

СИНТЕЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ЖИДКОСТИ

А.А. Петровская

alisa.1321@yandex.ru

SPIN-код: 9838-9707

С.А. Фомина

sveta7.fomina@yandex.ru

SPIN-код: 1034-4023

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Обозначена актуальность использования наночастиц в различных сферах науки и техники. Описан метод получения наночастиц, в основе которого лежит процесс лазерной абляции в жидкости. Приведены преимущества использования данного метода. Выявлены трудности при контроле и управлении характеристиками наночастиц в процессе синтеза. Показан состав экспериментальной установки, используемой в данной работе. Приведена методика проведения исследований. Приведены результаты исследования наночастиц, полученных методом лазерной абляции в жидкости. Представлена графическая зависимость экстинкции коллоидного раствора от энергии в импульсе. Проведен анализ полученных экспериментальных данных и выявлено, что пик плазмонного резонанса наночастиц совпадает с теоретическими данными.

Ключевые слова

Наночастицы, синтез, лазер, абляция, коллоидные растворы, экстинкция, плазмонный резонанс, спектрофотометрия

Поступила в редакцию 08.10.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Введение. В современной науке одним из наиболее перспективных и развивающихся направлений является получение и изучение свойств наноразмерных объектов — наночастиц [1]. В настоящее время наночастицы нашли применения в таких сферах, как наноэлектроника, нанофотоника, медицина, системы связи и др. [2]. Наночастицы, в первую очередь, интересны тем, что многие их химические, физические и термодинамические свойства существенно отличаются от свойств составляющих их атомов и молекул вещества, что позволяет получать новые материалы с уникальными свойствами. Наночастицы металлов обладают уникальными электронными, каталитическими и оптическими свойствами, которые находят применение в таких областях техники, как солнечная энергетика, спектроскопия, микроэлектроника и медицина [3, 4].

Лазерная абляция в жидкости. Существует множество способов получения наночастиц: физические (электродный, метод ионного распыления), химические (фотолиз) и лазерный (лазерная абляция в жидкости).

Настоящая работа посвящена одному из наиболее быстроразвивающихся методов синтеза наночастиц — лазерной абляции в жидкости (ЛАЖ), позволя-

ющему получать коллоидные растворы с характеристиками, которые не могут быть достигнуты другими методами. В отличие от других методов ЛАЖ не требуются длительное время для проведения химических реакций, а также высокие температуры и давления либо многоступенчатые процессы, характерные для химического синтеза; нет необходимости использовать токсичные или взрывоопасные химические исходные вещества [5].

Лазерная абляция позволяет получать наночастицы различного типа, включая металлические, полупроводниковые и полимерные частицы, а также наночастицы сложных многоэлементных металлических и полупроводниковых сплавов [6].

Материальный состав мишени полностью отражается на составе наночастиц, а в течение процесса абляции не появляются посторонних веществ.

Метод лазерной абляции применим практически с неограниченной комбинацией материалов мишеней и жидкостей, что позволяет осуществлять синтез наночастиц в подобранной среде [7, 8]. Свойства генерируемых наночастиц: форма, размер, распределение по размерам, состав и структура для каждого материала мишени — зависят от параметров лазера, используемого для абляции (длины волны излучения, длительности и частоты следования импульсов, энергии в импульсе), а также от условий окружения (вакуум, фиксированное давление газа либо жидкость).

Кроме того, при генерации наночастиц в жидкостях удается реализовать уникальное преимущество — возможность управлять распределением частиц по размеру (с пиком в диапазоне 5...500 нм) за счет изменения длительности процесса абляции или дополнительного облучения наночастиц в коллоидном растворе после их получения [9].

Также методом ЛАЖ можно формировать коллоидные сплавы, т. е. коллоидные растворы, которые состоят из сплава или смеси разных типов наночастиц [10].

Основным недостатком метода ЛАЖ мишеней для получения наночастиц является его низкая производительность (15 мг/ч) по сравнению с традиционными химическими методами. Однако производительность многих альтернативных методов сопоставима с ЛАЖ. Другим недостатком этого метода является большая дисперсия получаемых частиц по форме и размерам.

Были обнаружены трудности при контроле и управлении характеристиками наночастиц в процессе синтеза. Многие параметры невозможно контролировать привычными для макроразмерных объектов способами, поэтому следует уделить особое внимание разработке методов их измерения. Несмотря на то что лазерный метод синтеза позволяет управлять физическими параметрами синтезируемых частиц, нельзя точно определить влияние на них каких-либо параметров лазерного излучения. С учетом особенностей выбранной технологии возникает сложность с исследованием непосредственно образуемых частиц.

Экспериментальное оборудование. В данной работе были проведены исследования по получению наночастиц путем лазерной абляции в жидкости (дистиллированной воде). В ходе экспериментов использован лазерный лабораторный комплекс ЛКЗ. В состав лабораторного комплекса ЛКЗ входят:

- лазерная установка;
- управляющий компьютер;
- программное обеспечение Vitro NC GUI , Vitro2D Pro.

Общий вид лазерного комплекса представлен на рис. 1.

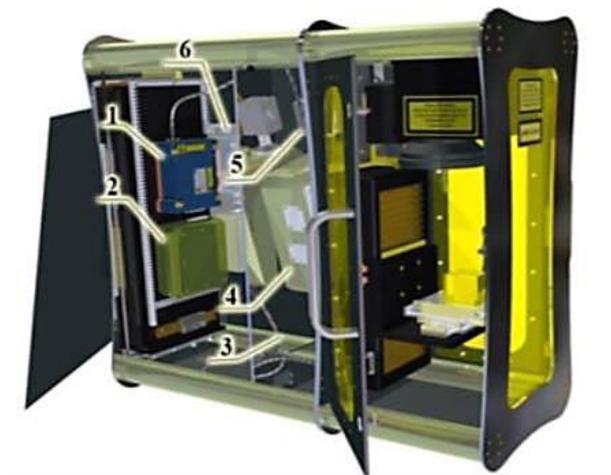


Рис.1. Лазерный лабораторный комплекс ЛКЗ:

- 1 — блок накачки; 2 — блок системы управления; 3 — оптоволокно; 4 — узел излучателя;
5 — узел 45-градусного поворотного зеркала; 6 — блок питания

Получившиеся коллоидные растворы исследовали методом спектрофотометрии. Для этого был использован спектофотометр Lambda 750 — сканирующий двухлучевой спектофотометр с двойным монохроматором.

Методика проведения эксперимента. Схема эксперимента показана на рис. 2. В кварцевую кювету была налита дистиллированная вода, на ее дне находилась металлическая мишень, которую облучали в перпендикулярном направлении (сверху вниз).

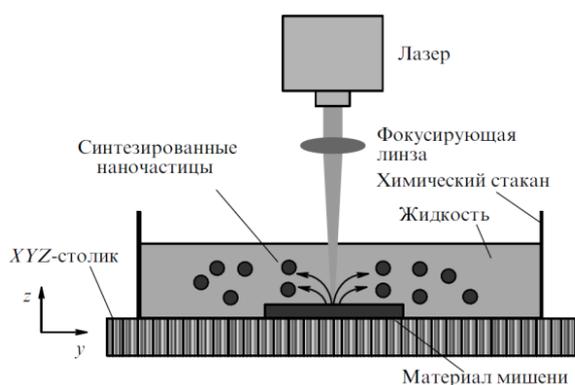


Рис. 2. Схема эксперимента

Для среды, исследуемой в данной работе, определяли число импульсов. Энергия лазерного импульса оставалась постоянной и была равна 250 мкДж.

Число импульсов изменялось в промежутке от 50 тыс. и 400 тыс. с частотой 2 кГц. Образцы исследовали с помощью спектрофотометрии: измеряли экстинкцию полученных коллоидных растворов. На основе полученных экспериментальных данных по пику плазмонного резонанса можно определить, какие именно наночастицы были получены.

Результаты измерений представлены на рис. 3.

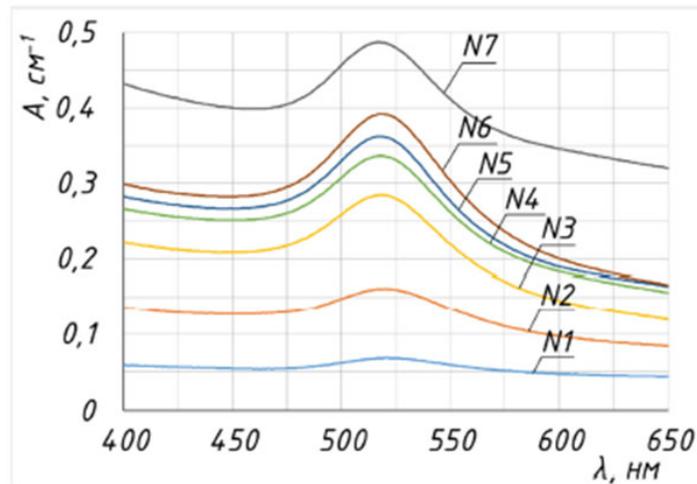


Рис. 3. Зависимость экстинкции коллоидного раствора от числа импульсов:

$N1$ — 50 тыс. имп., $N2$ — 100 тыс. имп., $N3$ — 200 тыс. имп., $N4$ — 300 тыс. имп.,
 $N5$ — 350 тыс. имп., $N6$ — 400 тыс. имп., $N7$ — 300 тыс. имп. при высокой энергии

Заключение. С малым числом импульсов пик наиболее сглажен, затем при увеличении количества импульсов мы можем наблюдать постепенное выражение пика экстинкции. Анализ графика выявил, что пик плазмонного резонанса наночастиц соответствует длине волны $\lambda = 520$ нм, что совпадает с теоретическими данными.

Литература

- [1] Макаров Г.Н. Применение лазеров в нанотехнологии: получение наночастиц и наноструктур методами лазерной абляции и лазерной нанолитографии. *УФН*, 2013, № 7, с. 673–718.
- [2] Amendola V., Meneghetti M. What controls the composition and the structure of nanomaterials generated by laser ablation in liquid solution? *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2013, vol. 15, no. 9, pp. 3027–3046. DOI: 10.1039/C2CP42895D URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2013/cp/c2cp42895d#ldivAbstract>
- [3] Petridis C., Savva K., Kymakis E., et al. Laser generated nanoparticles based photovoltaics. *J. Colloid Interface Sci.*, 2017, vol. 489, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.jcis.2016.09.065 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021979716307287>
- [4] Atwater H.A., Polman A. Plasmonics for improved photovoltaic devices. *Nat. Mater.*, 2010, no. 9, pp. 205–213.

- [5] Gçkce B., Amendola V., Barcikowski S. Opportunities and challenges for laser synthesis of colloids. *Chem. Phys. Chem.*, 2017, vol. 18, no. 9, pp. 1–3. DOI: 10.1002/cphc.201700310 URL: <https://www.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cphc.201700310>
- [6] Солдатов А.Н., Васильева А.В. Эффект лазерной резонансной абляции в микро- и нанотехнологиях. *Известия Томского политехнического университета*, 2007, № 2, с. 81–84.
- [7] Серков А.А., Кузьмин П.Г., Раков И.И. и др. Влияние лазерного пробоя на фрагментацию наночастиц золота в воде. *Квантовая электроника*, 2016, № 8, с. 713–718.
- [8] Симакин А.В., Воронов В.В., Шафеев Г.А. Образование наночастиц при лазерной абляции твердых тел в жидкостях. *Труды ИОФАН*, 2004, т. 60, с. 83–107.
- [9] Mafune F., Kohno J., Takeda Y., et al. Full physical preparation of size-selected gold nanoparticles in solution: laser ablation and laser-induced size control. *J. Phys. Chem. B*, 2002, vol. 106, no. 31, pp. 7575–7577. DOI: 10.1021/jp020577y URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jp020577y>
- [10] Шиганов И.Н., Мельников Д.М., Якимова М.А. Исследование взаимодействия лазерного излучения с рассеивающими жидкими средами в условиях изменения функции распределения взвешенных частиц по размерам. *Квантовая электроника*, 2016, № 9, с. 855–859.

Петровская Алиса Александровна — студентка кафедры «Лазерные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Фомина Светлана Андреевна — студентка кафедры «Лазерные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Богданов Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Мельников Дмитрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Петровская А.А., Фомина С.А. Синтез металлических наночастиц методом лазерной абляции в жидкости. *Политехнический молодежный журнал*, 2019, № 11(40). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-11-545>

SYNTHESIS OF METAL NANOPARTICLES BY LASER ABLATION IN A LIQUID

A.A. Petrovskaya

alisa.1321@yandex.ru

SPIN-code: 9838-9707

S.A. Fomina

sveta7.fomina@yandex.ru

SPIN-code: 1034-4023

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article discusses the relevance of using nanoparticles in various fields of science and technology. A method is described for producing nanoparticles, based on the process of laser ablation in a liquid. The advantages of using this method are given. Difficulties in monitoring and controlling the characteristics of nanoparticles in the synthesis process have been identified. The components of the experimental installation used in this work are shown. The research methodology is given. The results of a study of nanoparticles obtained by laser ablation in a liquid are presented. The graphical dependence of the extinction of a colloidal solution on energy in a pulse is presented. The analysis of the obtained experimental data is carried out and it is revealed that the peak of plasmon resonance of nanoparticles coincides with the theoretical data.

Keywords

Nanoparticles, synthesis, laser, ablation, colloidal solutions, extinction, plasmon resonance, spectrophotometry

Received 08.10.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Makarov G.N. Laser applications in nanotechnology: Nanofabrication using laser ablation and laser nanolithography. *UFN*, 2013, no. 7, pp. 673–718 (in Russ.). (Eng. version: *Phys.-Usp.*, 2013, vol. 56, no. 7, pp. 643–682. DOI: 10.3367/UFNe.0183.201307a.0673 URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.3367/UFNe.0183.201307a.0673>)
- [2] Amendola V., Meneghetti M. What controls the composition and the structure of nanomaterials generated by laser ablation in liquid solution? *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2013, vol. 15, no. 9, pp. 3027–3046. DOI: 10.1039/C2CP42895D URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2013/cp/c2cp42895d#!divAbstract>
- [3] Petridis C., Savva K., Kymakis E., et al. Laser generated nanoparticles based photovoltaics. *J. Colloid Interface Sci.*, 2017, vol. 489, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.jcis.2016.09.065 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021979716307287>
- [4] Atwater H.A., Polman A. Plasmonics for improved photovoltaic devices. *Nat. Mater.*, 2010, no. 9, pp. 205–213.
- [5] Gçkce B., Amendola V., Barcikowski S. Opportunities and challenges for laser synthesis of colloids. *Chem. Phys. Chem.*, 2017, vol. 18, no. 9, pr. 1–3. DOI: 10.1002/cphc.201700310 URL: <https://www.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cphc.201700310>
- [6] Soldatov A.N., Vasil'yeva A.V. Graph-analytic engineering method of corrosion current calculation in multielectrode system. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2007, no. 2, pp. 81–84 (in Russ.).

- [7] Serkov A.A., Kuz'min P.G., Rakov I.I., et al. Influence of laser-induced breakdown on the fragmentation of gold nanoparticles in water. *Kvantovaya elektronika*, 2016, no. 8, pp. 713–718 (in Russ.). (Eng. version: *Quantum Electron.*, 2016, vol. 46, no. 8, pp. 713–718. DOI: 10.1070/QEL16094 URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1070/QEL16094>)
- [8] Simakin A.V., Voronov V.V., Shafeev G.A. Nanoparticles formation under laser ablation of solids in liquids. *Trudy IOFAN*, 2004, vol. 60, pp. 83–107 (in Russ.).
- [9] Mafuné F., Kohno J., Takeda Y., et al. Full physical preparation of size-selected gold nanoparticles in solution: laser ablation and laser-induced size control. *J. Phys. Chem. B*, 2002, vol. 106, no. 31, pp. 7575–7577. DOI: 10.1021/jp020577y URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jp020577y>
- [10] Shiganov I.N., Mel'nikov D.M., Yakimova M.A. Study of interaction of laser radiation with scattering liquid media under conditions of a varying size distribution function of suspended particles. *Kvantovaya elektronika*, 2016, no. 9, pp. 855–859 (in Russ.). (Eng. version: *Quantum Electron.*, 2016, vol. 46, no. 9, pp. 855–859. DOI: 10.1070/QEL15937 URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1070/QEL15937>)

Petrovskaya A.A. — Student, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Fomina S.A. — Student, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Bogdanov A.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Melnikov D.M., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Petrovskaya A.A., Fomina S.A. Synthesis of metal nanoparticles by laser ablation in a liquid. *Politekhnikheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2019, no. 11(40). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-11-545.html> (in Russ.).