

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

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 13

ТВЕРЬ 2021

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 о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Издательство Тверского государственного университета, 2021. – Вып. 13. – 956 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров 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. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

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

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2021

© Тверской государственный университет, 2021

РАЗЛИЧНЫЕ СХЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ ФРАКТАЛЬНОГО РЕЛЬЕФА НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК ПЛАТИНЫ

Д.В. Иванов¹, А.С. Антонов^{1,2}, Е.М. Семенова¹, А.И. Иванова¹, В.А. Анофриев¹,
Н.Ю. Сдобняков¹

¹ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
170002, Россия, Тверь, Садовый пер., 35

²ФГБОУ ВО «Тверская государственная сельскохозяйственная академия»
170904, Россия, Тверь, ул. Маршала Василевского, 7
nsdobnyakov@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.156

Аннотация: В работе исследуется морфология рельефа наноразмерных пленок платины на поверхности слюды с помощью сканирующего зондового (в режиме атомно-силового) и туннельного микроскопов. Пленки платины исследовались непосредственно после их получения на установке магнетронного напыления, а также после отжига в муфельной печи в воздушной атмосфере. Отжиг позволял установить возможные диапазоны изменения фрактальной размерности и высотных параметров, соответствующие деградации нанорельефа. Получены значения фрактальной размерности для пленок разной толщины при двух альтернативных методах исследования на разных исходных масштабах образцов: на основе данных атомно-силового микроскопа – $\bar{D}_c = 2,17 \div 2,38$ и сканирующего туннельного микроскопа – $\bar{D}_c = 2,28 \div 2,50$ в зависимости от последовательности напыления слоев и отжига пленок. Выбор последовательности операций магнетронного напыления и отжига и внешних условий позволяют формулировать рекомендации по развитию технологии «выращивания» структур с заданной морфологией поверхности.

Ключевые слова: сканирующая зондовая микроскопия, режим атомно-силового микроскопа, сканирующая туннельная микроскопия, магнетронное напыление, отжиг, нанорельеф, параметры шероховатости, фрактальная размерность, пленки платины.

1. Введение

В настоящее время комплексные методики исследования поверхности наноразмерных пленок [1, 2] активно используются для установления закономерностей и механизмов формирования нанорельефа поверхностей [3] с заданными параметрами шероховатости, включая фрактальную размерность. Такие методики сочетают в себе исследования с помощью сканирующего зондового (в режиме атомно-силового) и туннельного микроскопов, а также иных приборов, например, оптического интерференционного профилометра. Известно, что величина фрактальной размерности может служить своего рода универсальной характеристикой – технологическим паспортом поверхности [4, 5]. Одним из перспективных методов получения наноразмерных пленок обладающих фрактальными свойствами является магнетронное напыление [6-8]. В частности, в работе [6, 7] было исследовано влияние на структуру тонких пленок, получаемых методом магнетронного ионного напыления, фрактально-матричных

резонаторов, находящихся в фиксированном контакте с подложкой, но вне зоны действия газового разряда. Описана степень влияния различных факторов на фрактализацию получаемых тонкопленочных структур.

Согласно имеющимся экспериментальным данным [9], на пленках платины, сформированных электрохимическим осаждением на поверхность $n^+ - GaAs(100)$, формируется достаточно развитый фрактальный рельеф со значением фрактальной размерности $D_c = 2,51 \pm 0,01$ (оценка выполнена методом триангуляции). Также и в работе [10] пленки платины были созданы методом электрохимического осаждения из раствора серной кислоты и оксида платины. Полученные значения фрактальной размерности для сформированного таким способом рельефа поверхности пленки платины (время экспозиции более 5 часов перед исследованием с помощью СТМ) составили $D_f = 2,5 \pm 0,1$ (значение D_f оценено нами с использованием соотношения между фрактальной размерностью профиля и поверхности $D_L = D_f - 1$). Однако в работах [9, 10] фактор возможной деградации нанорельефа не рассматривается, хотя он, по нашему мнению, носит выраженный технологический характер в условиях использования наноразмерных пленок платины как активных или пассивных элементов в нанотехнологиях.

Целью настоящей работы является комплексное исследование морфологии поверхности наноразмерных по толщине пленок платины на подложке из слюды непосредственно после их получения на установке магнетронного напыления, а также после отжига в муфельной печи в воздушной атмосфере. В данном случае мы планируем описать как процессы деградации нанорельефа, так и его развития за счет процессов коалесценции и самосборки.

2. Экспериментальное оборудование (более подробно описание изложено в [11])

Напыление платины на подложку из слюды осуществлялось на установке магнетронного напыления JEOL JFC-1600 (Япония) в плазме аргона при рабочем давлении 8 Па, значение ионного тока составляло 30 мА, напряжение 220 В, расстояние между мишенью и образцом 5 см. Продолжительность напыления одного слоя платины составила 30 секунд. Наносимые на поверхность слюды частицы платины имеют размер 1–2 нм и образуют кластерные структуры, имеющие диаметр 50–500 нм. В данной работе исследовались пленки платины, полученные по следующим схемам напыления:

1. единовременное напыление 6 слоев платины (толщина пленки варьировалась в диапазоне 130–135 нм);

2. два последовательных, но разделенных по времени напыления по 3 слоя платины (толщина пленки в 1 этапе – 55–58 нм, во 2 этапе – 137–140 нм).

После каждого этапа напыления производилось комплексное исследование (СТМ и АСМ) морфологии поверхности платины, после чего производился отжиг образцов. Отжиг образцов производился в муфельной печи в воздушной атмосфере в течение 30 минут. Нагрев осуществлялся до температуры 350 °С со скоростью 5 °С/мин. Образцы охлаждались вместе с печью без контроля скорости. После отжига также производилось повторное комплексное исследование (СТМ и АСМ) морфологии поверхности платины.

Исследования топографии поверхности пленок платины были выполнены при комнатной температуре на сканирующем зондовом микроскопе SolverNext в режиме АСМ (ООО «НТ-МДТ СИ»). Для дополнительной верификации результатов исследования топографии поверхности наноразмерных пленок платины также использовался СТМ «УМКА-02G», Анализ морфологии поверхности пленок платины проводился с использованием как встроенного программного обеспечения вышеперечисленных приборов, так и с использованием специализированного [12-14].

3. Методика определения фрактальной размерности и высотных параметров

Как и ранее [1, 2, 15, 16] будем оценивать 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). В данной работе базовым ПО для определения фрактальной размерности являлось [14]. Кроме того, в целях дополнительного контроля оценки фрактальной размерности и обработки графических материалов нами был использован программный комплекс Image Analysis (версия 3.5.30.19856), методика определения изложена в [13]. Высотные параметры находились с использованием ПО [12].

4. Обсуждение результатов

На рис. 1-3 представлены результаты, полученные помощью АСМ и СТМ микроскопов. В силу особенностей методик проведения эксперимента размеры участков сканирования поверхности исследуемых образцов различны. В целях оценки качества покрытия и определения типа покрытия (тип «плато», тип «высотно развитого рельефа») нами были

определены морфологические характеристики поверхности образца, а именно высотные параметры (см. Таблицу 1).

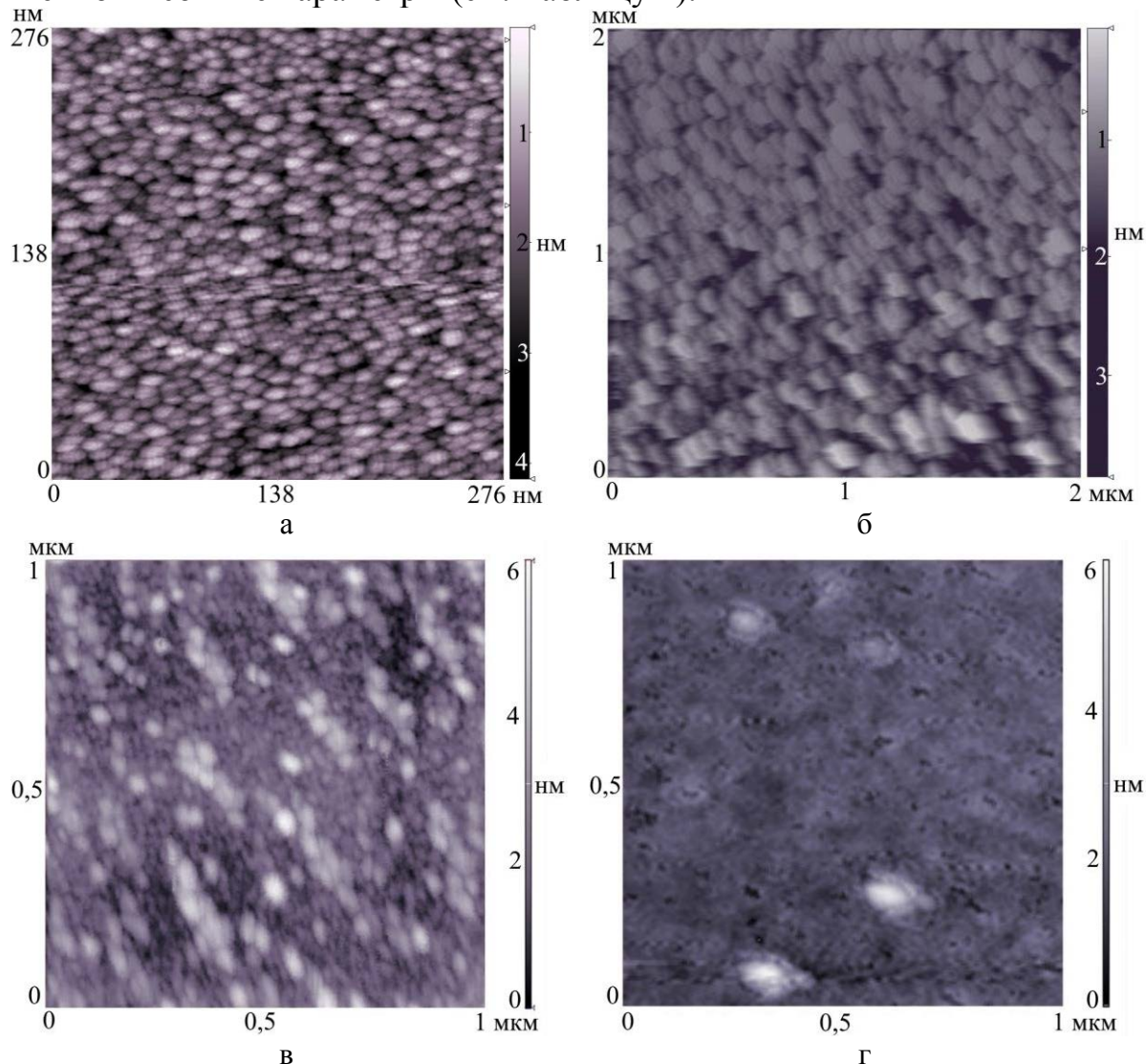


Рис. 1. Изображения поверхности платины на слюде, полученные по схеме 1: а – на сканирующем туннельном микроскопе до отжига, б – после отжига; в – на атомно-силовом микроскопе до отжига, г – после отжига.

Нами были определены следующие высотные параметры: средняя арифметическая шероховатость $S_a = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} |z(x_k, y_l)|$; среднеквадратичное отклонение $S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} [z(x_k, y_l)]^2}$; максимальная высота от пика до впадины на поверхности образца $S_z = z_{\max} - z_{\min}$; коэффициент эксцесса – параметр, учитывающий форму функции распределения амплитуды (определяет степень изрезанности поверхности) $S_{ku} = \frac{1}{MN \cdot S_q^4} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} [z(x_k, y_l)]^4$;

коэффициент асимметрии – параметр, который описывает форму функции распределения амплитуды (показывает симметрию изменения поверхности относительно ее средней линии)

$$S_{sk} = \frac{1}{MN \cdot S_q^3} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} [z(x_k, y_l)]^3.$$

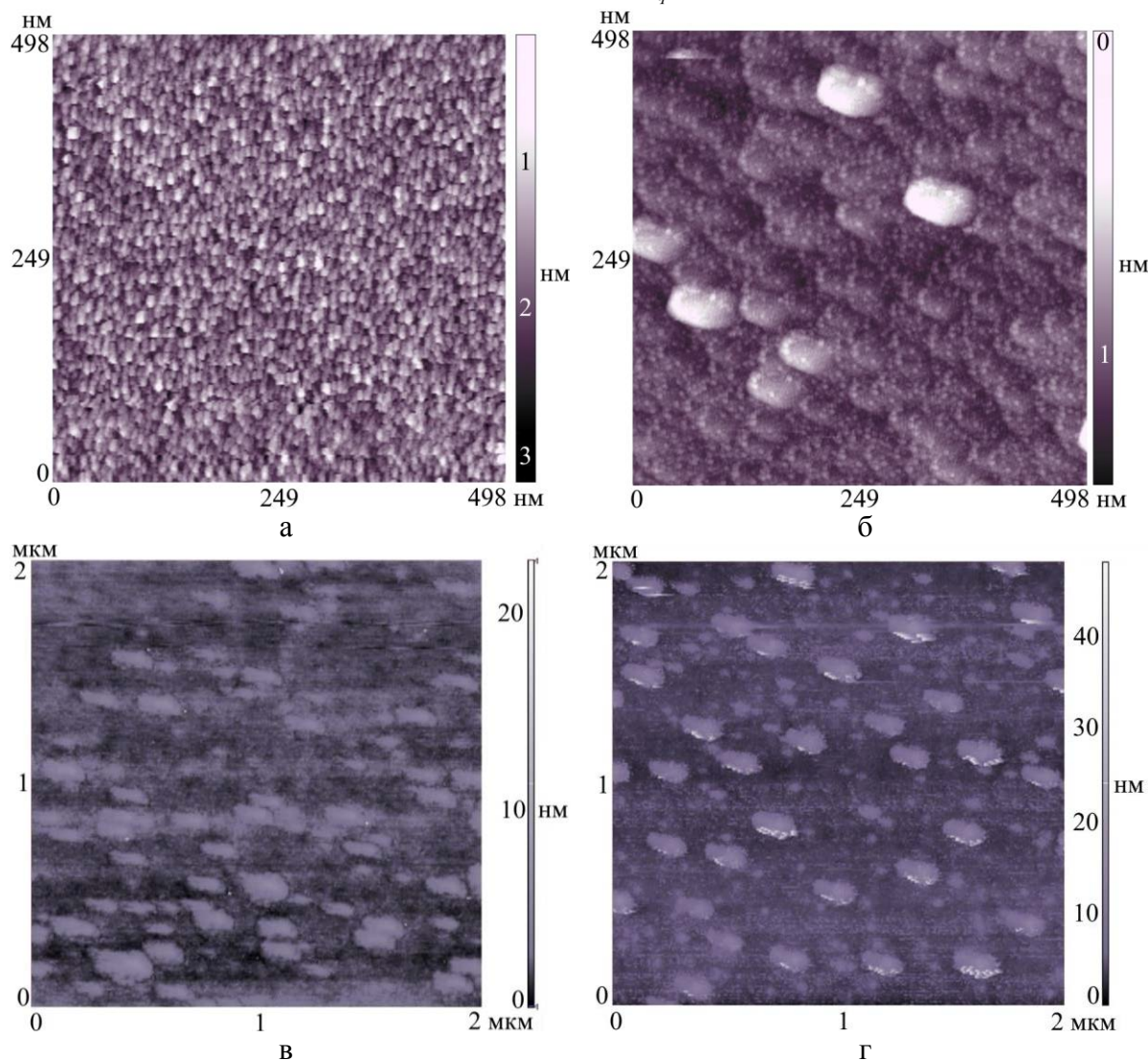


Рис. 2. Изображения поверхности платины на слюде, полученные по схеме 2 (1 этап): а – на сканирующем туннельном микроскопе до отжига, б – после отжига; в – на атомно-силовом микроскопе до отжига, г – после отжига.

Заметим, что полученные профили поверхности при схеме 1 и 2 принципиально отличны с позиции значений высотных параметров (см. Таблицу 1). Характер изменения коэффициента S_{sk} говорит о том, что отжиг может быть эффективным средством «выравнивания» поверхности, а значит влиять на значения фрактальной размерности. Вместе с тем, профиль поверхности с положительным коэффициентом асимметрии, имеет четкие высокие пики, которые выделяются от среднего. В то время как профиль поверхности с отрицательным коэффициентом асимметрии

(пористые поверхности) имеет четкие впадины (лакуны) в гладких участках типа «плато» (это ярко демонстрируют рис. 1-3).

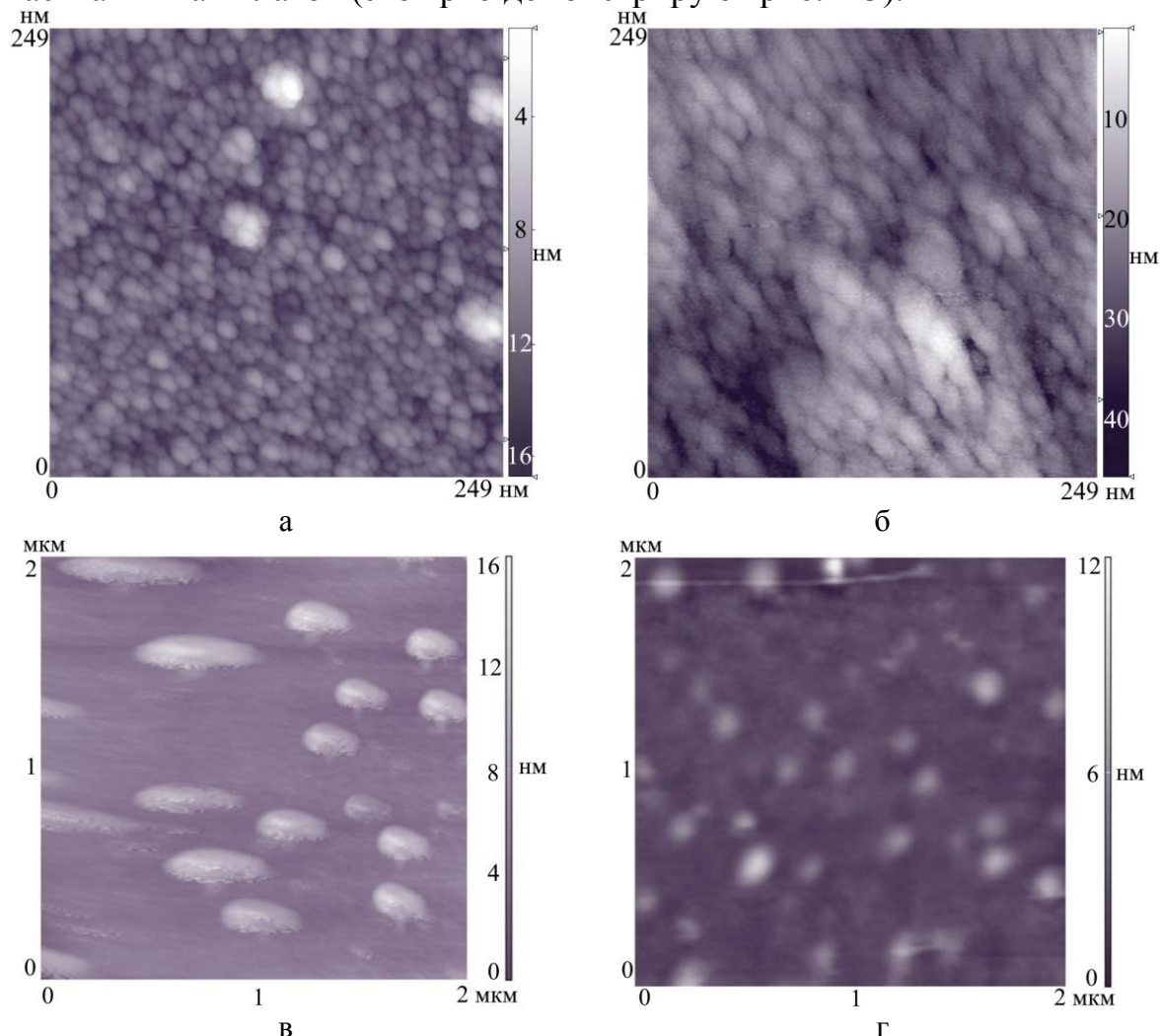


Рис. 3 Изображения поверхности платины на слюде, полученные по схеме 2 (2 этап): а – на сканирующем туннельном микроскопе до отжига, б – после отжига; в – на атомно-силовом микроскопе до отжига, г – после отжига.

Как правило, ожидается, что высотные параметры по абсолютным значениям должны уменьшаться с увеличением толщины напыляемой пленки (деградация рельефа), также происходит уменьшение степени изрезанности профиля, что говорит о возможности некоторого доминирования процессов структурообразования отдельных крупных агломератов с менее развитым фрактальным рельефом по отношению к локальным процессам образования мелких зерен. Можно заметить, что за счет применения технологии отжига (см. Таблицу 1, схема 2 этап 2 после отжига) можно получить более развитый высотный рельеф, т.е. отжиг влияет на формирование поверхностного слоя агломератов, полученных при коалесценции (автокоалесценции [17]) или посредством механизма смачивания в твердом состоянии [18]. Отметим также, что как СТМ, так и

АСМ несмотря на исследования на разных масштабах дают очень близкие значения фрактальной размерности, как правило, с разбросом $\Delta D_c = 0,1$.

Таблица 1. Средние значения морфологических характеристик плёнок платины на слюде для различных схем напыления, полученных с использованием ПО [12]. Фрактальная размерность определена в программном комплексе [14].

Тип напыления	S_a , нм	S_q , нм	S_z , нм	S_{ku}	S_{sk}	АСМ	СТМ
						\bar{D}_c^*	\bar{D}_c^*
схема 1 до отжига	4,4	5,4	40,0	2,7	-0,1	2,32	2,44
схема 1 после отжига	2,7	3,6	39,9	4,2	-0,01	2,27	2,32
схема 2, этап 1 до отжига	2,9	3,6	31,7	2,9	0,1	2,38	2,50
схема 2, этап 1 после отжига	0,9	1,3	13,0	8,0	1,7	2,30	2,40
схема 2, этап 2 до отжига	1,2	1,7	16,1	8,1	1,4	2,26	2,36
схема 2, этап 2 после отжига	4,5	5,7	46,1	3,4	0,2	2,17	2,28

* значение выбиралось из серии измерений на одном образце, масштабы исследуемых образцов указаны на рис. 1-3.

Как было показано в [11], различные типы коалесценции (жидкофазная коалесценция, миграционная коалесценция и автокоалесценция) могут выступать в качестве доминирующего механизма при формировании фрактального рельефа для пленок платины наноразмерной толщины, полученных технологией магнетронного напыления. В дальнейшем исследования данного эффекта необходимо продолжить, в том числе за счет изменения толщины пленки при последовательном напылении наноразмерных слоев.

5. Заключение

В данной работе апробированы различные схемы получения пленок платины, наноразмерных по толщине. В данных схемах присутствует отжиг образцов, который изменяет ход формирования фрактального рельефа, в частности за счет ускорения разных типов коалесценции. Полученные значения фрактальной размерности для наноразмерных пленок платины составляют в режиме АСМ $\bar{D}_c = 2,17 \div 2,38$, в режиме СТМ $\bar{D}_c = 2,28 \div 2,50$. Таким образом, комбинация схем напыления и параметров отжига образцов (температура и скорость ее изменения, время термического воздействия), на наш взгляд, позволит активировать и управлять всеми основными типами морфологических изменений [17], которые реализуются следующими способами: коалесценция, коагуляция, агрегирование, гетеродиффузия, миграция и т.д. Внедрение такой технологии открывает возможность получения наноразмерных

металлических пленок, обладающих широким спектром морфологических характеристик, включая фрактальную размерность.

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 0817-2020-0007). Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП Тверского государственного университета. Авторы благодарны к.ф.-м.н., доценту кафедры прикладной физики ТвГУ Е.В. Барабановой за помощь в отжиге образцов.

Библиографический список:

1. **Сдобняков, Н.Ю.** Морфологические характеристики и фрактальный анализ металлических пленок на диэлектрических поверхностях: монография / Н.Ю. Сдобняков, А.С. Антонов, Д.В. Иванов. – Тверь: ТвГУ, 2019. – 168 с.
2. **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.
3. **Slătineanu, L.** Nanoreliefs obtained by various machining methods / L. Slătineanu, O. Dodun, M. Coteață, I. Beșliu // In: Nanostructures and thin films for multifunctional applications. – Cham: Springer International Publishing Switzerland, 2016. – Ch. 14. – P. 447-472. DOI: 10.1007/978-3-319-30198-3_14.
4. **Иванов, Г.С.** Фрактальная геометрическая модель микроповерхности / Г.С. Иванов, Ю.В. Брылкин // Геометрия и графика. – 2016. – Т. 4. – № 1. – С. 4-11. DOI: 10.12737/18053.
5. **Брылкин, Ю.В.** Тестирование алгоритма моделирования рельефа шероховатой поверхности на основе теории фракталов / Ю.В. Брылкин, А.Л. Кусов, А.В. Флоров // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2014. – Т. IV. – № 5. – С. 86-89.
6. **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.
7. **Серов, И.Н.** Исследование воздействия фрактально-матричных структуризаторов на процессы образования и роста наноразмерных структур / И.Н. Серов, В.А. Жабрев, В.И. Марголин // Физика и химия стекла. – 2004. – Т. 30. – № 1. – С. 45-71.
8. **Серов, И.Н.** Получение и исследование наноразмерных пленок меди с фрактальной структурой / И.Н. Серов, Г.Н. Лукьянов, В.И. Марголин и др. // Микросистемная техника. – 2004. – № 1. – С. 31-38.
9. **Torkhov, N.A.** Fractal geometry of the surface potential in electrochemically deposited platinum and palladium films / N.A. Torkhov, V.A. Novikov // Semiconductors. – 2009. – V. 43. – I. 8. – P. 1071-1077. DOI: 10.1134/S106378260908020X.
10. **Gómez-Rodríguez, J.M.** Fractal surfaces of gold and platinum electrodeposits: dimensionality determination by scanning tunneling microscopy / J.M. Gómez-Rodríguez, A.M. Baró, L. Vázquez et al. // The Journal of Physical Chemistry. – 1992. – V. 96. – I. 1. – P. 347-350. DOI: 10.1021/j100180a064.
11. **Иванов, Д.В.** Получение наноразмерных пленок платины, обладающих фрактальными свойствами / Д.В. Иванов, А.С. Антонов, Е.М. Семенова, А.И. Иванова, С.А. Третьяков, Н.Ю. Сдобняков // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2020. – Вып. 12. – С. 73-88. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.073.
12. DigitalSurf. – Режим доступа: [www.url: https://www.digitalsurf.com](http://www.digitalsurf.com). – 15.08.2021.
13. Image Analysis P9. Руководство пользователя. – М.: НТ-МДТ СИ, 2019. – 582 с.
14. Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM, ...) data analysis software. – Режим доступа: [www.url: http://gwyddion.net](http://gwyddion.net). – 15.09.2021.
15. **Белко, А.В.** Фрактальная структура кластеров золота, образованных при осаждении в вакууме на диэлектрические подложки / А.В. Белко, А.В. Никитин, Н.Д. Стрекаль, А.Е. Герман // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2009. – № 5. – С. 11-15.
16. **Сдобняков, Н.Ю.** Определение фрактальной размерности островковых плёнок золота на слюде / Н.Ю. Сдобняков, Т.Ю. Зыков, А.Н. Базулев, А.С. Антонов // Вестник ТвГУ, серия «Физика». – 2009. – Вып. 6. – С. 112-119.
17. **Трусов, Л.И.** Островковые металлические пленки / Л.И. Трусов, В.А. Холмянский. – М.: Металлургия, 1973. – 320 с.

18. Бембель, А.Г. Смачивание в твердом состоянии и динамика нанорельефа твердой поверхности / А.Г. Бембель, И.В. Талызин, В.М. Самсонов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2018. – Вып. 10. – С. 83-92. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.083.

References:

1. Sdobnyakov N.Yu., Antonov A.S., Ivanov D.V. *Morfologicheskie kharakteristiki i fraktal'nyj analiz metallicheskih plenok na dielektricheskikh poverkhnostyakh: monografiya* [Morphological characteristics and fractal analysis of metal films on dielectric substrates: monography]. Tver: Tver State University Publ., 2019, 168 p. (In Russian).
2. Antonov A.S., Sdobnyakov N.Yu., Ivanov D.V. et al. Issledovanie fraktal'nykh svoystv nanorazmernykh plenok zolota, serebra i medi: atomno-silovaya i tunnel'naya mikroskopiya [Investigation of fractal properties of nanosized gold, silver and copper films: atomic force and tunnelling microscopy], *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2017, vol. 19, no. 3, pp. 473-486. (In Russian).
3. Slătineanu L., Dodun O., Coteață M., Beșliu I. Nanoreliefs obtained by various machining methods, *Nanostructures and thin films for multifunctional applications*. Cham, Springer International Publishing Switzerland, 2016, chapter 14, pp. 447-472. DOI: 10.1007/978-3-319-30198-3_14.
4. Ivanov G.S., Brylkin Yu.V. Fraktal'naya geometricheskaya model' mikropoverkhnosti [Fractal geometric microsurface model], *Geometriya i grafika* [Geometry & Graphics], 2016, vol. 4, no. 1, pp. 4-11. DOI: 10.12737/18053. (In Russian).
5. Brylkin Yu.V., Kusov A.L., Florov A.V. Testirovanie algoritma modelirovaniya rel'efa sherokhovatoj poverkhnosti na osnove teorii fraktalov [Testing a rough surface relief modeling algorithm based on fractal theory], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Kabardino-Balkarian State University], 2014, vol. IV, no. 5, pp. 86-89. (In Russian).
6. Serov I.N., Bel'skaya G.N., Margolin V.I. et al. Primenenie metoda magnetronnogo raspyleniya dlya polucheniya strukturirovannykh tonkikh plenok [The application of magnetron sputtering technique for production thin films with ordered structure], *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics], 2003, vol. 67, issue 4, pp. 575-578. (In Russian).
7. Serov I.N., Zhabrev V.A., Margolin V.I. Investigation into the influence of fractal-matrix structurizers on the formation and growth of nanostructures, *Glass Physics and Chemistry*, 2004, vol. 30, issue. 1, pp. 32-50. DOI: 10.1023/B:GPAC.0000016396.36549.ad.
8. Serov I.N., Luk'yanov G.N., Margolin V.I. et al. Poluchenie i issledovanie nanorazmernykh plenok medi s fraktal'noi strukturoi [Preparation and study of nanoscale films of copper with a fractal structure], *Mikrosistemnaya tekhnika* [Microsystem technology], 2004, no. 1, pp. 31-38. (In Russian).
9. Torkhov N.A., Novikov V.A. Fractal geometry of the surface potential in electrochemically deposited platinum and palladium films, *Semiconductors*, 2009, vol. 43, issue 8, pp. 1071-1077. DOI: 10.1134/S106378260908020X.
10. Gómez-Rodríguez J.M., Baró A.M., Vázquez L. et al. Fractal surfaces of gold and platinum electrodeposits: dimensionality determination by scanning tunneling microscopy, *The Journal of Physical Chemistry*, 1992, vol. 96, issue 1, pp. 347-350. DOI: 10.1021/j100180a064.
11. Ivanov D.V., Antonov A.S., Semenova E.M. et al. Poluchenie nanorazmernykh plenok platiny, obladayushchikh fraktal'nymi svoystvami [Obtaining nanosized platinum films with fractal properties], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials], 2020, issue 12, pp. 73-88. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.073. (In Russian).
12. DigitalSurf. Available at: [www.url: https://www.digitalsurf.com](https://www.digitalsurf.com) (accessed 15.08.2021).
13. *Image Analysis P9. Rukovodstvo pol'zovatelya* [Image Analysis P9. User guide]. Moscow: NT-MDT SI Publ., 2019, 582 p. (In Russian).
14. Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM, ...) data analysis software. Available at: [www.url: http://gwyddion.net](http://gwyddion.net) (accessed 15.09.2021).
15. Belko A.V., Nikitin A.V., Strekal' N.D., German A.E. Fractal structure of gold clusters formed under vacuum deposition on dielectric substrates, *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2009, vol. 3, issue 3, pp. 338-342. DOI: 10.1134/S1027451009030021.
16. Sdobnyakov N.Yu., Zykov T.Yu., Bazulev A.N., Antonov A.S. Opredelenie fraktal'noi razmernosti ostrovkovykh plenok zolota na slyude [Determination of the fractal dimension of island films of gold on mica], *Vestnik TvGU, seriya «Fizika»* [Herald of Tver State University, series «Physics»], 2009, issue 6, pp. 112-119. (In Russian).
17. Trusov L.I., Kholmyanskij V.A. *Ostrovkovye metallicheskie plenki* [Island metal films]. Moscow:

Metallurgiya Publ., 1973, 320 p. (In Russian).

18. Bembel A.G., Talyzin I.V., Samsonov V.M. Смачивание в твердом состоянии и динамика нанорельефа твердой поверхности [Solid state wetting and dynamics of solid surface nanorelief], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2018, issue 10, pp. 83-92. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.083. (In Russian).

Original paper

**DIFFERENT SCHEMES FOR OBTAINING FRACTAL RELIEF OF NANOSIZED
PLATINUM FILMS**

D.V. Ivanov¹, A.S. Antonov^{1,2}, E.M. Semenova¹, A.I. Ivanova¹, V.A. Anofriev¹, N.Yu. Sdobnyakov¹

¹Tver State University, Tver, Russia

²Tver State Agricultural Academy, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.156

Abstract: The morphology of the relief of nanosized platinum films on the mica surface is investigated using the scanning probe (in the atomic force mode) and tunneling microscopy. Platinum films were investigated immediately after their preparation in a magnetron sputtering facility, as well as after annealing in a muffle furnace in an air atmosphere. Annealing made it possible to establish the possible ranges of variation of the fractal dimension and the altitude parameters corresponding to degradation of the nanorelief. The values of the fractal dimension were obtained for films of different thicknesses using two alternative methods of investigation at different initial scales of samples: based on the data of an atomic force microscope – $\bar{D}_c = 2,17 \div 2,38$ and a scanning tunneling microscope – $\bar{D}_c = 2,28 \div 2,50$ depending on the sequence of deposition of layers and annealing of films. For comparison, experimental data of other authors are presented. The choice of the sequence of operations for magnetron sputtering and annealing, and external conditions makes it possible to formulate recommendations for development of the technology for «growing» structures with a given surface morphology.

Keywords: scanning probe microscopy, atomic force microscope mode, scanning tunneling microscopy, magnetron sputtering, annealing, nanorelief, roughness parameters, fractal dimension, platinum films.

Иванов Дмитрий Викторович – аспирант 4 года обучения кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Антонов Александр Сергеевич – к.ф.-м.н., научный сотрудник кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»; старший преподаватель ФГБОУ ВО «Тверская государственная сельскохозяйственная академия»

Семенова Елена Михайловна – к.ф.-м.н., доцент кафедры физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Иванова Александра Ивановна – к.ф.-м.н., доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Анофриев Виталий Александрович – студент 1 курса магистратуры кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Сдобняков Николай Юрьевич – к.ф.-м.н., доцент кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Dmitry V. Ivanov – 4th year postgraduate student, General Physics Department, Tver State University

Alexander S. Antonov – Ph. D., Researcher, General Physics Department, Tver State University, Senior Lecturer, Tver State Agricultural Academy

Elena M. Semenova – Ph. D., Docent, Condensed Matter Physics Department, Tver State University

Alexandra I. Ivanova – Ph. D., Docent, Applied Physics Department, Tver State University

Vitalii A. Anofriev – 1st year graduate student, General Physics Department, Tver State University

Nickolay Yu. Sdobnyakov – Ph. D., Docent, General Physics Department, Tver State University

Поступила в редакцию/received: 11.10.2021; после рецензирования/revised: 01.11.2021; принята/accepted 10.11.2021.