

**Формирование наночастиц Au в пленках SiO₂-TiO₂
методом локального электрохимического восстановления
с помощью зонда атомно-силового микроскопа**

В. Д. Кривчик¹, Д. О. Филатов², М. Б. Семенов³

^{1,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

²Нижегородский государственный университет
имени Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

¹physics@pnzgu.ru, ²filatov@phys.unn.ru, ³Misha29.02.2@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Цель настоящей работы – экспериментально исследовать особенности формирования наночастиц (НЧ) Au в пленках SiO₂-TiO₂ методом локального электрохимического восстановления с помощью зонда атомно-силового микроскопа (АСМ). Целью исследования также являлось установление режимов формирования НЧ Au, обеспечивающих контролируемое получение НЧ с заданными параметрами. Создаваемая научно-техническая продукция предназначена для применения в нанoeлектронике, интегральной оптике, оптоэлектронике и плазмонике для создания новых нанoeлектронных приборов на базе массивов металлических НЧ, встроенных в диэлектрические пленки металлических нанoантенн произвольной формы, сопряженных с оптическими диэлектрическими волноводами на базе тонкопленочных структур и т.п. С этим связана актуальность проводимых исследований. *Материалы и методы.* Экспериментальное исследование процессов формирования индивидуальных НЧ Au в толще пленок SiO₂-TiO₂ выполнялось методом локального электрохимического восстановления ионов Au(III) при помощи зонда АСМ. Формирование НЧ Au в пленках SiO₂-TiO₂ осуществлялось с использованием АСМ SolverPro производства компании «Нанотехнология-МДТ» (Зеленоград, Россия) в контактном режиме. Использовались АСМ-кантилеверы из Si с Pt покрытием компании «Нанотехнология-МДТ» марки CSG-01. Перед формированием НЧ Au измерялись АСМ-изображения выбранного участка поверхности гелевых пленок $z(x, y)$, где x, y – координаты острия АСМ-зонда в плоскости поверхности образца, z – высота поверхности в точке с координатами x, y . Кроме того, одновременно с АСМ-изображениями измерялись токовые изображения выбранных участков поверхности образца. *Результаты.* Исследованы процессы формирования НЧ Au в пленках геля SiO₂-TiO₂, содержащих ионы Au(III), осажденные на стеклянные подложки с подслоем ITO золь-гель-методом в ходе локального электрохимического восстановления ионов Au(III) при помощи проводящего АСМ-зонда. Показано, что после модификации гелевых пленок путем приложения импульсов положительного напряжения к АСМ-зонду относительно подслоя ITO на токовых изображениях модифицированных участков наблюдаются токовые каналы, связанные с формированием НЧ Au на границе раздела подслоя ITO и гелевой пленки в результате локального электрохимического восстановления ионов Au(III) в области под контактом АСМ-зонда к поверхности гелевой пленки. Установлено, что формирование НЧ Au проявляется также в появлении гистерезиса в циклической вольт-амперной характеристике контакта АСМ-зонда к поверхности гелевой пленки, измеренной в процессе формирования НЧ. Найдено, что при модификации гелевой пленки SiO₂-TiO₂ приложением импульса отрицательного напряжения к АСМ-зонду относительно подслоя ITO наблюдалось формирование тороидальных Au-наноструктур, связанное с электрохимическим вос-

становлением ионов Au(III) вблизи контакта АСМ-зонда с поверхностью гелевой пленки. *Выводы.* Результаты проведенных исследований планируются к использованию в дальнейшем при разработках методик контролируемого формирования металлических НЧ в тонких диэлектрических пленках с помощью АСМ.

Ключевые слова: Au-наночастицы, золотые тороидальные наноструктуры, проводящий атомно-силовой микроскоп

Финансирование: работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации 0748-2020-0012.

Благодарности: авторы благодарят НИЦ «Физика твердотельных наноструктур» Нижегородского государственного университета имени Н. И. Лобачевского за помощь в экспериментальной части данной работы.

Для цитирования: Кревчик В. Д., Филатов Д. О., Семенов М. Б. Формирование наночастиц Au в пленках SiO₂-TiO₂ методом локального электрохимического восстановления с помощью зонда атомно-силового микроскопа // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2023. № 3. С. 116–126. doi: 10.21685/2072-3040-2023-3-9

Formation of Au nanoparticles in SiO₂-TiO₂ films by local electrochemical reduction using an atomic force microscope probe

V.D. Krevchik¹, D.O. Filatov², M.B. Semenov³

^{1,3}Penza State University, Penza, Russia

²Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhni Novgorod, Russia

¹physics@pnzgu.ru, ²filatov@phys.unn.ru, ³Misha29.02.2@gmail.com

Abstract. *Background.* The purpose of this work is to experimentally investigate the features of the Au nanoparticles (NPs) formation in SiO₂-TiO₂ films by the method of local electrochemical reduction using an atomic force microscope (AFM) probe. The additional aim of the study has been also to establish the modes of the Au NPs formation, which provide controlled production of NPs with specified parameters. The created scientific and technical products are intended for use in nanoelectronics, integrated optics, optoelectronics and plasmonics to create new nanoelectronic devices based on MNP arrays embedded in dielectric films, metal nanoantennas of arbitrary shape embedded in optical dielectric waveguides based on thin-film structures, etc. Related to this is the relevance of ongoing research. *Materials and methods.* An experimental study of the formation processes of individual Au NPs in the thickness of SiO₂-TiO₂ films has been carried out by the method of local electrochemical reduction of Au (III) ions using an atomic force microscope (AFM) probe. The formation of Au NPs in SiO₂-TiO₂ films has been carried out using a SolverPro atomic force microscope manufactured by “Nanotechnologiya-MDT” (Zelenograd, Russian Federation) in the contact mode. We have used AFM cantilevers made of Si with Pt coating by “Nanotechnologiya-MDT” CSG-01. Before the formation of Au NPs, AFM images of a selected area of the gel film surface have been measured: $z(x, y)$, where x, y are the coordinates of the AFM probe tip in the sample surface plane, z is the surface height at the point with coordinates x, y . In addition, simultaneously with AFM images, images of current for selected areas of the sample surface have been measured. *Results.* The processes of the Au NPs formation in SiO₂-TiO₂ gel films containing Au (III) ions deposited on glass substrates with an ITO sublayer by the sol-gel method, have been studied in the course of local electrochemical reduction of Au(III) ions using a conducting AFM probe. It is shown that after the modification of gel films by applying positive voltage pulses to the AFM probe relative to the ITO sublayer, the images of current for the modified regions show channels of current associated with the formation of Au NPs at the interface between the ITO sublayer and of the gel film as a result of local electrochemical reduction of Au (III) in the area under the

contact of the AFM probe to the surface of the gel film. It has been established that the formation of Au NPs also manifests itself in the appearance of hysteresis in the cyclic CVC of the contact between the AFM probe and the surface of the gel film measured during the formation of NPs. It was found that, upon modification of the SiO₂-TiO₂ gel film by applying a negative voltage pulse to the AFM probe relative to the ITO sublayer, the formation of toroidal Au nanostructures has been observed, associated with the electrochemical reduction of Au (III) ions near the contact of the AFM probe with the surface of the gel film. *Conclusions.* The results of the carried out studies are planned to be used in the future in the development of methods for the controlled formation of MNPs in thin dielectric films using AFM.

Keywords: Au-nanoparticles, golden toroidal nanostructures, conductive AFM

Financing: the research was supported by the grant 0748-2020-0012 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

Acknowledgments: The author extends gratitude to the Scientific and Research “Physics of Solid-State Nanostructures” of the Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod for help with the experimental part of this work.

For citation: Krevchik V.D., Filatov D.O., Semenov M.B. Formation of Au nanoparticles in SiO₂-TiO₂ films by local electrochemical reduction using an atomic force microscope probe. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences.* 2023;(3):116–126. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3040-2023-3-9

Введение

Объектами настоящего исследования являются тонкие (толщиной ~10 нм) пленки геля SiO₂-TiO₂, содержащего ионы Au(III), нанесенные на стеклянные подложки с проводящим подслоем ИТО (*англ.* Indium-Tin Oxide). Предметом исследования является процесс формирования индивидуальных наночастиц (НЧ) Au в процессе локального электрохимического восстановления ионов Au(III) при помощи зонда атомно-силового микроскопа (АСМ) с электропроводящим покрытием, находящегося в контакте с поверхностью гелевой пленки SiO₂-TiO₂, на который подавалось напряжение V_g относительно подслоя ИТО. Целью исследования являлось установление режимов формирования НЧ Au, обеспечивающих контролируемое получение НЧ с заданными параметрами. Задача исследования:

- 1) формирование золь-гель-методом пленок геля SiO₂-TiO₂, содержащего ионы Au(III), на стеклянных подложках с подслоем ИТО;
- 2) экспериментальное исследование процессов формирования индивидуальных НЧ Au в толще пленок SiO₂-TiO₂ методом локального электрохимического восстановления ионов Au(III) при помощи зонда АСМ.

1. Формирование гелевых пленок SiO₂-TiO₂ на стеклянных подложках

Пленки геля SiO₂-TiO₂ (2:1) на стеклянных подложках формировались в Лаборатории фотополимеризации и полимерных материалов Института металлоорганической химии имени Г. А. Разуваева Российской академии наук (ИМХ РАН), Нижний Новгород, под руководством ведущего научного сотрудника д.х.н., профессора Б. Б. Троицкого.

В качестве подложек использовались покровные стекла для препаратов для оптической микроскопии размером 25 × 10 мм², толщиной 0,5 мм, покрытые прозрачным проводящим слоем ИТО толщиной ~1 мкм и удельным сопро-

тивлением $\sim 10^{-3}$ Ом · см. Пленки геля наносились методом вытяжки из суспензии золя в водном растворе этанола с постоянной скоростью 1–20 мм/с (*англ.* Dip-coating).

Приготовление суспензии золя проводилось по методике, описанной в [1]. Источником ионов Au(III) являлась хлороауриковая кислота ($\text{HAuCl}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), источниками SiO_2 и TiO_2 – тетраэтилортосиликат ($\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$) и тетраэтилортотитанат ($\text{Ti}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$). $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ в количестве 6,7 ммоль и $\text{Ti}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ в количестве 3,3 ммоль добавлялись к 6 мл 0,05М раствора HAuCl_4 в этаноле. Затем в смесь добавлялись 0,2 мл 2N раствора HCl при размешивании. Приготовленная золевая суспензия гидролизовалась в течение 8 ч при комнатной температуре. Осажденные на подложке пленки подвергались дегидратированию в сушильном шкафу при 150 °С в течение 1 мин. Толщина пленок, измеряемая при помощи спектроскопического эллипсометра Micro-PhotonicsPhE-102, составляла 4–100 нм в зависимости от концентрации зольей SiO_2 и TiO_2 в исходной суспензии и скорости вытяжки подложек из суспензии.

2. Исследование процесса формирования наночастиц Au методом атомно-силовой микроскопии

Формирование НЧ Au в пленках $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2$ осуществлялось с использованием АСМ SolverPro производства компании «Нанотехнология-МДТ» (Зеленоград, Россия) в контактном режиме. Использовались АСМ-кантилеверы из Si с Pt покрытием компании «Нанотехнология-МДТ» марки CSG-01. Электрический контакт к подслою ИТО на поверхности стеклянной подложки изготавливается на краю образца не погруженной в суспензию золя в процессе нанесения гелевой пленки при помощи капли токопроводящего клея (органический компаунд с наполнителем из коллоидного Ag).

Перед формированием НЧ Au измерялись АСМ-изображения выбранного участка поверхности гелевых пленок $z(x, y)$, где x, y – координаты острия АСМ-зонда в плоскости поверхности образца, z – высота поверхности в точке с координатами x, y . Кроме того, одновременно с АСМ-изображениями измерялись токовые изображения выбранных участков поверхности образца (карты распределения силы тока, протекающего между АСМ-зондом и проводящим подслоем ИТО $I_t(x, y)$). Токовые изображения измерялись при значении напряжения между АСМ-зондом и подслоем ИТО $V_g = 0,5$ В, меньшем электрохимического потенциала восстановления ионов Au(III) ($\approx 1,5$ В [2]).

На рис. 1 представлены АСМ- и токовое изображения поверхности гелевой пленки $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2$ в исходном состоянии.

Поверхность гелевой пленки на АСМ-изображении (рис. 1,а) имеет зернистую структуру с латеральным размером зерен 20–100 нм, типичную для поверхности пленок SiO_2 , осажденных золь-гель-методом [3]. Известно, что при гидролизе тетраэтилортосиликата $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ образуется золь, состоящий из глобул SiO_2 размером 3–5 нм. Данные частицы имеют тенденцию к образованию агломератов размером до 100 нм. По-видимому, данные агломераты проявляются на АСМ-изображении (рис.1,а) в виде зерен. При этом поверхность гелевой пленки имела весьма малую шероховатость: среднеквадратичная шероховатость S_q (среднеквадратичное отклонение высот от среднего) на рис. 1,а составляет $\approx 1,2$ нм на площади скана $2,2 \times 2,2$ μm^2 . Из-

вестно, что пленки TiO_2 , осажденные золь-гель-методом, имеют пористую структуру с развитой поверхностью [4]. В исследованных в настоящей работе пленках $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ TiO_2 заполняет зазоры между агломератами глобул SiO_2 , обеспечивая пористую структуру, содержащую водный раствор этанола с подвижными ионами Au(III) [5].

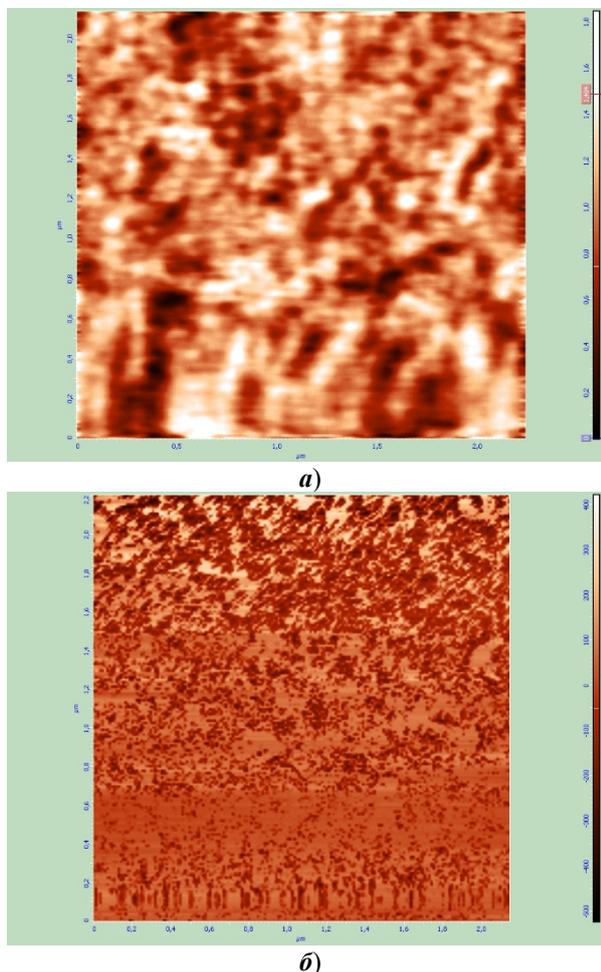


Рис. 1. Участок поверхности пленки геля $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ в исходном состоянии (до формирования НЧ Au):
a – АСМ-изображение; **б** – токовое изображение, $V_g = 0,5$ В

В отличие от АСМ-изображения на рис. 1,**a**, токовое изображение гелевой пленки на рис. 1,**б** выглядит достаточно однородным. Среднее значение силы тока через АСМ-зонд по площади АСМ-скана близко к нулю (рис. 1,**б**). Максимальное значение флуктуаций I_t на рис. 1,**б** составляет ≈ 400 пА, при этом отсутствует корреляция между неровностями на АСМ-изображении (рис. 1,**a**) и флуктуациями I_t на рис. 1,**б**.

Для формирования НЧ Au АСМ-зонд позиционировался в определенную точку поверхности гелевой пленки и приводился в контакт с поверхностью. Локальное восстановление ионов Au(III) в пленке проводится приложением треугольного импульса напряжения между АСМ-зондом и подслоем

ITO с амплитудой 10 В, превышающей порог электрохимической реакции восстановления ионов Au(III), и длительностью 1 с.

На рис. 2 представлены АСМ- и токовое изображения поверхности гелевой пленки SiO₂-TiO₂ после формирования НЧ Au путем приложения импульса положительного напряжения к АСМ-зонду относительно подслоя ITO. На токовом изображении в точке, где находился АСМ-зонд во время модификации, наблюдается участок с увеличенным значением I_t (токовый канал) размером ~100 нм. Максимальная величина силы тока через АСМ-зонд I_t в пределах токового канала составляла ≈12 нА, что более чем на порядок величины превышает максимальную величину флуктуаций I_t до модификации (см. рис. 1,б). Наличие указанного токового канала связано с формированием НЧ Au на границе раздела подслоя ITO с материалом гелевой пленки в области под АСМ-зондом за счет дрейфа ионов Au(III) в электрическом поле между АСМ-зондом и подслоем ITO (рис. 3,а) с последующим их электрохимическим восстановлением на поверхности НЧ Au.

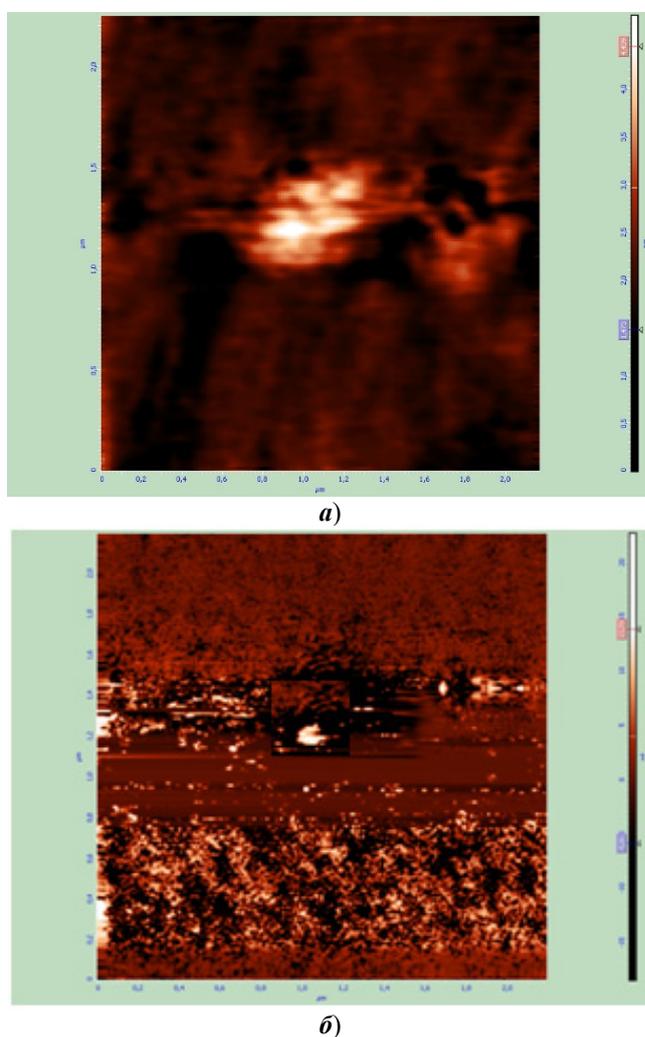


Рис. 2. Участок поверхности пленки геля SiO₂-TiO₂ после формирования НЧ Au:
а – АСМ-изображение; б – токовое изображение, $V_g = 0,5$ В

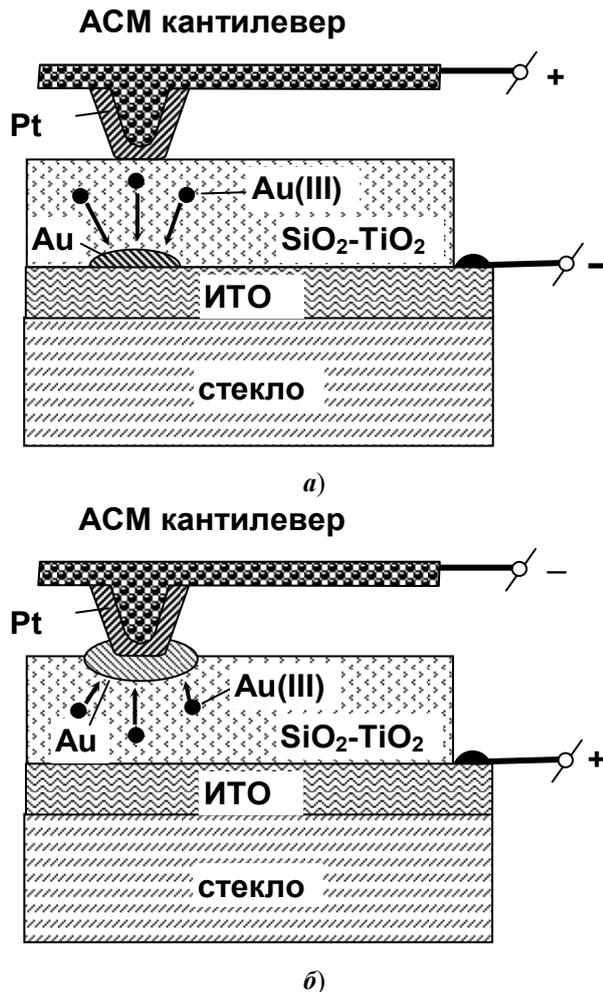
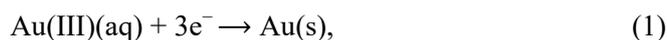


Рис. 3. Схема формирования НЧ Au при локальном восстановлении ионов Au(III) в гелевой пленке $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ при помощи АСМ-зонда при положительном (а) и отрицательном (б) напряжении на АСМ-зонде относительно подслоя ИТО

Как видно из АСМ-изображения модифицированного участка поверхности пленки $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ (рис. 2,а), формирование НЧ Au в толще пленки сопровождается свеллингом ее поверхности, что связано с притоком ионов Au в область материала пленки, находящейся под АСМ-зондом. Максимальная высота свеллинга составляла ≈ 4 нм. Следует отметить, что размер области свеллинга (≈ 400 нм) значительно превышает размеры токового канала на рис. 2,б, что может быть связано с втягиванием ионов Au(III) из окрестности области контакта АСМ-зонда к поверхности образца к растущей НЧ Au в существенно неоднородном электрическом поле вблизи поверхности НЧ (как показано на рис. 3,а).

Восстановление ионов Au(III) и формирование НЧ Au проявляется также в циклических вольт-амперных характеристиках (ВАХ) контакта АСМ-зонда к поверхности образца, записанных в процессе формирования НЧ (рис. 4). При $V_g \approx +1,5$ В значение I_t быстро растет, что соответствует пороговому потенциалу электрохимической реакции восстановления ионов Au(III) [6]:



и выходит на насыщение при $V_g \approx +4$ В.



Рис. 4. ВАХ контакта АСМ-зонда к поверхности гелевой пленки $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$, измеренная в процессе формирования НЧ Au. Красная линия – развертка по напряжению в прямом направлении, синяя – в обратном направлении

При дальнейшем увеличении V_g до +10 В, а также при последующем уменьшении до $\approx +1,5$ В значение I_t остается постоянным. Это можно объяснить обеднением области гелевой пленки $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$, находящейся непосредственно под областью контакта острия АСМ-зонда к поверхности гелевой пленки, ионами Au(III) . При этом стационарное значение I_t определяется скоростью притока ионов Au(III) из областей, окружающих область контакта, за счет латеральной диффузии ионов Au(III) , которая не зависит от V_g [1].

В работе [1] полусферические НЧ Au формировались на границе раздела подслоя ИТО с гелевой пленке $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ при отрицательной полярности напряжения на подслое ИТО относительно АСМ-зонда. В выполненном эксперименте при положительной полярности напряжения на АСМ-зонде относительно подслоя ИТО наблюдалось формирование НЧ Au, как и в [1]. При отрицательной полярности напряжения на АСМ-зонде относительно подслоя ИТО наблюдалось формирование торообразных наноструктур из Au (рис. 5), связанное с электрохимическим восстановлением ионов Au(III) вблизи контакта АСМ-зонда с поверхностью гелевой пленки (рис. 3,б).

После формирования НЧ Au гелевые пленки подвергались сушке в сушильном шкафу при 150 °С в течение 5 ч. После полного обезвоживания пленки $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ приобретали розовый цвет, что было связано с формирова-

нием ионов AuCl_4^- из остаточной хлорауриковой кислоты [7] (после осаждения гелевые пленки были прозрачными).

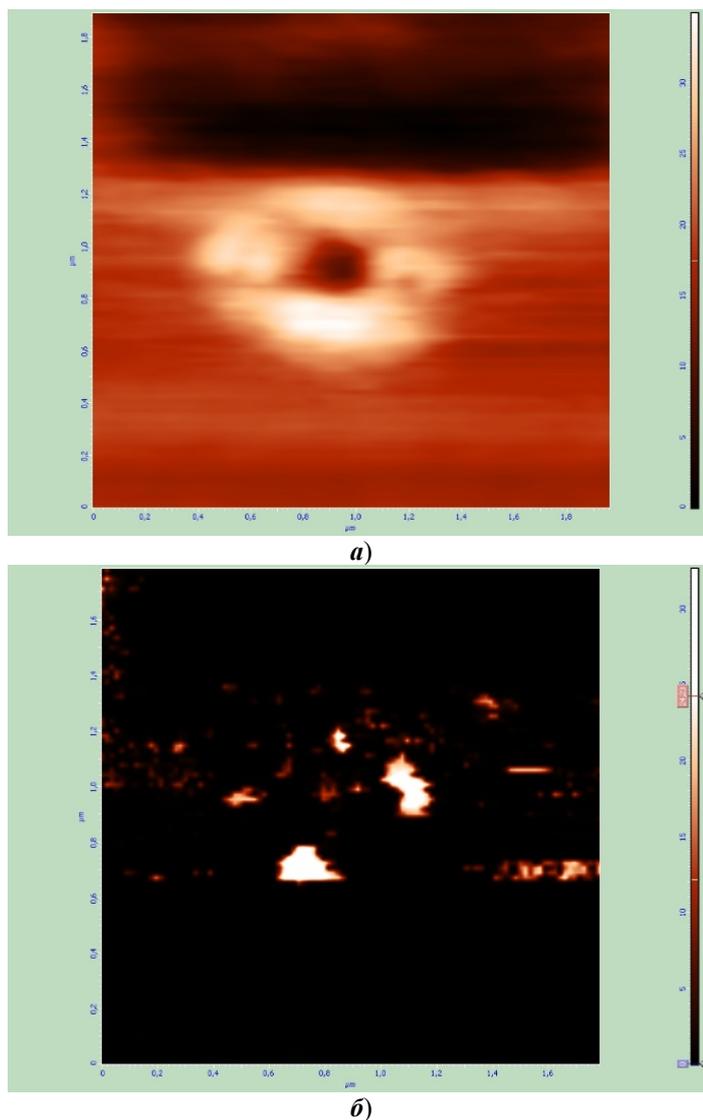


Рис. 5. Участок поверхности пленки геля $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ после формирования НЧ Au импульсом отрицательного напряжения:
a – АСМ-изображение; *б* – токовое изображение, $V_g = 0,5$ В

Заключение

Исследованы процессы формирования НЧ Au в пленках геля $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$, содержащих ионы Au(III) , осажденных на стеклянные подложки с подслоем ИТО золь-гель-методом, в ходе локального электрохимического восстановления ионов Au(III) при помощи проводящего АСМ-зонда.

После модификации гелевых пленок путем приложения импульсов положительного напряжения к АСМ-зонду относительно подслоя ИТО на токовых изображениях модифицированных участков наблюдаются токовые кана-

лы, связанные с формированием НЧ Au на границе раздела подслоя ИТО и гелевой пленки в результате локального электрохимического восстановления ионов Au(III) в области под контактом АСМ-зонда к поверхности гелевой пленки. Формирование НЧ Au проявляется также в появлении гистерезиса в циклической ВАХ контакта АСМ-зонда к поверхности гелевой пленки, измеренной в процессе формирования НЧ.

При модификации гелевой пленки $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ приложением импульса отрицательного напряжения к АСМ-зонду относительно подслоя ИТО наблюдалось формирование тороидальных Au-наноструктур, связанное с электрохимическим восстановлением ионов Au(III) вблизи контакта АСМ-зонда с поверхностью гелевой пленки.

Создаваемая научно-техническая продукция предназначена для применения в нанoeлектронике, интегральной оптике, оптоэлектронике и плазмонике для создания новых нанoeлектронных приборов на базе массивов металлических НЧ, встроенных в диэлектрические пленки, металлических наноантенн произвольной формы, встроенных в оптические диэлектрические волноводы на базе тонкопленочных структур и т.п.

Результаты проведенных исследований планируются к использованию в дальнейшем при разработках методик контролируемого формирования металлических НЧ в тонких диэлектрических пленках с помощью АСМ.

Список литературы

1. Yanagi H., Ohno T. Nanofabrication of Gold Particles in Glass Films by AFM-Assisted Local Reduction // *Langmuir*. 1999. Vol. 15, № 21. P. 4773–4776.
2. Zoski C. G. *Handbook of Electrochemistry*. Amsterdam : Elsevier, 2006. 934 p.
3. Bergna H. E., Roberts W. O. *Colloidal Silica: Fundamentals and Applications*. Boca Raton : CRC Press, 2005. 944 p.
4. Khataee A., Mansoori G. A. *Nanostructured Titanium Dioxide Materials: Properties, Preparation, and Applications*. Singapore : World Scientific, 2011. 204 p.
5. Yanagi H., Mashiko S., Nagahara L. A. [et al.]. Photoresponsive Formation of Gold Particles in Silica/Titania Sol – Gel Films // *Chemistry of Materials*. 1998. Vol. 10, № 5. P. 1258–1264.
6. Bard A. J., Faulkner L. R. *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*. Hoboken : Wiley, 2000. 864 p.
7. Quinn M., Mills G. Surface-Mediated Formation of Gold Particles in Basic Methanol // *Journal of Physical Chemistry*. 1994. Vol. 98, № 39. P. 9840–9844.

References

1. Yanagi H., Ohno T. Nanofabrication of Gold Particles in Glass Films by AFM-Assisted Local Reduction. *Langmuir*. 1999;15(21):4773–4776.
2. Zoski C.G. *Handbook of Electrochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 2006:934.
3. Bergna H.E., Roberts W.O. *Colloidal Silica: Fundamentals and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2005:944.
4. Khataee A., Mansoori G.A. *Nanostructured Titanium Dioxide Materials: Properties, Preparation, and Applications*. Singapore: World Scientific, 2011:204.
5. Yanagi H., Mashiko S., Nagahara L.A. et al. Photoresponsive Formation of Gold Particles in Silica/Titania Sol – Gel Films. *Chemistry of Materials*. 1998;10(5):1258–1264.
6. Bard A.J., Faulkner L.R. *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*. Hoboken: Wiley, 2000:864.
7. Quinn M., Mills G. Surface-Mediated Formation of Gold Particles in Basic Methanol. *Journal of Physical Chemistry*. 1994;98(39):9840–9844.

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Дмитриевич Кревчик

доктор физико-математических наук,
профессор, декан факультета
информационных технологий
и электроники, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: physics@pnzgu.ru

Vladimir D. Krevchik

Doctor of physical and mathematical
sciences, professor, dean of the faculty
of information technology and electronics,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Дмитрий Олегович Филатов

доктор физико-математических наук,
доцент, заведующий лабораторией
зондовой микроскопии, Нижегородский
государственный университет
имени Н. И. Лобачевского (Россия,
г. Нижний Новгород, пр-т Гагарина, 23/3)

E-mail: filatov@phys.unn.ru

Dmitriy O. Filatov

Doctor of physical and mathematical
sciences, associate professor, head
of the probe microscopy laboratory,
Lobachevsky State University of Nizhni
Novgorod (23/3 Gagarina avenue, Nizhni
Novgorod, Russia)

Михаил Борисович Семенов

доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
физики, Пензенский государственный
университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: Misha29.02.2@gmail.com

Mikhail B. Semenov

Doctor of physical and mathematical
sciences, professor, head of the
sub-department of physics, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 18.10.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 21.11.2022

Принята к публикации / Accepted 10.08.2023