



Исследование параметров герметичных углеродных покрытий оптических волокон, используемых в агрессивных средах

В.Б. Ромашова^{1,3}, Д.С. Шаймадиева^{1,2}, Н.В. Буров¹

¹ АО «Ленинградские Лазерные Системы»

² Университет ИТМО

³ Санкт-Петербургский Государственный Университет Аэрокосмического Приборостроения

Герметичные углеродные покрытия различной толщины в диапазоне от 1 до 100 нм для оптических волокон характеризуются при помощи конфокальной Рамановской спектроскопии и атомно-силовой микроскопии. В ходе исследований были получены стандартные Рамановские спектры дальнего поля в области от 1000 до 2000 см⁻¹ с использованием пяти отдельных компонентов: разные виды графитоподобных и неупорядоченных фаз. Предложен новый спектроскопический индикатор, который обеспечивает измерение доли сажи в углеродистых материалах. Результаты исследований методом комбинационного рассеяния TERS (tip-enhanced Raman scattering) подтвердили сложную структуру Рамановской D полосы первого порядка, отнесенной к неупорядоченным колебаниям графитовой решетки. С помощью данного метода было доказано, что в защитных покрытиях образуются такие углеродные аллотропы, как углеродные нанотрубки.

Ключевые слова: оптические волокна, герметичное покрытие, углеродные аллотропы, Рамановская спектроскопия, TERS.

Статья получена: 30.07.2019. Принята к публикации: 20.08.2019.

Research of Optical Fiber's Hermetic Carbon Coatings Used in Harsh Conditions

V. B. Romashova^{1,3}, D. S. Shaimadiyeva^{1,2}, N. V. Burov¹

¹ JSC «Leningrad Laser Systems», St. Petersburg

² St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg

³ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg

Hermetic carbon coatings of various thicknesses in the range from 1 to 100 nm for optical fibers are characterized by confocal Raman spectroscopy and atomic force microscopy. In the course of the research, standard Raman far-field spectra were obtained in the region from 1000 to 2000 cm⁻¹ using 5 individual components: different types of graphite-like and disordered phases. A new spectroscopic indicator is also proposed, which provides a measure of the soot fraction in carbon materials. Studies using the TERS (tip-enhanced Raman scattering) method confirmed the complex structure of the Raman D band of the first order assigned to disordered vibrations of the graphite lattice. In addition, using this method,



it was proved that carbon allotropes are formed in protective coatings, such as carbon nanotubes.

Keywords: optical fibre testing, protective coatings, carbon allotropes, Raman spectroscopy, TERS.

Received: 30.07.2019. Accepted: 20.08.2019.

ВВЕДЕНИЕ

Результаты мониторинга распределенных и точечных объектов в значительной степени зависят от параметров окружающей среды. Современные системы разработаны специально для эксплуатации в экстремальных условиях, которые могут включать в себя высокие температуры и давления, а также ионизирующее излучение и агрессивные химические вещества. Так, например, в нефтяных скважинах температура может достигать 380 °С, а давление подниматься до 150–160 атм. При этом ожидаемый срок эксплуатации должен составлять годы или даже десятки лет [1].

Оптические волокна на основе чистого кварца все чаще используются для распределенных датчиков измерения температуры, деформации, давления и пр. В таких системах мониторинга изменение температуры или появление акустических сигналов регистрируются, как непрерывный профиль по всей длине волоконного тракта. При длине волокна до 15 км операторы получают измерения практически в реальном времени по всей длине скважины или трубопровода с пространственным разрешением менее 1 м. Для мониторинга используются разные оптические методы: методы вынужденного комбинационного рассеяния, рассеяния Бриллюэна или Рэлея. Использование оптических волокон в сложных условиях эксплуатации требует повышенной стойкости волокон к внешним воздействиям и особой конструкции волоконных кабелей. Этим вопросам и будет посвящена данная статья.

СТРУКТУРА СПЕЦИАЛЬНЫХ ВОЛОКОН

Большинство современных оптических волокон имеют волновод, состоящий из сердцевины и оболочки, изготовленных из чистого или легированного кварца. Основное преимущество кварца – высокая прозрачность, позволяющая передавать сигнал с затуханием порядка 0,2 дБ/км [2]. Однако, поскольку кварц является хрупким материалом, волокна в процессе вытяжки покрываются полимерным слоем, что существенно увеличивает механическую прочность волоконного световода.

В течение последних десятилетий оптические волокна все больше используются для мониторинга в сложных условиях эксплуатации. В этих случаях такие воздействия, как механические напряжения, высокие температуры и перепады давления, а также наличие водорода и других агрессивных химических веществ снижают срок эксплуатации систем. Например, механические напряжения волокна, находящегося в кислой среде, также приводят к его ускоренному разрушению [3, 4]. Водород, проникая в сердцевину, вызывает дополнительные оптические потери, не позволяющие использовать волокно для дальнейшей передачи сигналов.

Выделим два основных фактора, влияющих на использование волокон в агрессивных условиях: стойкость к возникновению повышенных оптических потерь и стойкость к механическим повреждениям. Как было описано ранее, повышенные оптические потери связаны с проникновением водорода, а также с появлением центров окраски (ЦО), возникающих под воздействием β - или γ -излучения. Дополнительные оптические потери также могут быть связаны с эффектами макро- и микроизгибов, которые развиваются в результате деградации полимерного покрытия. Существенно уменьшить проникновение водорода в оптическое волокно и решить часть описанных проблем помогает использование герметичного покрытия. Оно может быть создано из углеродного либо из керамического материала, либо быть металлическим. Углеродное покрытие широко используется в специальных оптических волокнах. На это есть две причины:

- предотвращение диффузии водорода в сердцевину волокна (как уже сказано выше) [2];
- сохранение механической прочности волокна, связанное с предотвращением воздействия влаги на поверхность кварцевой оболочки [1].

Защитные свойства углеродного слоя связаны с его молекулярной структурой и толщиной покрытия, составляющей несколько десятков нанометров. При такой толщине покрытие не создает значи-

тельных нагрузок на волновод, следовательно, не вызывает затухания, связанного с микроизгибами. Подобно кварцу, углеродные покрытия являются хрупкими, поэтому после нанесения слоя углерода волокно дополнительно защищают полимерным покрытием, как правило акрилатным, силиконовым или полиимидным. При вытяжке волокна необходимо наносить углеродный слой непосредственно после прохождения индукционной печи, когда волокно имеет достаточно высокую температуру (800–1000 °С), т.к. в противном случае углеродный слой становится пористым, а его использование – малоэффективным. Наносимый слой углерода является непрозрачным, электропроводящим и хорошо прилипает к поверхности стекла благодаря химическим связям.

За стойкость к ионизирующему излучению отвечает «чистая» кварцевая сердцевина, а точнее, отсутствие в ней примесей фосфора (P), германия (Ge) и прочих добавок. Исключение в некоторых случаях составляет фтор (F) [5]. На рис. 1 изображена структурная схема волокна с углеродным покрытием. Хорошо известно, что углеродные покрытия состоят в основном из графитоподобных кристаллов, окруженных аморфными доменами [6].

Большой арсенал таких методов, как сканирующая зондовая микроскопия (SPM), Рамановская спектроскопия (в русскоязычной литературе называемая спектроскопией комбинационного рассеяния), ИК-спектроскопия, рентгеновская дифракция и сканирующая электронная микроскопия обеспечивают доступ к исследованиям внутренних характеристик углеродных покрытий, например, к степени графитизации, шероховатости и т.д. [7–9]. Наиболее популярными инструментами являются атомно-силовая микроскопия (AFM) и спектроско-

пия комбинационного рассеяния, которые предоставляют информацию о шероховатости и химической структуре углеродистых покрытий [10, 11]. В спектрах комбинационного рассеяния наблюдаются пики, относящиеся к графитовой и аморфной доменам углеродного покрытия, – это пики G и D соответственно. G-пик (симметрия моды E_{2g}) наблюдается при 1590 см^{-1} , а D-пик (симметрия моды A_{1g}) наблюдается при 1360 см^{-1} .

Более детальные исследования показали, что область комбинационного рассеяния углеродистых материалов в диапазоне 1000–2000 см^{-1} является более сложной: полосы D и G состоят из нескольких сильно перекрывающихся пиков, соответствующих различным структурам и колебательным модам [10]. Основную составляющую вышеупомянутой полосы D часто называют D_1 (симметрия A_{1g}). Характер этой полосы связан с наличием дефектов [12, 13]. Другие пики, вызванные неупорядоченностью, характерны для частиц сажи и стеклообразного углерода – это соответственно пики D_3 и D_4 , наблюдаемые при 1500 см^{-1} и 1180 см^{-1} [10].

Таким образом, принимая во внимание сложность спектров, становится очевидным, что соотношение кристаллической и аморфной фаз не может быть явно оценено только по соотношению интенсивностей пиков G/D из экспериментальных спектров комбинационного рассеяния в дальнем поле. Наличие в спектре пиков D_2 , D_3 и D_4 неочевидно, если используется спектроскопия комбинационного рассеяния в дальнем поле, и информацию об этих пиках можно получить только путем подгонки спектров методом наименьших квадратов.

Спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния (Tip-Enhanced Raman Spectroscopy – TERS) является мощным аналитическим инструментом, позволяющим выявлять скрытые отдельные пики в композитной полосе благодаря усилению поляризации-зависимого поля [14]. Сильно локализованный дифракционный свет позволяет непосредственно визуализировать неравномерное распределение частиц размером 20–30 нм на полукривых покрытиях.

Кроме того, TERS можно использовать для определения не только структурных особенностей получаемых углеродных покрытий, но и для определения таких мономолекулярных форм углерода, как одностенные и многостенные углеродные нанотрубки, фуллерены и графены. Далее мы приводим результаты двух независимых исследований, проведенных совместно компанией OFS

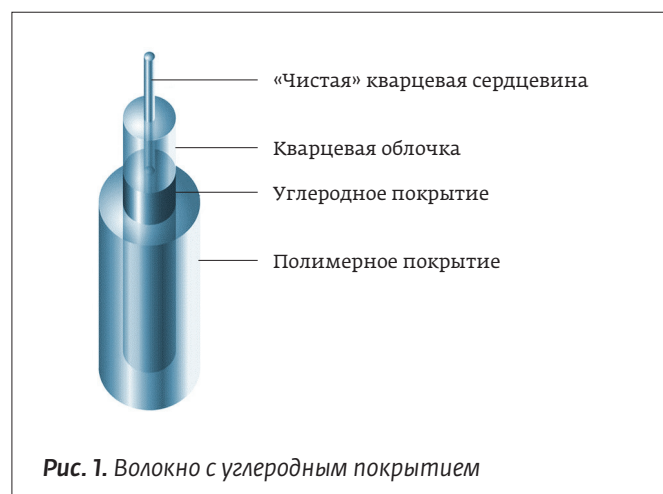


Рис. 1. Волокно с углеродным покрытием

(США) и Казанским федеральным университетом (Россия).

а). Изучение стойкости оптических волокон в агрессивных средах

В литературе имеются примеры изучения влияния газофазной окружающей среды на механическую прочность оптических волокон [15]. В то же время в меньшей степени изучены изменения рабочих характеристик оптических волокон после испытаний в жидких средах при высоких значениях температуры и давления.

Важно понимать, какие именно факторы ограничивают работоспособность оптических волокон в сложных и/или агрессивных условиях. Механизм разрушения всегда представляет первоочередной интерес. Как было сказано выше, разрушение оптического волокна связано либо с дополнительными оптическими потерями, либо с потерей механической прочности. Функциональная способность или неспособность оптического волокна определяется критериями, зависящими от способа применения этого волокна. В качестве такого критерия может выступать, например, оптические свойства интеррогатора или величина механического напряжения, которое волокно должно выдерживать. Разные критерии могут соответствовать разному времени жизни волокна даже при одинаковых условиях эксплуатации. Критерии определяют верхнюю границу температуры использования и период времени непрерывной эксплуатации. Эти два фактора также связаны

друг с другом: при использовании одного и того же критерия функциональности волокнам с более высокими температурными ограничениями соответствуют более короткие времена непрерывного использования и наоборот [16]. Недавно компания OFS проводила исследования [17] механической прочности волокон (50/125 мкм) с градиентным показателем преломления (ПП). Изучаемые волокна имели следующие покрытия:

- двуслойное акрилатное двух типов (DA-1 и DA-2) (оба покрытия являются стандартными и могут использоваться, например, на телекоммуникационных волокнах);
- силиконовое первичное покрытие (SA) и акрилатное вторичное (Si/A);
- гибридное органико-неорганическое покрытие (Hyb);
- полиимидное покрытие (PI);
- углерод/полиимидное покрытие (C/PI).

Также было протестировано 200-микрометровое волокно с «чистой» сердцевиной, фторакрилатной оптической оболочкой и буфером из сополимера этилен-тетрафторэтилена (ETFE). Геометрия данного волокна (HCS) составляла 200/225/500 мкм, числовая апертура $NA=0,37$. Испытания проводились в четырех жидкостях – дистиллированной воде, искусственной морской воде, парафиновом масле и изопропиловом спирте (IPA). Моделирование морской воды осуществлялось путем добавления морской соли в дистиллированную воду. Были приготовлены два раствора: один с соленостью 3,5% (концентрация, обнаруженная в мор-

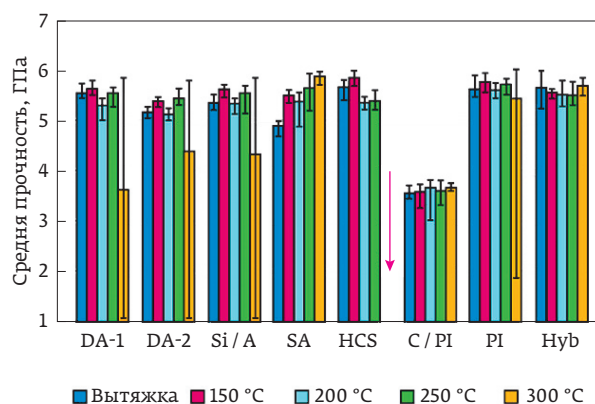


Рис. 2. Прочность оптических волокон до и после 10-дневного воздействия парафинового масла при давлении 13,8 МПа и температуре до 300 °С (столбики ошибок показывают диапазон наблюдаемых значений)

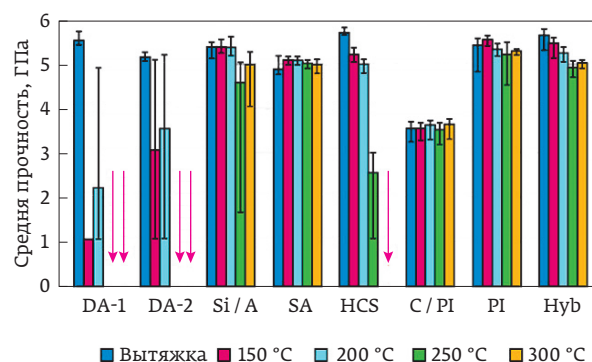


Рис. 3. Прочность оптических волокон до и после 7-дневного воздействия в изопропиловом спирте при давлении 10,3 МПа и различных температурах (столбики ошибок показывают диапазон наблюдаемых значений)

ской воде), а другой с соленостью 7%. Некоторые из полученных результатов представлены на рис. 2 и рис. 3.

Следует отметить, что наблюдения проводились в течение относительно короткого промежутка времени (7–14 дней). Если при определенных условиях (температура/давление) после нескольких дней испытаний волокно не потеряло механической прочности, это вовсе не означает, что данный тип волокна выдержит в подобных условиях более длительные периоды воздействия (месяцы или годы).

Стойкость оптических волокон, применяемых в сложных условиях эксплуатации, например, в нефтяных скважинах на суше или под водой, зависит от множества факторов, включая тип покрытия, окружающую среду, температуру, давление и время использования. Старение оптических волокон с восемью различными покрытиями в различных жидкостях, позволило ранжировать покрытия волокон по их стабильности в различных средах. Волокна с покрытиями DA-1 и DA-2 телекоммуникационного класса оказались наиболее уязвимыми во всех исследованных средах, в то время как волокна с покрытием C/PI были признаны наиболее стабильными. В изопропиловом спирте и парафиновом масле было обнаружено, что волокна с покрытиями SA и H₂O обладают самой высокой стойкостью. Было также обнаружено, что полимерное покрытие и кварцевое стекло растворяются в воде при температуре выше 200 °С, в то время как углеродное покрытие защищает волокно от полного растворения в воде.

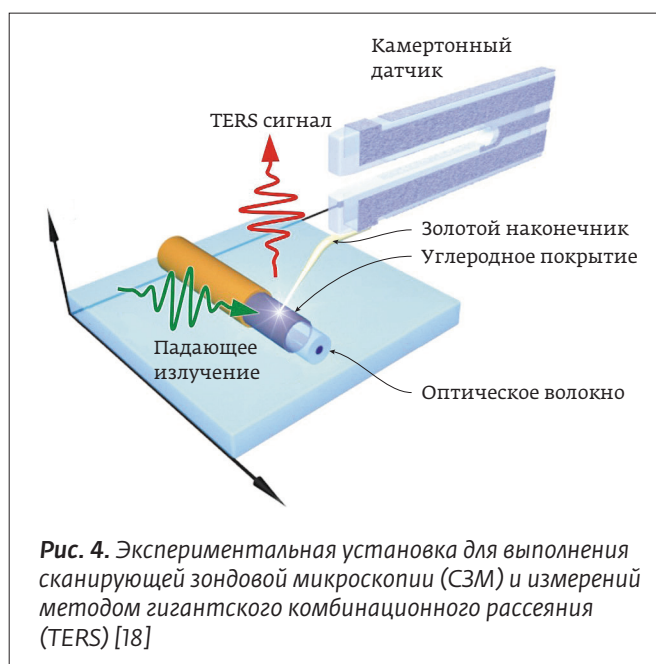
6). Исследование характеристик волокон с помощью Рамановской спектроскопии дальнего и ближнего поля

В работе [18] были исследованы оптические волокна производства компании OFS с углеродным покрытием различной толщины и диаметром кварцевой оболочки 125 мкм. Углеродные покрытия нанесли методом химического осаждения из паровой фазы (CVD), применяя один и тот же газ-прекурсор. Единственной переменной величиной была скорость потока газа в CVD-реакторе. Рассмотрены 2 типа образцов: (а) волокна, изготовленные с углеродным покрытием без нанесения полимерного покрытия, и (б) волокна с углеродным и акрилатным покрытиями. В последнем случае, перед измерениями методами AFM и комбинационного рассеяния полимерный материал удаляли

из образцов, погружая их в горячую (140 °С) серную кислоту с последующим промыванием в деионизированной воде.

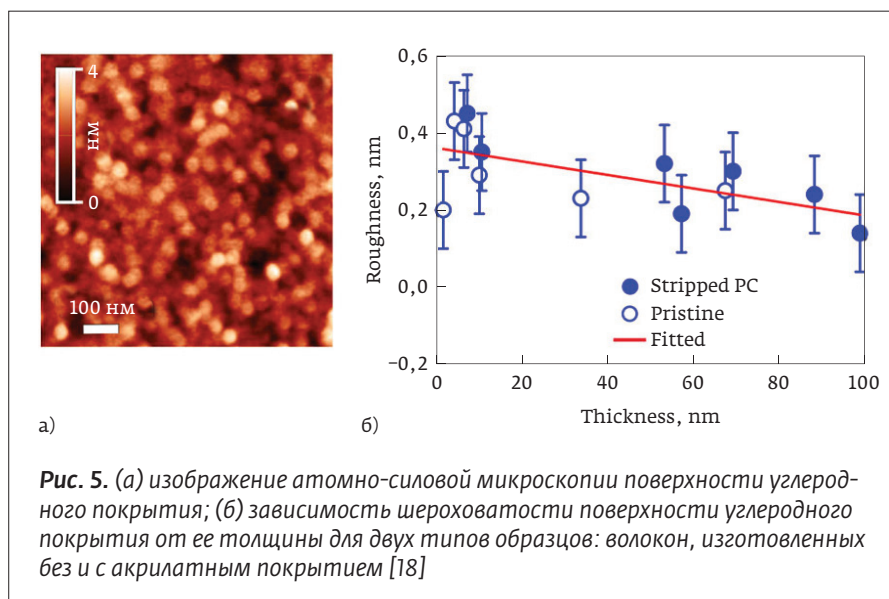
Все оптические и спектроскопические измерения были выполнены с помощью гибридного рамановского спектрометра с SPM-оборудованием NTEGRA SPECTRA (NT-MDT, Россия). AFM-изображения поверхности волокна были получены с использованием жестких кантилеверов (коэффициент жесткости 80 Н/м, резонансная частота 400 кГц, VIT_P, NT-MDT), работающих в контактном режиме. Для регистрации спектров комбинационного рассеяния в дальнем и ближнем поле использовали линейно поляризованный лазерный пучок с двумя длинами волн 532 и 632,8 нм соответственно. Объектив (увеличение 100×, числовая апертура NA 0,7) фокусировал коллимированный лазерный пучок на поверхности образца, а обратно-рассеянный свет направлял в спектрометр (конфигурация 180°). Мощность лазера, использованного в спектроскопических экспериментах, составила около 1 мВт, что соответствует интенсивности 1 МВт/см². Время экспозиции составляло 30 с. Спектры комбинационного рассеяния регистрировались в диапазоне 150–2000 см⁻¹ с разрешением около 3 см⁻¹ с использованием камеры Newton EMCCD (ANDOR, Ирландия), охлажденной до -100 °С.

С помощью спектроскопии TERS можно оценивать и контролировать поляризацию ближнего поля, создаваемого оптической наноантенной, которая подвергается воздействию лазерного излу-



чения. Направление поляризации ближнего поля зависит от свойств оптических наномантенн (часто называемых наконечниками): их формы, размеров и ориентации относительно направления поляризации падающего света. Метод поляризационно-зависимого анализа расфокусированной визуализации [14] дает возможность определить направление поляризации ближнего поля. Важно отметить, что конусообразные наконечники не подходят для проведения поляризационной оптической микроскопии ближнего поля. Для этой цели удобно использовать верхушку сферической формы в виде наночастиц с изотропной поляризуемостью. Альтернативный подход заключается в том, чтобы согнуть наконечник, как показано на рис. 4, таким образом, чтобы направления поляризации в плоскости и вне плоскости падения (перпендикулярные друг другу) в равной степени вносили вклад в усиление поля.

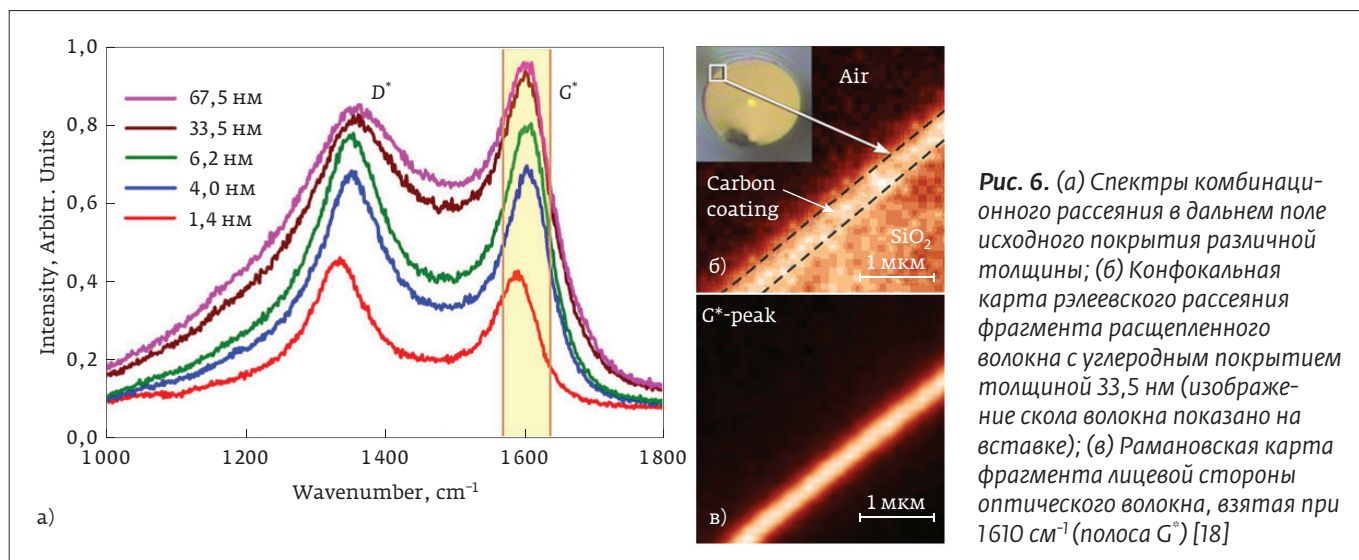
На рис. 5а представлено АФМ-изображение поверхности углеродного покрытия, содержащей кристаллические и аморфные области. Нерегулярная структура поверхности, усеянная углеродными частицами, свидетельствует о высокой степени аморфизации. Как следует из рисунка 3б, шероховатость поверхности демонстрирует почти линейную зависимость от толщины покрытия. Для исследуемых образцов значения шерохова-



тости медленно падают с увеличением толщины покрытия. Эту тенденцию можно интерпретировать как последовательное преобразование фазы углеродного слоя из перколированной фазы в твердую. Также на рис. 5а показаны средние размеры углеродных частиц, составляющие около 20 ± 5 нм. Средняя шероховатость оценивается примерно в $0,3 \pm 0,1$ нм.

С помощью спектроскопии комбинационного рассеяния в работе была выявлена морфология углеродного покрытия. Спектры комбинационного рассеяния оптических волокон, покрытых углеродным слоем различной толщины, приведены на рис. 6а.

Стоит отметить, что наличие углеродного слоя можно также непосредственно визуализировать на



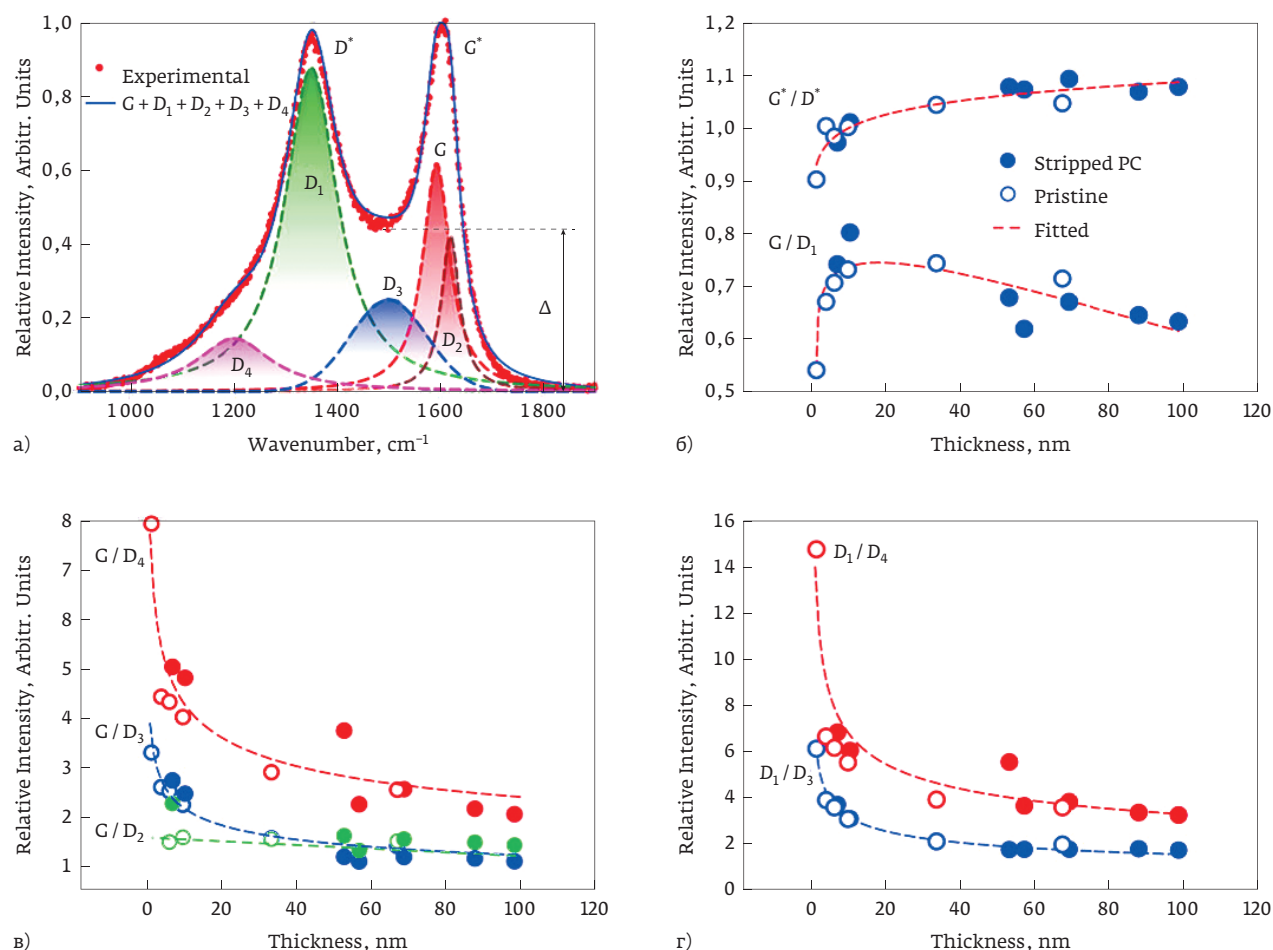


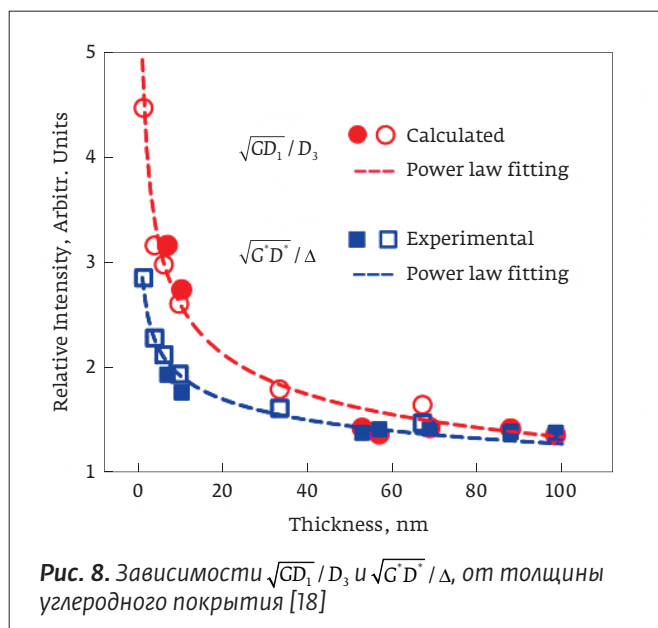
Рис. 7. (а) Спектр комбинационного рассеяния углеродного слоя толщиной 6,2 нм с длиной волны возбуждения 532 нм (красные точки) и сумма четырех Лоренцевых (G , D_1 , D_2 , D_4) и одной Гауссовой компонент (D_3 ; синяя кривая); (б–г) соотношения G^*/D^* и G/D_1 ; (в) G/D_2 , G/D_3 и G/D_4 . (д) D_1/D_4 и D_1/D_3 (для расчетов использовались интегральные интенсивности компонент. Исследовались образцы двух типов: изготовленные без и с полимерным покрытием [18])

поверхности скола волокна с помощью конфокальной оптической микроскопии и КР-микроскопии в дальнем поле (рис. 6б, в). Оптическое изображение поверхности волокна показано на вставке к рис. 6б. Рамановский сигнал получен из спектральной области, отмеченной желтой полосой с центром в 1610 см^{-1} . Яркий графитовый край свидетельствует о наличии углерода в структуре слоя.

Наблюдается перераспределение между графитоподобной полосой G и неупорядоченной полосой D : полоса G становится более интенсивной с увеличением толщины углеродного слоя (рис. 6а). Ранние исследования показывают, что это связано с повышенным образованием кристаллического графита в структуре слоев [10].

Предполагается, что полосы G , D_1 , D_2 и D_4 имеют лоренцеобразную форму и расположены на частотах 1590 ; 1350 ; 1620 ; и 1200 см^{-1} , тогда как полоса D_3 имеет гауссову форму и достигает максимума при 1500 см^{-1} [10]. На рис. 7а показано разложение спектрального контура на пять отдельных полос. Синяя сплошная кривая – это сумма всех пиков.

На рис. 7б показано отношение интенсивности пиков G^*/D^* , полученное из неразделенных спектров углеродных покрытий, в зависимости от толщины слоя. Как следует из предыдущих исследований [19], его монотонный рост свидетельствует об увеличении доли графитоподобного углерода в структуре слоев. Поскольку шероховатость немного уменьшается с толщиной покрытия, можно сделать вывод, что для защиты оптических волокон от проникновения водорода и воды

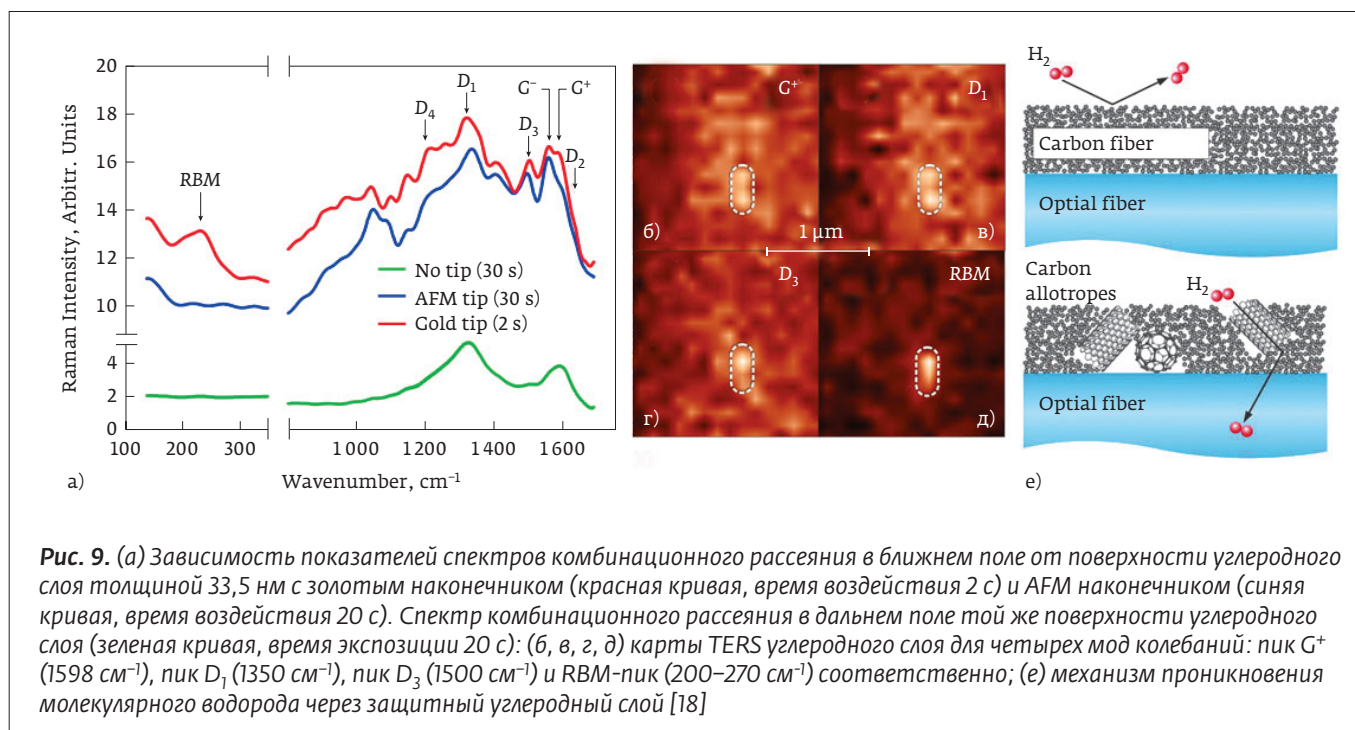


предпочтительнее использовать более толстые покрытия.

Чтобы оценить долю аморфной фазы, была выбрана полоса D_3 , которая может быть определена либо математической подгонкой (как показано на рис. 7а), либо экспериментально, например, с помощью дифференциальной спектроскопии, или методом TERS [20, 21]. Далее можно использовать среднее геометрическое из соотношений G/D_3 и D_1/D_3 , то есть $\sqrt{GD_1}/D_3$.

К сожалению, для расчета $\sqrt{GD_1}/D_3$ приходится раскладывать экспериментальные спектры на отдельные компоненты, что может быть несколько неоднозначным. Тем не менее, есть способ избежать этой проблемы. В работе [5] вводится следующий эмпирический параметр порядка $\sqrt{G^*D^*}/\Delta$ (где Δ – провал между полосами G^* и D^* , как показано на рис. 6а). Важно отметить, что этот параметр измеряется непосредственно по исходным спектрам комбинационного рассеяния и, следовательно, удобен для практического использования. На рис. 8 представлена зависимость параметров $\sqrt{GD_1}/D_3$ и $\sqrt{G^*D^*}/\Delta$ от толщины покрытия. Обе кривые демонстрируют абсолютно одинаковую тенденцию, а именно – сильные изменения при толщине покрытия ниже 40 нм и относительно медленные изменения при толщине выше 50 нм.

Таким образом, в начальном приближении оптические волокна с углеродным покрытием могут быть охарактеризованы с помощью спектроскопического индикатора $\sqrt{G^*D^*}/\Delta$ [18]. Для проведения измерений TERS использовался линейно поляризованный свет с длиной волны 632,8 нм. Следует помнить, что возбуждение более длинной волны приводит к относительному ослаблению полосы G^* и одновременному усилению полосы D^* , как показано на рис. 9а (зеленая кривая). Это в основном обусловлено резонансными эффектами неупорядоченных колебаний.





Из-за подавленной полосы G^+ можно отчетливо наблюдать полосу D_3 при 1500 см^{-1} . Очевидно, что интенсивность полосы может быть дополнительно увеличена с помощью ближней инфракрасной накачки. Введение золотого наконечника в сфокусированный лазерный луч приводит к гигантскому усилению комбинационного сигнала. Сигналы TERS, полученные с помощью золотого наконечника и наконечника AFM, представлены на рис. 9а красной и синей кривыми соответственно. Спектры TERS были взяты из областей, отмеченных пунктирным овалом на рис. 9б – е.

В спектрах TERS явно видна полоса $200\text{--}270\text{ см}^{-1}$ – это проявление RBM-моды углеродных нанотрубок (CNT). Широкая полоса состоит из нескольких отдельных пиков, чувствительных к диаметру d_{CNT} . Используя эмпирическое выражение $d_{\text{CNT}} = A/\nu$ (RBM) (где $A = 248\text{ см}^{-1}\cdot\text{нм}$, а ν (RBM) – частота наблюдаемой полосы), мы можем оценить диаметры CNT, которые варьируются в диапазоне $0,9\text{--}1,8\text{ нм}$. Важно, что неразрешенная широкая полоса скорее всего связана с образованием конических CNT, а не цилиндрических нанотрубок. Другими словами, диаметр таких структур постоянно меняется. Это поразительная находка, раскрывающая появление одного из возможных типов углеродных аллотропов в структуре слоев. Двойная структура графитоподобной полосы, состоящей из пика G^+ и пика G^- при 1598 и 1570 см^{-1} , является еще одним подтверждением того, что этот углеродный аллотроп в спектре может соответствовать трубкам CNT. Широкий и высокоинтенсивный G -пик, приписываемый тангенциальным валентным колебаниям C–C вдоль окружности трубки, является признаком ее металлической природы [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование серии оптических волокон с углеродным покрытием методами атомно-силовой микроскопии (AFM) и спектроскопии комбинационного рассеяния света дальнего и ближнего поля показало наличие по меньшей мере пяти комбинационных пиков первого порядка в области $1000\text{--}2000\text{ см}^{-1}$.

Нанесение полимерного покрытия на углеродный слой и его дальнейшее удаление при помощи кислоты не оказывает влияния на шероховатость и спектроскопические параметры покрытия.

Исследования при помощи метода комбинационного рассеяния TERS подтвердили сложную структуру Рамановской D-полосы первого порядка, отнесенной к неупорядоченным колебаниям графитовой решетки. В частности, этот метод позво-

ляет выделить другие углеродистые фазы, например, углеродные нанотрубки.

Наличие углеродных аллотропов в защитном углеродном слое указывает на дополнительные пути проникновения водорода и воды. Влияние аллотропов может быть уменьшено путем увеличения толщины углеродного слоя.

Метод TERS обогащает спектроскопический анализ для различения углеродных аллотропов и их неравномерного распределения по поверхности оптического волокна с нанометровой точностью. Кроме того, он позволяет визуализировать скрытые пики в композитных спектрах для улучшения характеристик их разложения на элементарные компоненты.

Результаты экспериментов и исследований предоставлены компанией OFS (США), являющейся дочерней компанией Furukawa Electric Company (Япония).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. Reinsch and J. Hennings. Temperature-dependent characterization of optical fibers for distributed temperature sensing in hot geothermal wells. *Meas Sci Tech.* 2010; 21: 094022.
2. A. Mendez, T. F. Morse (Eds) *Specialty Optical Fibers Handbook*. Elsevier Academic Press, Burlington. 2007.
3. G. Bolognini, A. Hartog. *Opt. Fiber Technol.* 2013; 19: 678.
4. K. Suh, C. Lee. *Opt. Lett.* 2008; 33: 1845.
5. В.Б. Ромашова, М.О. Жукова, Н.В. Буров. Обзор радиационно-стойких волокон от зарубежных и отечественных производителей. *Фотон-Экспресс*. 2018; 4(148): 12–14.
V. B. Romashova, M. O. Zhukova, N. V. Burov. Obzor radiacionno-stojkih volokon ot zarubezhnyh i otechestvennyh proizvozhitelej. *Foton-Ekspress*. 2018; 4(148): 12–14.
6. O. Beyssac, B. Goffe, J. P. Petit, E. Froigneux, M. Moreau, J. N. Rouzaud, *Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc.* 2003; 59: 2267.
7. C. R. Kurkjian, J. T. Krause, M. J. Matthewson, J. *Lightwave Technol.* 1989; 7: 1360.
8. H.-L. Le. *Opt. Eng.* 2003; 42: 969.
9. S. T. Shiue, H. H. Hsiao, T. Y. Shen, H. C. Lin, K. M. Li. *Thin Solid Films*. 2005; 483: 140.
10. A. Sadezky, H. Muckenhuber, H. Grothe, R. Niessner, U. Pöschl, *Carbon* 2005; 43: 1731.
11. G. G. Hoffmann, G. De With, J. Loos. *Macromol. Symp.* 2008; 265: 1.
12. A. Jorio, R. Saito, J. H. Hafner, C. M. Lieber, M. Hunter, T. McClure, G. Dresselhaus, M. S. Dresselhaus. *Phys. Rev. Lett.* 2001; 86: 1118.
13. N. Hayazawa, T. Yano, H. Watanabe, Y. Inouye, S. Kawata. *Chem. Phys. Lett.* 2003; 376: 174.
14. T. Mino, Y. Saito, P. Verma. *ACS Nano*. 2014; 8: 10187.
15. C. R. Kurkjian and M. J. Matthewson. Mechanical strength and reliability of glass fibers. In *Specialty Optical Fibers Handbook*. New York: Elsevier. 2007; 735–743.
16. A. A. Stolov et al. Thermal stability of specialty optical fibers. *J. Lightwave Tech.* 2008; 26(Issue 20): 3443–3451.
17. A. A. Stolov. Testing Optical Fiber: Undersea and Downhole Applications, *Photonics Spectra*. 2019.
18. Kharintsev, Sergey S.; Saparina, Svetlana V.; Stolov, Andrei A.; Li, Jie; Fishman, Alexandr I. Sensing carbon allotropes in protective coatings on optical fibers with far- and near-field Raman spectroscopy and microscopy. *Journal of Raman Spectroscopy*. 2017; 48(10): 1346–1355.
19. H. C. Lin, S. T. Shiue, Y. M. Chou, T. C. Wu. *Thin Solid Films*. 2007; 516: 114.
20. X. Shi, N. Coca-López, J. Janik, A. Hartschuh. *Chem. Rev.* 2017; 117: 4945.
21. S. Jiang, Y. Zhang, R. Zhang, C. Hu, M. Liao, Y. Luo, Z. Dong, J. G. Hou. *Nat. Nanotechnol.* 2015; 10: 865.

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ВОЛОКОННОЙ ОПТИКЕ

2019

Памяти академика Е.М. Дианова

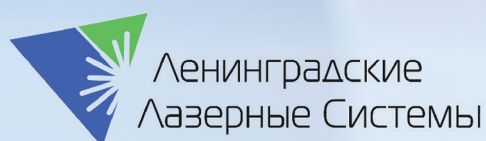
Пермь, 8-11 октября 2019 г.

Регистрация до 12 сентября 2019 г.
на сайте: www.fibopt.ru/rfo2019/

Тематика конференции

- Волоконные световоды;
- Волоконно-оптические кабели;
- Волоконно-оптические системы связи и передачи информации;
- Компоненты и устройства волоконной оптики;
- Волоконные лазеры и усилители;
- Волоконно-оптические датчики и системы измерения физических величин;
- Наноматериалы и нанотехнологии в волоконной оптике;
- Радиофотоника;
- Нанофотоника и агробифотоника;
- Другие актуальные вопросы современной волоконной оптики и смежных областей.

Генеральный спонсор



Спонсор



Организаторы



ФОТОНИКА

