

Ковальчук Николай Георгиевич – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; e-mail: nikolapiterski87@mail.ru; 220013, г. Минск, Республика Беларусь, ул. П. Бровки, 6; тел.: +375172938803; НИЛ 4.6 НИЧ; младший научный сотрудник.

Комиссаров Иван Владимирович – e-mail: komissarov@bsuir.by; НИЛ 4.6 НИЧ; ведущий научный сотрудник; к.ф.-м.н.

Лабунов Владимир Архипович – e-mail: labunov@bsuir.by; тел.: +375172021005; Центр взаимодействия с научно-техническими программами европейского союза; директор; д.т.н.; профессор; академик Национальной академии наук Беларуси.

Shostachenko Stanislav Alekseevich – Institute of Functional Nuclear Electronics; e-mail: stas.fizik92@gmail.com; 31, Kashirskoe highway, Moscow, 115409, Russia; phone: +74957885699, extens. 9002; postgraduate student.

Zakharchenko Roman Victorovich – e-mail: ramzesss300391@gmail.com; postgraduate student.

Minnebaev Stanislav Vadimovich – e-mail: dr.stason@mail.ru; postgraduate student.

Ryzhuk Roman Valerievich – e-mail: ryzhuk-rom@yandex.ru; senior researcher; cand. of eng. sc.

Maslov Mikhail Mikhailovich – e-mail: mike.maslov@gmail.com; the department of condensed matter physics; cand. of phis.-math. sc.; associate professor.

Katin Konstantin Petrovich – e-mail: kpkatin@yandex.ru; the department of condensed matter physics; cand. of phis.-math. sc.

Kargin Nikolay Ivanovich – e-mail: krgn@yandex.ru; deputy director; professor.

Kovalchuk Nikolay Georgievich – Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; e-mail: nikolapiterski87@mail.ru; 6, P. Brovka street, Minsk, 220013, Republic of Belarus; phone: +375172938803; R&D Department; Research laboratory 4.6; junior researcher.

Komissarov Ivan Vladimirovich – e-mail: komissarov@bsuir.by; R&D Department; Research laboratory 4.6; leading researcher; cand. of phis.-math. sc..

Labunov Vladimir Arkhipovich – e-mail: labunov@bsuir.by; phone: +375172021005; Center 4.0 «Center for Participation in Science and Technology Programs of European Union»; director; Academician of NASB; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 544.537

**А.О. Кучерик, С.В. Кутровская, А.В. Осипов, А.В. Истратов, А.Ю. Шагурина,
А.В. Подлесный**

ЛАЗЕРНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТОНКИХ ПЛЕНОК С ИЗМЕНЯЕМЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

В рамках данной работы исследована степень влияния морфологии (диаметр частиц в коллоиде, расстояние между осажденными частицами, количество слоев и т.д.) на оптические и электрические свойства осаждаемых тонких кластерных биметаллических пленок. Для формирования квазипериодически расположенных кластеров использовался метод осаждения частиц из коллоидных систем, позволяющий осаждавать наночастицы из коллоидов за счет локального нагрева и явления аномальной диффузии частиц вблизи поверхности. Было продемонстрировано изменение оптических свойств осаждаемых биметаллических пленок и проведено моделирование наблюдаемых оптических явлений с использованием FDTD-метода. Расчетные спектры пропускания качественно

совпадают с экспериментальными. Наблюдается сложное изменение спектра пропускания в области 380–430 нм, 520–600 нм, с формированием локальных экстремумов, наличие которых можно объяснить влиянием расстояния между частицами на оптические свойства пленки. Расхождение в численных значениях можно объяснить особенностью расчетной геометрии: в модельной задаче частицы лежат строго друг на друге (из-за необходимости использовать расчетную сетку) и с точно определенным расстоянием между частицами в одном слое.

Наночастицы; коллоидный раствор; спектр пропускания; лазерное воздействие; прозрачные плёнки.

**A.O. Kucherik, S.V. Kutrovskaya, A.V. Osipov, A.V. Istratov, A.Y. Shagurina,
A.V. Podlesnyi**

LASER-ASSISTED FORMING OF THE BIMETAL THIN FILMS WITH CHANGING OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES

In this research the degree of influence of the morphology (particle diameter of the colloid, the distance between the deposited particles, the number of layers etc.) on the optical and electrical properties of the deposited thin film of bimetallic clusters was studied. For the formation of a quasi-periodically spaced clusters the method of deposition of particles of colloidal system was used, allowing the nanoparticles to precipitate out of the colloids by local heating and phenomena anomalous diffusion of particles near the surface. The optical properties of the deposited bimetallic films was shown and modeling of optical phenomena observed using the FDTD method. The calculated transmission spectra match qualitatively with the experimental data. There is a complex change of the transmission spectrum in the 380–430 nm, 520–600 nm, with the formation of local extremum. Whose presence can be explained by the distance between the particles on the optical properties of the film. The discrepancy in the numerical values can be attributed to the estimated feature geometry: in the model problem particles lie strictly on each other (because of the need to use a computational grid) and with accurately determine the distance between the particles in a single layer.

Nanoparticles; colloidal solution; transmission spectrum; laser treatment; transparencies films.

Введение. Формирование прозрачных проводящих покрытий актуальное направление нанотехнологических исследований. Тонкие наноструктурированные металлические пленки благородных металлов демонстрируют нелинейные оптические эффекты в видимом спектральном диапазоне за счет возбуждения поверхностного плазмонного резонанса [1–4]. Так, например тонкие гранулированные пленки серебра демонстрируют увеличение пропускания за счет существенного снижения коэффициента отражения стеклянной поверхности [5]. Оптические свойства таких пленок существенно зависят от периодичности расположения формируемых структур [6]. Для некоторых случаев, когда расстояния между отдельными осажденными частицами сравнимо с их размерами, случайно распределенные структуры могут демонстрировать оптические свойства существенно отличающиеся от периодически расположенных структур [7]. При осаждении биметаллических комплексов золота и серебра можно ожидать еще более сложного поведения оптических свойств формируемых пленок [8], так как в этом случае не только компонентный состав частиц, но и их форма и морфология будут существенно влиять на оптические явления.

В случае осаждения фрактальных кластерных пленок наблюдается существенное изменение оптических свойств [9, 10] по сравнению со сплошными покрытиями того же состава. Это представляет значительный научный интерес, однако традиционные методы упорядоченного осаждения отдельных частиц имеют очень низкую производительность и требуют больших временных затрат [11].

Также представляет интерес изменение электрических свойств осаждаемых структур, поскольку в данном случае распространение электронов в сложной системе будет носить характер существенно отличный от однородных пленок, так как электроны в зоне проводимости с энергией вблизи и выше уровня Ферми имеют, как известно, непрерывный спектр, связанный с движением вдоль осажденного слоя. При этом при достижении высоты слоя в нескольких десятках нанометров возможна конкуренция баллистической и тепловой проводимости [12–15].

Описание эксперимента. Исходные коллоидные системы были приготовлены методом лазерной абляции в жидкость при воздействии непрерывного лазерного излучения [16] на мишени из серебра и золота, погруженные в деионизованную воду [10]. Изготавливались системы со средним размером частиц 50 нм и 10 нм с концентрацией 1 мкг/мл. Размер частиц контролировался методом динамического рассеяния света.

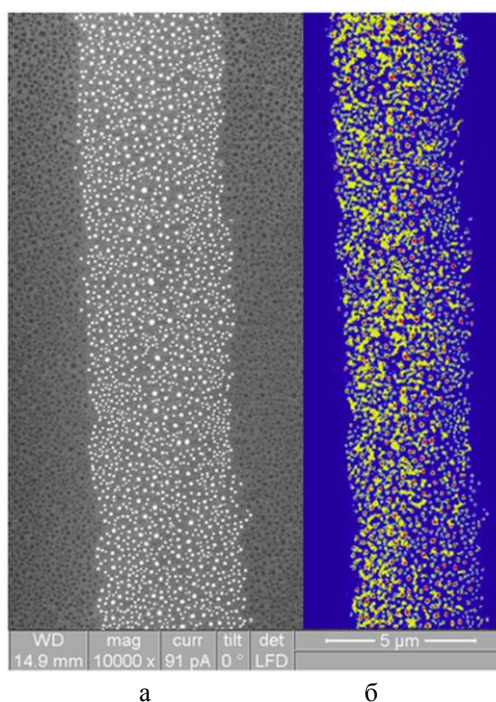


Рис. 1. Осаждение биметаллического массива наночастиц/кластеров из наночастиц d 50 нм на поверхность мишени из пиролитического графита: а – результаты зондирования с использованием РЭМ Quanta 200 3D; б – рентгеноэлементного анализа EDAX. Красные маркеры золото, желтые – серебро

Для осаждения биметаллических структур коллоидные системы смешивались в равных долях, в кювету с данным раствором помещалась подложка из стекла KB8 и с применением метода лазерного осаждения частиц из коллоидной системы производилось осаждение тонкой пленки [17]. В качестве источника излучения использовался лазерный комплекс на основе иттербиевого волоконного лазера ($\lambda=1,06$ мкм) с длительностью импульсов 100 нс, частотой следования импульсов 20 кГц и средней мощностью изменяемой в диапазоне от 1,5 до 4,5 Вт; диаметр лазерного пучка на поверхности подложки – 5 мкм. Формирование массива наночастиц на поверхности подложки осуществлялось сканированием лазерного пучка

вдоль одного и того же направления (от одного до десяти раз) со скоростью от 0,6 мм/с до 1,5 мм/с. В зависимости от условий осаждения сформированный массив наночастиц имел протяженность 100 мкм, средний поперечный размер 5 мкм и среднюю высоту до 55 нм.

Морфология и химический состав осажденных структур исследовались с использованием растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D и атомно-силового микроскопа Интегра Аура.

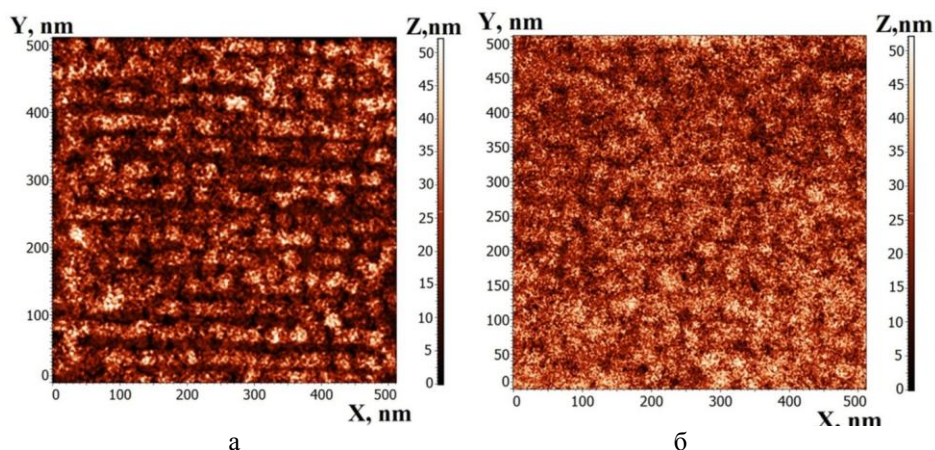


Рис. 2. АСМ-изображения осажденных тонких пленок Au-Ag из коллоидной системы с концентрацией 1 мкг/мл с исходным размером частиц 50 нм (а), 10 нм (б) и средней высотой рельефа 50 нм (а), 48 нм (б) на поверхность стекла КВ8. Среднее расстояние между частицами 5 нм (а) и 2 нм (б)

Изменяя исходный размер частиц в коллоидной системе, можно принципиальным образом изменять морфологию осаждаемого слоя [18–20]. Реализация различных режимов осаждения за счет изменения параметров лазерного воздействия (средняя мощность, скорость сканирования) также позволяет контролировать процесс осаждения.

Результаты и обсуждение. Оптические свойства формируемых тонких пленок исследовались в видимом спектральном диапазоне с использованием спектрофотометра СФ-2000 (рис. 3).

Во всех случаях пленки демонстрируют сложное поведение в видимом диапазоне. В структуре спектра пропускания ярко выделяется поглощение, соответствующее частоте плазмонного резонанса для серебра (360–420 нм) [17]. Однако при изменении размеров частиц в коллоиде и плотности их расположения на подложке меняется поведение спектра в исследуемой области. Принципиальное отличие демонстрируют спектры для частиц с диаметрами 50 нм и 10 нм в области плазмонного резонанса золота (520–560 нм): для частиц с диаметрами 50 нм пропускание увеличивается, а для частиц с диаметрами 10 нм – ослабевает. Хотя в целом пропускание 5-слойной системы частиц с диаметрами 10 нм выше, чем для одного слоя пятидесяти нанометровых частиц.

Для расчёта спектральных показателей прохождения был использован метод конечных разностей во временной области (англ. Finite Difference Time Domain, FDTD) с использованием модели Друде-Лоренца для свободных электронов в металле.

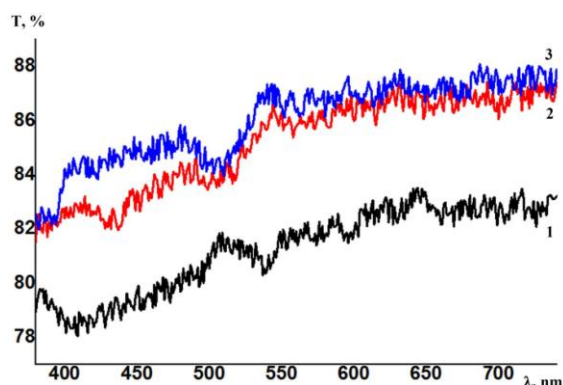


Рис. 3. Спектры пропускания и вольт-амперные характеристики осажденного слоя: 1 – Au:Ag (1:1) диаметр частиц 50 нм, один слой, расстояние между частицами 5 нм; 2 – Au:Ag (1:1) диаметр частиц 10 нм, пять слоев, расстояние между частицами 4 нм; 3 – Au:Ag (1:1) диаметр частиц 10 нм, пять слоев, расстояние между частицами 2 нм

Как видно из расчетов, расстояние между частицами существенным образом влияет на спектр пропускания [9, 10], при достижении значения расстояния между частицами 3 нм происходит изменение поглощения пленки в области плазмонного резонанса (рис. 4). Помимо сдвига центральной частоты плазмонного резонанса наблюдается формирование локальных максимумов и минимумов пропускания, причем для серебряных пленок изменение спектра пропускания носит существенно более сложный характер.

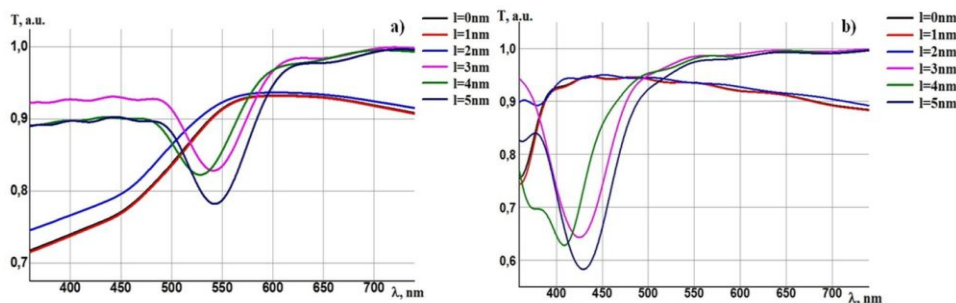


Рис. 4. Модельные спектры однослойных пленок наночастиц золота (а) и серебра (b) диаметром 10 нм, расположенных на расстоянии от 0 до 5 нм друг от друга на поверхности стекла

Такая модификация спектров однокомпонентных пленок позволяет объяснить сложный спектр тонкого биметаллического слоя (см. рис. 5). Расчетные спектры пропускания качественно совпадают с экспериментальными. Наблюдается сложное изменение спектра пропускания в области 380–430 нм, 520–600 нм, с формированием локальных экстремумов, наличие которых можно объяснить влиянием расстояния между частицами на оптические свойства пленки.

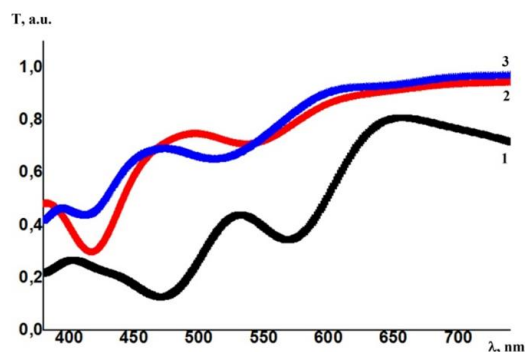


Рис. 5. Модельные спектры пропускания. Обозначения совпадают с рис. 2

Заключение. В представленной работе приведены экспериментальные и модельные данные по оптическим свойствам наноструктурированных биметаллических пленок. Показана возможность формирования протяженного массива наночастиц золота и серебра с управляемой морфологией. Продемонстрировано изменение оптических и электрических свойств формируемых пленок в зависимости от их морфологии (размер частиц, расстояние между частицами).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Genov D.A., Sarychev A.K., Shalaev V.M., Wei A.* Resonant field enhancements from metal nanoparticle arrays // *Nanoletters.* – 2004. – Vol. 4, No. 1. – P. 153-158.
2. *Axelevitch A., Gorenstein B., Golan G.* Investigation of Optical Transmission in Thin Metal Films // *Physics Procedia.* – 2012. – No. 32. – P. 1-13.
3. *Golan G., Axelevitch A.* *Microelectronics Journal.* – 2000, Vol. 31. – P. 469-473.
4. *Sarychev A.K. and Shalaev V.M.* Field distribution, Anderson localization, and optical phenomena in random metal-dielectric films // *Optics of nanostructured materials* (by eds. V.A. Markel and T. George) Wiley, New York, 2000.
5. *Bonch-Bruевич A.M., Vartanyan T.A., Leonov N.B., Przhibel'skii S.G., Khromov V.V.* Comparative action of heat and optical radiation on the structure of island metal films by optical fluctuation microscopy // *Optics and Spectroscopy.* – 2001. – Vol. 91, No. 5. – P. 779-785.
6. *Destouches N., Crespo-Monteiro N., Vitrant G., Lefkir Y., Reynaud S., Epicier T., Liu Y., Vocanson F., Pigeon F.* Self-organized growth of metallic nanoparticles in a thin film under homogeneous and continuous-wave light excitation // *J. Mater. Chem. C.* – 2014. – Vol. 2, No. 31. – P. 6256-6263.
7. *Persson B.N.J., Liebsch A.* Optical properties of two-dimensional systems of randomly distributed particles // *Physical Review B V.* – 1983. – Vol. 28, No. 8. – P. 4247-4254.
8. *Sonay A.Y., Çağlayan A.B., Çulha M.* Synthesis of peptide mediated au core-ag shell nanoparticles as surface-enhanced raman scattering labels // *Plasmonics.* – 2012. – Vol. 7, No. 1. – P. 77-86.
9. *Rui M. S. Pereira, J. Borges, Filipa C. R. Peres, Paulo A.S. Pereira, Smirnov G.V., Vaz F., Cavaleiro A., Vasilevskiy M.I.* Effect of clustering on the surface plasmon band in thin films of metallic nanoparticles // *Journal of Nanophotonics.* – 2015. – Vol. 9, No. 1. – P. 093796 (1-12).
10. *Antipov A.A., Arakelyan S.M., Vartanyan T.A., Itina T.E., Kutrovskaya S.V., Kucherik A.O., Sapagina I.V.* Optical properties of nanostructured gold-silver films formed by precipitation of small colloid drops // *Optics and Spectroscopy.* – 2015. – Vol. 119, No. 1. – P. 119-123.
11. *Bakhti S., Biswas S., Hubert C., Reynaud S., Vocanson F., Destouches N.* Switchable Silver Nanostructures Controlled with an Atomic Force Microscope // *J. Phys. Chem. C.* – 2014. – Vol. 118, No. 4. – P. 7494-7500.
12. *Mahfouzi F., Nagaosa N., Nikolic B.K.* Spin-Orbit Coupling Induced Spin-Transfer Torque and Current Polarization in Topological-Insulator/Ferromagnet Vertical Heterostructures // *Physical review letters.* – 2012. – Vol. 109, No. 16. – P. 166602 (1-5).

13. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы нанoeлектроники. – М.: Логос, 2006. – 496 с.
14. Mahfouzi F., Nikolic B.K., Chen S.-H. and Chang C.-R. // *Phys. Rev. B.* – 2010. – Vol. 82. – P. 195440.
15. Datta S. Quantum transport: atom to transistor. Cambridge University Press, Cambridge (2005).
16. Liu Z., Yuan Y., Khan S., Abdolvand A., Whitehead D., Schmid M. and Li L. Generation of metal-oxide nanoparticles using continuous-wave fibre laser ablation in liquid // *J. Micromech. Microeng.* – 2009. 19: 054008. doi:10.1088/0960-1317/19/5/054008.
17. Антипов А.А., Аракелян С.М., Кутровская С.В., Кучерик А.О., Макаров А.А., Ногтев Д.С., Прокошев В.Г. Импульсное лазерное осаждение кластерных наноструктур из коллоидных однокомпонентных систем // *Известия РАН. Серия физическая.* – 2012. – Т. 76, № 6. – С. 690-697.
18. Антипов А.А., Аракелян С.М., Кутровская С.В., Кучерик А.О., Вартанян Т.А. Осаждение биметаллических кластеров Au/Ag с использованием метода лазерного осаждения наночастиц из коллоидных систем // *Оптика и спектроскопия.* – 2014. – Т. 116, № 2. – С. 166-169.
19. Abramov D.V., Antipov A.A., Arakelian S.M., Khor'kov K.S., Kucherik A.O., Kutrovskaya S.V., Prokoshchev V.G. New advantages and challenges for laser-induced nanostructured cluster materials: functional capability for experimental verification of macroscopic quantum phenomena // *Laser Physics.* – 2014. – Vol. 24, No. 07. – P. 074010 (1-9).
20. Antipov A.A., Arakelyan S.M., Kutrovskaya S.V., Kucherik A.O. Electrical Properties of Metal Clusters Structures Formed on the Surface of Dielectrics // *Technical Physics Letters.* – 2014. – Vol. 40, No. 6. – P. 529-532.

REFERENCES

1. Genov D.A., Sarychev A.K., Shalaev V.M., Wei A. Resonant field enhancements from metal nanoparticle arrays, *Nanoletters*, 2004, Vol. 4, No. 1, pp. 153-158.
2. Axelevitch A., Gorenstein B., Golan G. Investigation of Optical Transmission in Thin Metal Films, *Physics Procedia*, 2012, No. 32, pp. 1-13.
3. Golan G., Axelevitch A. *Microelectronics Journal*, 2000, Vol. 31, pp. 469-473.
4. Sarychev A.K. and Shakaev V.M. Field distribution, Anderson localization, and optical phenomena in random metal-dielectric films, *Optics of nanostructured materials* (by eds. V.A. Markel and T. George) Wiley, New York, 2000.
5. Bonch-Bruевич А.М., Вартанян Т.А., Леонов Н.В., Пршибел'ский С.Г., Хромов В.В. Comparative action of heat and optical radiation on the structure of island metal films by optical fluctuation microscopy, *Optics and Spectroscopy*, 2001, Vol. 91, No. 5, pp. 779-785.
6. Destouches N., Crespo-Monteiro N., Vitrant G., Lefkir Y., Reynaud S., Epicier T., Liu Y., Vocanson F., Pigeon F. Self-organized growth of metallic nanoparticles in a thin film under homogeneous and continuous-wave light excitation, *J. Mater. Chem. C*, 2014, Vol. 2, No. 31, pp. 6256-6263.
7. Persson B.N.J., Liebsch A. Optical properties of two-dimensional systems of randomly distributed particles, *Physical Review B*, 1983, Vol. 28, No. 8, pp. 4247-4254.
8. Sonay A.Y., Çağlayan A.B., Çulha M. Synthesis of peptide mediated au core-ag shell nanoparticles as surface-enhanced raman scattering labels, *Plasmonics*, 2012, Vol. 7, No. 1, pp. 77-86.
9. Rui M. S. Pereira, J. Borges, Filipa C. R. Peres, Paulo A.S. Pereira, Smirnov G.V., Vaz F., Cavaleiro A., Vasilevskiy M.I. Effect of clustering on the surface plasmon band in thin films of metallic nanoparticles, *Journal of Nanophotonics*, 2015, Vol. 9, No. 1, pp. 093796 (1-12).
10. Antipov A.A., Arakelyan S.M., Vartanyan T.A., Itina T.E., Kutrovskaya S.V., Kucherik A.O., Sapagina I.V. Optical properties of nanostructured gold-silver films formed by precipitation of small colloid drops, *Optics and Spectroscopy*, 2015, Vol. 119, No. 1, pp. 119-123.
11. Bakhti S., Biswas S., Hubert C., Reynaud S., Vocanson F., Destouches N. Switchable Silver Nanostructures Controlled with an Atomic Force Microscope, *J. Phys. Chem. C*, 2014, Vol. 118, No. 4, pp. 7494-7500.

12. *Mahfouzi F., Nagaosa N., Nikolic B.K.* Spin-Orbit Coupling Induced Spin-Transfer Torque and Current Polarization in Topological-Insulator/Ferromagnet Vertical Heterostructures, *Physical review letters*, 2012, Vol. 109, No. 16, pp. 166602 (1-5).
13. *Dragunov V.P., Neizvestnyy I.G., Gridchin V.A.* Osnovy nanoelektroniki [Fundamentals of nanoelectronics]. Moscow: Logos, 2006, 496 p.
14. *Mahfouzi F., Nikolic B.K., Chen S.-H., and Chang C.-R.* Phys. Rev. B, 2010, Vol. 82, pp. 195440.
15. *Datta S.* Quantum transport: atom to transistor. Cambridge University Press, Cambridge, 2005.
16. *Liu Z., Yuan Y., Khan S., Abdolvand A., Whitehead D., Schmid M. and Li L.* (2009) Generation of metal-oxide nanoparticles using continuous-wave fibre laser ablation in liquid, *J. Micromech. Microeng.* 19: 054008. doi:10.1088/0960-1317/19/5/054008
17. *Antipov A.A., Arakelyan S.M., Kutrovskaya S.V., Kucherik A.O., Makarov A.A., Nogtev D.S., Prokoshev V.G.* Impul'snoe lazernoe osazhdenie klasternykh nanostruktur iz kolloidnykh odnokomponentnykh sistem [Pulsed laser deposition of cluster nanostructures of one-component colloidal systems], *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics], 2012, Vol. 76, No. 6, pp. 690-697.
18. *Antipov A.A., Arakelyan S.M., Kutrovskaya C.V., Kucherik A.O., Vartanyan T.A.* Osazhdenie bimetallicheskih klasterov Au/Ag s ispol'zovaniem metoda lazernogo osazhdeniya nanochastits iz kolloidnykh sistem [Deposition of bimetallic clusters of Au/Ag using the method of laser deposition of nanoparticles from colloidal systems], *Optika i spektroskopiya* [Optics and Spectroscopy], 2014, Vol. 116, No. 2, pp. 166-169.
19. *Abramov D.V., Antipov A.A., Arakelian S.M., Khor'kov K.S., Kucherik A.O., Kutrovskaya S.V., Prokoshev V.G.* New advantages and challenges for laser-induced nanostructured cluster materials: functional capability for experimental verification of macroscopic quantum phenomena, *Laser Physics*, 2014, Vol. 24, No. 07, pp. 074010 (1-9).
20. *Antipov A.A., Arakelyan S.M., Kutrovskaya S.V., Kucherik A.O.* Electrical Properties of Metal Clusters Structures Formed on the Surface of Dielectrics, *Technical Physics Letters*, 2014, Vol. 40, No. 6, pp. 529-532.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Лаврентьев.

Кучерик Алексей Олегович – ВлГУ; e-mail: kucherik@vlsu.ru; г. Владимир, ул. Горького, 87; тел.: +79157617615; кафедра физики и прикладной математики; к.ф.-м.н.; доцент.

Кутровская Стелла Владимировна – e-mail: 11stella@mail.ru; тел.: +79157699985; кафедра физики и прикладной математики; к.ф.-м.н.; доцент.

Осипов Антон Владиславович – e-mail: osipov@vlsu.ru; тел.: +79107776373; кафедра физики и прикладной математики; инженер-исследователь.

Истратов Александр Владимирович – e-mail: alexsgreene@gmail.com; тел.: +79042534037; кафедра физики и прикладной математики; аспирант.

Шагурина Анастасия Юрьевна – e-mail: shagurina.a@mail.ru; тел.: +79004757040; кафедра физики и прикладной математики; магистр.

Подлесный Антон Васильевич – e-mail: a-pod33@mail.ru; тел.: +79209320727; кафедра физики и прикладной математики; магистр.

Kucherik Alexsey Olegovich – Vladimir State University; e-mail: kucherik@vlsu.ru; 87, Gorky street, Vladimir, Russia; phone: +79157617615; the department of physics and applied mathematics; cand. of phis.-math. sc.; associate professor.

Kutrovskaya Stella Vladimirovna – e-mail: 11stella@mail.ru; phone: +79157699985; the department of physics and applied mathematics; cand. of phis.-math. sc.; associate professor.

Osipov Anton Vladislavovich – e-mail: osipov@vlsu.ru; phone: +79107776373; the department of physics and applied mathematics; engineer–researcher.

Istratov Alexander Vladimirovich – e-mail: aleksgreene@gmail.com; phone: +79042534037; the department of physics and applied mathematics; postgraduate student.

Shagurina Anastasia Yuryevna – e-mail: shagurina.a@mail.ru; phone: +79004757040; the department of physics and applied mathematics; magistr.

Podlesnyi Anton Vasilyevich – e-mail: a-pod33@mail.ru; phone: +79209320727; the department of physics and applied mathematics; magistr.

УДК 546.621/623:17

О.В. Карбань, О.М. Канунникова, Е.Н. Хазанов, А.В. Таранов

СТРОЕНИЕ ИНТЕРФЕЙСНЫХ ОБЛАСТЕЙ НАНОСТРУКТУРНЫХ КЕРАМИК BaTiO_3 – WTiO_3 *

Для сегнетоэлектрических керамик Ba-W-Ti-O , синтезированных методом одноосного сухого прессования с ультразвуковым воздействием с последующим спеканием, строение и состав интерфейсных областей изменяются немонотонно и определяются параметрами предварительного компактирования сухих нанопорошков (давление прессования, мощность ультразвукового воздействия). Анализ химического состава интерфейсных областей проводился методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Структура и средние по образцу характеристики интерфейсных границ в керамиках исследовались методом тепловых импульсов при гелиевых температурах. Наблюдалось несколько типов границ – границы между агломератами, границы между зернами в агломератах и границы между ОКР. Однако удовлетворительное соответствие результатов теоретического расчета и экспериментальных температурных зависимостей рассеяния неравновесных фононов в образцах наблюдается только в том случае, если R – это размеры зерен (частиц), составляющих агломераты. Наиболее оптимальной структурой интерфейсных границ обладают образцы, скомпактированные при $P \approx (700 \pm 800)$ МПа, которое позволяет сформировать интерфейсную область с преимущественной долей изотропной структуры. С увеличением давления при компактировании на поверхности сколов спеченных образцов растет количество вольфрама, который очевидно при спекании диффундирует в поверхностные слои зерен под воздействием температуры. Различие в температурной зависимости рассеяния неравновесных фононов при повышении давления свидетельствует об уменьшении толщины интерфейсного слоя для образца и увеличения его жесткости вследствие роста количества кубической фазы WO_3 в образцах. Для образцов, скомпактированных при одинаковом давлении и различной мощности ультразвукового воздействия (0 кВт и 3 кВт), структура границ различна, что и определяет отличия акустических импедансов.

Керамика Ba-W-Ti-O ; интерфейсные области; РФЭС; фононная спектроскопия.

O.V. Karban, O.M. Kanunnikova, E.N. Khazanov, A.V. Taranov

STRUCTURE OF THE INTERFACE REGIONS IN BaTiO_3 – WTiO_3 NANOCERAMICS

In the studied ferroelectric Ba-W-Ti-O ceramics, compacted under different conditions of pressure and ultrasound action with subsequent sintering at 1623 K, structure and composition of interface regions vary in a nonmonotonic way. The chemical composition was analyzed by the X-ray photoelectron spectroscopy. The structure of the ceramics interface regions and their specimen-average characteristics were investigated by the heat pulse method. In the ceramics studied different boundary types are observed: boundaries between agglomerates, between grains in the agglomerates, and boundaries between areas of coherent scattering. However, a satisfactory agreement between the theoretical calculations and the experimental temperature dependences of

* Работа поддержана проектом РФФИ № 15-07-02563156.