

## СИНТЕЗ НАНОСТРУКТУР МЕТАЛЛОВ В ЛАЗЕРНО-ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЕ В ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЕ

С.Д. Лещик, А.А. Лискович, А.А. Казьмин  
Гродненский государственный университет им. Я. Купалы,  
ул. Ожешко 22, Гродно 230023, Беларусь, L30041997@mail.ru

Представлены результаты экспериментального исследования методами АСМ-микроскопии состава, структуры и морфологии синтезированных наноструктур в лазерно-эмиссионной плазме в дистиллированной воде. Морфологическое разнообразие наночастиц размерностью до 100 нм не высокое. Наблюдаются частицы правильной формы: пирамидальные и конусообразные, а также неправильной формы. Больше половины синтезированных наночастиц никеля имеют размер меньше 60 нм. Плотность мощности лазерного импульса, используемого для получения лазерно-эмиссионной плазмы и синтеза наноструктур в ней, сильно влияет на их размерные распределения. Профили размерных распределений синтезированных наноструктур смещаются в сторону наночастиц больших размеров с ростом величины энергии лазерного импульса. Длина волны лазерного излучения существенного влияния на размерное распределение синтезированных наночастиц не оказывает. Показана возможность управления размерами синтезируемых наночастиц никеля путем изменения величины энергии лазерного импульса и путем изменения плотности мощности лазерного излучения на мишени.

**Ключевые слова:** наночастица; наноструктура; лазерная абляция; эрозионный кратер; лазерно-эмиссионная плазма; плазменный факел.

## SYNTHESIS OF METAL NANOSTRUCTURES IN LASER-EMISSION PLASMA IN DISTILLED WATER

S.D. Leshchik, A.A. Liskovich, A.A. Kazmin  
Yanka Kupala State University of Grodno,  
22 Ozheshko Str., 230023 Grodno, Belarus, L30041997@mail.ru

The article presents the results of an experimental study of the composition, structure, and morphology of synthesized nanostructures in laser-emission plasma in distilled water using AFM microscopy. The morphological diversity of nanoparticles up to 100 nm in size is not high. Regularly shaped particles are observed: pyramidal and cone-shaped, as well as irregularly shaped. More than half of the synthesized nickel nanoparticles are smaller than 60 nm. The power density of the laser pulse used to obtain laser-emission plasma and synthesize nanostructures in it greatly affects their size distributions. The profiles of the size distributions of the synthesized nanostructures shift toward larger nanoparticles with increasing laser pulse energy. The wavelength of laser radiation does not significantly affect the size distribution of the synthesized nanoparticles. The possibility of controlling the size of the synthesized nickel nanoparticles by changing the laser pulse energy and by changing the power density of laser radiation on the target is shown.

**Keywords:** laser ablation; erosion crater; laser-emission plasma; plasma torch; material removal; spectral line intensity.

### Введение

В настоящее время получению наноструктурированных материалов и их применению для модификации известных материалов и созданию новых метаматериалов уделяется большое внимание. Интерес к наноструктурам обусловлен их физико-химическими свойствами, которые значительно отличаются от свойств этих же

веществ, находящихся в макрофазном состоянии. Уменьшение размеров частиц до нанометров приводит к появлению у них квантово-размерных свойств. По этой причине они широко применяются при производстве аккумуляторных и солнечных батарей, сверхпроводников и композиционных материалов, оптических сенсоров, катализаторов, лекарств и т.д. [1-2].

Синтез наноструктур осуществляется различными методами. Для получения наноструктур металлов эффективными являются методы, основанных на использовании плазменного состояния вещества. Наиболее известными являются импульсная лазерная абляция [3-4] и электрический взрыв материалов в жидкостях [5]. Под воздействием сфокусированного лазерного излучения на материале образуется плазменный факел [6] излучение которого используется для элементного анализа в лазерно-эмиссионной спектроскопии [7, 8], а вынесенное вещество факела конденсируется в наноструктуры [1-4, 9].

### Экспериментальная установка

Установка состояла из импульсного наносекундного лазера LS-2147, оптической фокусирующей системы и кюветы с дистиллированной водой, в которой находился аблируемый материал. Абляция проводилась излучением с длиной волны 1064 нм, 532 нм и 355 нм. Энергия лазерного импульса регулировалась от 10 мДж до 120 мДж. Лазер может работать на частоте до 10 Гц. Диаметр пятна фокусировки лазерного излучения на образце составлял 0.5-1 мм. Исследования состава, структуры и морфологии полученных наноструктур проводилось на атомно-силовом микроскопе NT-206.

### Результаты и их обсуждение

В результате воздействия на образец никеля, находящийся в дистиллированной воде в течение 30 минут, получена наносuspension черно-графитового цвета со значительно сниженным светопропусканием по сравнению с чистой водой.

На рис. 1 приведены 3D АСМ-изображения наночастиц никеля. Их анализ показывает, что основное число наноструктур синтезируется размером до 100 нм. Наблюдаются наночастицы как правильной, так и неправильной формы. В поле сканирования АСМ микроскопа наноструктуры расположены хаотично. Они имеют четкий контур границ и доста-

точно большую высоту профиля. Кроме сферических наноструктур присутствуют частицы напоминающие пирамиды или конусы. Среди рассеянных частиц наблюдается присутствие в поле зрения АСМ микроскопа крупных одиночных частиц субмикронного уровня. Также наблюдались скопления наночастиц и их конгломераты, образованные из синтезированных наноструктур, расположенные в поле сканирования бессистемно.

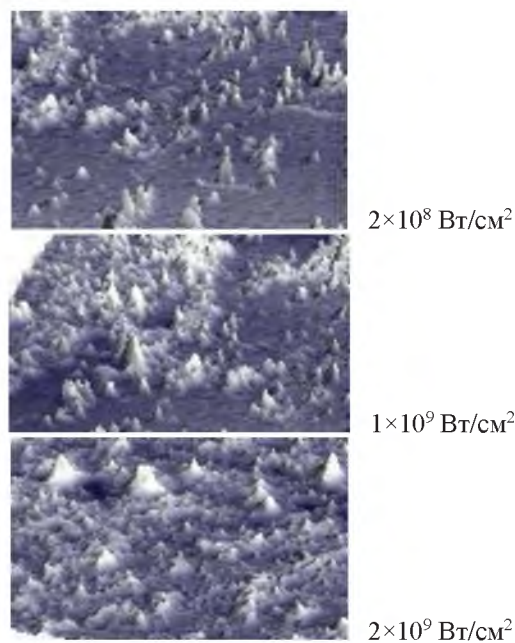


Рис. 1. 3D АСМ-изображения наночастиц Ni

Особенностью морфологии полученных наноструктур является то, что с ростом плотности мощности лазерного излучения на длине волны 532 нм в диапазоне от  $2 \times 10^8$  до  $2 \times 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, средний размер образующихся частиц и их количество возрастает. Значимых изменений морфологии наноструктур с ростом энергии лазерного импульса не наблюдалось.

На рис. 2 представлены гистограммы размерных распределений наночастиц, полученных абляцией никеля в воде на длине волны 532 нм при плотности мощности лазерного излучения  $2 \times 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> (1),  $1 \times 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> (2) и  $2 \times 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> (3). При плотности мощности лазерного излучения  $2 \times 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> более 70% наночастиц имеют размер до 60 нм. Максимум размерного распределения приходится на на-

ночастицы размером до 20 нм. Доля частиц размером до 20 нм составляет 20%. С ростом плотности мощности излучения максимум гистограммы размерного распределения наночастиц смещается в область больших размеров.

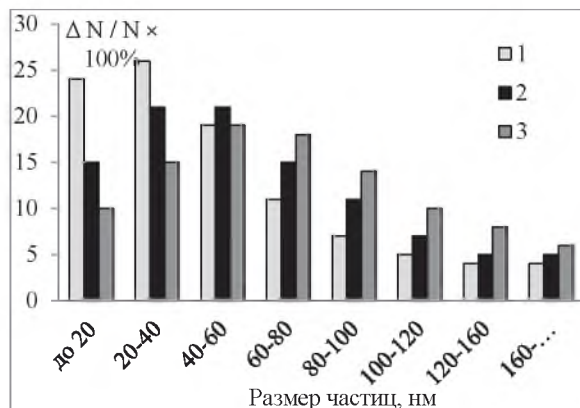


Рис. 2. Размерные распределения наночастиц Ni

Подобная ситуация наблюдалась при лазерной абляции никеля основной гармоникой лазера (1064 нм) и третьей гармоникой (335 нм). Хотя гистограммы размерных распределений синтезированных наночастиц несколько отличались, однако, тенденция к увеличению их размеров с ростом плотности мощности лазерного излучения прослеживались однозначно.

Моделирование лазерно-эмиссионной плазмы с использованием подходов разработанных при моделировании разрядной плазмы [10-12], показывают ее сильную нелинейность. Это приводит к сложностям в интерпретации полученных экспериментальных результатов.

## Заключение

Таким образом, реализован синтез наноструктур никеля в лазерной плазме в дистиллированной воде методами АСМ-микроскопии исследован состав, структура и морфология синтезированных наночастиц. На примере никеля показана возможность управления размерами синтезируемых наночастиц металлов изменением величины энергии лазерного импульса.

## Библиографические ссылки

1. Макаров Г.Н. Применение лазеров в нанотех-

- нологии: получение наночастиц и наноструктур методами лазерной абляции и лазерной нанолитографии. *УФН* 2013; 183(7): 673–718.
2. Тарасенко Н.В., Буцень А.В. Лазерный синтез и модификация композитных наночастиц в жидкостях. *Квант.электрон.* 2010; 40(11): 986–1003.
3. Гончарова Д.А., Лапин И.Н., Савельев Е.С., Светличный В.А. Структура и свойства наночастиц, полученных методом лазерной абляции объемных мишеней металлической меди в воде и этаноле. *Известия высших учебных заведений. Физика.* 2017; 60(7): 99–106.
4. Гусаков Г.А., Пузырев М.В., Горудко И.В., Шамова Е.В., Дорожкин Р.Н. Синтез и оптические характеристики наночастиц серебра, получаемых лазерной абляцией металла в жидкости. *Журнал БГУ. Физика* 2022; (2): 39–49.
5. Зноско К.Ф. Размерные характеристики наночастиц, синтезированных в плазме электро-взрывного разряда. *Вестник ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэматыка. Фіз. Інфарм., выліч. тэхн. і кір.* 2024; 14(1): 81–92.
6. Курьян Н.Н., Зноско К.Ф., Григуть В.В. Временная динамика свечения лазерно-эмиссионного факела глины. *Вестник ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер.2. Матэматыка. Фіз. Інфарм., выліч. тэхніка і кір.* 2018; 8(2): 101–110.
7. Ануфрик С.С., Зноско К.Ф., Курьян Н.Н. Спектральный анализ элементного состава древесноволокнистой плиты. *Вестник ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэма.т. Фіз. Інфарм., выліч. тэхніка і кіраванне* 2015; (3): 83–92.
8. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Зноско К.Ф., Анучин С.Н. Исследование микроэлементного химического состава строительного песка методами спектрального анализа. *Вестник ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэма.т. Фіз. Інфармат., выліч. тэхніка і кіраванне* 2016; 6(2): 57–63.
9. Зноско, К.Ф. Механизмы усиления интенсивности спектральных линий плазмы и роста выноса материала из эрозийного кратера при двухимпульсной лазерной абляции. *Вестник ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер.2. Матэма.т. Фіз. Інфарм., выліч.тэхніка і кір.* 2023; 13(1): 116–132.
10. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., Znosko K.F. Kinetic model for XeCl-lasers. *Proc. 8th Internat. Conf. on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, LFNМ 2006.* Kharkiv, Ukraine, June 2006. P. 80–83, 4018200.
11. Anufrik Slavomir, Volodenkov Alexander, Znosko Kazimir. Simulation of active medium of XeCl lasers. *Proceedings of SPIE 6731, International Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2007: Advanced Lasers and Systems.* Minsk, Belarus. 2007. 673106.
12. Anufrik S., Volodenkov A., Znosko K. Modeling of emission characteristics of XeCl excilamps in pulse-periodic mode of work. *High Temp. Mater. Process.* 2014; 18(3): 181–196.