

водилось люминесцентным методом. Для этого после соответствующей обработки поверхности подложки фосфида индия, диэлектрическая пленка удалялась химическим травлением. Известно, что длинноволновые полосы (0,9–1,2) эВ в фосфиде индия связаны с вакансиями фосфора и индия [2]. Поэтому исследование зависимости изменения отношения интегральных интенсивностей длинноволновой полосы к краевой полосе от глубины снятия верхнего слоя подложки позволяет определить относительное изменение концентрации дефектов по глубине монокристаллического фосфида индия. Исследования фотолюминесценции при низком уровне возбуждения проводилась при 77 К. Источником возбуждения служил (He-Cd)-лазер с  $\lambda = 441,6$  нм. Каждое измерение проводилось в 3–5 точках пластины и усреднялось. Люминесцентные исследования приповерхностных слоев фосфида индия показали, что наименьшее изменение величины отношения интегральной интенсивности длинноволновой полосы (1,08 эВ) к интегральной интенсивности краевой полосе (1,41 эВ) было у подложек, на которых формировались маскирующие покрытия пиролизическим разложением тетраэтоксисилана в присутствии травящих добавок (рис. 2, б). Сильное изменение величины  $I_{дл}/I_{кр.}$  по глубине припо-

верхностного слоя связывается с процессом формирования пленки двуокиси кремния, т.е. происходит нестехиометрическое разложение фосфида индия, покрытого пленкой собственного окисла. Использование в процессе формирования диэлектрической пленки травящих добавок приводит к удалению верхних нестехиометрических слоев с последующей пассивацией поверхности фосфида индия пленкой двуокиси кремния.

Таким образом, исследование влияния физико-технологических факторов предростовой подготовки подложек фосфина индия на структурное совершенство приповерхностных слоев позволило установить оптимальные технологические режимы в предростовой камере. Минимальные нарушения приповерхностных слоев фосфида индия наблюдались при парциальных давлениях фосфина  $(3-5) \cdot 10^2$  Па, в температурном диапазоне 400–960 К.

#### Литература

1. Марина, Л. И. Полупроводниковые фосфиды АПВ и твердые растворы на их основе / Л. И. Марина, А. Я. Нашельский, Л. И. Колесник. – М.: Металлургия, 1974. – 232 с.
2. Temkin, N. Photoluminescence study of melt grown InP / N. Temkin, W. A. Bonner // J. Appl. Phys. – 1981. – Vol. 51, № 1. – P. 397–401.

УДК 620.3

### ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

Маркевич М.И.<sup>1</sup>, Малышко А.Н.<sup>1</sup>, Журавлева В.И.<sup>2</sup>, Щербакова Е.Н.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»

<sup>2</sup>Военная академия Республики Беларусь

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** В настоящей работе исследовались морфология поверхности наночастиц алюминия. Для получения материала использовали лазер на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующий в двухимпульсном режиме. Исследования наночастиц алюминия, образовавшихся в результате лазерного воздействия, проводились на растровом электронном микроскопе MIRA-3.  
**Ключевые слова:** морфология поверхности, наночастицы алюминия, лазерная абляция.

### PRODUCTION OF ALUMINUM NANOPARTICLES BY LASER ABLATION

Markevich M.<sup>1</sup>, Malyshko A.<sup>1</sup>, Zhuravleva V.<sup>2</sup>, Shcherbakova E.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Physical-technical Institute of the NAS of Belarus

<sup>2</sup>Military Academy of the Republic of Belarus

<sup>3</sup>Belarusian National Technical University  
Minsk, Belarus

**Abstract.** In this work, we investigated the surface morphology of aluminum nanoparticles. To obtain the material, a yttrium aluminum garnet laser (LS-2134D) with a wavelength of 1064 nm, generating in a two-pulse mode, was used. Studies of aluminum nanoparticles formed as a result of laser exposure were carried out on a scanning electron microscope MIRA-3.

**Key words:** surface morphology, aluminum nanoparticles, laser ablation.

Адрес для переписки: Щербакова Е.Н., пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Республика Беларусь  
e-mail: scherbakova@bntu.by

**Введение.** Интерес к наноматериалам, особенно к наночастицам обусловлен существенным изменением их физических свойств по сравнению с массивными материалами, вызванный соизмеримостью вкладов в свободную энергию наночастицы, как объемной, так и поверхностной составляющей. Одним из актуальных методов использования импульсного лазерного излучения является получение металлических наночастиц в жидкостях. Преимуществами лазерной абляции материалов в жидкостях являются: относительная простота процесса, возможность получения готовых коллоидных растворов, возможность получения частиц малого размера.

Принципиально новый материал, который состоит из воды и наночастиц алюминия, был разработан для применения в двигателях и устройствах преобразования энергии [1–2].

**Методика проведения исследований.** В настоящей работе в качестве мишени использовали поликристаллический алюминий, а в качестве среды, в которой находилась алюминиевая мишень, применяли дистиллированную воду. При этом жидкость принудительно не перемешивали.

Для обработки материала использован лазер на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующий в двухимпульсном режиме (импульсы разделены временным интервалом 3 мкс, длительность импульсов 10 нс, частота следования импульсов 10 Гц, энергия одиночного импульса ~0,05 Дж).

Образованная в результате испарения алюминия под действием первого импульса абляционная плазма создает в приповерхностном слое область с повышенной температурой и пониженной плотностью частиц воздуха, что приводит к более полному использованию энергии второго импульса для лазерной абляции.

Образец обрабатывали лазерным излучением в интервале энергий 1000–1500 Дж при временах экспозиции от 10 до 25 мин. Размеры образцов: толщина ~ 10 мм, длина – 30 мм, ширина – 12 мм.

В процессе получения и во время хранения водных растворов наночастиц алюминия не применяли поверхностно-активные вещества.

В настоящей работе исследовались морфология поверхности наночастиц алюминия. Исследования образцов проводились на растровом электронном микроскопе MIRA-3

Особенности микроскопа MIRA:

- катод Шоттки высокой яркости для получения отображений высокого разрешения, высокой кратности, с низким уровнем шумов;
- запатентованная трехлинзовая электронная оптика;
- система торможения пучка для накопления изображений с высоким разрешением при минимальных энергиях пучка (от 50 эВ);

- In-Beam – детекторы, встроенные в объективную линзу, позволяют получать изображения превосходного качества во вторичных и в отраженных электронах;

- высокая скорость сканирования вплоть до 20 нс/пкс;

- полностью автоматизированная процедура настройки микроскопа предусматривает, в частности, оптимизацию параметров электронной оптики;

- современное программное обеспечение.

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 1 приведено полученное на микроскопе MIRA изображение морфологии частицы алюминия, образовавшейся в результате лазерного воздействия.

Размер частиц составляет от 20 нм до 0,6 мкм (рис. 1).

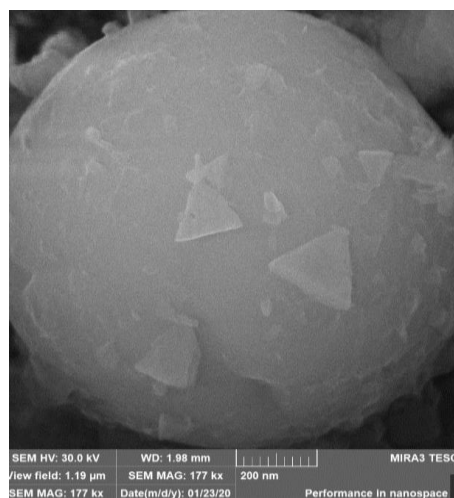


Рисунок 1 – Морфология поверхности частиц алюминия, образовавшихся в результате лазерного воздействия. Вложенная энергия 1500 Дж, время воздействия 25 мин

На поверхности крупной частицы размером 1000 нм видны более мелкие частицы. Необходимо отметить, что форма некоторых частиц имеет правильную кристаллографическую огранку.

При выходе эрозионной плазмы, образующейся под действием лазерного импульса в водную среду, происходит ее охлаждение со скоростью более 106 град/с.

Наночастицы, полученные методом лазерной абляции в жидкости, как показывают исследования [3], могут быть, как кристаллическими, так и аморфными.

Процесс конденсации наночастиц может происходить по двум различным механизмам: пар-жидкость (п→ж) и пар-кристалл (п→к) [4–5].

В общем образовавшаяся по механизму п→ж наночастица может находиться в аморфном состоянии или в дальнейшем кристаллизоваться (частица имеют правильную геометрическую форму в виде треугольников) по механизму (ж→к) (рис. 1).

**Выводы.** Таким образом, в процессе проведенных исследований была изучена морфология поверхности наночастиц алюминия, полученных путем обработки лазером на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D), определены размеры наночастиц.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что лазерная абляция в двухимпульсном режиме в интервале энергий 1000–1500 Дж при временах экспозиции от 10 до 25 мин является перспективным методом обработки для получения наночастиц алюминия.

#### Литература

1. Combustion of frozen nanoaluminium and water mixtures / G. A. Risha [et al.] // J. Propul. Power. – 2014. – Vol. 30, № 1. – P. 133–142.

2. Tappan Combustion of nanoaluminium and liquid water / G. A. Risha [et al.] // Proc. Combust. Inst, 2007. – Vol. 31, № 2. – P. 2029–2036.

3. Маркевич, М. И. Структурные превращения в тонких металлических пленках при импульсном лазерном воздействии / М. И. Маркевич, А. М. Чапланов // Вести Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук, 2016. – № 1. – С. 28–35.

4. Возможности получения наночастиц никеля в водной среде с помощью лазерного воздействия / В. К. Гончаров [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2008. – Т. 81, № 2. – С. 206–210.

5. Формирование коллоидных растворов металлов в воде методом лазерной абляции / В. К. Гончаров [и др.] // Актуальные проблемы физики твердого тела. – 2009. – С. 381–382.

УДК 539.23

### ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ПЕРФТОРИРОВАННЫХ АМФИФИЛЬНЫХ КИСЛОТ МЕТОДОМ ЛЕНГМЮРА–БЛОДЖЕТТ

Мельникова Г.Б.<sup>1</sup>, Лапицкая В.А.<sup>1,2</sup>, Хабарова А.В.<sup>1</sup>, Кузнецова Т.А.<sup>1,2</sup>, Чижик С.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси»

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

**Аннотация.** На поверхности кремния и наноструктурированных никелевых поверхностях методом Ленгмюра–Блоджетт сформированы пленки на основе перфторированных амфифильных кислот с добавлением различно количества наночастиц диоксида кремния. Проведены исследования морфологии и шероховатости поверхности полученных пленок методом атомно-силовой микроскопии. Установлено увеличение значений шероховатости пленок Ленгмюра–Блоджетт на кремнии с увеличением содержания наночастиц. Пленка Ленгмюра–Блоджетт из перфторированной кислоты с 1 мг наночастиц оксида кремния приводит к уменьшению шероховатости на наноструктурированных никелевых поверхностях. Полученные слои планируется применять для управляемого изменения смачиваемости поверхности.

**Ключевые слова:** перфторированные амфифильные кислоты, пленки, метод Ленгмюра–Блоджетт, атомно-силовая микроскопия.

### FORMING OF FILMS BASED ON PERFLUORINATED AMPHIPHILIC ACIDS BY THE LANGMUIR – BLODGETT METHOD

Melnikova G.<sup>1</sup>, Lapitskaya V.<sup>1,2</sup>, Khabarava A.<sup>1</sup>, Kuznetsova T.<sup>1,2</sup>, Chizhik S.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

**Abstract.** Films based on perfluorinated amphiphilic acids with the addition of various amounts of silicon dioxide nanoparticles were formed on the silicon surface and nanostructured nickel surfaces by the Langmuir-Blodgett method. The morphology and surface roughness of the obtained films were studied by atomic force microscopy. An increase in the roughness values of Langmuir-Blodgett films on silicon with an increase in the content of nanoparticles has been established. Langmuir-Blodgett film of perfluorinated acid with 1 mg of silicon oxide nanoparticles leads to a decrease in roughness on nanostructured nickel surfaces. The obtained layers are planned to be used for controlled changes in the wettability of the surface.

**Key words:** perfluorinated amphiphilic acids, films, Langmuir-Blodgett method, atomic force microscopy.

Адрес для переписки: Лапицкая В.А., ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Республика Беларусь  
e-mail: vasilinka.92@mail.ru

**Введение.** Поверхности, образованные перфторированными цепями амфифильных соединений, одновременно обладают гидрофобными и липофобными свойствами. Поверхностное натя-

жение перфторалканов в среднем вдвое меньше, чем у алканов с аналогичной длиной цепи. Следовательно, перфторированные поверхностно-активные вещества в водном растворе способны