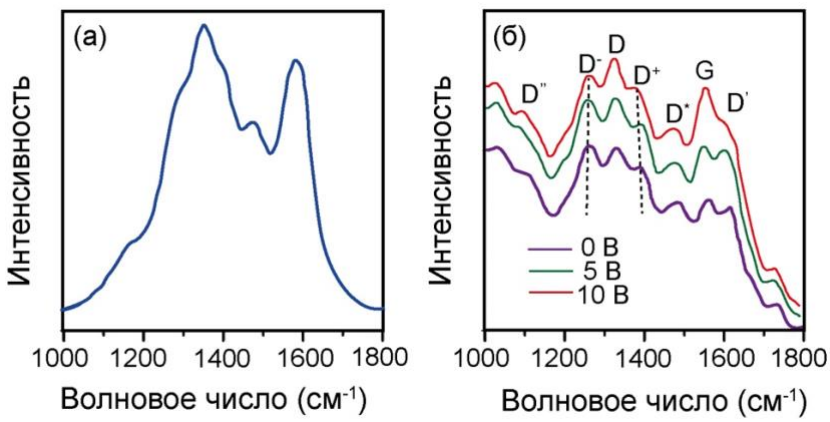

Рисунок 4. (а) Спектры КР и (б) спектры ГКР, снятые при различных значениях приложенного напряжения, аморфного углеродного покрытия толщиной 31нм

В частности, с ростом напряжения обнаруживается усиление и небольшое перераспределение интенсивностей полос на 1260 $см^{-1}$ и 1400 $см^{-1}$, которым соответствуют колебания гидроксильных и карбоксильных (C-OH/COOH) функциональных групп [8]. Активация этих полос обусловлена тем, что

функционализированные краевые дефекты становятся свободными от воды и начинают вносить больший вклад в интенсивность полос ГКР.

§4.2 посвящен исследованию химической функционализации аморфных углеродных покрытий. Обнаружено, что гистерезис электрического сопротивления углеродных покрытия зависит от типа используемого при синтезе газа-прекурсора, и является результатом необратимого химического легирования краевых / внутренних дефектов компонентами воды H^+ и OH^-. Образование дефектов с функциональными группами (C-H, COOH/C-O и C-O-C/C=O) приводит к открытию запрещенной зоны и вносит изменения в уровень Ферми. Убедительные доказательства были получены в результате многократных циклов нагрева и охлаждения как высушенных, так и обогащенных водой углеродных покрытий. Обогащенное водой углеродное покрытие выявило аномальный гистерезис около 25% после трех циклов нагрева и охлаждения на воздухе.

Результаты спектроскопии КР высушенных и обогащенных водой углеродных покрытий указали на появление двух новых полос на 1600 $см^{-1}$ и 1720 $см^{-1}$ (рисунок 5в).

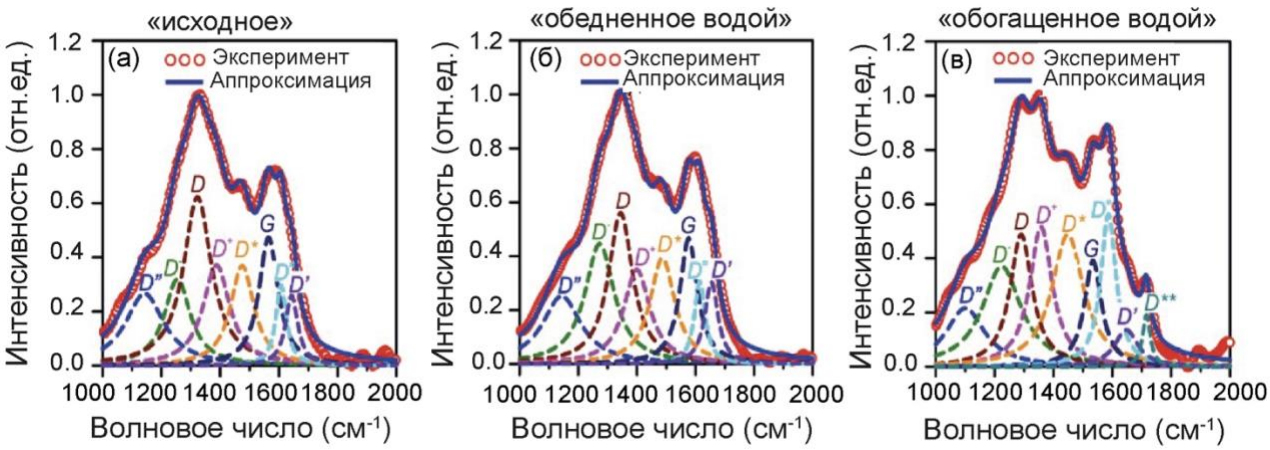

Рисунок 5. Спектр КР, зарегистрированный при температуре 80 ˚C, (а) исходного, (б) высушенного и (в) обогащенного водой углеродных покрытий и разложение спектра на элементарные компоненты

Наблюдаемые полосы оказались очень чувствительны к наличию воды в углеродном покрытии и, как показано в ряде работ, могут быть отнесены карбоксильным и карбонильным группам, соответственно.

Таким образом, с помощью метода гигантского комбинационного рассеяния с электронагревом образца было улучшено спектральное разрешение сильно перекрытых полос аморфного углерода и обнаружена химическая функционализация краевых дефектов компонентами воды H^+ и OH^-. Результаты исследований спектроскопических и электрических свойств высушенных и обогащенных водой углеродных покрытий указали на то, что дефекты обогащены гидроксильными, карбоксильными и карбонильными функциональными группами. Показано, что количество функционализированных дефектов углеродных покрытий зависит от типа газа-прекрусора, используемого при их синтезе.

В **заключении** приведены основные результаты и выводы:

1. Методом ГКР было обнаружено наличие аллотропных модификаций углерода в защитных углеродных покрытиях оптоволокна. Эти аллотропные модификации приводят к формированию дополнительных каналов транспорта молекулярного водорода в оптоволокно.
2. Впервые был обнаружен гистерезис электрического сопротивления и интенсивности комбинационного рассеяния света аморфных углеродных пленок при их нагреве и охлаждения на воздухе. Показано, что гистерезис обусловлен двумя механизмами: деинтеркаляцией воды из аморфного углеродного покрытия и диссоциативным поглощением гидроксильной группы на краевых дефектах углерода.
3. С помощью метода ГКР с электронагревом образца экспериментально зарегистрировано улучшение спектрального разрешения сильно перекрытых полос аморфного углерода.
4. Впервые интерпретирован спектр комбинационного рассеяния аморфного углеродного покрытия в области 1000-2000 $см^{-1}$.
5. Было установлено, что степень кристалличности аморфных углеродных покрытий определяет ее способность к химической функционализации водород- и кислородсодержащими группами.

6. Проведенные исследования позволяют оптимизировать условия синтеза углеродных покрытий для достижения их максимальной герметичности.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах:

A1. Sensing carbon allotropes in protective coatings on optical fibers with far- and near-field Raman spectroscopy and microscopy / S.S. Kharintsev, S.V. Saparina, A.A. Stolov, A.I. Fishman, J. Li // J. Raman Spectrosc. – 2017. – V. 48, №10. – P. 1346-1355.

A2. Сапарина, С.В. Характеризация углеродного нанопокрытия оптических волокон с помощью ближнеполеевой спектроскопии комбинационного рассеяния света / С.В. Сапарина, С.С. Харинцев // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – Казань: Изд-во Казан. ун-та. – 2018. – Т. 160, №1. – С. 126-134.

A3. Nanoscale probing a glass transition temperature of heterogeneous azopolymers using atomic force microscopy / T.A. Skvortsova, E.A. Chernykh, S.V. Saparina, K.R. Bikmeeva / J. Phys.: Conf. Ser. – 2019. – V. 1283, №1.– Art. № 012014 (5 p.).

A4. Spectrally resolving coherent TERS spectroscopy of electrically biased carbon-coated fibers / S.S. Kharintsev, S.V. Saparina, A.A. Stolov, A.I. Fishman, J. Li // J. Phys. Chem. C. – 2020. – V. 124, №27. – P. 14752-14758.

A5. Water-anchored edge defects in amorphous carbon probed with thermal-and electroassisted raman spectroscopy and nanoscopy / S.S. Kharintsev, S.V. Saparina, A.A. Stolov, A.I. Fishman, J. Li // J. Phys. Chem. C. – 2020. – V. 124, №29. – P. 15886-15894.

A6. Saparina, S.V. Study of the modification of the hydrophobic properties of thin carbon films via thermo-assisted Tip-Enhanced Raman Scattering method / S.V. Saparina, S.S. Kharintsev // AIP Conf. Proc. – 2020. – V. 2300, №1. – Art. № 020106 (4 p.).

A7. Water enrichment/depletion of amorphous carbon coatings probed by temperature-dependent dc electrical conductivity and Raman scattering / S.V. Saparina, A.A. Stolov, A.I. Fishman, J. Li, S.S. Kharintsev // Appl. Surf. Sci. – 2021. – V. 570, №28. – Art. № 151052 (9 p.).

A8. Anomalous anti-stokes scattering in amorphous carbon thin films / S.V. Saparina, A.R. Gazizov, S.S. Kharintsev // J. Phys. Conf. Ser. – 2021. – V. 2015, №1. – Art. № 012131 (4 p.).

A9. Saparina, S.V. Characterization of nanostructure and chemical properties of amorphous carbon films prepared from different precursor gases / S.V. Saparina, S.S.

Kharintsev // Proceedings of 2021 15th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials). – New York: IEEE, 2021. – P. 389-391.

Тезисы и материалы конференций:

А10. Сапарина, С.В. Эффект воды на электрический гистерезис углеродных покрытий оптических волокон света / С.В. Сапарина, С.С. Харинцев // Фотон-экспресс. – 2021. – №6. – Р. 432.

А11. Сапарина, С.В. Исследование химической функционализации аморфных углеродных покрытй методами атомно- силовой микроскопии и термо-ассистируемой спектроскопии комбинационного рассеяния света / С.В. Сапарина, С.С. Харинцев // XII Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (Фэкс-2021) памяти профессора В.В. Самарцева: сборник тезисов, г. Казань, 25-30 октября 2021 г. / под ред. А.А. Калачева и А. В. Наумова. – Москва: Тровант, 2021. – С.234-237.

А12. Сапарина, С.В. Комбинационное рассеяние света и ИК-поглощение бинарных полимеров с субволновым пространственным разрешением / С.В. Сапарина, С.С. Харинцев, А.М. Alekseev, J. Loos // Сборник тезисов I Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Биомедицина, материалы и технологии XXI века» (Казань, 25–28 ноября 2015 г.) / отв. ред. А.В. Герасимов. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2015. – С.542.

А13. Сапарина, С.В. Характеризация углеродных нанопокрытий оптического волокна с помощью атомно-силовой микроскопии и спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света // С.В. Сапарина, С.С. Харинцев, А.И. Фишман // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия: XX Международная молодежная научная школа,18-20 октября 2016 г.: сборник статей / науч. ред. М.Х. Салахов. - Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2016. – С. 29-34.

А14. Сапарина, С.В. Спектроскопическое исследование алотропных модификаций углерода с помощью гигантского комбинационного рассеяния / С.В. Сапарина // Итоговая научно-образовательная конференция студентов Казанского федерального университета 2016 года: сборник тезисов: в 3 т. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2016. – Т.1.– С.232.

А15. Сапарина, С.В. Характеризация углеродного нанопокрытия оптического волокна методом спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света света / С.В. Сапарина // Итоговая научно-образовательная конференция студентов Казанского федерального университета 2017 года: сборник тезисов: в 4 т. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2017. – Т. 3. – С.231.

А16. Сапарина, С.В. Характеризация углеродного нанопокрытия оптического волокна с помощью атомно-силовой микроскопии и спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света / С.В. Сапарина, С.С. Харинцев //

Scanning Probe Microscopy. Abstract Book of International Conference (Ekaterinburg, August 27-30, 2017). - Ekaterinburg, UFU, 2017. – P.176.

А17. Сапарина, С.В. Характеризация углеродного нанопокрытия оптического волокна методом спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния / С.В. Сапарина // Сборник научных статей Казанского федерального университета 2017 года: по результатам Конкурса на лучшую научную работу студентов Казанского федерального университета 2017 года. – Казань, 2017. – С.39-42.

А18. Исследование углеродных аллотропов в защитном слое оптических волокон с помощью дальней и ближней спектроскопии комбинационного рассеяния света / С.В. Сапарина, С.С. Харинцев, А.И. Фишман, А.А. Столов // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия XXI Международная молодежная научная школа: сборник статей / под ред. М.Х. Салахова. – Казань: Изд-во «ФЭН» АН РТ, 2017. – С.147-151.

А19. Сапарина, С.В. Характеризация углеродного нанопокрытия оптических волокон с помощью нового класса гибридных методов локально-усиленной спектроскопии комбинационного рассеяния света / С.В. Сапарина, С.С. Харинцев // VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов, Москва, 23-25 января 2019 г. / отв. ред. Родин В.Г. – М.: НИЯУ МИФИ, 2019. – С.461-462.

А20. Сапарина, С.В. Исследование углеродных нанокомпозитов методами электро - и термоассистируемого гигантского комбинационного рассеяния света / С.В. Сапарина, С.С. Харинцев // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия XXII Международная молодежная научная школа: сборник статей / под ред. М.Х. Салахова. – Казань: Изд-во «ФЭН» АН РТ, 2019. – С.122-126.

А21. Исследование углеродных нанокомпозитов методами электро- и термо-ассистируемого гигантского комбинационного рассеяния света // С.В. Сапарина, С.С. Харинцев, А.И. Фишман, А.А. Столов // IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов, 29-31 января 2020 г. г. Москва / отв. ред. Родин В.Г. - М.: НИЯУ МИФИ, 2020. – С.109-110.

А22. Сапарина, С.В. Исследование оптических и электрических эффектов в наноразмерных пленках аморфного углерода методом спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света / С.В. Сапарина, С.С. Харинцев // «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия» и «Квантовая информатика и квантовые сенсоры на основе алмазов»: XXIV Объединенная международная молодежная научная школа (Казань, 10–11 декабря 2020 г.). Сборник статей. Вып. XXIV / под ред. М.Х. Салахова. – Казань: – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2021. – С.91-94.

А23. Сапарина, С.В. Эффекты усиления антистоксового комбинационного рассеяния света в аморфных углеродных наноплѐнках / С.В. Сапарина, С.С.

Харинцев // X Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов, 27-29 января 2021 г., Москва: / отв. ред. Родин В.Г. – М.: НИЯУ МИФИ, 2021. – С.71-72.

А24. Сапарина, С.В. Химическая диагностика наноразмерных аморфных углеродных покрытий с помощью электроассистируемой спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света / С.В. Сапарина, С.С. Харинцев // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия XXV Юбилейная Международная молодежная научная школа (Казань, 27-29 октября 2021 г.): сборник статей. Вып. XXV / под ред. М.Х. Салахова. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2022. – С.61-64.

А25. Сапарина, С.В. Наноспектроскопический анализ аморфных углеродных плёнок методом гигантского комбинационного рассеяния света с электронагревом образца / С.В. Сапарина, С.С. Харинцев // XI Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов, Москва, 26-28 января 2022 г. / отв. ред. Родин В.Г. - М.: НИЯУ МИФИ, 2022. – С.112-113.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lemaire, P.J. Hermetic optical fibers: Carbon-coated fibers / P.J. Lemaire, E.A. Lindholm // Specialty optical fibers handbook. – Academic Press, 2007. – P. 453-490.
2. Carbon coatings on silica glass optical fibers studied by reflectance Fourier-transform infrared spectroscopy and focused ion beam scanning electron microscopy / A.A. Stolov [et al.] // Thin Solid Films. – 2012. – V. 520, №13. – P.4242-4248.
3. Structure evolution of graphene oxide during thermally driven phase transformation: is the oxygen content really preserved? / P. Sun [et al.] // Plos One. – 2014. – V. 9, №11. – Art. № 111908 (8 p.).
4. Reversible hydrophobic to hydrophilic transition in graphene via water splitting induced by UV irradiation / Z. Xu [et al.] // Sci. Rep. – 2014. – V. 4, №1. – P. 1-9.
5. UV irradiation induced reversible graphene band gap behaviors / Z. Xu [et al.] // J. Mater. Chem. C. – 2016. – V. 4, №36. – P. 8459-8465.
6. Theory of spatial coherence in near-field Raman scattering / L.G. Cançado [et al.] // Phys. Rev. X. – 2014. – V. 4, №3. – Art. № 03105 (14 p.).
7. Novotny, L. Principles of Nano-Optics / L. Novotny, B. Hecht. – Cambridge University Press, 2006. – 539 p.
8. Raman spectra of graphite oxide and functionalized graphene sheets / K.N. Kudin [et al.] // Nano Lett. – 2008. – V. 8, №1. – P. 36-41.