Министерство образования и науки
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ, НАНОСТРУКТУР И НАНОМАТЕРИАЛОВ

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 8

ТВЕРЬ 2016

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145
ББК Ж36:Г5+В379
Ф50

Рецензент сборника:
Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики конденсированного состояния Тверского государственного университета
Н.Н. Большакова

Рецензирование статей осуществляется на основания Положения об рецензировании статей и материалов для опубликования в Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:
www.physchemaspects.ru

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2016. – Вып. 8. – 448 с.

ISBN 978-5-7609-1161-2
Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011

Сборник составлен из оригинальных статей теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145
ББК Ж36:Г5+В379
ISBN 978-5-7609-1161-2
ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2016
© Тверской государственный университет, 2016

УДК 539.216.2

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУННЕЛЬНОГО КОНТАКТА НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК ЗОЛОТА И СЕРЕБРА

А.С. Антонов, Д.В. Иванов, И.И. Сорокина, Н.Ю. Сдобняков
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
170002, Тверь, Садовый пер., д. 35
nsdobnyakov@mail.ru

Аннотация: Проведенное сравнительное исследование вольт-амперной характеристики контакта металл-металл для пленок золота и серебра с острием из вольфрама показывает, что экспериментальные результаты свидетельствуют о необходимости тщательного учета параметров, влияющих на туннельный ток, для извлечения информации об электронной структуре образца.
Ключевые слова: сканирующая туннельная микроскопия, золота, серебро, слюда, вольт-амперная характеристика, термическое расширение острия.

Наноматериалы и их свойства привлекают огромное внимание вследствие их широкого практического применения. Важнейшим параметром тонких плёнок металлов и наночастиц является их электронная структура. При помощи вольт-амперных характеристик, снятых в различных точках поверхности, можно судить о распределении различных фаз на поверхности композитных структур, исследовать корреляции между технологическими параметрами их получения и электронными свойствами [1-4]. Кроме того, практическая значимость работы обусловлена тем, что в настоящее время наночастицы металлов вводятся в активные среды электронных устройств [5].

В данной работе на нанотехнологическом комплексе «УМКА-02G» было проведено сравнительное исследование вольт-амперной характеристики контакта металл-металл для пленок золота и серебра с острием из вольфрама. Ранее отдельные результаты подобного рода исследований нами были уже проведены для нанопокрытий «золото/слюда», «серебро/слюда» и опубликованы в работах [6-15]. Однако отличие данной работы от работы [15] заключается в том, что влияние временного фактора на поведение вольт-амперной характеристики требует дополнительного исследования, в частности, проведение анализа степени влияния термического расширения острия, своевременное обнаружение массопереноса с острия на образец, а также появления оксидных пленок.

Напыление металлических слоев серебра производилось с помощью установки ВУП-4 при давлении воздуха в вакуумной камере $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Образец в виде слоя слюды с характерным размером 2 см помещался на расстоянии 7 см от вольфрамовой спирали из 9-ти витков,

внутри которой помещалась золотая или серебряная проволока диаметром $0,25$ см и длиной 7 мм. Предварительный постепенный нагрев спирали и образца осуществлялся в течение $4-6$ с, а процесс испарения – в течение 3 с. Максимальная сила тока, протекающего по спирали на основном этапе испарения напыляемых металлов, составляла 22 А.

СТМ позволяет исследовать не только морфологию поверхности образца, но и ее локальную электронную структуру. Получаемая из этих данных информация об электронной структуре образца может быть сильно искажена влиянием различных факторов, которые не всегда можно учесть. Нами было изучено влияния параметров туннельной системы на вид ВАХ на примере двух модельных систем острие (вольфрам) – образец (золото/серебро на подложке из слюды).

На рис. 1, 2 приведены результаты серии измерений ВАХ, сделанных без замены острия. Черная кривая, соответствующая одному из первых сканов, оказалась асимметрична относительно знака напряжения, что свидетельствует о влиянии электронной структуры острия. При проведении многократных измерений с одним и тем же острием зависимость становится симметричной относительно знака напряжения и в диапазоне напряжений $-0,5 \div 0,5$ эВ это особенно заметно. Из этого можно сделать вывод, что электронная структура острия изменилась, что может быть объяснено массопереносом с образца на острие. Необходимо отметить, что в наиболее общем случае форма туннельного барьера зависит от работ выхода из материалов образца и острия, приложенного напряжения, расстояния между электродами. Кроме того, необходимо учитывать потенциал сил зеркального изображения, который может приводить к различиям не только в значениях туннельного тока, но и в форме кривых [12].

При этом анализ ВАХ показывает существование запрещенной зоны только у образцов серебра (это говорит о наличии оксидной плёнки на поверхности), ширина которой составляет порядка 1 эВ [19]. В каком-то смысле наличие оксидной пленки на поверхности серебра аналогично напылению слоя полимера. Таким образом, можно ожидать проявления особенностей в поведении вольт-амперной характеристики, описанные в работе [16]. Для пленок серебра изменение ВАХ со временем происходит более плавно и лишь кривая, соответствующая наибольшему времени измерения, резко отличается при положительных напряжениях (см. рис. 1). Для золота после двух первых последовательных измерений наблюдается резкий скачок наклона графика (см. рис. 2), что свидетельствует о резком увеличении сопротивления туннельного контакта. Отчасти это может быть связано с существованием на поверхности образца крупных агломератов, для которых кривые ВАХ при положительном напряжении могут иметь

несколько другую форму в отличие от отдельных наночастиц [17]. В частности такие агломераты обнаружены для пленок золота в работе [18].

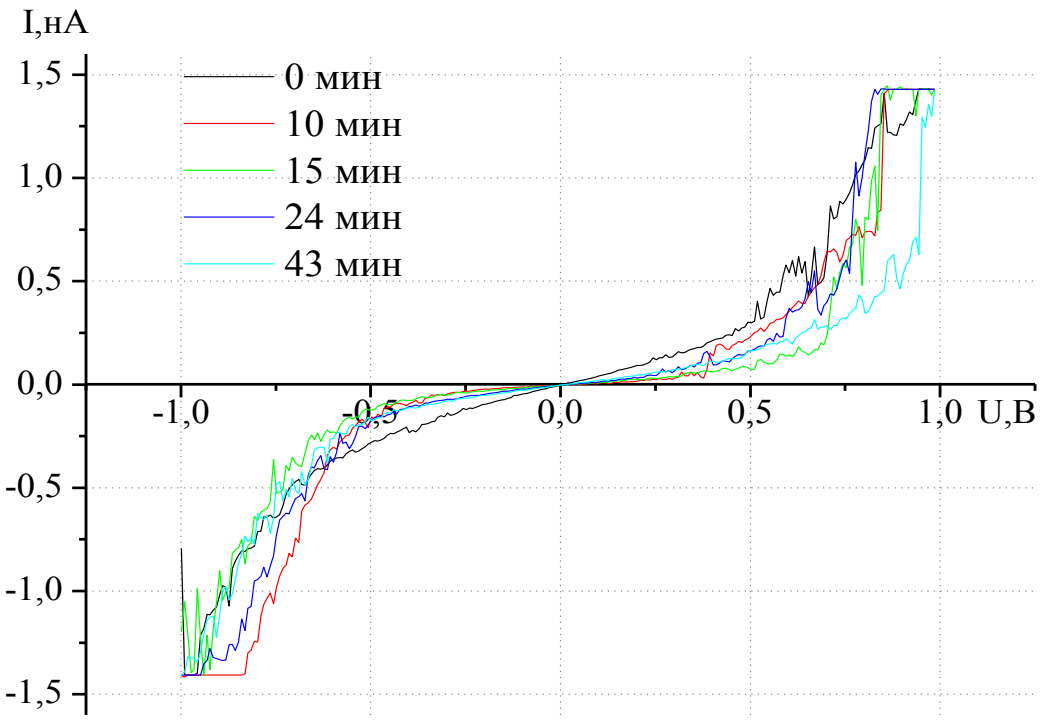

Рис. 1. Кривые серии измерений ВАХ контакта вольфрам – серебро.

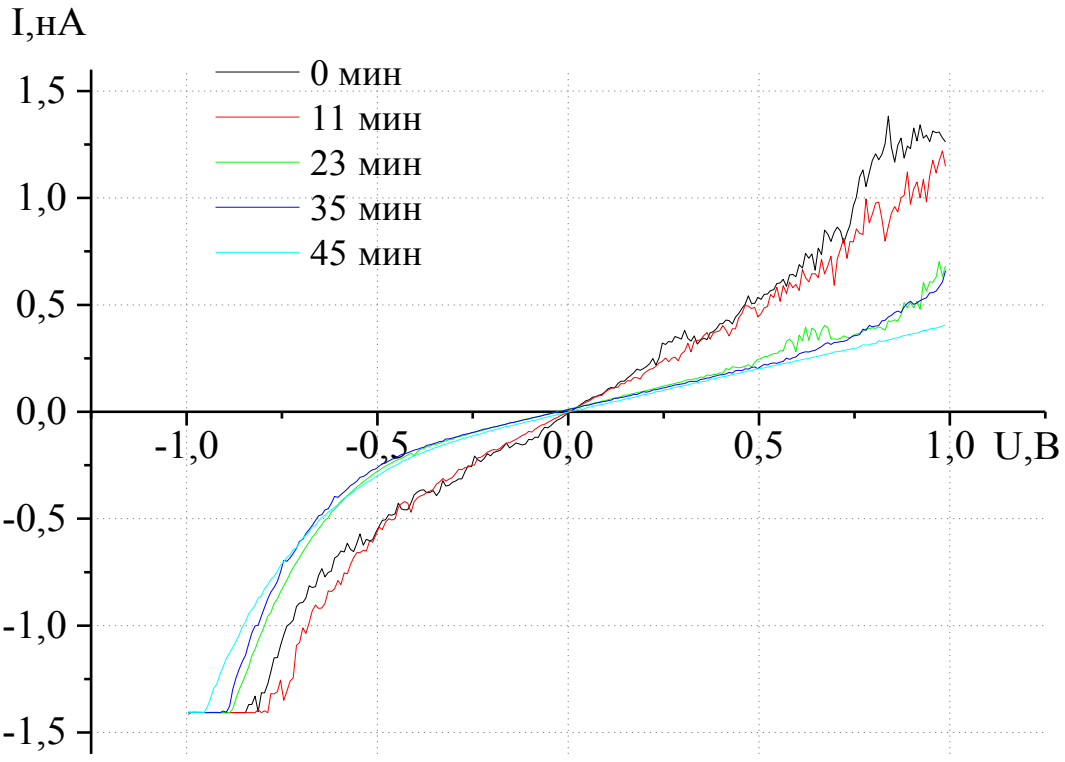

Рис. 2. Кривые серии измерений ВАХ контакта вольфрам – золото.

Исследование ВАХ контакта металл-металл для пленок золота и серебра с острием из вольфрама показывает, что экспериментальные результаты свидетельствуют о необходимости тщательного учета параметров, влияющих на туннельный ток, для извлечения информации об электронной структуре образца. Форма туннельного барьера и ее изменение от приложенного напряжения оказывает существенное влияние на получаемые в СТМ данные. Для анализа экспериментальных данных необходим детальный учет прозрачности туннельного барьера. Причем нами ранее показано в работах [11, 12, 15], что эффект термического расширения острия оказывает существенное влияние на форму вольт-амперных характеристик системы даже при малых по сравнению с работой выхода напряжениях смещения.

Отметим, что изменение длины острия происходит в основном за счет термического расширения. Причем вклад энергии Джоуля-Ленца пренебрежимо мал в сравнении с вкладом энергии Ноттингама. При этом тепловое расширение острия может достигать величин, сравнимых с шириной туннельного промежутка и возможно возникновение лавинообразного процесса теплового расширения острия, приводящего к возникновению контакта между острием зонда и поверхностью образца, что подтверждается данными компьютерного моделирования [20]. Определенным доказательством развиваемой нами теории могут служить экспериментальные результаты исследований [21] для системы вольфрам-золото. Результаты [21] соответствуют как расчету без учета потенциала сил зеркального изображения, так и с его учетом. Таким образом, было показано, что термическое расширение острия, связанное с выделением энергии Джоуля-Ленца и энергии Ноттингама может оказывать влияние на ВАХ туннельного барьера, т.к. ширина зазора зависит от приложенного напряжения. А так же проведена количественная оценка степени влияния на ВАХ, описанных выше эффектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки в рамках выполнения государственных работ в сфере научной деятельности (проект № 3.2448.2014/К).

Библиографический список:

1. **Simons, J.G.** Electric tunnel effect between dissimilar electrodes separated by a thin insulating film / J.G. Simons // Journal of Applied Physics. – 1963. – V. 34. – № 9. – P. 2581-2590.
2. **Tersoff, J.** Theory and application for scanning tunneling microscope / J. Tersoff, D.R. Hamann // Physical Review Letters. – 1983. – V. 50. – I. 25. – P. 1998-2001.
3. **Tersoff, J.** Theory of the scanning tunneling microscope / J. Tersoff, D.R. Hamann // Physical Review B. – 1985. – V. 31. – I. 2. – P. 805-813.
4. **Tersoff, J.** Method for the calculation of scanning tunneling microscope images and

spectra / J. Tersoff // Physical Review B. – 1989. – V. 40. – I. 17. – P. 11990-11993.
5. **Wang, C.C.D.** Optical and electrical effects of gold nanoparticles in the active layer of polymer solar cells / C.C.D. Wang, W.C.H. Choy, C. Duan et al. // Journal of Materials Chemistry. – 2012. – V. 22. – I. 3. – P. 1206-1211.
6. **Зыков, Т.Ю.** Исследование морфологии рельефа поверхности золота на слюде методом сканирующей туннельной микроскопии / Т.Ю. Зыков, Н.Ю. Сдобняков, В.М. Самсонов, А.Н. Базулев, А.С. Антонов // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2009. – Т. 11. – № 4. – С. 309-313.
7. **Сдобняков, Н.Ю.** Определение фрактальной размерности островковых плёнок золота на слюде / Н.Ю. Сдобняков, Т.Ю. Зыков, А.Н. Базулев, А.С. Антонов // Вестник Тверского государственного университета. Серия «Физика». – 2009. – № 41. – Вып. 6. – С. 112-119.
8. **Зыков, Т.Ю.** Исследование морфологии рельефа поверхности золота на слюде методом сканирующей туннельной микроскопии / Т.Ю. Зыков, Н.Ю. Сдобняков, А.Н. Базулев, А.С. Антонов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2009. – Вып. 1. – С. 34-41.
9. **Сдобняков, Н.Ю.** Получение 3-d изображений нанопокрытия золота на слюде / Н.Ю. Сдобняков, А.С. Антонов, Т.Ю. Зыков, А.Н. Базулев, Д.Н. Соколов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2010. – Вып. 2. – С. 126-128.
10. **Сдобняков, Н.Ю.** Измерение вольт–амперных характеристик туннельного контакта вольфрам–золото / Н.Ю. Сдобняков, А.С. Антонов, Т.Ю. Зыков, Д.Н. Соколов, Е.А. Воронова, О.В. Михайлова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. − Тверь: Твер. гос. ун-т, 2011. − Вып. 3. − С. 206-216.
11. **Сдобняков, Н.Ю.** Измерение вольт-амперных характеристик туннельного контакта вольфрам-золото / Н.Ю. Сдобняков, А.С. Антонов, Д.Н. Соколов, Е.А. Воронова, О.В. Михайлова // Нанотехника. – 2012. – №2 (30). – С. 16-19.
12. **Антонов А.С.** Сканирующая туннельная микроскопия для нанопокрытия «серебро/слюда»: морфология рельефа и электрические характеристики / А.С. Антонов, О.В. Михайлова(Зонова), Е.А. Воронова, Н.Ю. Сдобняков, Д.Н. Соколов, Д.В. Иванов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. − Тверь: Твер. гос. ун-т, 2015. − Вып. 7. − С. 31-46.
13. **Сдобняков Н.Ю.** Изучение фрактальной размерности нанопокрытий золота и серебра на слюде / Н.Ю. Сдобняков, А.С. Антонов, О.В. Михайлова // 18-й Международный симпозиум «Упорядочение в минералах и сплавах», ОМА-18, Ростов н/Д – пос. Южный, 10-15 сентября 2015: труды конференции. Выпуск 18. Том 1. – Ростов н/Д: Фонд науки и образования, 2015. – С. 241-243.
14. **Антонов А.С.** Комплексное исследование морфологии рельефа и электрических характеристики пленок золота и серебра методом сканирующей туннельной микроскопии / А.С. Антонов, Д.В. Иванов, И.И. Иванова, Н.Ю. Сдобняков // XXVI Российская конференция по электронной микроскопии и 4-я Школа молодых ученых «Современные методы электронной и зондовой микроскопии в исследованиях наноструктур и наноматериалов»: тезисы докладов. – Москва-Зеленоград: ИПТМ РАН,

2016. – С. 238-239.
15. **Антонов А.С.** Комплексное исследование морфологии рельефа и электрических характеристик пленок золота и серебра методом сканирующей туннельной микроскопии / А.С. Антонов, Д.В. Иванов, Н.Ю. Сдобняков, В.В. Кулагин // Мониторинг. Наука и технологии. – 2016. – № 3 (28). – С. 50-54
16. **Кухто, А.В.** Оптические и электрофизические свойства нанокомпозитов на основе PEDOT: PSS и наночастиц золота/серебра / А.В. Кухто, А.Е. Почтенный, А.В. Мисевич и др. // Физика твердого тела. – 2014. – Т. 56. – Вып. 4. – С. 794-801.
17. **Гришин, М.В.** Адсорбция и взаимодействие водорода и кислорода на поверхности единичных кристаллических наночастиц золота / М.В. Гришин, А.К. Гатин, Н.В. Дохликова и др. // Кинетика и катализ. – 2015. – Т. 56. – № 4. – С. 539-546.
18. **Самсонов, В.М.** О фрактальных свойствах агрегатов металлических нанокластеров на твердой поверхности / В.М. Самсонов, Ю.В. Кузнецова, Е.В. Дьякова // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86. – Вып. 2. – С. 71-77.
19. **Антонов, А.С.** Исследование морфологии рельефа нанопокрытия серебра на слюде и измерение вольт-амперных характеристик / А.С. Антонов, Н.Ю. Сдобняков, Е.А. Воронова, Н.В. Новожилов, О.В. Михайлова // XIX Российский симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел и 3-я Школа молодых ученых «Современные методы электронной и зондовой микроскопии в исследованиях наноструктур и наноматериалов», Черноголовка, 1-5 июня 2015 года: тезисы докладов. – Черноголовка: ИПТМ РАН, 2015. – С. 120-121.
20. **Соколов, Д.Н.** О моделировании термических эффектов при взаимодействии зонда сканирующего туннельного микроскопа с образцом / Д.Н. Соколов, Н.Ю. Сдобняков, П.С. Кутилин, О.В. Новожилов, О.В. Михайлова, А.С. Антонов // Нанотехника. – 2013. – № 2 (34). – С. 78-80.
21. **Корнилов О.А.** Изучение влияния формы туннельного барьера на туннельный ток в СТМ / О.А. Корнилов, Г.Г. Владимиров // Тезисы ВНКСФ-7. – Санкт-Петербург: СПбГУ, 2001. − С. 187.