

60°C достигается максимальное значение микротвердости и минимальное значение шероховатости покрытий. Также при данной температуре покрытия получают равномерные с высокими декоративными свойствами.

### Список использованных источников

1. Yufang, Y. Preparation of Fe-Co-Ni Ternary Alloys with Electrodeposition / Y. Yufang // Int. J. Electrochem. Sci. – 2015. – V. 10, no 1. – P. 5164 – 5175.

УДК 539.234

**Н.Н. Тарасенко<sup>1</sup>, В.В. Корнев<sup>1</sup>, Н.В. Тарасенко<sup>1</sup>,  
С.Т. Пашаян<sup>3</sup>, А.В. Буцень<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси

<sup>2</sup>Белорусский государственный технологический университет  
Минск, Беларусь

<sup>3</sup>Институт физических исследований НАН Армении  
Аштарак-2, Армения

### СИНТЕЗ НАНОСТРУКТУР МЕДИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

*Аннотация.* В данной работе методом наносекундной лазерной абляции (ЛА) мишеней из меди и оксида меди (II) получены коллоидные растворы наночастиц в различных жидкофазных средах. Показано, что составом и морфологией наночастиц можно управлять путем выбора жидкой среды, в которой осуществлялся синтез.

**N.N. Tarasenko<sup>1</sup>, V.V. Kornev<sup>1</sup>, N.V. Tarasenko<sup>1</sup>,  
S.T. Pashayan<sup>3</sup> A.V. Butsen<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>B.I. Stepanov Institute of Physics, NAS of Belarus

<sup>2</sup>Belarusian State Technological University  
Minsk, Belarus

<sup>3</sup>Institute for Physical Research, NAS of Armenia,  
Ashtarak-2, Armenia

### SYNTHESIS OF COPPER NANOSTRUCTURES BY LASER ABLATION IN LIQUIDS

***Abstract.** In this work, colloidal solutions of nanoparticles in various liquids were obtained using nanosecond laser ablation (LA) of copper and copper oxide (II) targets. It was shown that the composition and morphology of nanoparticles can be controlled by choosing the liquid medium in which the synthesis was carried out.*

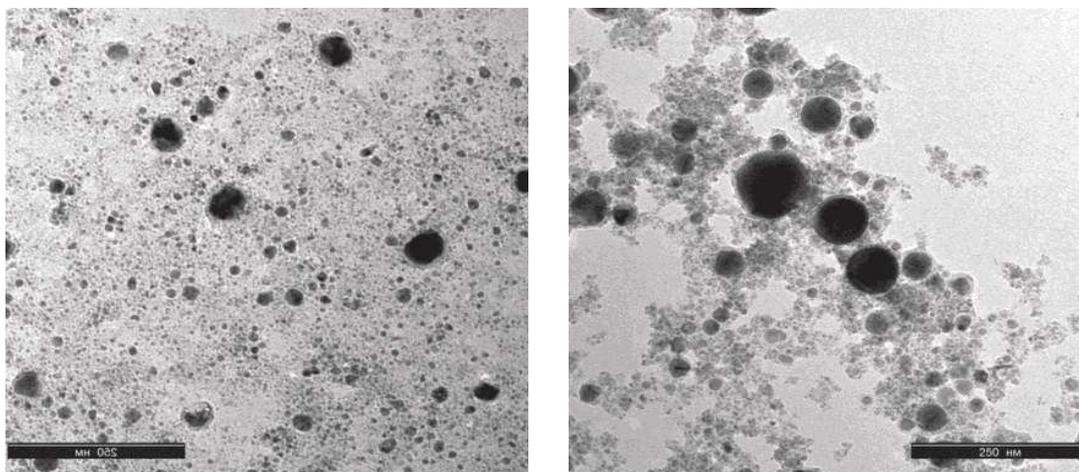
В последние годы большой научный и практический интерес представляют наноструктурные и нанокompозитные материалы, наночастицы оксидов переходных металлов и полупроводниковые металл – оксидные наноструктуры, которые имеют широкий спектр применения в новейшей оптоэлектронной и лазерной технике, в устройстве солнечных элементов, сенсоров и детекторов, в биомедицине и катализе и т.д. [1-3]. Среди новых технологий получения наночастиц (НЧ) важными преимуществами обладает метод импульсной лазерной абляции в жидкости (ИЛАЖ) [1,2].

В настоящей работе методом двухимпульсной ИЛАЖ твердотельных мишеней в различных жидкофазных средах без использования каких-либо поверхностно-активных веществ или стабилизаторов были получены НЧ меди (Cu) и ее оксида (CuO) при вариации параметров лазерного излучения и свойств жидкости.

Для проведения эксперимента использовался импульсный наносекундный Nd<sup>3+</sup> : YAG лазер (LOTIS ТП, LS 2134D, Беларусь), работающий в двухимпульсном режиме. Основные параметры лазерного излучения следующие: длина волны 1064 нм, энергия 80 мДж/импульс, длительность импульса 10 нс, частота повторения импульсов 10 Гц [2]. Задержку между сдвоенными импульсами установили равной 10 мкс, при которой, как показали предыдущие исследования, наблюдается наиболее эффективная абляция материала мишени и вследствие этого происходит формирование коллоидного раствора с максимальной концентрацией НЧ. В качестве мишеней использовались металлическая медная пластина и мишень из спрессованного порошка CuO (99, 9%). Абляцию мишеней проводили в течение 15 минут в дистиллированной воде, ацетоне и изопропиловом спирте. Плотность мощности лазерного излучения на поверхности мишени составляла от 10<sup>8</sup> до 10<sup>9</sup> Вт/см<sup>2</sup>. Морфология, размер и структура полученных НЧ после их осаждения из раствора анализировались с использованием сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии (СЭМ и ПЭМ), а также применялись абсорбционная (UV-vis) спектроскопия и рентгеноструктурный анализ.

На рис. 1 представлены ПЭМ-изображения полученных НЧ после ЛА в изопропиловом спирте и ацетоне. Анализ изображений показывает, что получены квазисферические НЧ со схожей морфологией во всех растворах, размеры которых лежат в интервале от

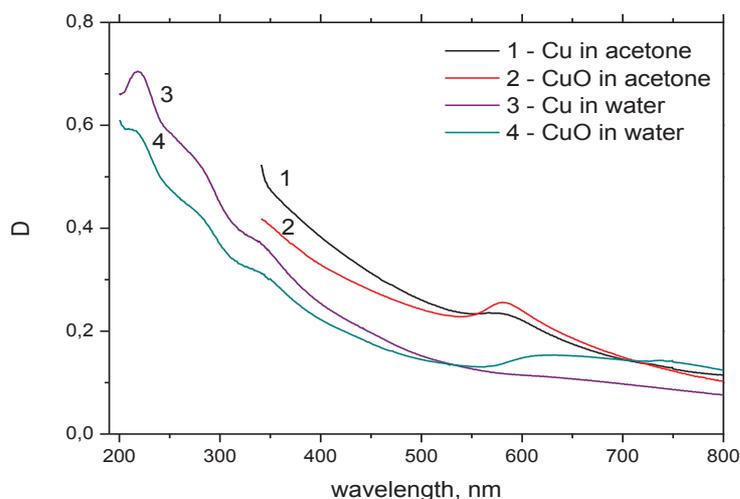
5 до 50 нм, хотя наблюдаются и небольшие агломерации с размерами в пределах от 50 до 100 нм. Но и эти крупные частиц, скорее всего, являются результатом агломерации в процессе пробоподготовки образцов для проведения измерений на электронном микроскопе.



**Рис. 1 - ПЭМ- изображения НЧ, полученных лазерной абляцией в ацетоне медной мишени (слева) и мишени CuO (справа)**

Спектры оптического поглощения (экстинкции) растворов, полученных абляцией медной и оксидной мишеней в воде и в ацетоне, приведены на рис.2. Наблюдается полоса (пик) с максимумом около 580 нм, что относится к полосе плазменного поглощения НЧ Cu, связанного с коллективным возбуждением электронов проводимости металла. Проведение абляции в дистиллированной воде (кривые 3 и 4) не приводит к появлению указанного пика, что объясняется достаточно быстрым окислением наночастиц в воде. Напротив, лазерная абляция в ацетоне приводит к формированию медных НЧ, причем вид спектра практически не зависит от типа используемой исходной мишени (кривые 1 и 2).

Отметим, что после дополнительного лазерного облучения полученных коллоидов несфокусированным пучком второй гармоники (длина волны 532 нм) Nd:YAG-лазера во всех коллоидах наблюдалось полное исчезновение полосы поверхностного плазмона, свидетельствующее об окислении металлических частиц независимо от используемой мишени (Cu или CuO) и состава жидкости.



**Рис. 2 - Спектры поглощения НЧ, полученных ЛА медной мишени и мишени CuO в дистиллированной воде и ацетоне**

Таким образом, в настоящей работе методом двухимпульсной ИЛАЗ твердотельных мишеней в различных жидкофазных средах без использования каких-либо поверхностно-активных веществ или стабилизаторов были получены НЧ меди (Cu) и ее оксида (CuO); исследованы структурные, морфологические и оптические характеристики сформированных НЧ. Показано, что составом и морфологией наночастиц можно управлять, варьируя состав и свойства мишени и жидкой среды, в которой осуществляется синтез. Установлено, что лазерная абляция в ацетоне приводит к формированию НЧ металлической меди, изменение же растворителя на дистиллированную воду позволяет формировать преимущественно оксидные НЧ. При абляции мишени CuO в воде наблюдается слабая широкая плазменная полоса с максимумом около 633 нм (1,96 эВ), которая позволяет сделать вывод о формировании НЧ металлической меди наряду с оксидными наноструктурами.

В дальнейшем планируется использовать полученные наноструктуры для формирования активного материала фотовольтаических элементов.

### **Список использованных источников**

1. Zeng H., Du X.W., Singh S.C., Kulinich S.A., Yang S., He J., Cai W. / Nanomaterials via laser ablation/irradiation in liquid: A review.//Adv. Funct.Mat.2012; 22: P.1333.

2. Tarasenko N. V., Butsen A. V. Laser synthesis and modification of composite nanoparticles in liquids / *Quant. Electron.* 2010; 40: P. 986-1003.

3. N. N. Tarasenko, A.V. Butsen, N.V. Tarasenko, S.T. Pashayan. Laser assisted fabrication and modification of metal oxides nanostructures. «Armenia in focus SPIE: Optics-2016», (25-28 July, 2016), Armenia, Yerevan: P. 91.

УДК 621.7

**А.В. Волокитин, И.Е. Волокитина**  
Карагандинский индустриальный университет  
Темиртау, Казахстан

### **ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ ПОСЛЕ СКРУЧИВАНИЯ В РАВНОКАНАЛЬНОЙ СТУПЕНЧАТОЙ МАТРИЦЕ И ВОЛОЧЕНИЯ**

*Аннотация.* Исследовано влияние новой технологии обработки медной проволоки на изменение ее микроструктуры. В результате деформирования была получена медная проволока с градиентной структурой. Поверхностный слой измельчен до 500 нм на глубину  $\approx 1$  мм. Далее размер зерен увеличивается к центральной части проволоки и составляет 4 мкм.

**A.V. Volokitin, I.E. Volokitina**  
Karaganda Industrial University  
Temirtau, Kazakhstan

### **EVOLUTION OF COPPER WIRE MICROSTRUCTURE AFTER TWISTING IN AN EQUAL-CHANNEL STEPPED MATRIX AND DRAWING**

*Abstract.* The influence of a new technology of copper wire processing on the change of its microstructure has been investigated. As a result of deformation a copper wire with a gradient structure was obtained. The surface layer is crushed to 500 nm at a depth of  $\approx 1$  mm. Further the grain size increases to the central part of the wire and is 4  $\mu\text{m}$ .

При волочении проволоки среднего и большого сечения использование больших обжатий и, следовательно, большого количества циклов деформирования нецелесообразно, так как исходный диаметр проволоки ограничен, а увеличение числа проходов