

Совет молодых ученых Российской академии наук Координационный совет по  
делам молодежи в научной и образовательной сферах при Совете при  
Президенте Российской Федерации по науке и образованию

Третий междисциплинарный молодежный научный форум  
с международным участием «Новые материалы»  
**СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ**

Москва  
21-24 ноября 2017 г.

УДК 661.12

ББК 24.95

Н 85

**Н85** Третий междисциплинарный молодежный научный форум с международным участием «Новые материалы». Москва. 21-24 ноября 2017 г./ Сборник материалов. – М: ООО «Буки Веди», 2017 г., 903 с.  
ISBN 978-5-4465-1638-4

ISBN 978-5-4465-1638-4



© Коллектив авторов

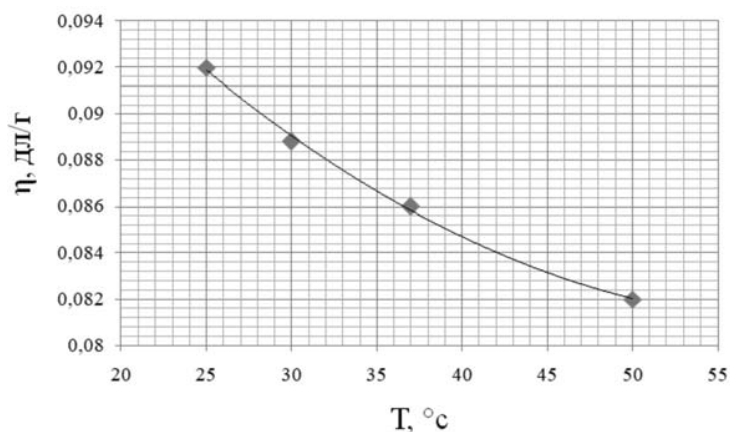


Рис. 1(а) – Зависимость характеристической вязкости ПВП от температуры

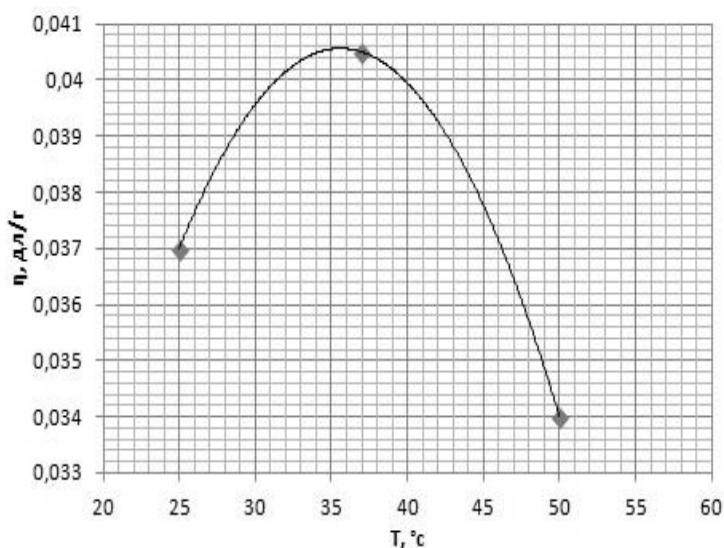


Рис. 1(б) – Зависимость характеристической вязкости комплекса ПВП с эндофуллеренов Gd@C<sub>82</sub> от температуры

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ:

1. Lebedev V. T., Kulvelis Yu. V., Runov V. V. et al. Polarized Neutron Scattering in Aqueous Solutions of Fullerenols in a Magnetic Field. // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2014. V. 8. No. 5. P. 1044–1054.
2. Svergun D.I. Determination of the Regularization Parameter in Indirect-Transform Methods Using Perceptual Criteria // J. Appl. Cryst. 1992. V. 25. P. 495–503.

#### ФЕМТОСЕКУНДНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ НАНОСТРУКТУР FEMTOSECOND LASER SYNTHESIS OF NANOSTRUCTURES

Хорьков К.С., Прокошев В.Г.

Khorkov K.S., Prokoshev V.G.

Россия, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, freeod@mail.ru, prokoshev\_vg@vlsu.ru

Представлены возможности использования фемтосекундного лазерного излучения для получения наноструктур и наноструктурированных покрытий. На основании лазерного метода жидкофазного расслоения

графитовых плоскостей получены различные типы графеновых структур. С помощью обработки в режиме множественной филаментации фемтосекундного лазерного излучения продемонстрировано наноструктурирование образцов с изменением их фазового состава.

Possibilities of using femtosecond laser radiation for nanostructures and nanostructured coatings formation are presented. On the basis of laser method of liquid-phase separation of graphite planes have obtained various types of graphene structures. Laser processing of materials in the multiple filamentation mode of femtosecond laser radiation demonstrated the nanostructuring of the samples with the change of their phase composition.

Растущие потребности создания новой элементной базы в области высокоскоростной электроники, оптоэлектроники и нанофотоники стимулируют развитие процессов поиска, создания и изучения новых классов наноматериалов. Среди таких материалов углеродные наноматериалы привлекают особое внимание благодаря их уникальным структурным и физическим свойствам, а формирование образцов с развитым нанорельефом позволяет более эффективно использовать такие материалы в традиционных технологиях.

Исследование фундаментальных основ взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов с веществом и изучение механизмов лазерно-индуцированных фотохимических реакций, протекающих в сильно неравновесных условиях, являются актуальными задачами, решение которых позволяет, как оптимизировать существующие технологические подходы синтеза-обработки материалов, так и создать новые комбинации операций и подходов в приложениях нанофотоники, микросистемной техники и других областях [1-4].

В качестве одного из подходов к решению задачи формирования графеновых структур является метод жидкофазного расслоения графитовых плоскостей при обработке фемтосекундным лазерным излучением [5]. Для успешного применения лазерного излучения для эксфолиации графена необходимо обеспечить специальные условия охлаждения области лазерного воздействия. Для этой цели был использован жидкий азот (рис. 1).

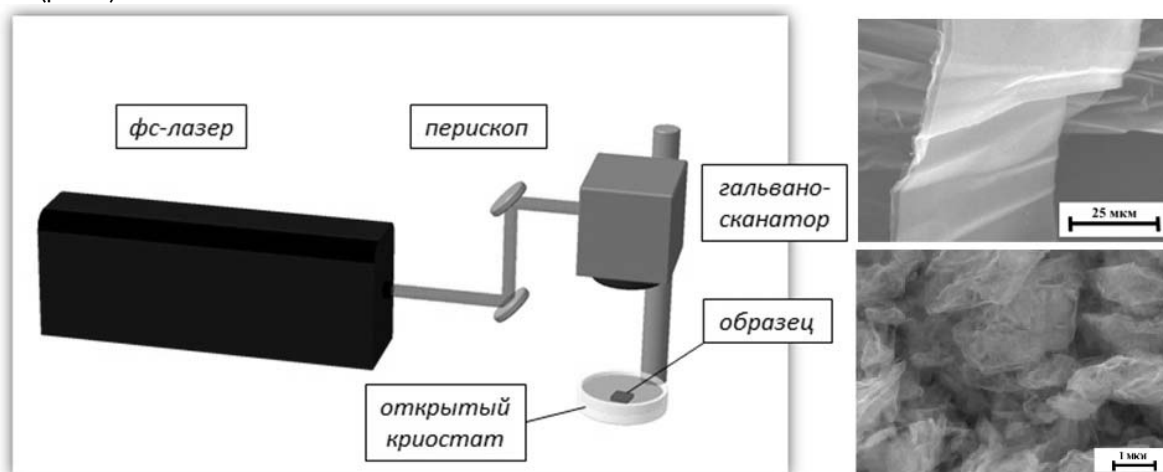


Рис.1. Экспериментальная схема воздействия фемтосекундного лазерного излучения на углеродные образцы в жидком азоте и сформированные графеновые структуры (на вставке)

На основании разработанного способа получены графеновые листы различной формы. Микроскопические исследования графеновых структур, полученных при облучении высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ), выявили графеновые ленты шириной до 50 мкм и длиной более 150 мкм, а также графеновые пластины произвольной формы с характерным размером до 150 мкм. Графеновые структуры, получаемые при лазерной обработке поверхности стеклоглерода, имеют принципиально другую форму. Графеновые листы образуют комки со сложной складчатой структурой. Зарегистрированы комки с

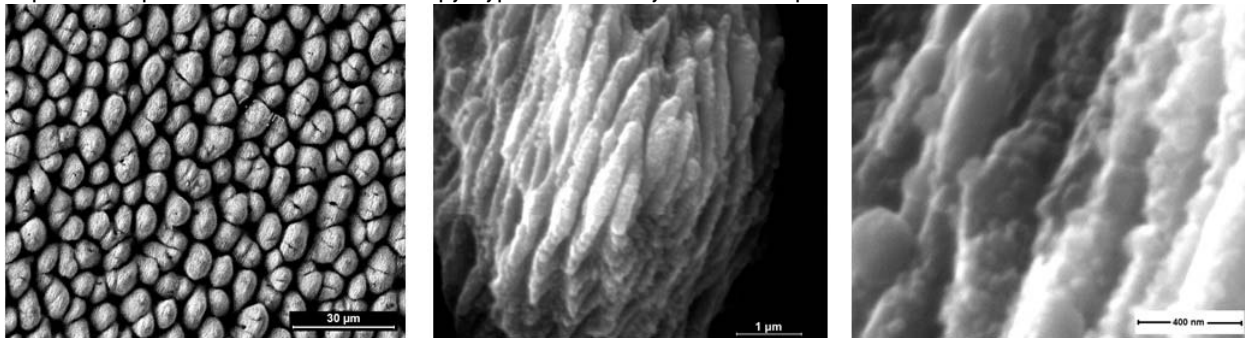
характерным размером порядка 1 мкм.

Сравнение результатов обработки ВОПГ и стеклоглерода фемтосекундным лазерным излучением в среде жидкого азота показало, что использование первого материала предпочтительно для целей получения как можно более ровных и тонких графеновых структур. Очевидно, что в данном случае решающую роль играет исходная внутренняя структура облучаемых материалов.

Использование скомканного графена является актуальным для применения в схемах функциональных элементов, где необходима большая удельная площадь поверхности и долгосрочная стабильность. Устойчивый к агрегации и обладающий жесткой конструкцией, скомканый графен может поддерживать свою структуру после погружения в раствор электролита и является одним из наиболее перспективных материалов для создания суперконденсаторов с высокой ёмкостью [6].

Воздействие на материал филаментами лазерного излучения позволяет уменьшить размер образуемых отверстий вплоть до нескольких микрометров. Развитие методов использования нелинейных эффектов, инициируемых фемтосекундным лазерным излучением, обеспечивает реализацию новых технологий микрообработки материалов [7].

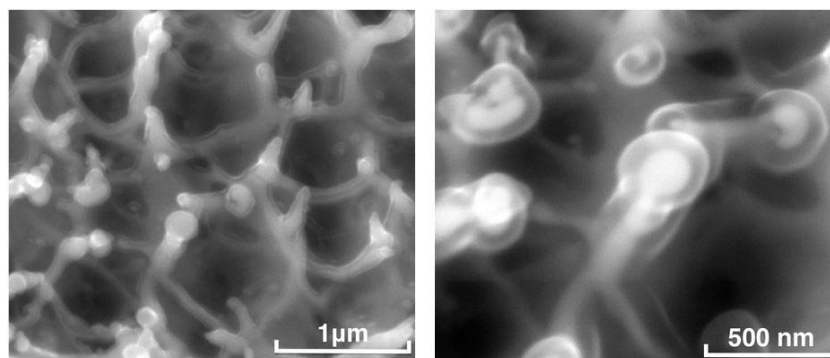
Проведение экспериментов при сканировании лазерным излучением по поверхности образца нержавеющей стали (SS304) осуществлялось при различных скоростях (от 1 мм/с до 1000 мм/с) с помощью гальваносканатора. После рассмотрения обработанных образцов с помощью оптического микроскопа было проведено анализ на растровом электронном микроскопе (рис. 2), который показал, что на поверхности образцов образовались выделенные структуры в виде конусов или микроколон.



*Рис.2. РЭМ-изображения области воздействия лазерного излучения ( $\lambda=800$  нм,  $\tau=50$  фс,  $P_{ср}=400$  мВт,  $f=1$  кГц) на нержавеющую сталь (SS304)*

Использование обработки фемтосекундными лазерными филаментами, приводит к структурированию поверхности с комбинированным на микро- и наноуровне рельефом, образованию оксидов основных элементов сплава, что позволяет получить сильное поглощение в широкополосном оптическом диапазоне. Высокая поглощающая способность оптического излучения обеспечивается совместным действием поверхностных микроколон и связанных с ними наноструктур. Данная особенность может найти применение в приложениях солнечной энергетики, теплообменных устройствах и биологическом зондировании.

Фемтосекундное лазерное излучение может очень эффективно использоваться для наноструктурирования поверхности тугоплавких металлов. Но его экстремальные характеристики затрудняют исследование процессов формирования наноструктур. Как правило, процесс лазерного наноструктурирования завершается формированием рипл-картины с периодом структур, сравнимым с длиной волны воздействующего излучения. Вольфрам относится к классу тугоплавких металлов и обладает высокой стойкостью к внешним воздействиям. На рисунке 3 показаны сформированные микро- и наноструктуры на поверхности вольфрама.



*Рис. 3. Наноструктуры вольфрама в центральной области воздействия лазерного излучения*

Результаты экспериментов позволяют выделить три стадии лазерного наноструктурирования тугоплавких металлов. Во-первых, синтез поверхностных наноструктур в виде наностержней или наносфер. Во-вторых, осаждение продуктов лазерной абляции и формирование рипл-картины. В-третьих, термическое воздействие лазерно-индуцированного плазменного факела, который или разрушает сформированные наноструктуры и выделяет их. Последний этап может быть исключен при обработке материалов в среде криогенных жидкостей, например, в жидком азоте. Однако именно термическое воздействие приводит к формированию сетеподобной системы наноструктур при фемтосекундной лазерной обработке вольфрама в атмосферном воздухе.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке технологий получения материалов с функциональными свойствами, устройств на их основе, а также представляют интерес для основополагающих явлений теоретических и экспериментальных научных работ.

Работа была выполнена в рамках государственного задания ВлГУ ГБ-1106/17, а также при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 16-32-00760 мол\_а.

#### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ:**

1. Amans D. et al. Origin of the nano-carbon allotropes in pulsed laser ablation in liquids synthesis //Journal of Colloid and Interface Science. – 2017. – V. 489. – P. 114-125.
2. Jariwala D. et al. Carbon nanomaterials for electronics, optoelectronics, photovoltaics, and sensing //Chemical Society Reviews. – 2013. – V. 42. – №. 7. – P. 2824-2860.
3. Arakelian S. et al. Progress in the Design of New Photonics and Optoelectronics Elements Using Advantages of Contemporary Femto-Nanophotonics //Journal of Russian Laser Research. – 2016. – Т. 37. – №. 5. – С. 494-506.
4. El-Kady M. F., Kaner R. B. Direct laser writing of graphene electronics //ACS nano. – 2014. – V. 8. – №. 9. – P. 8725-8729.
5. Al-Hamaoy A. et al. Liquid Phase–Pulsed Laser Ablation: A route to fabricate different carbon nanostructures //Applied Surface Science. – 2014. – V. 302. – P. 141-144.
6. Abramov D. et al. Interaction of femtosecond laser radiation with carbon materials: exfoliation of graphene structures and synthesis of low-dimensional carbon structures // Nanosystems: physics, chemistry, mathematics. 2016. Vol. 7(1). P. 220-225.
7. Luo J., Jang H. D., Huang J. Effect of sheet morphology on the scalability of graphene-based ultracapacitors //Acs Nano. – 2013. – V. 7. – №. 2. – P. 1464-1471.
8. Khorkov K. S. et al. Laser processing of materials in the multiple filamentation mode //Laser Optics (LO), 2016 International Conference. – IEEE, 2016. – P. R8-52-R8-52.