

РЕЗЮМЕ. Ёйгириш агрегатлари асинхрон электр юритмаси векторли бошқариш тизимининг хусусиятлари ротор занжирининг вақт доимийси, статор кучланишлари, реактив қувватни хисоблаш, ушбу кўрсаткичларга аналитик ифода асосида мослаштириш кўриб чиқилди.

РЕЗЮМЕ. Рассмотрены особенности векторной системы управления асинхронным электроприводом прядильных агрегатов, постоянная времени роторной цепи, напряжения статора, расчет реактивной мощности, адаптация этих показателей на основе аналитического выражения.

SUMMARY. The features of the vector control system for the asynchronous electric drive of spinning units, the time constant of the rotor circuit, the stator voltage, the calculation of reactive power, and the adaptation of these indicators based on an analytical expression are considered.

ФОРМИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ГРАФИТА МПГ-6 В ЖИДКОЙ СРЕДЕ

Д.Ж.Асанов – ассистент преподаватель

А.Ж.Сайпназарова – магистрант

Н.Р.Давлетова – магистрант

Нукусский государственный педагогический институт имени Ажинияза

Таянч сўзлар: суюқликда лазер абляцияси, углерод нанозаррачалари, МПГ-6 графити, сканерловчи электрон микроскопия, Раман спектроскопияси, морфология.

Ключевые слова: лазерная абляция в жидкости, углеродные наночастицы, графит МПГ-6, сканирующая электронная микроскопия, Рамановская спектроскопия, морфология.

Key words: laser ablation in liquid, carbon nanoparticles, MPG-6 graphite, scanning electron microscopy, Raman spectroscopy, morphology.

Введение. Углеродные наночастицы (УНЧ) представляют значительный интерес благодаря высокой химической стойкости, развитой поверхности и широким возможностям применения в электронике, биомедицине, энергетике и каталитике. Среди физических методов их получения особое место занимает импульсная лазерная абляция в жидкости (ИЛАЖ), позволяющая формировать наночастицы высокой чистоты без использования прекурсоров и обеспечивать контроль их характеристик за счёт варьирования параметров лазерного излучения. Суть метода заключается в воздействии высокоэнергетических импульсов на углеродную мишень, погружённую в жидкость, что приводит к испарению вещества и конденсации наночастиц в растворе. Использование дистиллированной воды исключает контаминацию посторонними примесями, а применение графита марки МПГ-6 обеспечивает стабильность процесса и получение наночастиц различной морфологии. ИЛАЖ обладает рядом преимуществ: экологичность, стерильность, высокая скорость синтеза и возможность направленного управления размерами и структурой образующихся наночастиц.

Цель настоящей работы состояла в исследовании морфологии и структурных характеристик УНЧ, синтезированных из графита МПГ-6 в дистиллированной воде методом ИЛАЖ, а также в изучении влияния параметров лазерного излучения на размерный состав и фазовые модификации материала.

Материалы и методы исследования. Эксперименты проводились с использованием Nd:YAG-лазера LS-2134D ($\lambda = 1064$ нм) в двухимпульсном режиме (интервал 3 мкс, длительность 10 нс, частота 10 Гц, энергия 0,05 Дж/импульс). Плотность мощности изменялась в диапазоне $(1,3-2) \cdot 10^7$ Вт/см², время облучения составляло 30-90 мин. Морфология наночастиц исследовалась методом РЭМ (S-4800), структурные изменения - методом КРС (лазер 532 нм). Морфология углеродных наночастиц и поверхности мишени Импульсное лазерное воздействие оказывает выраженное влияние на поверхность графитовой мишени марки МПГ-6.

Результаты и их обсуждение. В результате облучения наблюдается формирование кратера с

неоднородным рельефом и развитой пористой структурой (рис. 1). Данные изменения отражают протекание интенсивных термических и механических процессов, сопровождающих абляцию. Высокая плотность энергии лазерного излучения приводит к локальному плавлению и последующему быстрому переохлаждению материала в жидкой фазе. Вследствие этого на поверхности мишени образуются зоны с различной степенью разрушения: микротрещины, пористые участки и локальные дефекты. Такие структуры являются характерным признаком эрозивных процессов и подтверждают неравномерность теплового воздействия. Формирование пористого рельефа играет важную роль в механизме генерации углеродных наночастиц. Испарившийся материал конденсируется в растворе, образуя частицы различного размера и формы. Дополнительная модификация поверхности создаёт активные центры, которые ускоряют дальнейший абляционный процесс. Таким образом, морфологический анализ поверхности МПГ-6 демонстрирует высокую энергоёмкость и сложность процессов, определяющих формирование УНЧ.

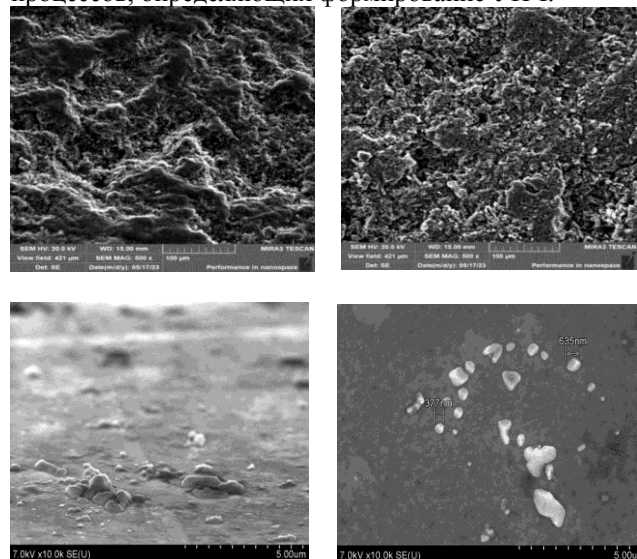


Рис. 1. Сравнение морфологии поверхности МПГ-6 до и после обработки лазерной абляцией.

Тепловые процессы и контроль размера ультрадисперсных наночастиц (УНЧ). Процессы теплопереноса, определяющие характер лазерной абляции, описываются основным уравнением теплопроводности:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho c} \nabla^2 T$$

где T – температура, ρ – плотность вещества, c – удельная теплоёмкость, а ∇^2 отражает пространственную диффузию теплового потока в материале. В результате действия импульсного лазерного излучения из мишени выбрасываются продукты абляции, которые конденсируются в виде ультрадисперсных наночастиц. Их морфология характеризуется широкой дисперсией по размерам (от 30 нм до 1 мкм) и вариациями формы – от сферических до анизотропных структур. Экспериментально были зафиксированы как частицы малого диаметра (20-100 нм), так и более крупные образования размером до ~700 нм по ширине и порядка 1 мкм по длине [1-3]. Размер УНЧ контролируется параметрами лазерного воздействия. Увеличение длительности облучения (30-90 мин) способствует росту среднего размера за счёт пролонгированных процессов нуклеации, кристаллизации и агрегации. Повышение плотности мощности лазера вызывает нелинейное увеличение размеров частиц, что связано с ростом скорости абляции и локального нагрева. Тем самым появляется возможность направленно регулировать морфологию и размерные характеристики синтезируемых наноструктур, как это наглядно демонстрируется на рисунке 2.

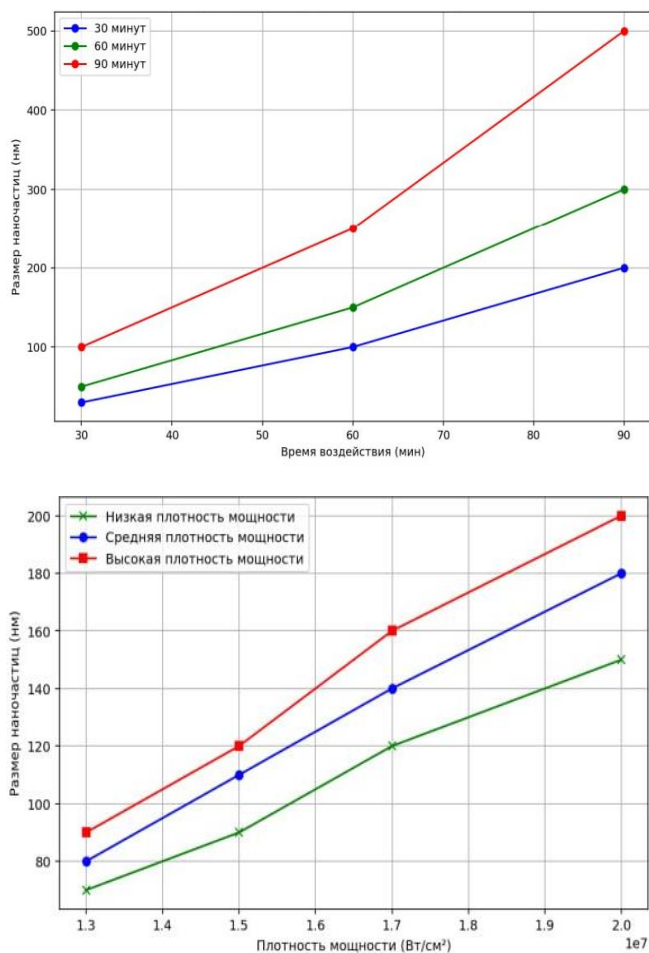


Рис. 2. Влияние времени облучения (а) и плотности мощности (б) лазерного излучения на средний размер УНЧ.

Для изучения структурных изменений углеродного материала, вызванных импульсной лазерной абляцией, использовалась комбинационная спектроскопия (КРС). Этот метод позволяет выявлять особенности кристаллического строения, различать аморфные и упорядоченные фазы, а также фиксировать дефекты решётки. Спектры исходного графита МПГ-6 демонстрировали характерные полосы, соответствующие упорядоченной графитовой структуре. После лазерного воздействия были зарегистрированы новые особенности спектров, указывающие на частичную аморфизацию, появление дефектных состояний и образование нанодисперсных углеродных фаз. Данные изменения обусловлены интенсивным локальным нагревом поверхности мишени и быстрым её охлаждением в жидкой среде, что инициирует перестройку кристаллической решётки и формирование наноструктурированных форм углерода [4-6].

Таким образом, КРС-анализ подтвердил существенные фазовые преобразования материала в результате лазерного синтеза, что хорошо согласуется с результатами морфологических исследований. Полученные спектры представлены на рисунке 3.

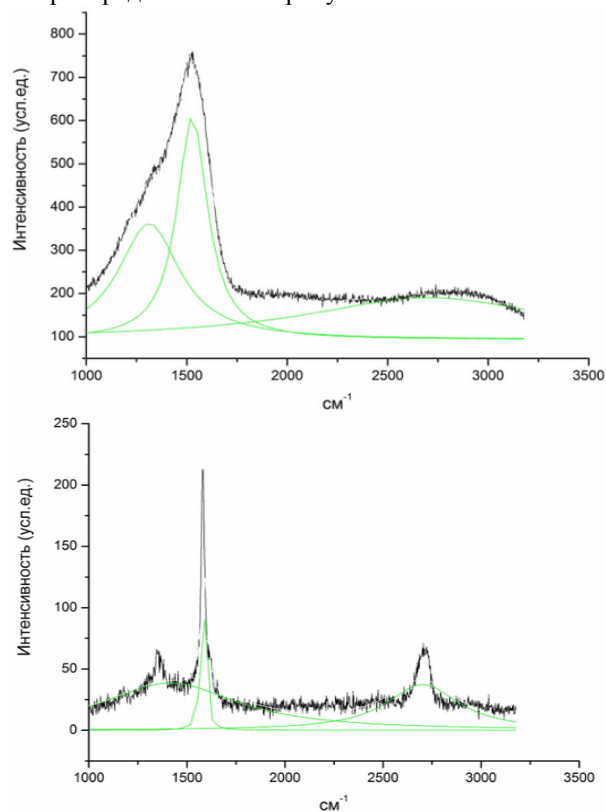


Рис. 3. КРС-спектры графита МПГ-6 до и после лазерной абляции.

При рассмотрении спектров комбинационного рассеяния после проведения лазерной абляции были выявлены характерные особенности, позволяющие судить о структурной перестройке углеродного материала. Наиболее отчётливо проявилась так называемая D-полоса (~1354 см⁻¹), интенсивность которой заметно возросла по сравнению с исходным образцом. Известно, что данный пик ассоциирован с нарушением дальнего порядка в графитовой решётке и связан с присутствием структурных дефектов, границ кристаллитов и областей аморфизации. Значительное усиление D-компоненты однозначно свидетельствует о росте степени разупорядоченности, индуцированной

импульсным лазерным воздействием. Помимо этого, в спектре отчетливо фиксируется 2D-полоса ($\sim 2700 \text{ см}^{-1}$), характерная для систем с преобладанием sp^2 -гибридизованных связей. Наличие данного пика подтверждает сохранение графитоподобного характера строения, несмотря на возникновение дефектов и аморфных участков. Таким образом, результаты КРС указывают на то, что в процессе импульсной лазерной абляции в жидкости происходит частичная структурная модификация углеродного материала с одновременным сохранением его базовой sp^2 -гибридизации [7-10].

Заключение. В данной работе подтверждена эффективность метода импульсной лазерной абляции графита МПГ-6 в воде для получения углеродных наночастиц с регулируемыми характеристиками. Установлено, что варьирование параметров лазерного облучения, в частности времени экспозиции и

плотности мощности, позволяет контролировать размерный диапазон частиц от 30 нм до 1 мкм и формировать их разнообразную морфологию – от сферических до анизотропных структур. Методы растровой электронной микроскопии и комбинационного рассеяния света выявили выраженные морфологические изменения и фазовые преобразования материала, включая дефектообразование, аморфизацию и сохранение sp^2 -гибридизованных связей в структуре наночастиц. Эти результаты указывают на существенное влияние лазерного излучения на внутреннюю организацию углеродного материала.

Таким образом, импульсная лазерная абляция в жидкости зарекомендовала себя как перспективный и экологически безопасный способ синтеза углеродных наночастиц, обладающих потенциалом применения в нанотехнологии, электронике и материаловедении.

Литература

1. Markevich M.I., Kamalov A.B., Asanov D.J., Esbergenov D.M., Kazakbaeva M.A. Specific features of carbon nanoparticle formation under the influence of a laser operating in a double-pulse generation mode. // East european journal of physics. – Ukrain: 2024, № 2. – P. 394-397.
2. Ласковнѐв А.П., Щербакова Е.Н., Анисович А.Г., Маркевич М.И., Журавлѐва В.И., Жигулин Д.В., Асанов Д.Ж. Синтез наноструктур фосфида индия методом импульсной лазерной абляции мишени InP в водной среде. // Вестник Фонда фундаментальных исследований, 2024, №2(108). – С. 162-167.
3. Анисович А.Г., Маркевич М.И., Журавлева В.И., Асанов Д.Ж., Камалов А.Б. Диагностика наночастиц, полученных методом лазерной абляции. // Научно-практический журнал. Неразрушающий контроль и диагностика. № 1/2022. – С. 12-16.
4. Маркевич М.И., Камалов А.Б., Асанов Д.Ж., Нажепова С.Р. Нано и микроструктурирование поверхности никеля и меди на основе кремния при воздействии наносекундным лазерным излучением. // Science and world. Международный научный журнал, 2023, № 5 (117). – С. 60-63.
5. Ласковнев А.П., Маркевич М.И., Журавлева В.И., Камалов А.Б., Асанов Д.Ж. Лазерное структурирование поверхности графита в водной среде. «Fan va ta'limda innovatsion texnologiyalarning istiqbollari» nomli xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya. – Farg'ona: 17-aprel, 2024-yil, 10-12-b.
6. Ласковнев А.П., Маркевич М.И., Журавлева В.И., Асанов Д.Ж., Камалов А.Б. Лазерное воздействие на поверхность Si, InP в водной среде. IX Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии лаплаз-2023». – Москва: Сборник научных трудов. НИЯУ МИФИ, 2023. – С. 42.
7. Симакин А. В., Воронов В. В., Шафеев Г. А. Образование наночастиц при лазерной абляции твердых тел в жидкостях. // Труды института общей физики им. Прохорова, 2004. Т. 60. – С. 83-107.
8. Markevich M.I. In sulphurous liquids under action of chock waves / M.I. Markevich F.A. Piskunov. // High Power Laser Science and Engineering. - 1995. - Czech R. NATO Advanced study institute. – Karlovy Vary. – P. 49.
9. Гончаров В.К., Козадаев К.В., Маркевич М.И., Пузырев М.В., Чапланов А.М. Формирование коллоидных растворов металлов в воде методом лазерной абляции. // Актуальные проблемы физики твердого тела. – Минск: 2009. – С. 381-382.
10. Казилин Е.Е., Маркевич М.И., Конкин С.В., Чапланов А.М., Фолманис Г.Э., Иванов Л.И., Коваленко Л.В. Исследование коллоидных растворов селена, созданных по лазерной технологии. // Перспективные материалы, 2008. №3. – С. 60-63.

РЕЗЮМЕ. Мақолада МПГ-6 графитидан дистилланган сувда импулсли лазер абляцияси усули орқали углерод нанозаррачалари (УНЗ) синтез қилинди. Тадқиқотлар шуни кўрсатдики, лазер нурланишининг давомийлиги ва қувват зичлигини ўзгартириш орқали заррачаларнинг ўлчами (30 нм - 1 мкм) ҳамда морфологиясини назорат қилиш мумкин. Сканерловчи электрон микроскопия ва Раман спектроскопияси натижалари морфологик ўзгаришлар ва структура нуксонларини, жумладан, D ва 2D диапазонларининг яққол ифодаланишини кўрсатди. Импулсли лазер абляцияси усули назорат қилинадиган хусусиятларга эга углерод наноструктураларини олишда самарадорлиги ва экологик хавфсизлиги билан ажралиб туради.

РЕЗЮМЕ. В статье представлены результаты синтеза углеродных наночастиц (УНЧ) методом импульсной лазерной абляции графита МПГ-6 в дистиллированной воде. Установлено, что варьирование времени облучения и плотности мощности позволяет контролировать размер наночастиц (30 нм - 1 мкм) и их морфологию. Растровая электронная микроскопия и комбинационное рассеяние света показали наличие морфологических изменений и структурных дефектов, включая появление D- и 2D-полос в спектрах КРС. Метод импульсной лазерной абляции доказал свою эффективность и экологичность для получения углеродных наноструктур с регулируемыми свойствами.

SUMMARY. The article presents the results of the synthesis of carbon nanoparticles (CNPs) by pulsed laser ablation of MPG-6 graphite in distilled water. It was established that varying laser irradiation time and power density enables control over the particle size (30 nm-1 μm) and morphology. Scanning electron microscopy and Raman spectroscopy revealed significant morphological modifications and structural defects, including pronounced D and 2D bands. The pulsed laser ablation method demonstrated high efficiency and environmental safety for producing carbon nanostructures with tunable characteristics.