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 9

ТВЕРЬ 2017

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании 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, 2017. – Вып. 9. – 592 с.

ISBN 978-5-7609-1275-6

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 978-5-7609-1275-6

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2017

© Тверской государственной
университет, 2017

УДК 539.25+620.187

ИССЛЕДОВАНИЯ МОРФОЛОГИИ РЕЛЬЕФА ПЛЕНОК МЕДИ НА ПОВЕРХНОСТИ СЛЮДЫ

А.С. Антонов¹, Н.Ю. Сдобняков¹, Д.В. Иванов¹, К.Б. Подболотов²

¹ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

170002, Россия, Тверь, Садовый пер., 35

²ГНУ «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»

220141, Республика Беларусь, Минск, ул. Купревича, 10

nsdobnyakov@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2017.9.019

Аннотация: С помощью сканирующего туннельного микроскопа выполнено исследование морфологии рельефа пленок меди, нанесенных термовакuumным напылением, на поверхность слюды. Описаны характерные особенности нанорельефа поверхности пленки, включая фрактальные свойства.

Ключевые слова: сканирующая туннельная микроскопия, нанорельеф, фрактальная размерность, пленки меди.

1. Введение

Интерес к исследованию поверхности металлических пленок, включая пленки с фрактальной структурой поверхности или профиля, обусловлен их широким применением в ряде направлений нанотехнологии. Например, наноразмерные пленки с фрактальной структурой, получаемые в условиях, далеких от равновесного состояния и на основе самоорганизации, обладают уникальными оптическими и электрофизическими свойствами [1-3], существенно отличающимися от их обычных наноразмерных аналогов. К настоящему времени уже очевидно, что существует зависимость между структурой и морфологией получаемых пленок и особенностями технологических режимов их получения, что позволяет развивать технологии получения пленок с заранее заданными свойствами [4, 5].

В наших предыдущих работах [6-8] исследовались пленки золота, серебра и меди на поверхности слюды. С использованием двух альтернативных методов: сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ) были установлены значения фрактальной размерности для образцов «золото на слюде» (СТМ: профиль – $D_L = 1,89 \pm 0,06$, поверхность – $D_f = 2,08 \pm 0,05$; АСМ: профиль – $D_L = 1,85 \pm 0,03$, поверхность – $D_f = 2,11 \pm 0,05$) и «серебро на слюде» (СТМ: профиль – $D_L = 1,88 \pm 0,04$, поверхность – $D_f = 2,13 \pm 0,03$; АСМ: профиль – $D_L = 1,91 \pm 0,03$, поверхность – $D_f = 2,08 \pm 0,04$). Однако для пленок меди на поверхности слюды были лишь обнаружены отдельные фрактальные образования с фрактальными размерностями для профиля – $D_L = 1,81 \pm 0,09$ и для поверхности – $D_f = 2,15 \pm 0,05$ соответственно.

При этом в [8] исследование всей поверхности образца показало, что графики зависимости (в дважды логарифмической шкале) числа мономеров от размера кластера для профиля и поверхности образца не являются достаточно линейными для признания поверхности фрактальной. На том этапе мы объясняли этот факт тем, что при напылении пленки меди на слюду способность к самоорганизации посредством механизма коалесценции для меди выражена более слабо, чем для золота и серебра, что и проявляется при исследовании поверхности на больших масштабах. В этой связи необходимо провести более всестороннее исследование морфологии рельефа пленок меди на поверхности с целью выявления характерных отличительных особенностей нанорельефа поверхности пленки меди.

2. Методика эксперимента и результаты

В нашей работе объектом исследования на нанотехнологическом комплексе «УМКА-02G» были выбраны пленки меди на поверхности слюды, полученные методом термовакuumного напыления. Для напыления покрытий нами использовалась проволока меди толщиной 0,25 мм. С помощью вакуумной установки ВУП-4 на поверхность слюды произведено напыление пленки меди 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 девяти витков, внутри которой помещалась металлическая проволока диаметром 0,25 мм и длиной 7 мм. Предварительный постепенный нагрев спирали и образца осуществлялся в течение 4–6 секунд, а процесс испарения – в течение 3 секунд. Максимальная сила тока, протекающего по спирали на основном этапе испарения напыляемых металлов, составляла 22 А. В целях первичного контроля качества покрытий образцы изучались на растровом электронном микроскопе JSM-6610LV. Более подробное описание методики подготовки образцов изложено нами в [9].

На рис. 1 представлен результат сканирования в режиме постоянной высоты поверхности пленки меди в различных масштабах и 3D изображение нанопокрyтия. Анализируя 3D изображение пленки меди можно увидеть достаточно крупные агломераты, распределенные по поверхности в достаточной степени равномерно. Очевидно, что именно такие агломераты могут быть центрами зарождения фрактальных структур [10].

Для оценки напыления нами были построены высотные профили поверхности (см. рис. 2). Приведены высотные профили вдоль главной (черная линия на рис. 2) и побочной (красная линия на рис. 2) диагоналей, а также высотные профили, проведенные перпендикулярно к краям

рисунка через его центр (черная кривая – вертикаль, красная кривая – горизонталь).

Рис. 1. Изображение поверхности в разных масштабах (верхний рисунок) и 3D изображение нанопокртия (нижний рисунок, размер области сканирования $996 \times 996 \text{ nm}^2$) пленки меди на слюде, полученное с помощью туннельного микроскопа.

Рис. 2. Профили поверхности пленки меди на слюде по направлению диагоналей (верхний рисунок) и перпендикуляров, проведённых через центр изображения (нижний рисунок).

Из рис. 2 видно, что разница высот между подобными скоплениями изменяется в пределах 1,0–1,5 нм. Для оценки поверхности нами построена гистограмма появления пиков, из которой следует, что наибольшая часть пиков приходится на $-0,8 \div +0,8$ нм (заметим, что диапазон наиболее часто встречающихся высот в целом соответствует по ширине значению, фиксируемому нами для пленок золота и серебра [6-8], но при этом вдвое больше, чем для пленок хрома [11]). Можно сделать вывод о том, что в целом поверхность достаточно однородна – тип «плато» (см. рис. 3) с отдельными зернами, представленными агломератами меди, сформированными в процессе конденсации атомов меди и последующей коалесценции.

Рис. 3. Гистограмма появления пиков на поверхности пленки меди на слюде.

Проанализировав шероховатость поверхности с использованием программного продукта Scanning Probe Image Processor [12], мы пришли к выводу, что центр области сканирования имеет ярко выраженный пик, что может говорить о локации оседающих частиц с пучка при напылении в этом месте (данный результат воспроизводим). Кроме того, нами были рассчитаны морфологические характеристики поверхности образца, а именно высотные параметры: среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины S_a (Roughness Average), среднеквадратичное отклонение S_q (Root Mean Square), сумма

средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины S_{10z} (The Ten Point Height), поскольку именно они в большей степени имеют значение для изучения фрактальных свойств профиля и поверхности (см. Таблицу 1).

Таблица 1. Морфологические характеристики пленки меди на слюде», нм

$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} z(x_k, y_l) $	$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} [z(x_k, y_l)]^2}$	$S_{10z} = \frac{\sum_{i=1}^5 z_{\max i} + \sum_{i=1}^5 z_{\min i} }{5}$
0,318	0,439	5,00

Для характеристики основного свойства фрактальных кластерных агрегатов – самоподобия их внутренней структуры вводят в рассмотрение кластерную размерность D_c , определяемую из соотношения

$$N = (d/a)^{D_c}, \quad (1)$$

где N – число частиц в кластере (число мономеров), d – линейный размер, т.е. диаметр кластера (агрегата), a – размер частиц, из которых состоит кластер (средний размер мономера). Формула (1) отвечает частному случаю формулы [13]

$$N = \rho^* (d/a)^{D_c}, \quad (2)$$

определяющей кластерную размерность D_c . Здесь ρ^* – безразмерный параметр, играющий роль приведенной плотности и называемый лакунарностью (или префактор) [14-16]. При этом величина D_c , определяемая коэффициентом наклона зависимости $\ln(N)$ от $\ln(d/a)$ не зависит от ρ^* и выбора основания логарифмов.

Рис. 4. Угловое распределение фрактальной размерности.

С использованием программного продукта Scanning Probe Image Processor [12] определено среднее значение фрактальной размерности для пленки меди на поверхности слюды $\bar{D}_c = 2,54$ и построена диаграмма углового распределения фрактальной размерности, полученная на основе анализа амплитудного спектра Фурье (см. рис. 4).

3. Заключение

В данной работе методом сканирующей туннельной микроскопии определены морфологические характеристики пленок меди, нанесенных термовакuumным напылением, на поверхность слюды. Установлена фрактальная размерность для пленки меди на поверхности слюды и получено угловое распределение фрактальной размерности. Таким образом, пленки меди на диэлектрических подложках, как и пленки золота и серебра могут образовывать фрактальные структуры. Однако, в дальнейшем необходимо более подробно изучить факторы, влияющие на формирование фрактальных структур в пленках меди на больших масштабах, с целью уточнения данных работы [8] и выявления специфических закономерностей, описывающих фрактальные свойства пленок меди и отдельных агломератов на ее поверхности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 16-33-00742 и № 17-53-04010 Бел_мол_a) и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № X17PM-032).

Библиографический список:

1. **Bendavid, A.** Morphology and optical properties of gold thin film prepared by filtered arc deposition / A. Bendavid, P.J. Martin, L. Wiecek // Thin Solid Films. – 1999. – V. 354. – P. 169-175.
2. **Стогний, А.И.** Получение методом ионно–лучевого распыления кислородом и оптические свойства ультратонких пленок золота / А.И. Стогний, Н.Н. Новицкий, С.Д. Тушина и др. // Журнал технической физики. – 2003. – Т. 73. – Вып. 6. – С. 86-89.
3. **Карпов, С.В.** Оптические и фотофизические свойства фрактально-структурных золотых металлов / С.В. Карпов, В.В. Слабко. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003. – 264 с.
4. **Серов, И.Н.** Применение метода магнетронного распыления для получения структурированных тонких пленок / И.Н. Серов, Г.Н. Бельская, В.И. Марголин, и др. // Известия РАН. Серия физическая. – 2003. – Т. 67. – № 4. – С. 575-578.
5. **Серов, И.Н.** Исследование воздействия фрактально- матричных структуризаторов на процессы образования и роста наноразмерных структур / И.Н. Серов, В.А. Жабров, В.И. Марголин // Физика и химия стекла. – 2004. – Т. 30. – № 1. – С. 45-71.
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. **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.
8. **Антонов, А.С.** Исследование фрактальных свойств наноразмерных пленок золота, серебра и меди: атомно-силовая и туннельная микроскопия / А.С. Антонов, Н.Ю. Сдобняков, Д.В. Иванов и др. // Химическая физика и мезоскопия. – 2017. – Т. 19. – № 3. – С. 473-486.
9. **Антонов, А.С.** О методике подготовки образцов для изучения фрактальной размерности и электрических свойств образцов с помощью сканирующего туннельного микроскопа / А.С. Антонов, О.В. Михайлова, Е.А. Воронова, Н.Ю. Сдобняков // 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, 2014. – С. 15-21.
10. **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.
11. **Антонов, А.С.** Оценка геометрических характеристик нанопокрyтия хрома на стекле и измерение вольт-амперных характеристик / А.С. Антонов, Е.А. Воронова, Н.Ю. Сдобняков, О.В. Михайлова // Нанотехника. – 2014. – № 2 (38). – С. 8-10.
12. Introduction Scanning Probe Image Processor. Режим доступа: [www.url: http://www.imagemet.com/WebHelp6/Default.htm](http://www.imagemet.com/WebHelp6/Default.htm). – 15.11.2017.
13. **Федер, Е.** Фракталы / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 260 с.
14. **Ролдугин, В.И.** Фрактальные структуры дисперсных систем / В.И. Ролдугин // Успехи химии. – 2003. – Т. 72. – Вып. 10. – С. 931-959.
15. **Ролдугин, В.И.** Свойства фрактальных дисперсных систем / В.И. Ролдугин // Успехи химии. – 2003. – Т. 72. – Вып. 11. – С. 1027-1054.