

УДК 546.26-162:537.5

## СТРУКТУРНЫЕ ТРАНСФОРМАЦИИ УГЛЕРОДНОГО НАНОМАТЕРИАЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**П. Е. Павлюченко, Г. М. Серопян, М. В. Тренихин, В. А. Дроздов**

*ПОЛИНА ЕВГЕНЬЕВНА ПАВЛЮЧЕНКО – инженер лаборатории аналитических и физико-химических методов исследования ИППУ СО РАН. E-mail: polina.pavluchenko@mail.ru*

*ГЕННАДИЙ МИХАЙЛОВИЧ СЕРОПЯН – кандидат физико-математических наук, доцент, ОмГУ им. Ф.М. Достоевского, кафедра общей физики. E-mail: ser\_gm@mail.ru*

*МИХАИЛ ВИКТОРОВИЧ ТРЕНИХИН – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории аналитических и физико-химических методов исследования ИППУ СО РАН, E-mail: tremv@yandex.ru*

*ВЛАДИМИР АНИСИМОВИЧ ДРОЗДОВ – кандидат химических наук, заведующий лабораторией аналитических и физико-химических методов исследования ИППУ СО РАН, E-mail: drozdov@ihcp.ru*

*644040 г. Омск, ул. Нефтезаводская, 54, Институт проблем переработки углеводородов СО РАН, тел. (3812) 67-22-16.*

*644077 г. Омск, пр. Мира 55а, корпус 1, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, тел. (3812) 64-77-87.*

*В работе проведено облучение глобулярного турбостратного углеродного материала лазерными импульсами в различных условиях. Методом ПЭМ зафиксировано, что формирование наноструктурированных частиц – нанокapsул в процессе облучения на длине волны 1064 нм происходит при плотности мощности  $I = 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>, а её увеличение до  $I = 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> приводит к возрастанию упорядоченности получаемых структур. Показано, что облучение исходных глобул импульсами с длиной волны 532 нм позволяет уменьшить межплоскостное расстояние графеновых слоев с 0,410 нм до 0,346 нм в сформированных нанокapsулах. Проанализирована зависимость максимальной температуры нагрева наночастиц от плотности энергии в пятне лазера. Установлено влияние температуры нагрева углеродного наноматериала на его структуру и морфологию.*

**Ключевые слова:** углеродные наноматериалы, нанокapsулы, лазерное облучение, плотность энергии, просвечивающая электронная микроскопия

## STRUCTURAL TRANSFORMATIONS OF CARBON NANOMATERIAL UNDER INFLUENCE OF HIGH ENERGY LASER IRRADIATION

P. E. Pavlyuchenko, G. M. Seropyan, M. V. Trenikhin, V. A. Drozdov

*Laser pulse irradiation of the globular turbostratic carbon material in various conditions was carried out in this work. It was investigated by TEM that the formation of nanostructured particles (nanocapsules) during irradiation at 1064 nm wavelength occurs with power density of  $10^8$  W/cm<sup>2</sup>, and it's rise up to  $10^{11}$  W/cm<sup>2</sup> leads to increase the degree of ordering of the obtained structures. It is shown that irradiation of the initial globules with pulses at 532 nm wavelength allows to reduce the interplanar spacing of graphene layers from 0,410 nm to 0,346 nm in the formed nanocapsules. The dependence of the maximum heating temperature of nanoparticles on the energy density on the laser spot was analyzed. The influence of the heating temperature of the carbon nanomaterial on structure and morphology was stated.*

**Keywords:** carbon nanomaterials, nanocapsules, laser irradiation, energy density, transmission electron microscopy.

### Введение

В последние годы актуальным направлением в химии и физике твердого тела является синтез и исследование углеродных наноматериалов, в связи с перспективой их использования в научно-технических разработках и технологических устройствах. Так углеродные нанокapsулы [1] и родственные им структуры – фуллерены, онионы, полиэдрические частицы обладают малыми размерами, высокой электрической проводимостью. По своим физико-химическим характеристикам нанокapsулы подходят для применения в качестве активного материала для электродов суперконденсаторов, в качестве компонентов устройств с низкой температурой при использовании ионных жидких электролитов [2]. Перспективным направлением является возможность получения полимерных композитных материалов на основе углеродных нанокapsул, поглощающих или отражающих электромагнитное излучение в широком диапазоне длин волн для создания чувствительных детекторов в электронике [3].

Новое развитие получили методы синтеза углеродных наноматериалов (УНМ) посредством мощного энергетического воздействия на углеродсодержащие предшественники [4, 5]. Одним из способов получения УНМ является лазерное облучение графита и глобулярного углеродного материала. В ряде работ [6-8] было показано, что лазерное излучение позволяет получать свободный от примесей высокоструктурированный наноуглерод с заданной или хорошо предсказуемой морфологией. Изменяя характеристики данного вида высокоэнергетического воздействия можно прогно-

зировать и создавать форму и структуру углеродных наночастиц.

Вместе с этим, часто облучение проводится несколькими способами в различных средах, а углеродсодержащие мишени, могут находиться как в твердом, так и в жидком состоянии [9]. Таким образом, достигается возможность получения смешанных углеродных форм. Так, например, два вида углеродных структур – люминисцентные наночастицы и графитовые нанопластины были получены в процессе лазерного облучения массивных графитовых мишеней [10]. В случае, когда в качестве облучаемого лазером объекта использовали раствор полиэтиленгликоля [11], зафиксировано образование одновременно трех видов углеродных частиц – к двум вышеуказанным добавились углеродные наноклетки («nanocages»).

В ряде работ [12-14] показаны возможности и преимущества (по сравнению с другими способами) получения наночастиц посредством лазерного облучения различных порошков, диспергированных в воде и водных растворах. Так, М. Miyazaki и др. [14] проводили облучение водных суспензий углеродных наночастиц, используя лазерные пучки различной мощности. Авторы показали, что, начиная с плотности энергии  $100$  мДж/см<sup>2</sup> наблюдаются изменения в морфологии поверхности наночастиц, но в то же время объемных структурных трансформаций обнаружено не было. По итогам работы был сделан вывод о том, что настоящий метод лазерного облучения может быть использован для активации поверхностей углеродных частиц, особенно для реакций с участием углерода как восстановителя.

Эффективность поглощения лазерного излучения твердым углеродным материалом и его структурные трансформации зависят от многих факторов – длины волны, плотности мощности (энергии) облучения, структуры и морфологии исходного материала, в т. ч. размеров составляющих его частиц. Механизмы протекающих структурных трансформаций в углеродном материале до конца не изучены. Однако существует несколько моделей, описывающих данный процесс. Так, в модели последовательного образования оболочек, структурные изменения происходят в результате адсорбции испаренных атомов углерода на поверхность наночастиц [15]. Другой предложенной моделью является кристаллизация жидкого углеродного кластера с образованием оболочечных структур [16]. В работе [17] данная модель рассмотрена более детально и выдвигается гипотеза образования наночастиц из нанокристаллов графита через кристаллизацию жидкого кластера. Авторы данной статьи придерживаются мнения, что формирование высокоструктурированного УНМ происходит согласно модели кристаллизации жидкого кластера.

Ранее нами были проведены исследования по облучению углеродного материала с диаметром исходных глобул 100–300 нм, который имел разупорядоченную турбостратную структуру, близкую к аморфной с низкой степенью упорядоченности графеновых слоев. В результате, после облучения углеродного материала методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) было зафиксировано образование новых морфологических образований: глобулярных структур диаметром от 100 до 500 нм, на срезе которых наблюдаются ряды параллельных пространственно протяженных графеновых слоев с высокой степенью упорядоченности [18]. Такие частицы в литературе получили название розоподобных [19].

В настоящей работе в результате систематических экспериментов установлено, что при лазерном высокоэнергетическом воздействии в различных условиях на глобулярный турбостратный углерод образуются оболочечные структуры – нанокapsулы. Методом ПЭМ исследовано влияние параметров лазерного излучения на характеристики получаемых наноструктур. Дополнительно в работе проанализирована зависимость максимальной температуры нагрева углеродных наночастиц от плотности энергии в излучающем пятне лазера.

### Экспериментальная часть

Для исследования структурных и морфологических преобразований углеродного наноматериала после лазерного воздействия были использованы

образцы, имеющие в данной работе, следующие обозначения:

- углеродный наноматериал-1 (УНМ-1);
- углеродный наноматериал-2 (УНМ-2).

Исследование исходных и облученных образцов проводили с помощью просвечивающего электронного микроскопа высокого разрешения (ПЭМВР) JEM-2100 «JEOL» (ускоряющее напряжение 200 кВ, разрешение 0,145 нм). Анализ и компьютерную обработку цифровых электронно-микроскопических изображений УНМ выполняли с использованием программы Digital Micrograph «Gatan». Средние расстояния между графеновыми слоями ( $d_{002}$ ) для образцов УНМ определяли после обработки электронограмм путем построения профилей радиальной интенсивности контраста. При проведении вышеуказанных вычислений и компьютерной обработки использована методика, представленная в [20, 21].

Для облучения использовали три твердотельных Nd:YAG лазера со следующими характеристиками ( $\lambda$  – длина волны,  $\tau$  – длительность импульса,  $E_{\max}$  – максимальная энергия в импульсе,  $\nu$  – частота следования импульсов):

$$\lambda=1064 \text{ нм}, \tau=8 \text{ нс}, E_{\max}=0,9 \text{ Дж}, \nu=10 \text{ Гц};$$

$$\lambda=1064 \text{ нм}, \tau=16 \text{ нс}, E_{\max}=0,5 \text{ Дж}, \nu=10 \text{ Гц};$$

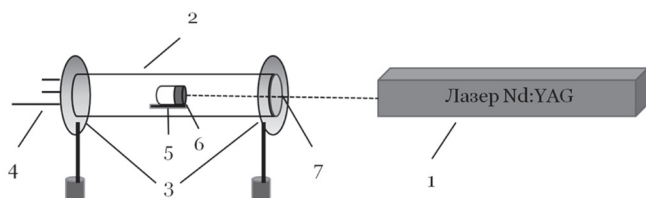
$$\lambda=532 \text{ нм}, \tau=8 \text{ нс}, E_{\max}=100 \text{ мДж}, \nu=0,5\text{--}50 \text{ Гц}.$$

Лазерное облучение образцов УНМ проводили в различных средах, используя две экспериментальные установки.

Для облучения в жидкой среде в пробирке из кварцевого стекла были приготовлены суспензии углеродных порошков в дистиллированной воде и этиловом спирте. Полученные суспензии облучали в течение 30 минут вертикально направленным сфокусированным лазерным пучком. Использование магнитной мешалки позволяло поддерживать углеродный порошок во взвешенном состоянии, что способствовало его равномерному облучению.

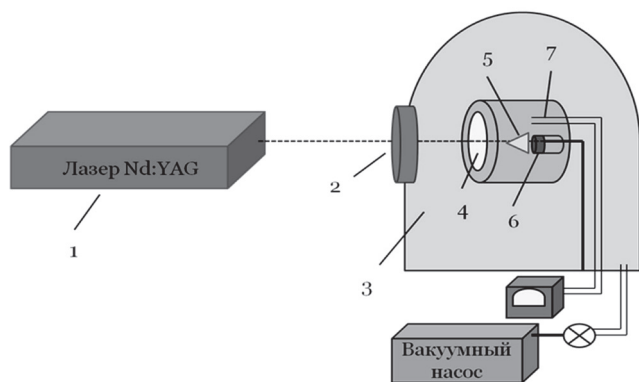
Для проведения экспериментов по лазерному облучению УНМ в воздушной атмосфере были приготовлены смеси исходных образцов с углеродородным связующим ( $C_{18}H_{38}$ ), которые затем впрессовывались в металлические кольца диаметром 20 мм (мишени). Прессование исходных порошков в значительной степени позволило уменьшить разлет частиц, и снизить потери вещества при лазерной абляции. Таблетированные мишени помещались на дно кварцевого цилиндра с крышкой. Фокусированное лазерное излучение направлялось на мишень. Процесс облучения проводили в горизонтальном положении и продолжали до образования на стенках и крышке цилиндра черного углеродного налёта.

Аналогичным образом готовили образцы для облучения в атмосфере гелия. В этом случае использовался реактор в виде кварцевой трубки с фланцами на торцах, имеющими вводы для создания потока инертного газа (рис. 1). Лазерное излучение направляли на мишень через торец реактора, содержащий короткофокусную линзу. Расход гелия поддерживали на уровне 20 л/час.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки

1 – лазер, 2 – кварцевая трубка реактора, 3 – фланцы, 4 – вводы для вакуумирования, 5 – держатель, 6 – мишень, 7 – линза



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки

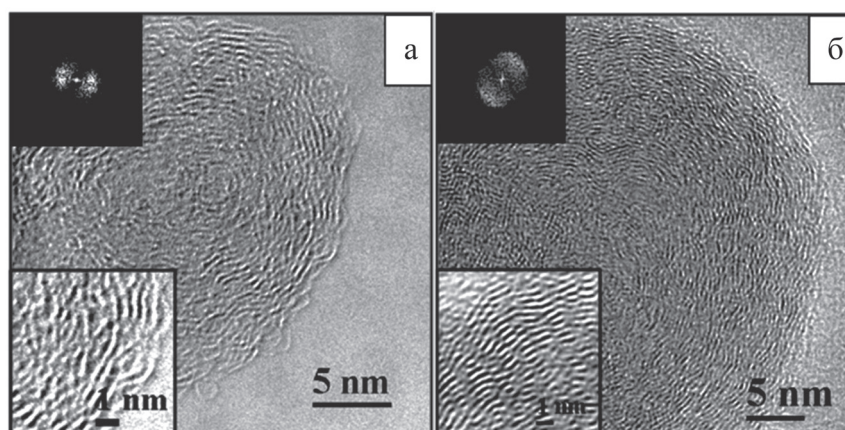
1 – лазер, 2 – оптическая система; 3 – вакуумная камера; 4 – печь; 5 – подложка для сбора УНМ; 6 – мишень; 7 – термопара

Кроме того, лазерное воздействие на таблетированные мишени и на порошки образцов проводили в вакуумной камере под давлением 100 Па при 20 °С и при 850 °С, соответственно. Лазерный луч, сфокусированный линзой ( $F=260$  мм), направляли через окно вакуумной камеры (рис. 2). В режиме облучения при нагреве (850 °С) объекты исследования в конусах из тугоплавкого металла, примерно наполовину заполненные порошком УНМ, помещались в цилиндрическую печь из кварца с нагревателем и термопарой. После облучения в вакуумную камеру напускали воздух. Сбор углеродного материала в случае таблетированных мишеней проводился аналогичным для кварцевого реактора способом. В случае порошков после облучения углеродный материал собирался со стенок конусов. Исследование и анализ всех полученных образцов далее проводился методом ПЭМВР.

### Обсуждение результатов

Согласно данным ПЭМВР исходные образцы УНМ-1 и УНМ-2 состояли преимущественно из достаточно правильных глобул диаметром 15–30 нм и 20–50 нм, соответственно. Наблюдалась близкая к аморфной структура графеновых слоев. Среднее расстояние между графеновыми слоями  $d_{002}$  вычислялось после обработки Фурье-преобразования полученных изображений этих слоев и составляло 0,410 нм в случае УНМ-1 и 0,382 нм в случае УНМ-2 (рис. 3).

После воздействия лазерного излучения с длиной волны 1064 нм и плотностью мощности  $I=10^8$  Вт/см<sup>2</sup> на образцы УНМ-1 было зафиксировано образование углеродных частиц, напоминающих нанокapsулы, оболочка которых состояла из рядов параллельных пространственно протяженных графеновых слоев с незаполненным



**Рис. 3.** ЭМ изображения глобул исходных образцов УНМ-1 – (а) и УНМ-2 – (б)  
На вставках показана структура графеновых слоев и их Фурье-преобразование

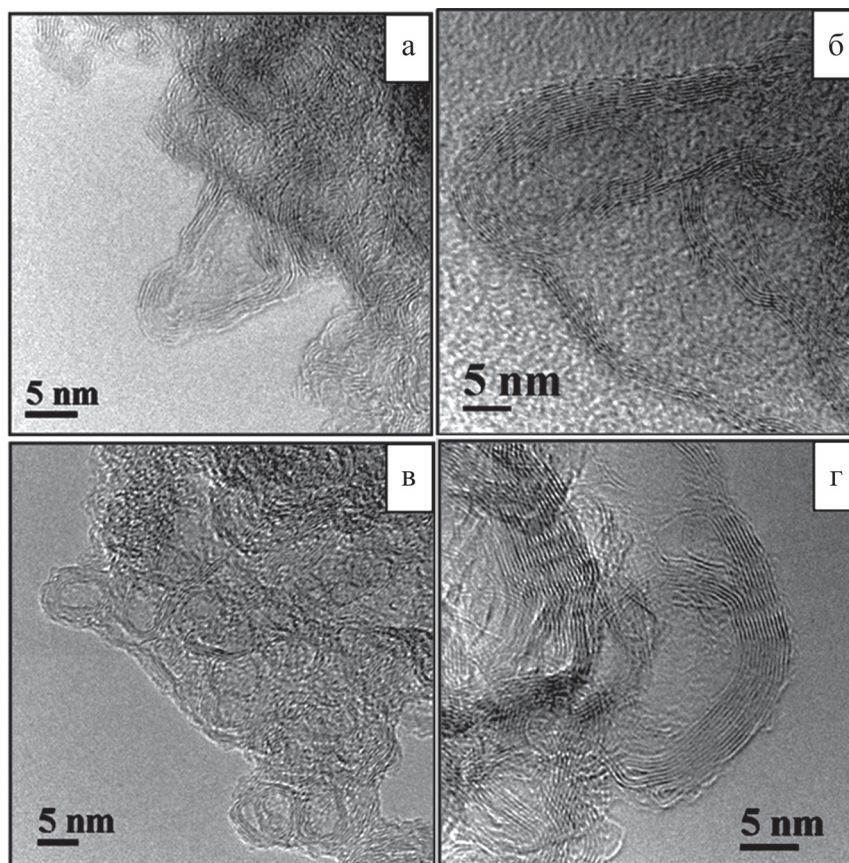


Рис. 4. ЭМ изображения нанокapsул УНМ-1 после облучения,  $I = 10^8 \text{ Вт/см}^2$ : в воде – (а), в этиловом спирте – (б), в воздушной атмосфере – (в), в гелии – (г)

пространством (поры) в центральной области (рис. 4). Отметим, что качественно аналогичный результат был получен и при облучении образца УНМ-2.

В случае облучения с плотностью мощности  $10^8 \text{ Вт/см}^2$  образца УНМ-1, диспергированного в воде, межплоскостное расстояние  $d_{002}$  в нанокapsулах составляло 0,367 нм, в случае диспергирования в этиловом спирте – 0,371 нм, а при облучении таблетированных образцов как в воздушной атмосфере, так и в гелии – 0,362 нм.

В результате дальнейших исследований было установлено, что увеличение плотности мощности до  $10^{11} \text{ Вт/см}^2$  при облучении образца УНМ-1 в условиях вакуума приводило к уменьшению межплоскостного расстояния в нанокapsулах. Также для данного образца проводили облучение в вакууме при температуре 850 °С. Дополнительный нагрев и последующее за этим быстрое охлаждение при напуске воздуха в камеру способствовало увеличению структурных и морфологических преобразований в образце. Таким образом, для образца УНМ-1 удалось достичь межплоскостного расстояния 0,35 нм. ЭМ изображения нанокapsул УНМ-1 после облучения представлены на рис. 5. На вставке здесь и далее показана детализация структуры

графеновых слоев после компьютерной обработки, выполненной с целью улучшения качества изображения.

В целом, для образцов УНМ-1, подвергнутых лазерному воздействию ( $\lambda = 1064 \text{ нм}$ ) с различной плотностью мощностью ( $10^8 \text{ Вт/см}^2$  и  $10^{11} \text{ Вт/см}^2$ ) в различных средах (воздушная и гелиевая атмосфера, вакуум, жидкости) и при разных температурах (20 °С и 850 °С) установлено, что структурная трансформация облучаемого глобулярного турбостратного углерода приводит к формированию нанокapsул. При этом, межплоскостные расстояния  $d_{002}$  в образующихся углеродных нанокapsулах в первую очередь существенно зависят от плотности мощности воздействующего на образец излучения и уменьшаются от средних значений (0,410 нм) на 0,057 нм, что сопровождается упорядочением формируемых структур.

Образцы УНМ-2 также подвергали лазерному облучению с длиной волны 1064 нм и с различной плотностью мощности. ЭМ анализ показал, что с увеличением плотности мощности лазерного излучения наблюдалось уменьшение расстояния между графеновыми слоями в нанокapsулах, также как и в образцах УНМ-1. Можно отметить,

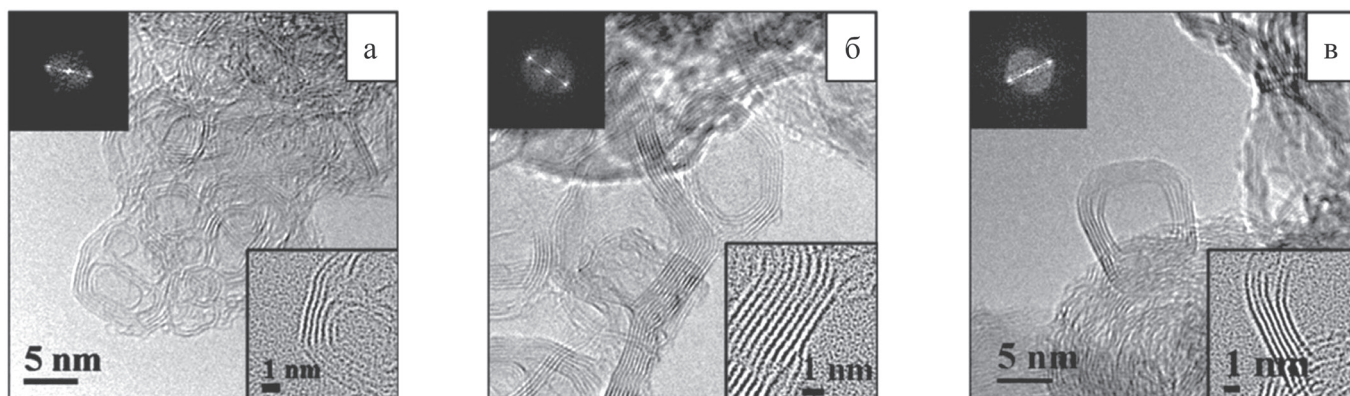


Рис. 5. ЭМ изображения и Фурье-преобразование нанокapsул УНМ-1 после облучения,  $I=10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> в атмосфере,  $d_{002} = 0,351$  нм – (а); в вакууме,  $P=100$  Па,  $d_{002} = 0,352$  нм – (б); в вакууме,  $P=100$  Па,  $t=850$  °С,  $d_{002} = 0,355$  нм – (в)

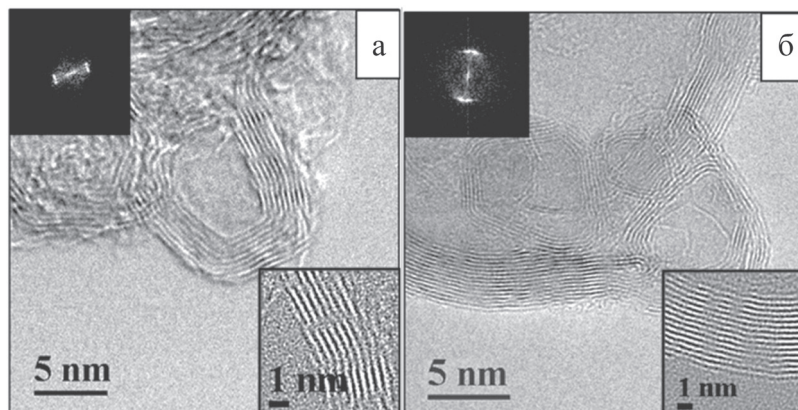


Рис. 6. ЭМ изображения и Фурье-преобразование нанокapsул УНМ-2 после облучения,  $I=10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> в атмосфере,  $d_{002} = 0,337$  нм – (а); в вакууме,  $P=100$  Па,  $t=850$  °С,  $d_{002} = 0,349$  нм – (б)

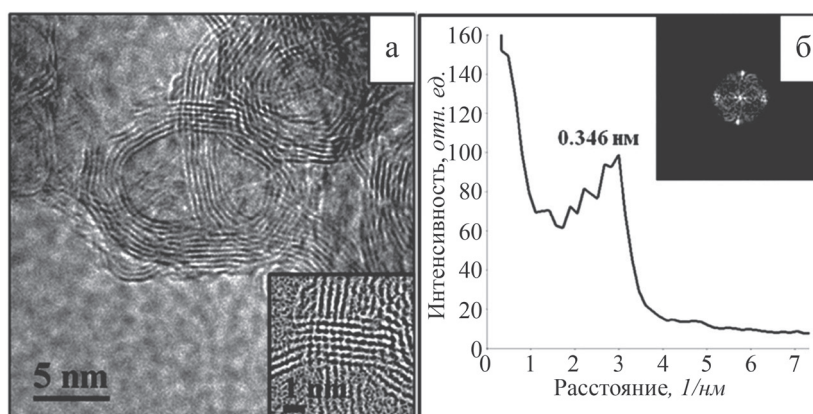


Рис. 7. ЭМ изображения нанокapsул УНМ-1 после облучения с длиной волны 532 нм,  $I=10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>,  $d_{002} = 0,346$  нм – (а); Фурье-преобразование и соответствующий ему профиль радиальной интенсивности контраста – (б)

что межплоскостные расстояния  $d_{002}$  в сформированных нанокластерах для образцов УНМ-2 составляют более низкие значения, порядка 0,34–0,35 нм, по сравнению с образцами УНМ-1 (рис. 6).

На рис. 7 представлены ЭМ изображения УНМ-1 после облучения с длиной волны 532 нм и плотностью мощности  $10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>. Анализ ЭМ изображений образцов УНМ-1 показал, что увеличение частоты воздействующего на УНМ излучения позволяло достичь значений  $d_{002} = 0,346$  нм.

Как было показано авторами работы [22] структура исходного УНМ представляет собой совокупность кластеров, состоящих из  $sp^2$ - и  $sp^3$ -гибридизованных углеродных атомов в соотношении 80/20. При воздействии фотонных пучков происходит поглощение энергии отдельными глобулами УНМ, достаточное для нагревания до высоких температур и перехода этих углеродных кластеров в квази-жидкое состояние. При этом за время взаимодействия (~1–10 нс) глобулярность формы углеродной мишени остаётся неизменной. Данное состояние соответствует температуре приблизительно 5100 К [23]. Дальнейшее формирование наночастиц происходит также за короткие временные промежутки (10–1000 нс) через кристаллизацию квази-жидкого состояния углерода с образованием оболочечных структур, построенных из  $sp^2$  атомов углерода (рис. 8).

Согласно теории Ми [24] глобулы исходного УНМ рассматриваются как сферические частицы, размер (диаметр) которых много меньше длины волны падающего лазерного излучения. В этом случае рассеяние излучения можно считать Релеевским и пренебрежимо малым по сравнению с фактором поглощения. Таким образом, поглощение не будет зависеть от размера частиц, но будет сильно зависеть от длины волны возбуждающего лазера. Для глобулярного УНМ поглощающая способность которого изменяется в зависимости от длины волны, будет также наблюдаться зависимость от температуры [25]. Температура нагревания глобулы, в свою очередь, будет опреде-

ляться плотностью мощности (или плотностью энергии) лазерного излучения. Для расчёта максимальной температуры нагрева углеродных глобул нами была использована формула, приведенная в работе [26]:

$$T = T_g + \frac{6\pi F E(m)}{\rho c \lambda},$$

где  $T_g = 300$  К – температура окружающей среды,  $F$  и  $\lambda$  – плотность энергии и длина волны лазера,  $\rho = 1860$  кг/м<sup>3</sup> [27],  $c = 2100$  Дж/кг·К [28] – плотность и удельная теплоёмкость углеродных глобул. В качестве функции  $E(m)$ , зависящей от коэффициента преломления глобул были выбраны значения 0,05 и 0,395, полученные для углеродных частиц размером около 15 нм и 30 нм, соответственно [29]. Для частиц размером более 30 нм расчёты произведены не были, в связи с отсутствием достоверных данных о поведении функции  $E(m)$  в области более крупных частиц. Все расчеты проводили, принимая  $\lambda = 1064$  нм. Значения плотности энергии  $F$  выбраны с учётом неоднородного распределения интенсивности в пятне лазера. Для этого был использован экспериментальный профиль распределения плотности энергии по диаметру пятна в зависимости от расстояния от центра к периферии (рис. 9).

Графики зависимости распределения максимальной расчетной температуры нагревания от плотности энергии пятна лазера для частиц размером 15 нм и 30 нм представлены на рис. 10 а, б.

Как видно из зависимостей температуры нагревания от плотности энергии  $T(F)$ , в связи с неоднородностью распределения плотности энергии по диаметру лазерного пятна, частицы при облучении могут нагреваться до различных максимальных температур. Таким образом, для частиц УНМ, подвергшихся воздействию фотонами из различных температурных областей, должны наблюдаться отличия в структуре и морфологии формирующихся (получаемых) наночастиц. Это подтверждается данными ПЭМ.

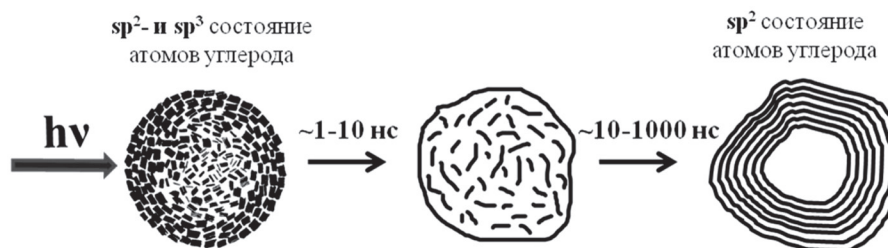


Рис. 8. Механизм формирования оболочечных структур через кристаллизацию квази-жидкого углеродного кластера

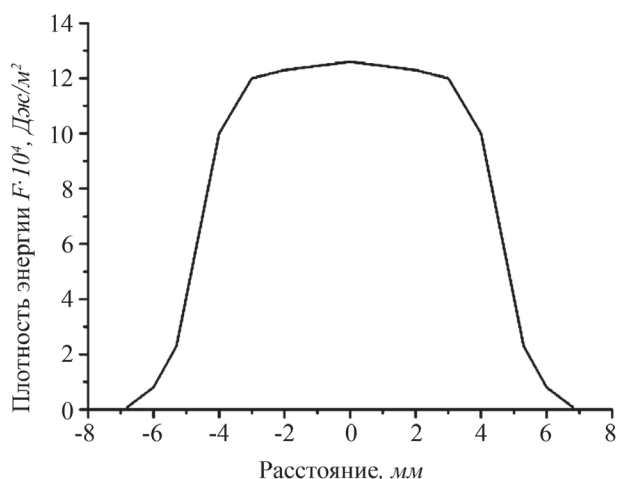


Рис. 9. Экспериментальный профиль распределения плотности энергии по диаметру лазерного пятна

Так для частиц, облучённых низкоэнергетическими фотонами, рост нанокapsул не наблюдается. Однако, для данных частиц характерно появление оболочек с признаками структурной упорядоченности на краях глобул исходного УНМ. Это указывает на то, что структурные превращения УНМ в нанокapsулы начинаются на краях глобул и их дальнейшее формирование происходит по направлению к центру по мере нагревания графеновых слоёв (рис. 11 а).

Из графиков  $T(F)$  следует, что максимальная расчетная температура в центре пятна лазера достигает значений порядка  $10^4$ – $10^5$  К, что соответствует температурам плазмы. По литературным данным процесс плазмообразования для данного диапазона температур обычно происходит при плотностях мощности  $10^7$ – $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

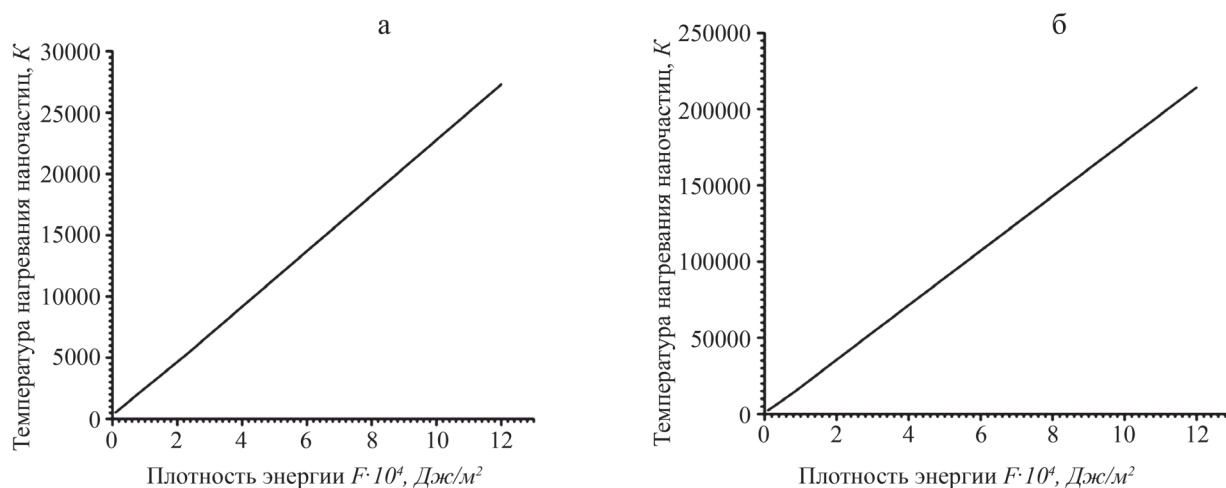


Рис. 10. Графики зависимости распределения максимальной расчетной температуры нагрева от плотности энергии в пятне лазера для частиц размером 15 нм – (а), размером 30 нм – (б)

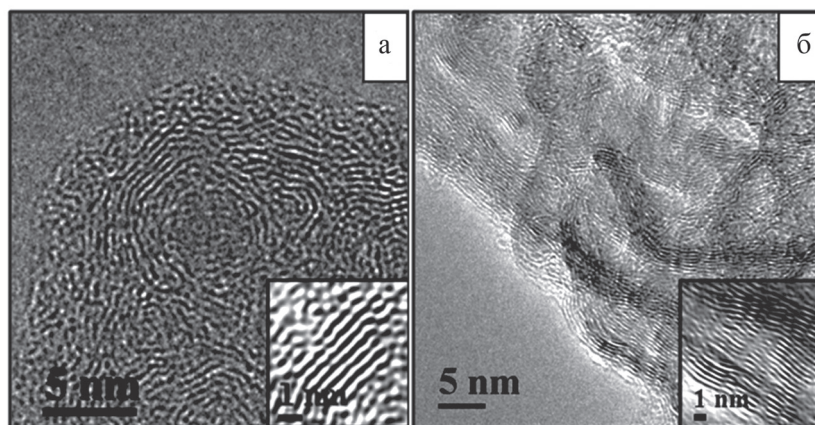


Рис. 11. ЭМ изображения УНМ после облучения: оболочки с признаками упорядоченности графеновых слоев на краях глобулы – (а); участки сплавленного наноструктурированного материала – (б)



ми. Дальнейший рост температур в центре пятна до  $10^6$ – $10^7$  К будет происходить при увеличении плотности мощности до значений  $10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> и более [30]. На ЭМ изображениях таких частиц были зафиксированы протяжённые участки сплавленного наноструктурированного материала не относящиеся ни к одной из известных классификаций существующих углеродных структурных типов (рис. 11б).

Образование данных участков, возможно, является следствием плавления и перекристаллизации нанокapsул под действием сверхвысоких температур горения плазмы.

Как уже было отмечено выше, трансформации исходного УНМ в нанокapsулы под воздействием лазерного излучения происходят при температуре  $\sim 5100$  К. Тогда формирование нанокapsул из исходного УНМ диаметром 15 нм при данной температуре возможно при плотности энергии 2 Дж/см<sup>2</sup>. В то время как, для УНМ диаметром 30 нм требуется значительно меньшая плотность энергии – 0,2 Дж/см<sup>2</sup> (рис. 10). Вероятно, это связано с тем, что более крупные частицы обладают большей площадью поглощающей поверхности. Как следствие, это приводит к уменьшению значений плотности энергии, требуемых для формирования углеродных нанокapsул.

### Заключение

Методами высокоэнергетического лазерного воздействия на углеродные наноматериалы (УНМ), возможно получение различных мультиморфологических углеродных структур. Так, применяя в качестве исходного материала глобулярный турбостратный углерод, возможно формирование нанокapsул разного размера и с различной степенью упорядоченности замкнутых графеновых слоев. При этом условия, в которых происходит облучение (воздух, инертная атмосфера, вакуум), практически не влияют на морфологический тип получаемых углеродных частиц. Вероятно, это обусловлено высокими температурами  $\sim 5100$  К, при которых происходят структурные преобразования.

Трансформации УНМ в нанокapsулы при лазерном облучении на длине волны 1064 нм начинается при интегральной плотности мощности  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Увеличение плотности мощности (примерно на 3 порядка) и частоты воздействующего лазерного излучения ( $\lambda = 532$  нм) вызывает существенное повышение температуры облучаемых образцов УНМ, что в свою очередь приводит к значительному уменьшению межслоевого расстояния  $d_{002}$  в графеновых слоях.

Установлено, что температура нагрева частиц при облучении не является одинаковой и зависит от распределения плотности энергии в пятне лазера. Таким образом, для частиц, облучённых фотонами из различных температурных областей, наблюдаются отличия в их структуре и морфологии. Кроме того, нагрев наночастиц до одних и тех же температур может происходить при разных значениях плотности энергии из-за разницы в размерах глобул исходного УНМ.

Опираясь на полученную экспериментальную и расчетную информацию о поведении УНМ при воздействии лазерного облучения, можно прогнозировать форму, размеры и структуру синтезируемых углеродных наночастиц в заданных условиях.

*Работа выполнена с использованием оборудования Омского регионального ЦКП СО РАН (ОмЦКП СО РАН) и лаборатории лазерной физики ОмГУ.*

*Работа выполнена при финансовой поддержке ФАНО России в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы по направлению V. 45. Проект V.45.2.8. номер госрегистрации АААА-А17-117021450093-7.*

### Литература

1. Endo M., Iijima S., Dresselhaus M.S. Carbon Nanotubes. Pergamon Press. 1996. p. 153–162.
2. McDonough J.K., Gogotsi Y. The Electrochemical Society Interface. 2013. v. 22. №3. p. 61–66.
3. Мосеев С.И. Синтез и исследование свойств углерода луковичной структуры и его композитов. Автореф. дисс. канд. хим. наук. Новосибирск. 2014 г. 3 с.
4. Булгаков А.М., Булгакова Н.М., Бураков И.М. и др. Синтез наноразмерных материалов при воздействии мощных потоков энергии на вещество. Н-ск: ИТФ СО РАН, 2009. 462 с.
5. Trenikhin M.V., Ivashchenko O.V., Eliseev V.S., et al. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. 2015. v. 23. p. 801–806.
6. Trenikhin M.V., Kryazhev Yu.G., Protasova O.V. et al. International Multidisciplinary Microscopy Congress. Springer Proceedings in Physics. 2014. Ch. 21. p. 159–164.
7. Vander Wal R. L., Choi M. Y. Carbon. 1999. v. 37. №2. p. 231–239.
8. Shengliang Hu., Tian F., Bai P., Cao S., Sun J. Carbon. 2009. v. 47. №3. p. 876–883.
9. Kwong H. Y., Wong M. H., Leung C. W. et al. J. Appl. Phys. 2010. v. 108. №3. 034304 p.
10. Hu S., Dong Y., Yang J. et al. Chem. Asian J. 2012. v. 7. p. 2711–2717.

11. *Hu S., Dong Y., Yang J. et al.* J. Mater. Chem. 2012. v. 22. p. 1957–1961.
12. *Amendola V., Meneghetti M.* Phys. Chem. Chem. Phys. 2013. v. 15. p. 3027–3046.
13. *Kim D., Ye M., Grigoropoulos C.P.* Appl. Phys. A. 1998. v. 67. №2. p. 169–181.
14. *Miyazaki M., Miura Y., Yui K. et al.* Carbon. 2006. v. 44. №15. p. 3348–3378.
15. *Kroto H.W.* Science. 1988. v. 242. p. 1139.
16. *Saito Y.* Carbon. 1995. v. 33. №7. p. 979–988.
17. *Лозовик Ю.Е., Попов А.М.* Успехи физических наук. 1997. т. 167. №7. с. 751–772.
18. *Тренихин М.В., Кряжев Ю.Г., Коваль Н.Н. и др.* Каучук и резина. 2013. №3. с. 36–37.
19. *Yamada K., Tobisawa S.* Carbon. 1989. v. 27. №6. p. 845–852.
20. *Oshida K., Nakazawa T., Miyazaki T. et al.* Synthetic Metals. 2002. v. 125. №2. p. 223–230.
21. *Zhu W., Miser D.E., Chan W.G., Hajaligol M.R.* Carbon. 2004. v. 42. №8–9. p. 1841–1845.
22. *Muller J.O., Su D. S. et al.* Phys. Chem. Chem. Phys. 2007. v. 9. p. 4018–4025.
23. *Опеннов Л.А., Подливаев А.И.* Физика твердого тела. 2016. т. 58. №4. с. 821.
24. *Оцисик М.Н.* Сложный теплообмен М.: Мир. 1976. с. 90–94.
25. *Блох А.Г.* Теплообмен в топках паровых котлов. Л.: Энергоатомиздат. 1984. 119 с.
26. *Гуренцов Е.В., Еремин А.В., Фальченко М.Г.* Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2011. т. 11. с. 1–8.
27. *Панченко М.В., Козлов В.С., и др.* Оптика атмосферы и океана. 2012. т. 25. №1. с. 46–54.
28. *Snelling D.R., Liu F. et al.* Combustion and Flame. 2004. v. 136. №1–2. p. 180–190.
29. *Гуренцов Е.В., Еремин А.В., Попова Е.Ю. и др.* Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2013. т. 14. №2. с. 1–8.
30. *Райзер Ю. П.* Успехи физических наук. 1965. т. 87. №1. 29 с.