

Б.Е. Жумадилов^{1,2} ¹Институт прикладных наук и информационных технологий, Алматы, Казахстан²Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстанe-mail: zhumadilovbe@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ СИНТЕЗА НА МОРФОЛОГИЮ И СТРУКТУРУ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТЕНОК НА ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДНОЙ БУМАГИ

В работе исследована эволюция морфологии и структурного состояния углеродных наностенок (УНС), выращенных на углеродной бумаге методом ёмкостно-связанного плазменно-усиленного химического осаждения из газовой фазы (ССР-PECVD), в зависимости от длительности синтеза (30-120 мин) при фиксированных параметрах процесса. Морфология покрытия изучена методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ), а структурные изменения оценены методом Рамановской спектроскопии ($\lambda = 473$ нм). Показано, что на ранней стадии (30 мин) УНС формируются островковым образом на дефектах подложки, а при увеличении времени до 60-90 мин происходит интенсивный вертикальный рост и уплотнение массива. По данным АСМ наблюдается рост средней и среднеквадратичной шероховатости (R_a : с 13.91 до 26.91 нм; R_{ms} : с 18.19 до 34.26 нм при 60-120 мин), тогда как пиковая шероховатость R_z возрастает до 90 мин (с 124.3 до 159.3 нм) и далее насыщается (161.1 нм при 120 мин), что указывает на переход от преимущественно вертикального роста к режиму уплотнения и вторичной нуклеации. Рамановские данные подтверждают увеличение дефектности и разупорядочения sp^2 -сетки с ростом времени синтеза: отношение I_D/I_G возрастает от 0.61 до 1.84, ширина G-пика увеличивается от 24.8 до 40.9 cm^{-1} , а степень графитизации снижается с 40.2 до 27.2 %. Установлено, что около 90 мин достигается оптимальный компромисс между развитием вертикальной морфологии и сохранением структурной упорядоченности углеродной фазы, тогда как 120 мин обеспечивает максимальную дефектность и развитость поверхности, перспективные для приложений, требующих высокой плотности активных центров.

Ключевые слова: углеродные наностены, углеродная бумага, ССР-PECVD, эволюция морфологии, СЭМ, АСМ.

Б.Е. Жумадилов^{1,2}¹Қолданбалы ғылымдар және ақпараттық технологиялар институты, Алматы, Қазақстан²Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан*e-mail: zhumadilovbe@gmail.com

Көміртек қағазының бетіндегі көміртек наноқабырғаларының морфологиясы мен құрылымына синтез ұзақтығының әсері

Бұл жұмыста сыйымдылықпен байланысқан плазмамен күшейтілген химиялық бу фазасынан тұндыру (ССР-PECVD) әдісімен көміртек қағазында өсірілген көміртек наноқабырғаларының (КНҚ) морфологиясы мен құрылымдық күйінің синтез ұзақтығына (30-120 мин) тәуелді эволюциясы, процесс параметрлері тұрақты болған жағдайда, зерттелді. Қаптаманың морфологиясы сканерлеуші электрондық микроскопия (СЭМ) және атомдық-күштік микроскопия (АКМ) әдістерімен зерттелді, ал құрылымдық өзгерістер рамандық спектроскопия ($\lambda = 473$ нм) арқылы бағаланды. Ерте кезеңде (30 мин) КНҚ көміртек қағазының ақаулары аймағында аралдық нуклеация механизмі бойынша қалыптасатыны көрсетілді. Тұндыру уақыты 60-90 мин-қа артқанда наноқабырғалардың қарқынды тік бағытталған өсуі және массивтің тығыздалуы байқалады. АКМ деректері бойынша орташа және орташа квадраттық кедір-бұдырлықтың өсуі анықталды (R_a : 13.91-

ден 26.91 нм-ге дейін; R_{ms} : 18.19-дан 34.26 нм-ге дейін, 60-120 мин), ал пиктік кедір-бұдырлық R_z 90 мин-қа дейін өсіп (124.3-тен 159.3 нм-ге дейін), кейін қанығуға жетеді (120 мин кезінде 161.1 нм). Бұл құбылыс басым түрде тік өсу режимінен тығыздалу және екіншілік нуклеация режиміне ауысуды көрсетеді. Рамандық спектроскопия нәтижелері синтез уақыты артқан сайын sp^2 -көміртек торының ретсізденуі мен ақаулылық деңгейінің ұлғаюын растайды: I_D/I_G қатынасы 0.61-ден 1.84-ке дейін өседі, G-пигінің жартылай биіктігіндегі ені 24.8-ден 40.9 cm^{-1} -ке дейін артады, ал графиттену дәрежесі 40.2 %-дан 27.2 %-ға дейін төмендейді. Шамамен 90 мин синтез уақыты тік морфологияның барынша дамуы мен көміртек фазасының салыстырмалы жоғары құрылымдық реттелуінің оңтайлы үйлесімін қамтамасыз ететіні анықталды, ал 120 мин максималды ақаулылық пен дамыған бет түзіп, белсенді орталықтардың жоғары тығыздығын талап ететін қолданбалар үшін перспективалы болып табылады.

Түйін сөздер: көміртек наноқабырғалары, көміртек қағазы, CCP-PECVD, морфология эволюциясы, СЭМ, АКМ.

B.E. Zhumadilov^{1,2}

¹Institute of Applied Science and Information Technologies, Almaty, Kazakhstan

²Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: zhumadilovbe@gmail.com

Effect of synthesis duration on the morphology and structure of carbon nanowalls on the surface of carbon paper

This work investigates the evolution of the morphology and structural state of carbon nanowalls (CNWs) grown on carbon paper by capacitively coupled plasma-enhanced chemical vapor deposition (CCP-PECVD) as a function of synthesis duration (30-120 min) under fixed process parameters. The surface morphology of the coatings was examined by scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM), while structural changes were evaluated by Raman spectroscopy ($\lambda = 473$ nm). It is shown that at the early stage (30 min) CNWs form via island-like nucleation on defects of the carbon paper substrate, whereas increasing the deposition time to 60-90 min leads to intensive vertical growth and densification of the CNW array. AFM analysis reveals an increase in average and root-mean-square roughness (R_a : from 13.91 to 26.91 nm; R_{ms} : from 18.19 to 34.26 nm for 60-120 min), while the peak-to-valley roughness R_z increases up to 90 min (from 124.3 to 159.3 nm) and then reaches saturation (161.1 nm at 120 min). This behavior indicates a transition from predominantly vertical growth to a regime dominated by densification and secondary nucleation. Raman spectroscopy confirms a progressive increase in defect density and disorder of the sp^2 carbon network with increasing synthesis time: the I_D/I_G ratio rises from 0.61 to 1.84, the G-band full width at half maximum increases from 24.8 to 40.9 cm^{-1} , and the degree of graphitization decreases from 40.2 to 27.2 %. It is established that a synthesis duration of approximately 90 min provides an optimal balance between the development of vertical morphology and the preservation of structural ordering of the carbon phase, whereas 120 min results in maximum defect density and surface development, which is promising for applications requiring a high density of active sites.

Keywords: carbon nanowalls, carbon paper, CCP-PECVD, morphology evolution, SEM, AFM.

Введение

Углеродные наностенки (УНС) были открыты несколько десятилетий назад и в настоящее время рассматриваются как перспективный класс углеродных наноструктур для создания различных функциональных устройств. Несмотря на то что многие физические и

химические свойства УНС уже достаточно хорошо изучены, интерес к данным материалам сохраняется благодаря появлению новых областей применения и возможности целенаправленного управления их структурой и морфологией [1-3]. УНС представляют собой вертикально

ориентированные графеноподобные нанолиты, характеризующиеся развитой удельной поверхностью, высокой плотностью краевых плоскостей и хорошей химической и термической стабильностью [4,5]. Благодаря своим структурным особенностям УНС находят применение в широком спектре областей, включая электроды для суперконденсаторов, гидрофобные и защитные поверхностные покрытия, полевые эмиттеры, сенсорные системы и различные интерфейсные слои [6-9]. Высокая удельная площадь поверхности и открытая архитектура УНС обеспечивают хорошую доступность активных участков и делают данные наноструктуры удобной модельной системой для фундаментальных исследований, направленных на установление взаимосвязи между условиями синтеза, морфологией и структурными характеристиками углеродных материалов [10].

Свойства УНС в значительной степени определяются не только параметрами роста, но и природой подложки, на которой осуществляется их формирование. Углеродная бумага представляет собой проводящий пористый материал, состоящий из переплетённых углеродных волокон, и широко используется в различных электрохимических и энергетических системах. По сравнению с гладкими и жёсткими подложками, такими как кремний или стеклоуглерод, углеродная бумага обладает развитой трёхмерной архитектурой и сложной поверхностной топологией [11,12].

Вместе с тем синтез углеродных наностенок на углеродной бумаге сопряжён с рядом трудностей. Волокнистая и высокопористая структура углеродной бумаги оказывает существенное влияние на процессы зародышеобразования и дальнейшего роста УНС, определяя их плотность, вертикальную ориентацию, толщину и степень однородности. Одним из ключевых параметров синтеза,

напрямую влияющих на эволюцию морфологии и структуры УНС, является длительность роста. Недостаточное время синтеза может приводить к формированию разреженных и неполностью развитых наностенок, тогда как чрезмерно длительный рост способствует утолщению слоя, агломерации наноструктур и изменению дефектной структуры материала. Несмотря на важность данного параметра, систематические исследования, посвящённые изолированному влиянию длительности синтеза на рост УНС на углеродной бумаге, в литературе представлены ограниченно [13,14].

В данной работе УНС были выращены непосредственно на поверхности углеродной бумаги в условиях ёмкостно-связанного плазменно-усиленного химического осаждения из газовой фазы (ССР-PECVD). Время осаждения варьировалось в диапазоне от 30 до 120 мин при фиксированных остальных параметрах процесса, что позволило целенаправленно проследить влияние длительности синтеза на формирование структуры УНС. Для комплексного исследования морфологической и структурной эволюции полученных углеродных наностенок были использованы методы сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ) и Рамановской спектроскопии. СЭМ и АСМ обеспечили детальный анализ изменений морфологии массива УНС, их плотности, характерных размеров и параметров шероховатости поверхности, тогда как Рамановская спектроскопия была применена для оценки степени графитизации, дефектности и эволюции sp^2 -углеродной структуры.

Основной целью работы является установление закономерностей морфологической и структурной эволюции УНС, сформированных на углеродной бумаге, в зависимости от времени синтеза, а также обсуждение возможных механизмов их роста в условиях ССР-PECVD.

Экспериментальная часть

Синтез УНС на углеродной бумаге

УНС были получены на предварительно очищенной углеродной бумаге методом ССР-PECVD в соответствии с методикой, подробно описанным в нашей предыдущей работе [15].

Процесс синтеза осуществлялся при температуре подложки $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ и рабочем давлении порядка 10^{-2} Торр. В качестве исходной газовой смеси использовались метан, водород и аргон с расходами 15, 10 и 15 $\text{см}^3/\text{мин}$ соответственно. Радиочастотный плазменный разряд (13.56 МГц) с мощностью 35 Вт

обеспечивал активацию газовой фазы и инициировал рост углеродных наностенок. Перед осаждением подложка подвергалась предварительной обработке в аргоновой плазме в течение 10 мин, что способствовало очистке поверхности и улучшению адгезии формируемых наноструктур. После завершения процесса образцы охлаждались до комнатной температуры в атмосфере инертного газа, что позволило снизить термические напряжения в сформированном слое УНС.

Методы исследования

Морфология полученных образцов исследовалась с использованием двухлучевого сканирующего электронного микроскопа с сфокусированным ионным пучком (FIB/SEM, Helios 5CX, Thermo Fisher Scientific). Топография поверхности и количественные параметры шероховатости определялись методом атомно-силовой микроскопии (АСМ, Solver Spectrum,

NT-MDT) в полуконтактном режиме с применением кремниевых зондов NSG01 (радиус острия ~10 нм, резонансная частота ~170 кГц). Структурное состояние и колебательные характеристики УНС, исследовались с помощью Рамановской спектроскопии (Solver Spectrum, NT-MDT) с длиной волны возбуждения 473 нм.

Результаты и обсуждение

Изучение морфологии поверхности углеродной бумаги после плазмохимического осаждения УНС позволило установить закономерности их роста в зависимости от временного фактора. На рисунке 1 представлены СЭМ изображения УНС, синтезированных на поверхности углеродной бумаги при различном времени осаждения. На начальном этапе синтеза (30 мин, рис. 1а) наблюдается частичное покрытие углеродной бумаги первичными зародышами. На этой стадии УНС локализованы преимущественно на дефектах и неровностях подложки, что характерно для островкового механизма роста [16,17]. При увеличении времени осаждения до 60 мин (рис. 1б) поверхность углеродной бумаги становится более равномерно покрытой массивом наностенок. Наблюдается рост их плотности и уменьшение межстеночного расстояния, что свидетельствует об активном вертикальном росте первичных УНС. Структуры сохраняют выраженную вертикальную ориентацию, формируя типичную лабиринтную структуру, характерную для УНС [18,19]. Дальнейшее увеличение времени синтеза до 90 мин (рис. 1в) приводит к заметному уплотнению покрытия. Наностенки формируют более плотную и однородную сеть, при этом различия по высоте между отдельными структурами становятся менее выраженными. Одновременно в массиве появляются более мелкие и тонкие элементы, что может указывать на начало вторичного роста – формирование новых наностенок на поверхности уже сформированного слоя [20, 21]. При времени осаждения 120 мин (рис. 1г) морфология покрытия практически стабилизируется. Массив УНС характеризуется высокой плотностью и равномерным распределением по поверхности подложки. Однако существенного увеличения высоты наиболее выступающих структур не

наблюдается, что позволяет предположить замедление вертикального роста первичных наностенок и доминирование процессов вторичного роста.

Для детальной количественной оценки рельефа поверхности были получены АСМ изображения (рис. 2) и рассчитаны параметры шероховатости (табл. 1). При увеличении времени осаждения с 60 до 120 мин наблюдается рост средней (R_a) и среднеквадратичной (R_{ms}) шероховатости поверхности. Значение R_a увеличивается с 13.91 до 26.91 нм, а R_{ms} с 18.19 до 34.26 нм, что свидетельствует о последовательном усложнении микрорельефа и росте эффективной поверхности покрытия. В то же время параметр пиковой шероховатости R_z демонстрирует принципиально иное поведение. Динамика изменения параметра пиковой шероховатости R_z носит нелинейный характер. Между 60 и 90 мин его значение возрастает с 124.3 до 159.3 нм (примерно на 28 %), отражая продолжающийся вертикальный рост наиболее высоких наностенок. Однако при дальнейшем увеличении времени осаждения до 120 мин рост R_z практически прекращается (161.1 нм), несмотря на заметное увеличение R_a и R_{ms} . Такое расхождение в параметров шероховатости указывает на изменение доминирующего механизма роста УНС после 90 мин синтеза. Насыщение R_z свидетельствует о стабилизации максимальной высоты рельефа поверхности, тогда как продолжающийся рост R_a и R_{ms} связан с увеличением плотности наностенок, их утолщением и формированием вторичных структур в межстеночном пространстве [22]. Данные СЭМ наблюдений хорошо согласуются с этим выводом, демонстрируя уплотнение массива и появление вторичных структур без существенного увеличения высоты наиболее выступающих наностенок.

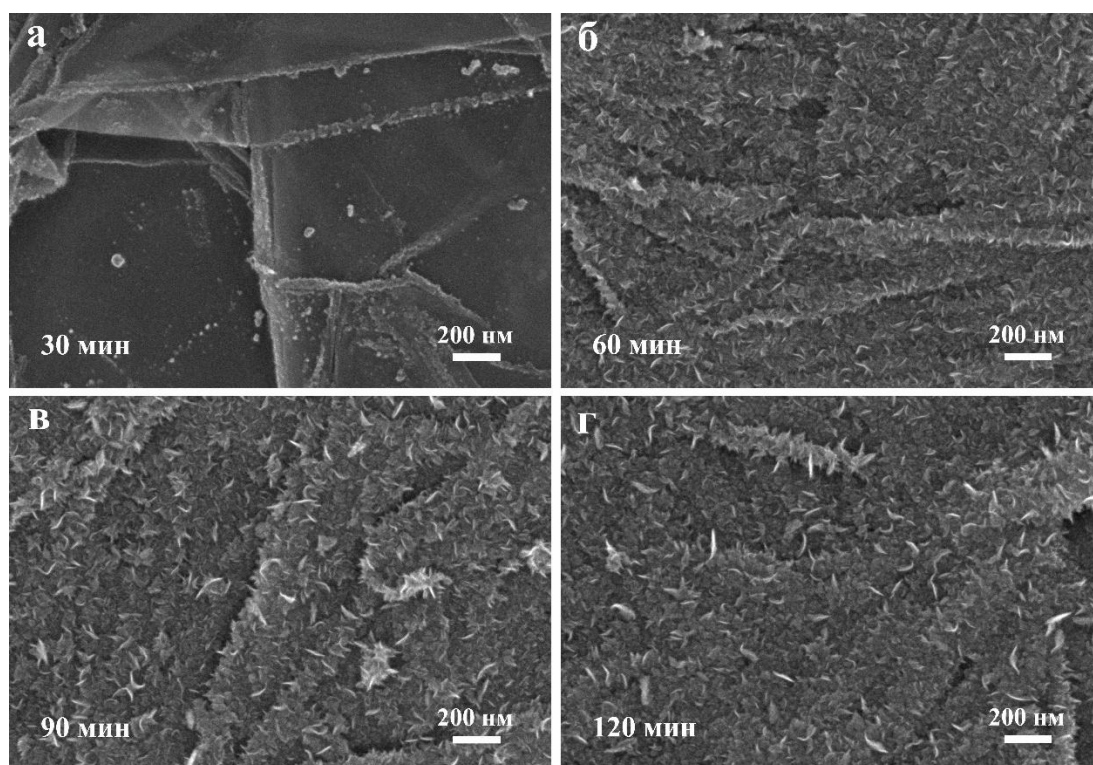


Рисунок 1 – СЭМ-изображения УНС на поверхности углеродной бумаги при различном времени осаждения: а) 30 мин; б) 60 мин; в) 90 мин; г) 120 мин

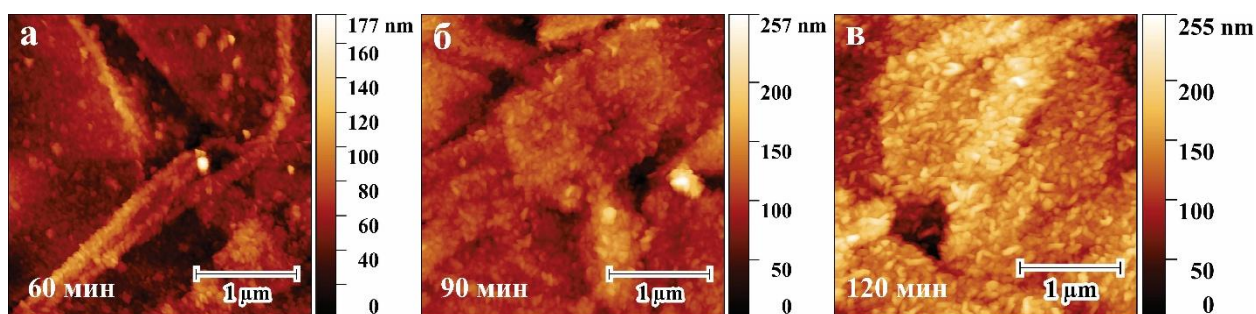


Рисунок 2 – АСМ-изображения углеродных наностенок на поверхности углеродной бумаге при различном времени осаждения: а) 60 мин; б) 90 мин; в) 120 мин

Таблица 1 – Влияние времени осаждения на параметры шероховатости поверхности

| Время осаждения | Средняя шероховатость, R_a , нм | Пиковая шероховатость, R_z , нм | Среднеквадратичная шероховатость, R_{ms} , нм |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---|
| 60 мин | 13.91 | 124.3 | 18.19 |
| 90 мин | 17.71 | 159.3 | 24.06 |
| 120 мин | 26.91 | 161.1 | 34.26 |

В совокупности полученные результаты указывают на наличие оптимального временного интервала синтеза (около 90 мин), при котором достигается максимальное развитие вертикальной морфологии УНС, тогда как дальнейшее увеличение времени осаждения приводит главным образом к уплотнению и структурному усложнению покрытия.

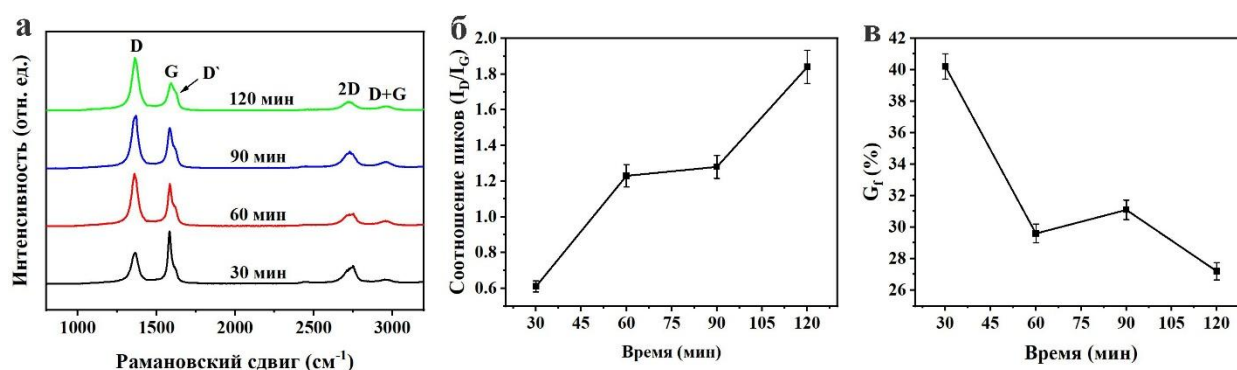


Рисунок 3 – а) Рамановские спектры, б) соотношение интенсивностей I_D/I_G и в) степень графитизации УНС в зависимости от времени роста на углеродной бумаге

Структурные изменения углеродной фазы при увеличении времени синтеза дополнительно подтверждаются спектроскопией комбинационного рассеяния (рис. 3 и табл. 2). Во всех образцах присутствуют характерные полосы D (~ 1361 - 1365 cm^{-1}), G (~ 1583 - 1591 cm^{-1}), D' (~ 1617 - 1621 cm^{-1}), 2D (~ 2725 - 2736 cm^{-1}) и D+G (~ 2958 - 2960 cm^{-1}), типичные для графеноподобного углерода с развитой системой дефектов и краевых состояний, что является ожидаемым для вертикально ориентированных УНС [23,24]. С ростом времени осаждения наблюдается систематическое увеличение дефектности, о чём свидетельствует рост отношения I_D/I_G от 0.61 (30 мин), 1.23-1.28 (60-90 мин) до 1.84 (120 мин) (рис. 3б). Это указывает на увеличение плотности дефектов и краевых участков sp^2 -сетки по мере развития и уплотнения массива УНС [25]. Аналогичную тенденцию демонстрирует отношение $I_{D'}/I_G$ (табл. 2), что подтверждает рост вклада дефектов, связанных с локальными нарушениями и границами доменов. В совокупности увеличение I_D/I_G и $I_{D'}/I_G$ хорошо

согласуется с СЭМ и АФМ-данными: по мере увеличения времени синтеза растет плотность стенок, увеличивается число стыков, изгибов и междоменных границ, а при 90-120 мин усиливается вклад вторичного роста, приводящий к дополнительным дефектным центрам.

Особо показательной является динамика ширины полосы G: FWHM G возрастает от 24.8 cm^{-1} (30 мин) до 30.1-32.7 cm^{-1} (60-90 мин) и достигает 40.9 cm^{-1} (120 мин). Уширение G-полосы отражает увеличение структурной неоднородности и снижение степени упорядочения sp^2 -доменов. Одновременно степень графитизации уменьшается с 40.2 % (30 мин) до 29.6-31.1 % (60-90 мин) и до 27.2 % (120 мин), что подтверждает рост разупорядочения углеродной сетки при длительном осаждении. Сдвиг положения G-пика в область больших волновых чисел (с 1583, до 1591 cm^{-1}) также согласуется с накоплением дефектов и возможным ростом внутренних напряжений в графеноподобных стенках.

Таблица 2 – Параметры Рамановских пиков и степень графитизации УНС

| | 30 мин | 60 мин | 90 мин | 120 мин |
|---|--------|--------|--------|---------|
| Положение пика G (cm^{-1}) | 1583 | 1585 | 1585 | 1591 |
| Положение пика D (cm^{-1}) | 1362 | 1361 | 1362 | 1365 |
| Положение пика D' (cm^{-1}) | 1617 | 1618 | 1618 | 1621 |
| Положение пика 2D (cm^{-1}) | 2736 | 2732 | 2728 | 2725 |
| Положение пика D + G (cm^{-1}) | 2959 | 2958 | 2958 | 2960 |
| FWHM G (cm^{-1}) | 24.8 | 30.1 | 32.7 | 40.9 |
| FWHM D (cm^{-1}) | 51.5 | 46.8 | 46.5 | 48.3 |
| FWHM D' (cm^{-1}) | 26.9 | 23.4 | 24.3 | 23.3 |
| I_D/I_G | 0.61 | 1.23 | 1.28 | 1.84 |
| $I_{D'}/I_G$ | 0.35 | 0.5 | 0.59 | 0.85 |
| I_{2D}/I_G | 0.37 | 0.33 | 0.45 | 0.38 |
| Степень графитизации (G_f , %) | 40.2 | 29.6 | 31.1 | 27.2 |

Таким образом, комплексный анализ данных СЭМ, АСМ и Рамановской спектроскопии свидетельствует о поэтапной эволюции УНС в процессе синтеза. На начальной стадии роста (30 мин) происходит формирование первичных центров нуклеации и относительно более упорядоченных sp^2 -доменов. В интервале 60-90 мин реализуется интенсивный вертикальный рост, приводящий к образованию плотного массива УНС с максимально выраженной вертикальной морфологией, что отражается в увеличении параметра R_z и резком росте отношения I_D/I_G . При дальнейшем увеличении времени синтеза до 120 мин наблюдается стабилизация максимальной высоты рельефа поверхности (насыщение R_z) и переход к режиму

уплотнения структуры и вторичного роста, сопровождающийся максимальным увеличением дефектности и разупорядочения sp^2 -углеродной сетки, что подтверждается ростом I_D/I_G до 1.84 и существенным увеличением ширины пика G. С практической точки зрения, временной интервал около 90 мин может рассматриваться как оптимальный компромисс между развитием вертикальной морфологии и сохранением относительно высокой структурной упорядоченности углеродной фазы, тогда как 120 мин обеспечивает максимальную плотность дефектных центров и наиболее развитую поверхность, что может быть полезно для приложений, где важна высокая реакционная активность и развитая поверхность.

Заключение

УНС были успешно синтезированы на поверхности углеродной бумаги методом ССР-PECVD при варьировании длительности осаждения от 30 до 120 мин. Это позволило проследить временную эволюцию морфологии и структуры покрытия и выявить характерные стадии формирования массива УНС.

На ранней стадии роста (30 мин) наблюдается начальная нуклеация и частичное покрытие подложки с островковым характером роста. При 60 мин формируется более равномерный массив УНС с выраженной вертикальной ориентацией и уменьшением межстеночного расстояния. При увеличении времени синтеза до 90 мин происходит уплотнение покрытия и выравнивание структур по высоте с признаками начала вторичного роста. Дальнейшее осаждение до 120 мин не приводит к существенному увеличению высоты наиболее выступающих наностенок, что указывает на стабилизацию морфологии и доминирование процессов уплотнения и вторичной нуклеации. Данные АСМ свидетельствуют о росте средней и среднеквадратичной шероховатости поверхности при увеличении времени осаждения, отражая увеличение эффективной площади поверхности.

Рамановская спектроскопия показала рост дефектности и снижение степени упорядочения

sp^2 -углеродной сетки с увеличением времени синтеза, что выражается в росте отношения I_D/I_G , увеличении ширины пика G и снижении степени графитизации. В совокупности полученные результаты позволяют рассматривать время осаждения около 90 мин как оптимальный режим, обеспечивающий максимальное развитие вертикальной морфологии при сохранении относительно более высокой структурной упорядоченности, тогда как более длительный синтез приводит к формированию дефектно-богатых, уплотнённых структур с развитой поверхностью.

Благодарности

Особая признательность выражается Немкаевой Р.Р. за помощь в проведении экспериментов методом АСМ и Рамановской спектроскопии. Автор также выражает благодарность Жумадилову Р.Е., Ерланұлы Е. и Габдуллину М.Т. за научные консультации, обсуждение результатов и поддержку в ходе исследования. Настоящее исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR28712419).

Литература

1. C. Zhang, N. Huang, et al., Bifunctional Oxygen Electrocatalyst of Co_4N and Nitrogen-Doped Carbon Nanowalls/Diamond for High-Performance Flexible Zinc-Air Batteries, *Advanced Energy Materials* **13**, 2301749 (2023). <https://doi.org/10.1002/aenm.202301749>

2. A. Olejnik, M. Ficek, M., et al., Tailoring diffusional fields in zwitterion/dopamine copolymer electropolymerized at carbon nanowalls for sensitive recognition of neurotransmitters, *ACS nano* **16**, 13183-13198 (2022). <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c06406>
3. S. Ghodke, M. Murashima, et al., Mechanical properties of maze-like carbon nanowalls synthesized by the radial injection plasma enhanced chemical vapor deposition method, *Materials Science and Engineering: A* **862**, 144428 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144428>
4. N.Q. Minh, N. Van Nong, et al., Synthesis of highly dense and multi-branched carbon nanowalls by two-step growth combining different plasma chemical vapor deposition methods, *Vacuum* **213**, 112118 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112118>
5. D. Deepak, M. Ficek, et al., Boron Doped Carbon Nanowalls as Multifunctional Interfaces for Directional Water Transport and Electrowetting, *Small* **21**, e06074 (2025). <https://doi.org/10.1002/smll.202506074>
6. E. Ghoniem, S. Mori, et al., An efficient strategy for transferring carbon nanowalls film to flexible substrate for supercapacitor application, *Journal of Power Sources* **493**, 229684 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229684>
7. H. Kondo, M. Hori, et al., Controlled synthesis of carbon nanowalls for carbon channel engineering, *Key Eng. Mater.* **470**, 85-91 (2011). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.470.85>
8. L. Huang, S. Harajiri, et al., Enhanced field emission from ultrananocrystalline diamond-decorated carbon nanowalls prepared by a self-assembly seeding technique, *ACS Applied Materials & Interfaces* **14**, 4389-4398 (2022). <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c17279>
9. R. Li, Y. Dong, et al., CsPbBr₃/graphene nanowall artificial optoelectronic synapses for controllable perceptual learning, *Photonix* **4**, 4 (2023). <https://doi.org/10.1186/s43074-023-00082-8>
10. A. Dettlaff, M. Szopińska, et al., sp²-rich dendrite-like carbon nanowalls as effective electrode for environmental monitoring of explosive nitroaromatic, *Chemical Engineering Journal* **493**, 152620 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152620>
11. L. Ouyang, C.H. Hsiao, et al., Fabrication of Ni-Mn LDH/Co₃O₄ on carbon paper for the application in supercapacitors, *Surfaces and Interfaces* **28**, 101574 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101574>
12. W. Guo, J. Kim, et al., Cu-Co-P electrodeposited on carbon paper as an efficient electrocatalyst for hydrogen evolution reaction in anion exchange membrane water electrolyzers, *International Journal of Hydrogen Energy* **46**, 19789-19801 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.120>
13. A.E. Balan, B.I. Bitu, et al., Carbon-nanowall microporous layers for proton exchange membrane fuel cell, *Membranes* **12**, 1064 (2022). <https://doi.org/10.3390/membranes12111064>
14. L. Lv, W. Dai, et al., A mini review: Application of graphene paper in thermal interface materials, *New Carbon Materials* **36**, 930-938 (2021). [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(21\)60093-8](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(21)60093-8)
15. B.Y. Zhumadilov, R.Y. Zhumadilov, et al., Influence of Substrate Type and Synthesis Time on Morphological and Structural Properties of Carbon Nanowalls, *Advanced Physics Research* **4**(12), e00156 (2025). <https://doi.org/10.1002/apxr.202500156>
16. Y. Yerlanuly, R. Zhumadilov, et al., Physical properties of carbon nanowalls synthesized by the ICP-PECVD method vs. the growth time, *Scientific Reports* **11**, 19287 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97997-8>
17. I.S. Hosu, M. Sobaszek, et al., Boron-doped carbon nanowalls as effective electrodes for non-enzymatic electrochemical glucose detection: A novel bimodal EC-SALDI-MS approach, *Materials Today Nano* **30**, 100635 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.mtnano.2025.100635>
18. N.Q. Minh, N. Van Nong, et al., Low-temperature growth at 225° C and characterization of carbon nanowalls synthesized by radical injection plasma-enhanced chemical vapor deposition, *Vacuum* **224**, 113180 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2024.113180>
19. A. Kumar, A. Dager, et al., Synthesis and growth mechanism of vertically aligned graphene sheets with precise control over the number of layers for lithium-oxygen batteries, *Journal of Materials Chemistry A* **12**, 13933-13945 (2024). <https://doi.org/10.1039/D3TA06356A>
20. Y. Yerlanuly, D. Christy, et al., Creation of unique shapes by coordination of alumina nanopores and carbon nanowalls. Fullerenes, *Nanotubes and Carbon Nanostructures* **31**, 295-301 (2023). <https://doi.org/10.1080/1536383X.2022.2146672>
21. T. Ohta, H. Iwata, et al., Power generation characteristics of polymer electrolyte fuel cells using carbon nanowalls as catalyst support material. *C*, **8**, 44 (2022). <https://doi.org/10.3390/c8030044>
22. M. Ficek, B. Dec, et al., Stable field electron emission and plasma illumination from boron and nitrogen Co-doped edge-rich diamond-enhanced carbon nanowalls, *Advanced Materials Interfaces* **8**, 2100464 (2021). <https://doi.org/10.1002/admi.202100464>
23. R. Zhumadilov, et al., In situ raman analysis of carbon nanowalls during electrochemical measurement, *Physical Sciences and Technology* **12**, 57-67 (2025). <https://doi.org/10.26577/phst20251216>
24. S. Kwon, C. Kim, et al., Effect of Ag NPs-decorated carbon nanowalls with integrated Ni-Cr alloy microheater for sensing ammonia and nitrogen dioxide gas, *Journal of Alloys and Compounds* **932**, 167551 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167551>
25. Z. Sun, M. Cho, et al., Electrical characteristics of metal contacts to carbon nanowalls, *ECS Journal of Solid State Science and Technology* **11**, 061012 (2022). <https://doi.org/10.1149/2162-8777/ac6a77>

История статьи: поступила: 29 декабря 2025; принята: 20 января 2026.

Мақала тарихы: түсті: 29 желтоқсан 2025; қабылданды: 20 қаңтар 2026.

Article history: received: 29 December 2025; accepted: 26 January 2026.

Информация об авторе:

Бауыржан Е. Жұмадилов – Научный сотрудник Казахстанско-Британского технического университета Института прикладных наук и информационных технологий, Алматы, Қазақстан, e-mail: zhumadilovbe@gmail.com

Автор туралы мәлімет:

Бауыржан Е. Жұмадилов – Қазақ-Британ техникалық университетінің ғылыми қызметкері, Қолданбалы ғылым және ақпараттық технологиялар институты, Алматы, Қазақстан, e-mail: zhumadilovbe@gmail.com

Information about author:

Bauyrzhan Ye. Zhumadilov – Ms., Researcher, Kazakh-British Technical University, Institute of Applied Science and Information Technologies, Almaty, Kazakhstan, e-mail: zhumadilovbe@gmail.com