

08,11

Структурные особенности и электронные свойства углеродных наностенок

© Р.Р. Исмагилов^{1,2}, В.И. Клещ^{1,2}, Е.А. Образцова^{1,3}, А.Н. Образцов^{1,2}, Ю.П. Свирко¹

¹ Балтийский федеральный университет имени И. Канта,
Калининград, Россия

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

³ Московский физико-технический институт,
Долгопрудный, Россия

E-mail: ismagil@polly.phys.msu.ru

Поступила в Редакцию 29 июля 2026 г.

В окончательной редакции 3 августа 2026 г.

Принята к публикации 1 сентября 2026 г.

Исследованы особенности наностенок, имеющих нанометровую толщину и поперечные размеры микрометрового масштаба. С помощью просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения выявлено, что на кромках углеродных наностенок параллельно расположенные слои графена попарно соединены друг с другом. Образующаяся при этом петлеобразная атомная структура обеспечивает увеличение механической стабильности наностенок за счет дополнительной прочной связи между слоями и химической инертности за счет отсутствия оборванных связей. Сравнение спектров энергетических потерь электронов, полученных для различных областей наностенок, показывает, что электронные свойства их атомной структуры аналогичны графиту за исключением кромок пластинчатых кристаллитов, в которых наблюдается повышенная концентрация атомов с алмазным типом гибридизации атомных орбиталей. Выявленные закономерности структуры имеют важное значение для объяснения особенностей электронных свойств и разработки методов применения пленок, состоящих из углеродных наностенок в электронике, оптоэлектронике, электрохимии и других областях.

Ключевые слова: CVD, углеродные наностенки, оборванные связи, алмазный тип гибридизации атомных орбиталей.

DOI: 10.61011/FTT.2026.09.63917.10453

1. Введение

Разнообразные наноразмерные углеродные образования привлекают внимание исследователей как с фундаментальной научной точки зрения, так и в связи с их потенциальными практическими применениями. Их физико-химические свойства изменяются в широких пределах от тех, которые соответствуют планарным структурам на основе графена, до трехмерных алмазных структур, образованных sp^2 и sp^3 гибридизованными атомами углерода, соответственно. В обоих случаях атомы углерода в каждом слое объединяются в гексагональные структуры, и отличие между графитом и алмазом состоит в том, что для идеального случая sp^2 гибридизации (графен) атомы находятся в одной плоскости, а в случае sp^3 гибридизации (алмаз) атомная плоскость имеет регулярную гофрировку в двух планарных направлениях с характерным масштабом, равным межатомному расстоянию. Аналогичные различия между отдельными идеально плоскими и гофрированными атомными слоями имеют место для графена и графана, представляющего собой гидрогенизированный графен [1]. Различия физико-химических свойств графита и алмаза, а также графена и графана могут, таким образом, рассматриваться как результат отклонения от идеально

плоской топологии в расположении атомов. Для алмаза и графана это отклонение достигает максимальной величины, формируя поверхность с минимально возможным радиусом, равным межатомному расстоянию.

Любое меньшее по величине отклонение направления межатомных связей от случая идеально плоской структуры, состоящей из гексагональных ячеек, образованных атомами углерода в графене, также приводит к отклонению параметров, характеризующих свойства материала (прежде всего электронные), от тех, которые соответствуют идеально плоскому случаю. Соответствующие изменения наблюдаются, например, для свободных слоев графена в результате его волнообразных тепловых колебаний [2], для фуллеренов, в которых искривление атомного слоя сопровождается наличием ячеек с числом атомов, отличным от шести [3], для углеродных нанотрубок, свойства которых зависят от диаметра и угла закрутки цилиндрически искривленного слоя графена [4], и для других углеродных наноструктур.

Углеродные наностенки, которые представляют собой совокупность нескольких плоских атомных слоев графена [5], в простейшем случае не содержат искривленных структур и, соответственно, их свойства должны изменяться, по мере увеличения количества слоев, от идеального графена к монокристаллу графита. Как пра-

вило, углеродные наностенки рассматриваются в виде массивов, формирующих тонкие пленки и покрытия на поверхности подложек. Отдельные наностенки, известные также под названиями „лепестки“ (petal), „чешуйки“ (flakes), и состоящие из них пленки, называемые „petal-like carbon“ [6] мезопористые нанографитные слои [7,8] и т.п., обладают набором свойств, делающих их привлекательными для различных применений. В частности, высокое аспектное отношение и электрическая проводимость отдельных наностенок позволяют создавать высокоэффективные автоэмиссионные источники электронов (катоды) для различных электровакуумных устройств (см., например, [9]), практически полное поглощение оптического излучения в широком спектральном диапазоне в сочетании с высокой электропроводностью и подвижностью носителей заряда делает пленки из наностенок перспективными для создания оптоэлектронных детекторов и преобразователей оптической энергии (см., например, [10]), а их химическая инертность, высокая электропроводность и пористость перспективны для использования таких пленок в электрохимических устройствах (см., например, [11]) и биомедицинских технологиях (см., например, [12]).

В ходе исследований углеродных наностенок было выявлено, что, по крайней мере, в некоторых из них присутствуют фрагменты в виде искривленных слоев графена, расположенных на кромках пластинчатых кристаллитов нанометровой толщины. Такие искривления в виде петлеобразных структур возникали при высокотемпературной (2000–2800 °C) термической обработке многослойных графеновых чешуек (см., например, [13]), а также непосредственно в процессе формирования углеродных наностенок осаждением из газовой фазы (chemical vapor deposition — CVD) при температуре около 900 °C (см., например, [11,14]). Такие петлеобразные структуры могут состоять из нескольких искривленных атомных слоев [13] или попарно соединять соседние графеновые плоскости [11,14]. Следует отметить, что наблюдение петлеобразных структур производилось с помощью просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (high resolution transmission electron microscopy — HR TEM) в виде изображений, показывающих расположение атомов углерода в определенном поперечном сечении, находящемся в фокальной плоскости микроскопа. При этом смещение фокальной плоскости может вызывать переход к другому поперечному сечению, расположение атомов в котором отличается, в результате чего петлеобразные структуры не обнаруживаются или оказываются сформированы между другими парами (или группами) слоев. С одной стороны, это затрудняет наблюдение такой структурной особенности, но, с другой стороны, служит свидетельством того, что петлеобразные образования, соединяющие соседние атомные слои, имеют ограниченную протяженность вдоль кромки углеродных наностенок. Эта особенность может объяснять повышенную устойчивость углеродных наностенок к воздействию сильных электрических полей в ходе автоэлектронной эмиссии, а также заметное

увеличение стабильности автоэмиссионных катодов на основе углеродных наностенок, по сравнению с аналогичными по составу и структуре графитными материалами, отдельные атомные слои в которых легко разделяются (см., например, [15]). Соединение соседних слоев обеспечивает дополнительную связь между соседними слоями и препятствует их расщеплению под воздействием сильных электрических полей, используемых для создания автоэмиссии. Аналогично этому происходит увеличение стабильности углеродных наностенок при их использовании в электрохимических устройствах [11,13]. Кроме этого, снижение числа оборванных связей на кромках нанографитных стенок из-за соединения соседних слоев увеличивает их стабильность по отношению к воздействию агрессивных химических сред, которые могут иметь место в электрохимических и биомедицинских применениях [11,12].

Наличие в составе углеродных наностенок искривленных графеновых структур должно приводить к соответствующим локальным изменениям электронных свойств. В предельном варианте, соответствующем петлеобразным структурам, попарно связывающим соседние графеновые слои, атомы, входящие в состав таких структур, расположенных на кромках углеродных наностенок по своим электронным характеристикам могут оказаться ближе к sp^3 гибридованному углероду (т.е. алмазу), чем к sp^2 графиту [16]. Относительное количество таких атомов в составе наностенок крайне мало, что делает невозможным или чрезвычайно сложным их обнаружение с помощью традиционно используемых при изучении углеродных материалов аналитических методик (например, комбинационного рассеяния света, фотоэлектронной спектроскопии и др.). При этом слой атомов на кромках наностенок может оказывать существенное влияние на поверхностно-чувствительные эффекты и соответствующие применения, включая, например, автоэлектронную эмиссию [14,15], электрохимические и биомедицинские характеристики [11,12]. В данной работе углеродные наностенки исследовались с помощью спектроскопии характеристических потерь энергии электронами (Electron Energy Loss Spectroscopy — EELS) для получения прямых экспериментальных свидетельств о наличии на кромках углеродных наностенок атомов с гибридизацией, отличающейся от составляющих основную часть этих образований атомов с графитоподобной sp^2 гибридизацией.

2. Экспериментальные условия и материалы

Для исследований использовались нанографитные пленки, полученные при осаждении углерода на кремниевые подложки из газовой смеси метана и водорода, активированной разрядом постоянного тока. Методика и условия осаждения подробно описаны ранее (см., например, [8–12,14,15]). Полученные образцы пленок анализировались с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) и растровой электронной

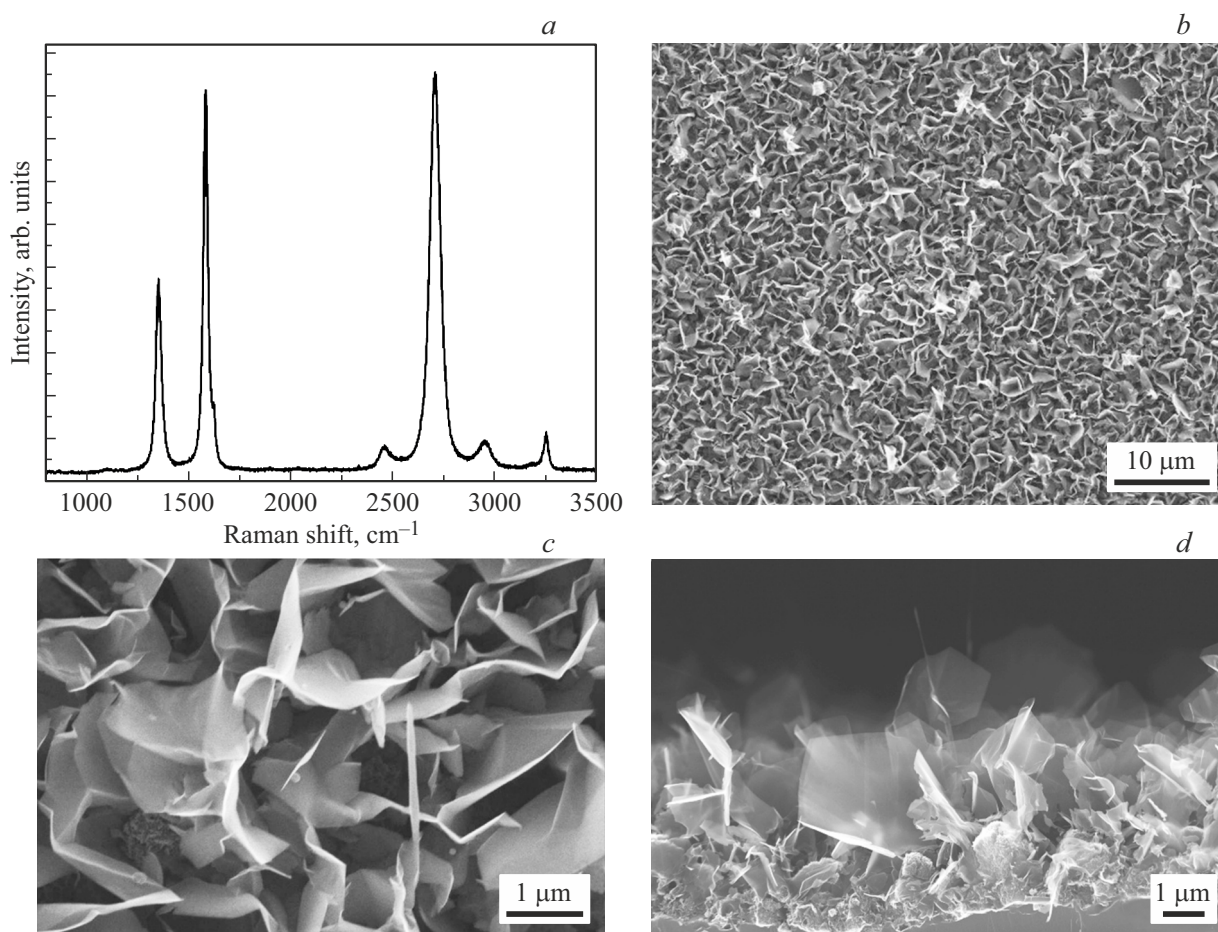


Рис. 1. Типичный спектр комбинационного рассеяния света (*a*) и электронно-микроскопические изображения, полученные для поверхности нанографитной пленки (*b, c*) с различными увеличениями и для поперечного скола образца (*d*).

микроскопии (РЭМ). Для этого использовались соответственно спектрометр U1000 Jobin Yvon и микроскоп LEO Supra 55VP. Для возбуждения спектров КРС использовался аргоновый лазер с длиной волны 488 nm. Анализ с помощью РЭМ производился для поверхности и поперечного скола нанографитной пленки, нанесенной на кремниевую подложку.

Также проводились исследования с помощью метода просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Для получения образцов нанографитных пленок, которые были бы прозрачны для зондирующего электронного пучка, кремниевая подложка с пленкой раскалывалась на клинообразные фрагменты, которые крепились эпоксидным клеем на стандартные кольцевые держатели ПЭМ так, чтобы их острая кромка и расположенные на ней углеродные наностенки оказывались примерно в центре держателя и с плоскостью, ориентированной перпендикулярно оси электронного пучка. ПЭМ-изображения высокого разрешения для поперечного сечения углеродных стенок (с плоскостью, ориентированной вдоль электронного пучка) этого типа были получены ранее (см. работы [11,14]). Разрешающая способность микроскопа LEO 912 AB Omega, использовавшегося в

данной работе недостаточна для получения изображений отдельных атомных слоев и в ходе исследований были получены обзорные изображения, дифракционные электронограммы и спектры характеристических потерь энергии электронами (EELS). При этом постоянная прибора (LEO 912AB Omega) определялась по электронограммам золота при ускоряющем напряжении 100 kV и составляла $2\lambda L = 174/4 \text{ \AA} \cdot \text{mm}$ (длина волны де-Бройля электронов $\lambda = 0.0370 \text{ \AA}$, условная длина проекционной системы $L = 4714 \text{ mm}$). В работе использовалась функциональная возможность микроскопа LEO 912 AB Omega, позволяющая получать изображения объектов в режиме фильтрации электронов по энергии.

3. Результаты и их обсуждение

Характерные спектры КРС, а также РЭМ-изображения поверхности пленок и их поперечного сечения, полученные с различными увеличениями, показаны на рис. 1.

Спектр КРС (см. рис. 1, *a*) содержит линии первого порядка *G* (на частоте 1580 cm^{-1}) и *D* (на частоте

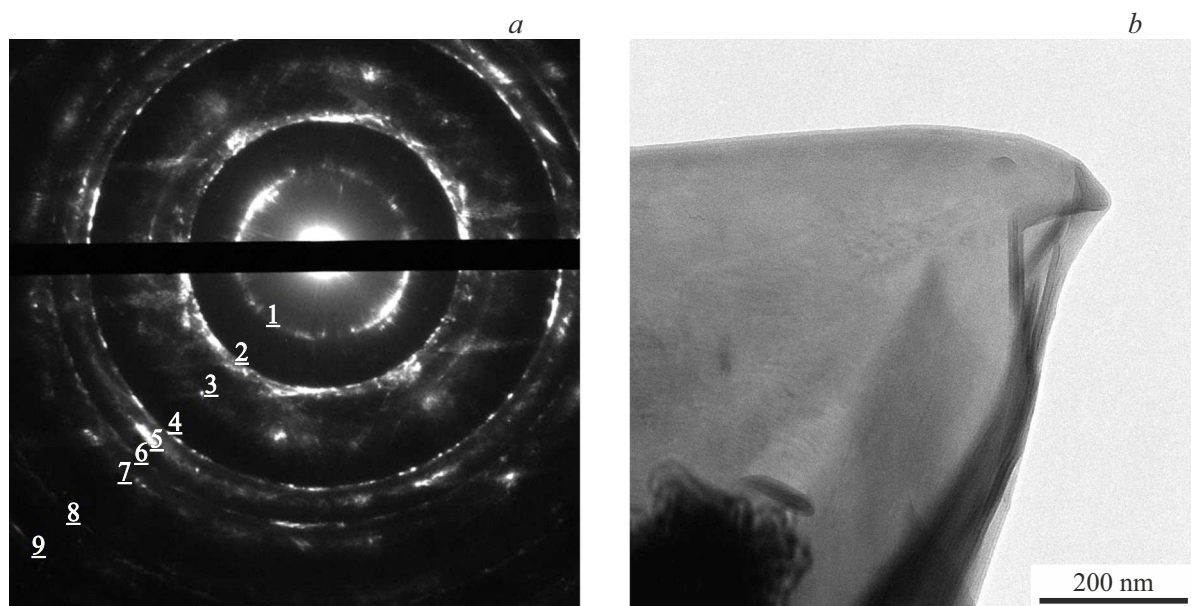


Рис. 2. Электронограмма (*a*) и изображение (*b*) отдельной углеродной наностенки. На электронограмме пронумерованы кольцевые структуры, параметры которых представлены в таблице.

1350 см^{-1}), и несколько линий в диапазоне от 2250 до 3500 см^{-1} , соответствующие рассеянию второго порядка. Спектральное положение, ширина и интенсивности линий соответствуют хорошо упорядоченным кристаллитам графита, состоящим из нескольких атомных слоев графена (называемым иногда „малослойным“ графеном). Спектры регистрируются для макроскопически большой области диаметром около 2 мкм , соответствующей диаметру сфокусированного пучка возбуждающего лазерного излучения, в которую попадает несколько отдельных углеродных наностенок. Детальный анализ спектров КРС для таких материалов был проведен ранее (см., например, [17]). Обзорные РЭМ-изображения (рис. 1, *b*) показывают, что на масштабах в несколько микрометров пленки можно считать однородными. При этом толщина составляющих их отдельных кристаллитов (наностенок) достаточно мала для сквозного прохождения электронного пучка (см. рис. 1, *c* и 1, *d*).

Типичный результат дифракции электронного пучка при прохождении через отдельные наностенки, регистрируемой с помощью ПЭМ, представлен в виде электронограммы на рис. 2, которая содержит систему концентрических колец или групп рефлексов, равноудаленных от центра микродифракционной картины и соответствующих межплоскостным расстояниям в кристаллической структуре. Расстояние между плоскостями, ответственными за образование рефлексов может быть найдено [18] используя формулу $d = 2\lambda L/D$, где D — диаметр кольца на электронограмме, или расстояние между соответствующими рефлексами; L — условная длина проекционной оптической системы; λ — длина волны электрона, определяемая с учетом релятивистского эффекта. Полученные межплоскостные расстояния приведены в таблице.

Межплоскостные расстояния и индексы Миллера, соответствующие дифракционным кольцам на рис. 2, *a*

№ кольца	d , Å	d_{theory} , Å	(hkl)
1	3.38	3.35	(002)
2	2.10	2.13	(100)
3	1.66	1.68	(002)
4	1.20	1.21	(111)
5	1.14	1.15	(112)
6	1.06	1.08	(200)
7	0.99	0.99	(114)
8	0.79	0.79	(121)
9	0.70	0.72	(300)

При этом путем сопоставления экспериментальных данных (d) с наиболее близкими по значению теоретическим значениям (d_{theory}) определялись индексы Миллера (h, k, l) соответствующих атомных плоскостей в соответствии с известной методикой (см., например, [19]). Экспериментальные данные совпадают с теоретическими вычислениями в пределах ошибки измерений, обусловленной, в первую очередь, конечной шириной экспериментально регистрируемых дифракционных колец. Результаты исследования дифракции электронов подтверждают, что кристаллическая структура углеродных наностенок соответствует параллельным слоям графена, упакованным по типу гексагонального графита.

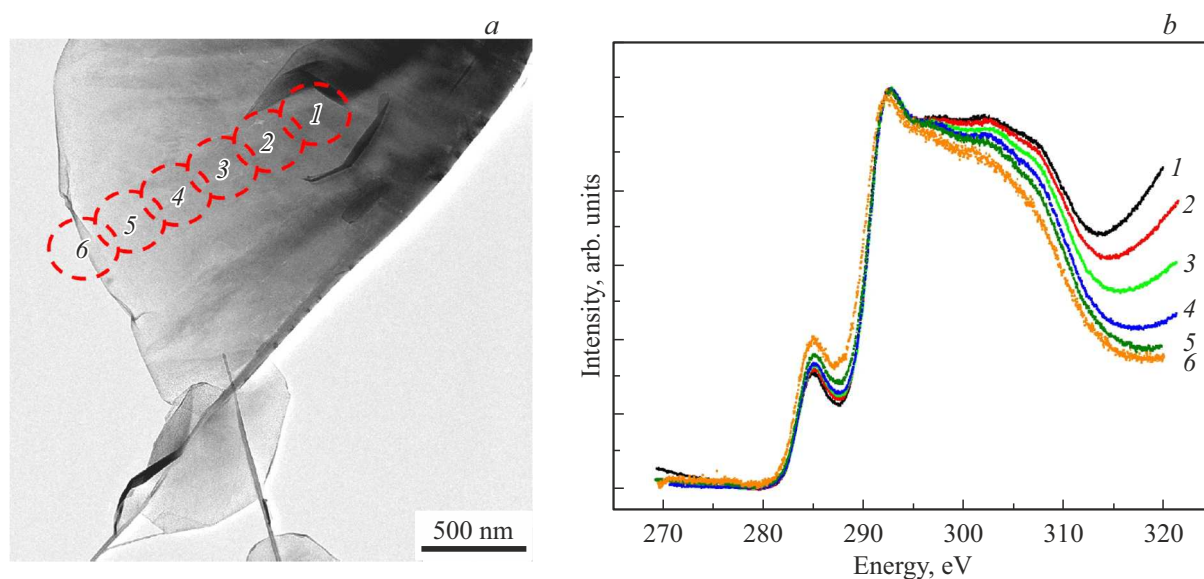


Рис. 3. Пример изображения отдельной углеродной наностенки, полученного с помощью ПЭМ, с отмеченными на нем положениями и размерами зондирующего электронного пучка (*a*) и EELS-спектры, полученные для областей, отмеченных на ПЭМ-изображении с номерами, соответствующими номеру области (*b*).

EELS измерения производились для локальных областей на поверхности отдельных наностенок с помощью электронного пучка с минимально возможным диаметром, устанавливаемым с помощью соответствующей диафрагмы. Перемещение диафрагмы в плоскости, перпендикулярной оси электронного пучка, позволяло выбирать анализируемую область. Пример взаимного расположения таких областей на поверхности отдельной углеродной наностенки в процессе измерений представлен на рис. 3, *a*. Области для анализа выбирались таким образом, чтобы провести сравнительный анализ вдоль линии, перпендикулярной одной из кромок углеродной наностенки. Интенсивность сигнала, формирующего электронные спектры EELS, монотонно уменьшалась при переходе от внутренних областей наностенки к ее периферии (кромке), что может объясняться соответствующим изменением ее толщины.

Сопоставление спектров, зарегистрированных для различных областей на поверхности наностенки свидетельствует о перераспределении плотности электронных состояний, соответствующих $1s \rightarrow \pi^*$ (около 285 eV) и $1s \rightarrow \sigma^*$ (в диапазоне от 293–310 eV) переходам в электронной подсистеме углеродного материала. Для сопоставления полученные спектры нормировались по величине наиболее интенсивного пика, соответствующего переходу $1s \rightarrow \pi^*$ (около 293 eV) (см. рис. 3, *b*). При таком представлении очевидно, что доля электронных состояний, соответствующих переходам $1s \rightarrow \sigma^*$ (около 285 eV) увеличивается при смещении зондирующего электронного пучка из центральной области наностенки к ее кромке. Одновременно с этим интенсивность сигнала и доля соответствующих переходов $1s \rightarrow \sigma^*$ уменьшается. При этом наиболее заметное уменьшение

наблюдается для электронных переходов в состояния зоны σ^* , лежащей выше уровня Ферми, с большими значениями энергии. При постоянстве толщины наностенки такое перераспределение плотности электронных состояний может указывать на изменение доли атомов с различной гибридизацией.

Используя известные подходы (см., например, [20–22]) было проведено сравнение спектров EELS для количественной оценки доли атомов с различной гибридизацией. Для этого спектры, полученные для углеродных наностенок, сравнивались с полученными в аналогичных условиях для высокоупорядоченного пиролитического графита, содержание sp^2 гибридизованного углерода в котором принималось равным 100%. Интенсивности соответствующих пиков в спектрах определялись как площади под кривой с гауссовым профилем, которыми аппроксимировалась их форма. Для пика, соответствующего переходу $1s \rightarrow \pi^*$ (около 285 eV) при аппроксимации использовалась одна функция Гаусса, а для пиков, соответствующих переходам $1s \rightarrow \sigma^*$ (в диапазоне от 293–310 eV), — четыре в соответствии с распределением плотности состояний в σ^* зоне [22]. Суммарная интенсивность для последнего случая получалась сложением площадей под четырьмя кривыми. Также производилось усреднение данных, полученных для нескольких отдельных углеродных наностенок. Результат проведенного таким образом анализа указывает на то, что в центральной области наностенок доля sp^2 гибридизованных атомов углерода составляет около 90%, а в их периферийной области около 75%.

Для более точной локализации областей с различными соотношениями sp^2 и sp^3 гибридизованных атомов производилась регистрация изображений наностенок с

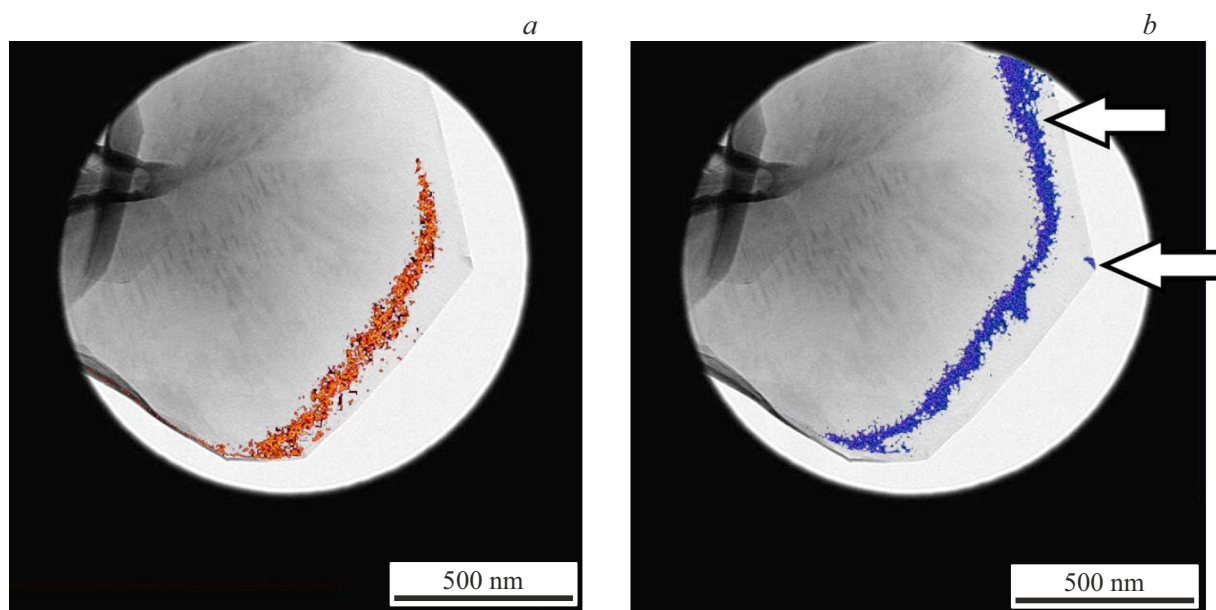


Рис. 4. Наложенные на микрофотографию углеродной наностенки распределения областей, соответствующие электронным переходам $1s \rightarrow \pi^*$ (a) и $1s \rightarrow \sigma^*$ (b). Стрелками отмечены области с явным превышением доли переходов, соответствующих sp^3 гибридизации атомов углерода.

использованием энергодисперсионных фильтров микроскопа LEO 912 AB Omega. Для этого энергетическая ширина щели анализатора устанавливалась равной 10 eV. Для получения изображений, создаваемых электронами, соответствующими переходам $1s \rightarrow \pi^*$, положение центра щели анализатора устанавливалось на 285 eV. Для формирования изображений электронами, соответствующими переходам $1s \rightarrow \sigma^*$, положение центра щели анализатора устанавливалось на 298 eV. Для исключения фонового сигнала предварительно производилась регистрация изображений с щелью анализатора, установленной на значениях 220 и 250 eV. При анализе сигнал фонового изображения вычитался с помощью программных средств микроскопа LEO 912 AB Omega. Результат такого анализа представляет собой набор точек, соответствующих определенным элементам светочувствительной матрицы микроскопа, с яркостью соответствующей интенсивности электронного пучка в заданном диапазоне значений характеристических потерь энергии. Вычитание фона и предварительная калибровка с помощью высокоупорядоченного пиролитического графита позволяют выявить локализацию атомов, для которых степень гибридизации отклоняется от идеальной (100%) sp^2 . На рис. 4, a распределение таких атомов показано для случая использования энергетического фильтра, соответствующего переходам $1s \rightarrow \pi^*$, а на рис. 4, b для случая использования энергетического фильтра, соответствующего переходам $1s \rightarrow \sigma^*$. В обоих случаях полученные распределения наложены на изображение, полученное без использования фильтров, которое может считаться фоновым уровнем сигнала.

Представленные на рис. 4 распределения являются результатом сложения двух противоположно направленных факторов. С одной стороны, увеличение толщины наностенки в ее центральной части приводит к увеличению фона и снижению уровня сигнала, регистрируемого с помощью энергетической фильтрации. С другой стороны, при уменьшении толщины наностенок в их периферийной области интенсивность сигнала снижается ниже порогового уровня чувствительности матрицы, используемой для его регистрации. Таким образом, профиль распределения соответствует ожидаемому профилю изменения значения толщины наностенки. При этом отличия в профилях для переходов разного типа отражают распределение атомов с различным типом гибридизации. Заметные отличия в этих распределениях отмечены стрелками на рис. 4, b и могут свидетельствовать об относительном увеличении в этих областях доли sp^3 гибридизованных атомов. Наиболее примечательной является область, расположенная на кромке нанографитной стенки (нижняя стрелка на рис. 4, b). В этой части толщина наностенки минимальна и уровень сигнала близок к пороговой чувствительности матрицы. При этом регистрируемые переходы электронов свидетельствуют о наличии атомов с sp^3 гибридизацией, которая может быть следствием образования петлеобразных структур в результате попарного соединения графеновых слоев. Аналогичные отличия в распределении для других областей (верхняя стрелка на рис. 4, b) также могут быть следствием наличия петлеобразных структур с учетом изменения толщины наностенки. Однако в этом случае возможно проявление эффектов, связанных с изменени-

ем толщины и фонового сигнала, а также дефектности кристаллической структуры.

4. Заключение

Проведенный с помощью EELS анализ показывает, что углеродные наностенки, полученные при осаждении из газовой фазы, представляют собой хорошо упорядоченные образования из нескольких слоев графена в виде пластинчатых кристаллитов с поперечными размерами в несколько микрометров и толщиной в несколько нанометров. Толщина таких наностенок максимальна в их центральной области и снижается на их периферии. В составе наностенок, состоящих, в основном, из графитоподобного sp^2 гибридного углерода, отмечается наличие атомов с sp^3 гибридизацией, которые могут быть следствием образования изогнутых графеновых структур. Наиболее высокий уровень концентрации таких sp^3 гибридных атомов отмечается на кромке наностенок, что согласуется с экспериментальными данными и моделью, предполагающими формирование попарных соединений графеновых слоев. Такое попарное соединение атомных слоев проявляется в увеличении механической и химической стабильности углеродных наностенок, а также в изменении электронных характеристик в локальных областях на их кромках. Полученное в работе экспериментальное подтверждение таких особенностей представляется важным для выявления механизмов, определяющих физико-химические свойства, углеродных наностенок, и объясняющих связанные с их использованием эффекты, а также для обеспечения контролируемого создания углеродных материалов с характеристиками, требуемыми для различных практических применений.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-72-31032).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D.C. Elias, R.R. Nair, T.M.G. Mohiuddin, S.V. Morozov, P. Blake, M.P. Halsall, A.C. Ferrari, D.W. Boukhvalov, M.I. Katsnelson, A.K. Geim, K.S. Novoselov. *Science* **323**, 610 (2009). DOI: 10.1126/science.1167130
- [2] A. Fasolino, J.H. Los, M.I. Katsnelson. *Nat. Mater.* **6**, 858 (2007). DOI: 10.1038/nmat2011
- [3] Л.Н. Сидоров, М.А. Юровская, А.Я. Борщевский, И.В. Трушков, И.Н. Иоффе. *Фуллерены*. Издательство „Экзамен“, М. (2005). 688 с.
- [4] И.И. Кулакова, Г.В. Лисичкин. *Химия нанотрубок, графен, нанотрубки, наноалмаз. ТЕХНОСФЕРА*, М. (2025). 368 с.
- [5] M. Hiramatsu, M. Hori. *Carbon Nanowalls. Synthesis and Emerging Applications*. Springer (2010). 168 с.
- [6] Y. Ando, X. Zhao, M. Ohkohchi. *Carbon* **35**, 1, 153 (1997).
- [7] S.K. Srivastava, A.K. Shukla, V.D. Vankar, V. Kumar. *Thin Solid Films* **492**, 1–2, 124 (2005).
- [8] А.Н. Образцов, А.П. Волков, И.Ю. Павловский. *Механизм холодной эмиссии электронов из углеродных материалов. ПЖЭТФ* **68**, 1, 56 (1998)
- [9] V.I. Kleshch, R.R. Ismagilov, V.V. Mukhin, A.S. Orekhov, A.S. Filatyev, A.N. Obratsov. *Nanotechnology* **33**, 415201 (2022). DOI: 10.1088/1361-6528/ac7def
- [10] P.A. Obratsov, G.M. Mikheev, S.V. Garnov, A.N. Obratsov, Yu.P. Svirko. *Appl. Phys. Lett.* **98**, 091903 (2011). DOI:10.1063/1.3559928
- [11] T.V. Magdesieva, P.V. Shvets, O.M. Nikitin, E.A. Obratsova, F.T. Tuyakova, V.G. Sergeyev, A.R. Khokhlov, A.N. Obratsov. *Carbon* **105**, 96 (2016). DOI: 10.1016/j.carbon.2016.04.028
- [12] L. Golubewa, H. Rehman, T. Kulahava, R. Karpicz, M. Baah, T. Kaplas, A. Shah, S. Malykhin, A. Obratsov, D. Rutkauskas, M. Jankunec, I. Matulaitiene, A. Selskis, A. Denisov, Yu. Svirko, P. Kuzhir. *Sensors* **20**, 5028 (2020). DOI:10.3390/s20185028
- [13] X. Jia, J. Campos-Delgado, E.E. Gracia-Espino, M. Hofmann, H. Muramatsu, Y.A. Kim, T. Hayashi, M. Endo, J. Kong, M. Terrones, M.S. Dresselhaus. *J. Vac. Sci. Technol. B* **27**, 1996 (2009). DOI: 10.1116/1.3148829
- [14] D.A. Bandurin, S. Mingels, V.I. Kleshch, D. Lutzenkirchen-Hecht, G. Muller, A.N. Obratsov. *App. Phys. Lett.* **106**, 233112 (2015). DOI: 10.1063/1.4922550
- [15] A.N. Obratsov, V.I. Kleshch, E.A. Smolnikova. *Beilstein J. Nanotechnol.* **4**, 493, (2013). DOI:10.3762/bjnano.4.58
- [16] H. Hiura, T.W. Ebbesen, J. Fujita, K. Tanigaki, T. Takada. *Nature* **367**, 148 (1994).
- [17] А.Н. Образцов, Е.А. Образцова, А.А. Золотухин, А.В. Тюрина. *ЖЭТФ* **133**, 3, 654 (2008).
- [18] К. Эндрюс, Д. Дайсон, С. Киоун. *Электроннограммы и их интерпретация*. „Мир“, М. (1971). 256 с.
- [19] Г. Томас, М.Дж. Гориндж. *Просвечивающая электронная микроскопия материалов*. „Наука“, М. (1983). 320 с.
- [20] S.D. Berger, D.R. McKenzie, P.J. Martin. *Philos. Mag. Lett.* **57**, 285 (1988).
- [21] S.R.P. Silva, V. Stolojan. *Thin Solid Films*, **488**, 283 (2005). DOI: 10.1016/j.tsf.2005.04.025.
- [22] J.T. Titantah, D. Lamoen. *Phys. Rev. B* **70**, 075115 (2004). DOI: 10.1103/PhysRevB.70.075115

Редактор А.Н. Смирнов