

УДК 539.216.2 : 621.385.833

О «ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ» СВОЙСТВАХ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК НИКЕЛЯ И МЕДИ

Д.В. Иванов¹, А.С. Антонов¹, Н.Ю. Сдобняков¹, А.Н. Шиманская², Е.В. Романовская²,
М.С. Афанасьев^{3,4}

¹ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
170102, Тверь, Садовый пер., 35

²УО «Белорусский государственный технологический университет»
220006, Республика Беларусь Минск, ул. Свердлова, 13а

³ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет»
119454, Москва, пр. Вернадского, 78

⁴Фрязинский филиал ФГБУН «Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова Российской академии наук»
141190, г. Фрязино Московской области, пл. Введенского, 1
nsdobnyakov@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.291

Аннотация: На примере исследования морфологии рельефа наноразмерных пленок никеля и меди на поверхности слюды с помощью сканирующего туннельного микроскопа показана возможность создания технологии «выращивания» структур с заданной морфологией поверхности. Описаны характерные особенности нанорельефа поверхности пленки, включая фрактальные свойства. Получены вольт-амперные характеристики контакта металл-металл для пленок никеля и меди с острием из вольфрама. Показано, что для участков поверхности, содержащих фрактальные структуры, вольт-амперные характеристики могут отличаться от зависимостей, получаемых на обычных поверхностях.

Ключевые слова: сканирующая туннельная микроскопия, нанорельеф, фрактальная размерность, наноразмерные пленки никеля и меди, вольт-амперная характеристика, туннельный контакт.

1. Введение

Представленная работа является логическим продолжением исследований морфологических характеристик наноразмерных пленок на поверхности слюды методом сканирующей туннельной микроскопии [1]. Ранее экспериментально установлено [2], что пленки меди на диэлектрических подложках, как и пленки золота и серебра, могут образовывать фрактальные структуры. Однако, до сих пор остается не вполне ясным какие факторы, влияющие на формирование фрактальных структур в наноразмерных пленках, являются определяющими, можно ли получать фрактальные структуры на больших масштабах (для наноразмерных пленок серебра и золота это более характерно, чем, например, для пленок меди), а также не выработаны исчерпывающие рекомендации по созданию технологии «выращивания» структур с заданной морфологией поверхности. С целью дальнейшего развития результатов, в том числе опубликованных в [3], получения и накопления статистических данных для различных металлов по морфологическим

характеристикам получаемых покрытий и отдельных агломератов на поверхности этих пленок различными методами, в том числе с помощью оценки фрактальной размерности, нами были выбраны наноразмерные пленки никеля и меди. Авторами [4, 5] предлагается считать, что параметр фрактальной размерности может и должен использоваться в качестве эффективной характеристики развитости микро- и наноструктуры шероховатой поверхности, а величина фрактальной размерности эквивалентно заменяет целый комплекс амплитудных и шаговых характеристик шероховатости поверхности. На наш взгляд, данное утверждение может быть принято лишь отчасти, поскольку в ряде технологических процессов наряду со значением фрактальной размерности, может требоваться контроль определенных высотных параметров и наоборот [6-8]. Бесспорным является тот факт, что в настоящее время уже активно развиваются технологии искусственного создания деталей рельефа, что позволит обеспечить воспроизводимость условий для формирования наноразмерных металлических пленок с фрактальной структурой на твердых поверхностях.

2. Методика эксперимента и описание результатов

В нашей работе исследования проводились на нанотехнологическом комплексе «УМКА-02G». Пленки из никеля и меди формировались на подложке из слюды методом электронно-лучевого напыления на установке A700QE/DI12000. Величина вакуума в процессе напыления составляла 10^{-6} мбар. Скорость напыления $2,0 \pm 0,2$ Å/с. Размер подложки 50×40 мм². Толщина получаемых пленок 65 нм с погрешностью ± 2 нм. Температура подложки в процессе напыления 70 °С. В камере установлены шесть ИК-нагревателей, которые перед началом напыления нагревают подложки для улучшения адгезионных свойств поверхности. Также в камере установлен кварцевый осциллятор, который в режиме реального времени контролирует скорость напыления с ангстремной точностью. Отметим, что в наших работах [1-3] пленки изготавливались методом термовакуумного напыления. На рис. 1-2 представлен результат сканирования, в режиме постоянной высоты, поверхности пленок никеля и меди в различных масштабах и 3D изображение. Анализируя 3D изображение пленок никеля и меди, можно увидеть достаточно крупные агломераты, распределенные по поверхности и в достаточной степени равномерно. Очевидно, что именно такие агломераты могут быть центрами зарождения фрактальных структур [9]. В целом поверхность достаточно однородна (см. рис. 1 г и 2 г) с отдельными зернами, представленными агломератами никеля и меди, сформированными в процессе конденсации атомов и последующей коалесценции.

**Физико-химические аспекты изучения кластеров,
наноструктур и наноматериалов**

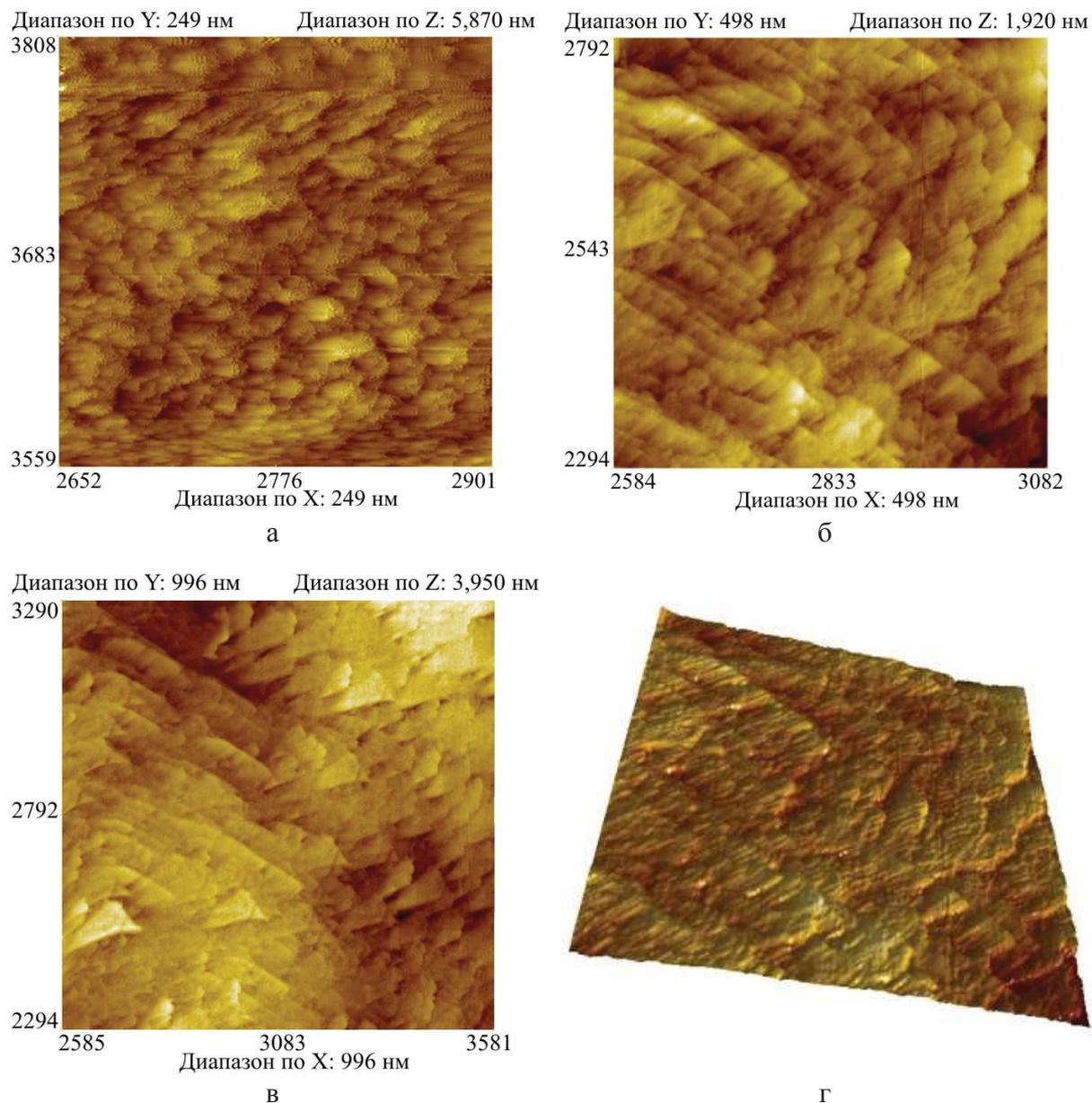


Рис. 1. Изображения поверхности в разных масштабах и 3D изображение нанопокрывтия пленки меди на слюде, полученное с помощью туннельного микроскопа: а – размер области сканирования 249×249 нм², б – 498×498 нм², в – 996×996 нм², г – 498×498 нм².

Проанализировав шероховатость поверхности с использованием программного продукта Scanning Probe Image Processor (SPIP) [10] нами были определены морфологические характеристики поверхности образца, а именно высотные параметры: среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины

$$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} |z(x_k, y_l)|, \quad \text{среднеквадратичное} \quad \text{отклонение}$$

$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} [z(x_k, y_l)]^2}$, сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины $S_{10z} = \left(\sum_{i=1}^5 |z_{\max i}| + \sum_{i=1}^5 |z_{\min i}| \right) / 5$, поскольку именно они, в большей степени, имеют значение для изучения фрактальных свойств профиля и поверхности [1-3].

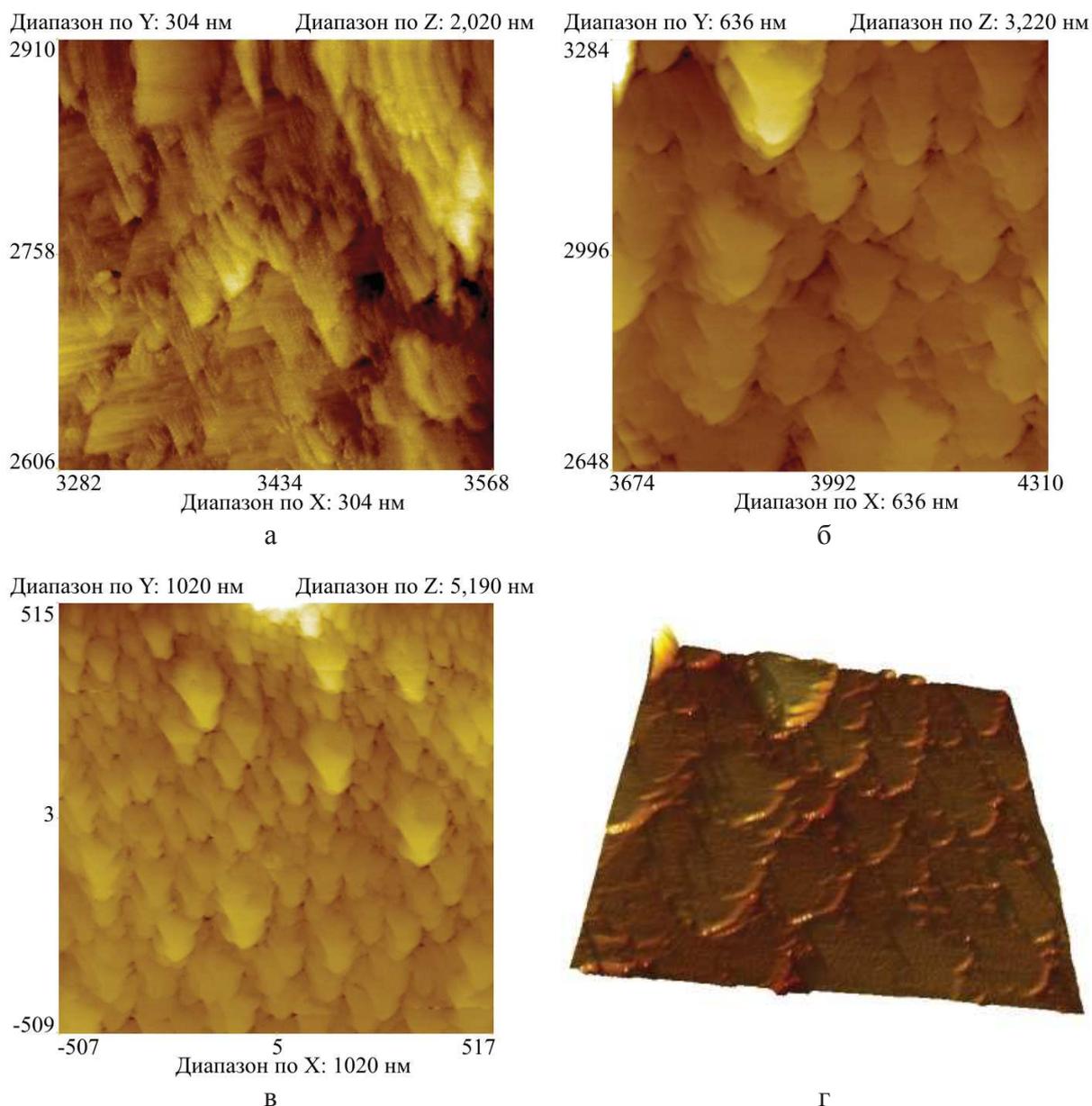


Рис. 2. Изображения поверхности в разных масштабах и 3D изображение нанопокрyтия пленки никеля на слюде, полученное с помощью туннельного микроскопа: а – размер области сканирования 304×304 нм², б – 636×636 нм², в – 1020×1020 нм², г – 636×636 нм².

Кроме того, с использованием SPIP [10], определено среднее

значение фрактальной размерности для пленок никеля и меди на поверхности слюды в различных масштабах (см. данные Таблицы 1) и построена диаграмма углового распределения фрактальной размерности, полученная на основе анализа амплитудного спектра Фурье (см. рис. 3-4).

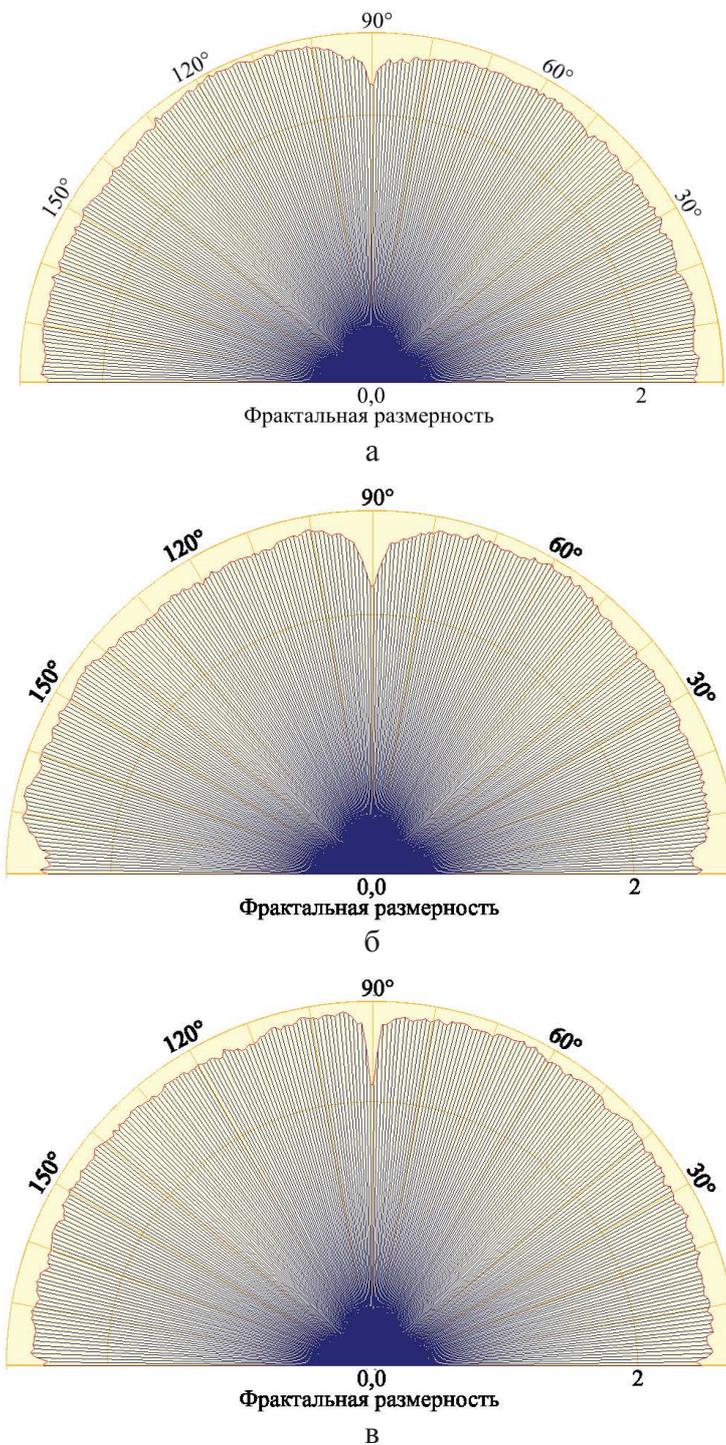


Рис. 3. Угловое распределение фрактальной размерности нанопокрyтия меди на слюде на разных масштабах: а – размер области сканирования $249 \times 249 \text{ нм}^2$, б – $498 \times 498 \text{ нм}^2$, в – $996 \times 996 \text{ нм}^2$.

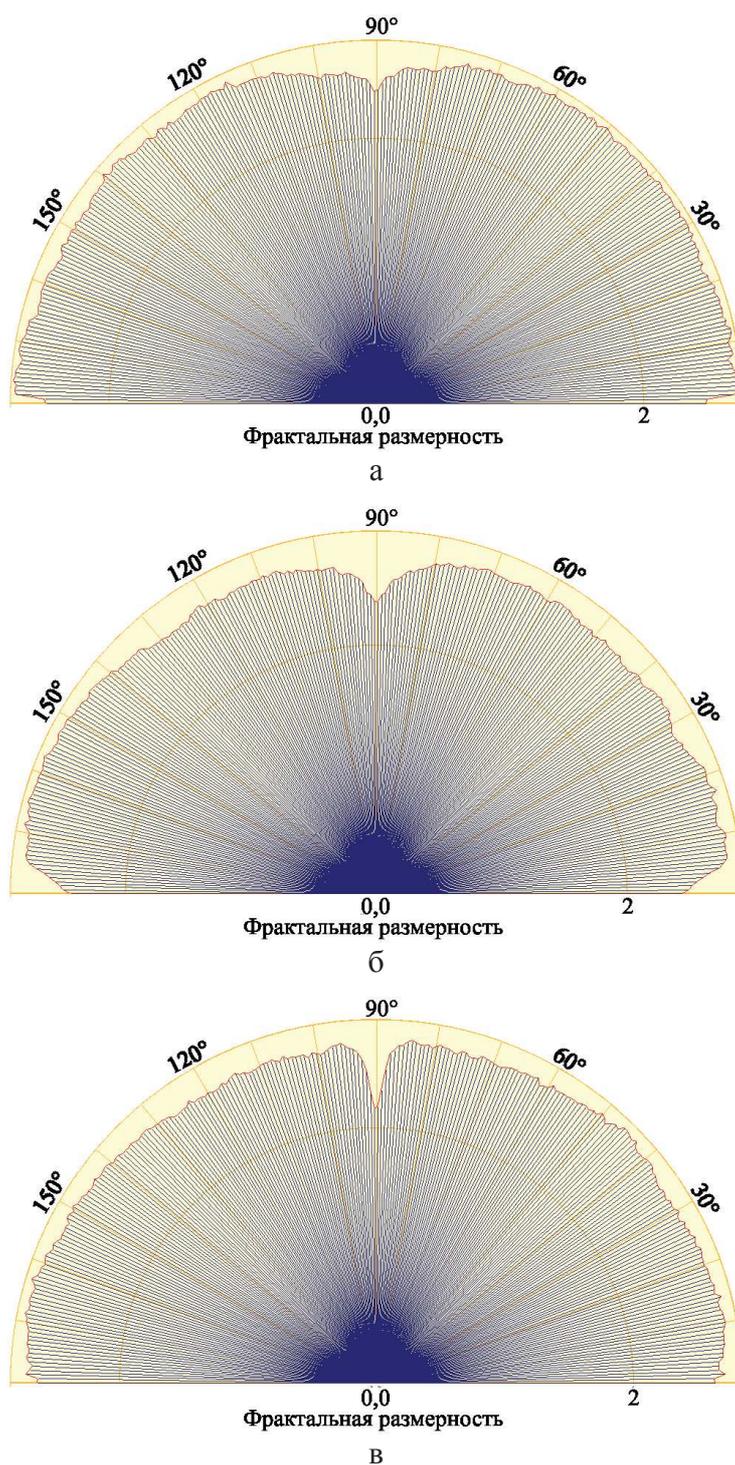


Рис. 3. Угловое распределение фрактальной размерности нанопокрyтия никеля на слюде на разных масштабах: а – размер области сканирования $304 \times 304 \text{ нм}^2$, б – $636 \times 636 \text{ нм}^2$, в – $1020 \times 1020 \text{ нм}^2$.

Для различных направлений извлекается профиль спектра Фурье и рассчитываются логарифмы для частоты появления и амплитуды координат. Фрактальная размерность может быть также определена из

анализа $2D$ спектра Фурье при условии построения соответствующих зависимостей в двойном логарифмическом масштабе. Если поверхность является фрактальной, то график зависимости в двойном логарифмическом масштабе должен быть линейным с отрицательным наклоном.

Таблица 1. Диапазон изменения морфологических характеристик пленок никеля и меди на слюде на исследованных масштабах

Граница диапазона	медь				никель			
	S_a , нм	S_q , нм	S_{10z} , нм	\bar{D}_c	S_a , нм	S_q , нм	S_{10z} , нм	\bar{D}_c
минимальное значение	0,271	0,347	3,19	2,48	0,104	0,159	1,47	2,63
максимальное значение	0,381	0,475	3,42	2,61	0,269	0,374	0,38	2,71

Именно 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 [11]

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

определяющей кластерную размерность D_c . Здесь ρ^* – безразмерный параметр, играющий роль приведенной плотности и называемый лакунарностью (или префактор) [12].

Анализ данных, представленных в Таблице 1, показывает, что наноразмерные пленки никеля образуют на поверхности слюды достаточно гладкое покрытие типа «плато», по сравнению с наноразмерными пленками меди. Аналогичный эффект наблюдался нами, в частности, в [2, 13] для наноразмерных пленок золота и серебра соответственно. Кроме того, очевиден факт, что для наноразмерных пленок никеля среднее значение фрактальной размерности (по всей поверхности исследуемого образца) практически не зависит от масштаба сканирования (фотографии представлены на рис. 2), т.е. фрактальные структуры образуются на всей поверхности образца, в то время как разброс среднего значения фрактальной размерности для наноразмерных пленок меди можно интерпретировать, и это было нами установлено, в том числе посредством методики вложенных квадратов [14, 15], наличием локальных областей, в которых формирование «фрактального рельефа» не произошло. Данный факт был нами впервые обнаружен в работе [3] и, по нашему

мнению, является специфической особенностью получаемых наноразмерных пленок меди на поверхности слюды.

Интересным является не только получение покрытий с фрактальными структурами, но и соответствие определенных физических свойств у покрытий определенным значениям средней фрактальной размерности. В данной работе также нами были исследованы участки поверхности, содержащие фрактальные структуры, и получены вольт-амперные характеристики (ВАХ) для системы зонд (вольфрам) – образец (пленки никеля или меди). На рис. 5 соответствующие зависимости приведены. ВАХ туннельного контакта имеют форму близкую к S -образной, характерную для туннельного контакта чистых металлов. Анализ рис. 5 говорит о том, что получаемые ВАХ для «фрактальных» рельефов могут отличаться от зависимостей, получаемых на обычных поверхностях. Форма ВАХ и получаемые значения туннельного тока могут зависеть от участка поверхности, на котором проводится измерение: для межзеренных границ (это могут быть именно границы областей, в которых образуются фрактальные структуры) в [16] фиксировались более высокие значения туннельного тока по сравнению со свободной поверхностью агломератов. На рис. 5 указаны соответствующие масштабы сканирования и им соответствуют определенные значения средней фрактальной размерности (см. Таблицу 1).

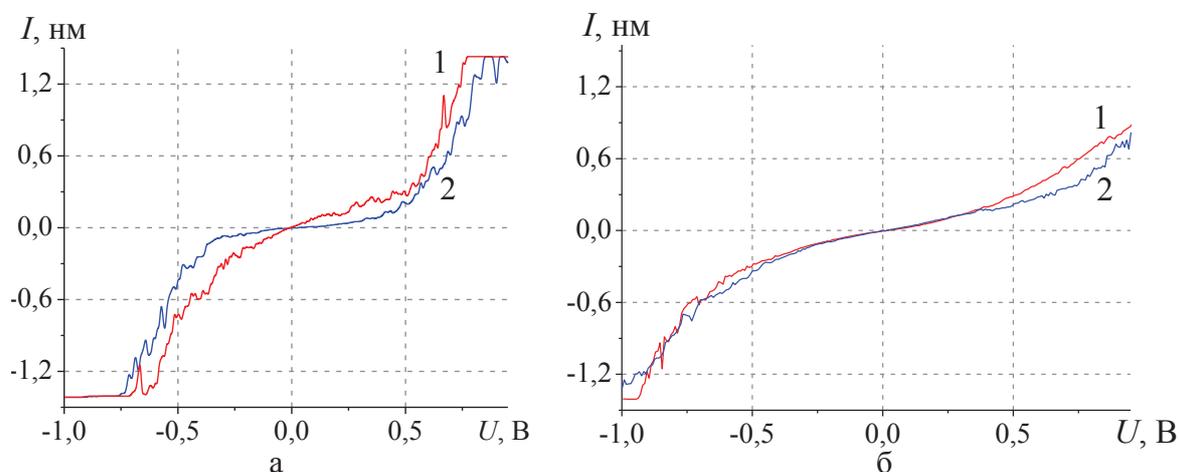


Рис. 5. Усредненные кривые серии измерений ВАХ зонд (вольфрам) – образец: а – пленка меди (цифры указывают масштаб сканирования: 1 – $498 \times 498 \text{ нм}^2$, 2 – $996 \times 996 \text{ нм}^2$), б – пленка никеля (цифры указывают масштаб сканирования: 1 – $636 \times 636 \text{ нм}^2$, 2 – $1020 \times 1020 \text{ нм}^2$).

3. Заключение

В [3, 13, 17] нами исследовались пленки золота, серебра и меди на поверхности слюды, полученные методом термовакuumного напыления, с использованием двух альтернативных методов: сканирующей туннельной

микроскопии (СТМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ). При вышеназванном методе подготовки наноразмерных пленок были установлены значения фрактальной размерности для поверхности образцов: золото на слюде (СТМ – $D_f = 2,08 \pm 0,05$, АСМ: – $D_f = 2,11 \pm 0,05$), серебро на слюде (СТМ – $D_f = 2,13 \pm 0,03$, АСМ – $D_f = 2,08 \pm 0,04$), медь на слюде (СТМ – $D_f = 2,15 \pm 0,05$), то есть в этом случае можно говорить о слабо развитом фрактальном рельефе. Отметим, что фрактальная размерность поверхности D_f , найденная с помощью метода вложенных квадратов [14, 15], соответствует кластерной размерности трехмерных агрегатов.

При подготовке образцов методом электронно-лучевого напыления как для наноразмерных пленок никеля, так и для пленок меди, проведенные исследования свидетельствуют о формировании достаточно развитого фрактального рельефа. В данной работе рассмотрены результаты для достаточно «тонких» пленок, по сравнению с образцами, исследованными в работах [3, 13, 17]. Подобные закономерности фиксировались нами также для пленок толщиной 25 нм (с погрешностью ± 2 нм). При этом возникает вопрос, который подробно обсуждался в [2], насколько велико влияние подложки и как его учитывать? Для исследования морфологических и фрактальных характеристик металлических пленок в качестве подложек необходимо использовать ювенильную поверхность слюды или высокого качества шлифованное стекло. Ювенильная поверхность слюды создает одинаковые условия для всей поверхности наноразмерной металлической пленки в части появления активных центров формирования фрактальных структур. Вместе с тем, не вызывает сомнений, что механизм образования фрактальных структур, в том числе механизм ассоциации, будет существенно зависеть от состояния поверхности диэлектрической подложки (шероховатости поверхности, наличия дефектов), а также температуры подложки или скорости ее изменения.

Кроме того, процесс образования фрактальных структур может зависеть от типа исследуемых пленок – аморфных или кристаллических, в нашем случае это аморфные пленки.

Таким образом, комбинируя методики подготовки наноразмерных пленок, внешние факторы (температура подложки, внешнее давление, наличие последующей химической обработки и т.д.) можно создать технологию «выращивания» структур с заданной морфологией поверхности, а также структур, обладающих определенными физическими свойствами, в частности проводимостью. Важной особенностью является факт воспроизводимости результатов в зафиксированных условиях (метод

подготовки пленки, внешние факторы, выбранный металл) и наличие специфических особенностей при описании фрактальных свойств наноразмерных пленок (тип рельефа, например, тип «плато» или площадь локальных зон, в которых не сформировался «фрактальный рельеф»).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 17-53-04010, № 18-38-00571 мол_а, № 18-29-11029, №16-07-00665) и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № X17PM-032).

Библиографический список:

1. **Антонов, А.С.** Исследование морфологии рельефа пленок меди на поверхности слюды / А.С. Антонов, Н.Ю. Сдобняков, Д.В. Иванов, К.Б. Подболотов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2017. – Вып. 9. – С. 19-26.
2. **Антонов, А.С.** Морфологические характеристики и фрактальный анализ металлических пленок на диэлектрических поверхностях: дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07: защищена 23.03.2018; утв. 13.08.2018 / Антонов Александр Сергеевич. – Тверь: Тверской государственный университет, 2018. – 198 с.
3. **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.
4. **Брылкин, Ю.В.** Фрактальная геометрическая модель микроповерхности / Г.С. Иванов, Ю.В. Брылкин // Геометрия и графика. – 2016. – Т. 4. – № 1. – С. 4-11.
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. **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.
10. 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.
11. **Федер, Е.** Фракталы / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 260 с.
12. **Ролдугин, В.И.** Фрактальные структуры дисперсных систем / В.И. Ролдугин // Успехи химии. – 2003. – Т. 72. – Вып. 10. – С. 931-959.

13. **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.
14. **Ролдугин, В.И.** Свойства фрактальных дисперсных систем / В.И. Ролдугин // Успехи химии. – 2003. – Т. 72. – Вып. 11. – С. 1027-1054.
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. **Дохликова, Н.В.** Определение морфологии и локальной электронной структуры оксидного слоя титанового покрытия на поверхности высокоориентированного пироэлектрического графита методами АСМ и СТМ/СТС / Н.В. Дохликова, С.Ю. Сарвадий, В.А. Харитонов, А.А. Кирсанкин // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: Минск, 16-19 октября 2018: сборник докладов. – Минск: Беларуская навука, 2018. – С. 141-146.
17. **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.

References:

1. **Antonov, A.S.** Issledovanie morfologii rel'efa plenok medi na poverhnosti slyudy / A.S. Antonov, N.Yu. Sdobnyakov, D.V. Ivanov, K.B. Podbolotov // Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov. – 2017. – I. 9. – P. 19-26.
2. **Antonov, A.S.** Morfologicheskie harakteristiki i fraktal'nyj analiz metallicheskih plenok na dielektricheskikh poverhnostyah: diss. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.07: zashchishchena 23.03.2018; utv. 13.08.2018 / Antonov Aleksandr Sergeevich. – Tver: Tverskoj gosudarstvennyj universitet, 2018. – 198 p.
3. **Antonov, A.S.** Issledovanie fraktal'nyh svojstv nanorazmernyh plenok zolota, serebra i medi: atomno-silovaya i tunnel'naya mikroskopiya / A.S. Antonov, N.YU. Sdobnyakov, D.V. Ivanov i dr. // Himicheskaya fizika i mezoskopiya. – 2017. – V. 19. – no. 3. – P. 473-486.
4. **Brylkin, Yu.V.** Fraktal'naya geometricheskaya model' mikropoverhnosti / G.S. Ivanov, Yu.V. Brylkin // Geometriya i grafika. – 2016. – V. 4. – no. 1. – P. 4-11.
5. **Brylkin, Yu.V.** Testirovanie algoritma modelirovaniya rel'efa sherohovatoj poverhnosti na osnove teorii fraktalov / Yu.V. Brylkin, A.L. Kusov, A.V. Florov // Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2014. – V. IV. – no. 5. – P. 86-89.
6. **Serov, I.N.** Primenenie metoda magnetronnogo raspyleniya dlya polucheniya strukturirovannyh tonkih plenok / I.N. Serov, G.N. Bel'skaya, V.I. Margolin i dr. // Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya. – 2003. – V. 67. – no. 4. – P. 575-578.
7. **Serov, I.N.** Issledovanie vozdejstviya fraktal'no- matrichnyh strukturizatorov na processy obrazovaniya i rosta nanorazmernyh struktur / I.N. Serov, V.A. ZHabrev, V.I. Margolin // Fizika i himiya stekla. – 2004. – V. 30. – no. 1. – P. 45-71.
8. **Serov, I.N.** Poluchenie i issledovanie nanorazmernyh plenok medi s fraktal'noj strukturoj / I.N. Serov, G.N. Luk'yanov, V.I. Margolin i dr. // Mikrosistemnaya tekhnika. – 2004. – no. 1. – P. 31-38.

9. **Samsonov, V.M.** O fraktal'nyh svojstvah agregatov metallicheskih nanoklasterov na tverdoj poverhnosti / V.M. Samsonov, Yu.V. Kuznecova, E.V. D'yakova // ZHurnal tekhnicheskoy fiziki. – 2016. – V. 86. – I. 2. – P. 71-77.
10. 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.
11. **Feder, E.** Fraktaly / E. Feder. – M.: Mir, 1991. – 260 p.
12. **Roldugin, V.I.** Fraktal'nye struktury dispersnyh sistem / V.I. Roldugin // Uspekhi himii. – 2003. – V. 72. – I. 10. – P. 931-959.
13. **Antonov, A.S.** Kompleksnoe issledovanie morfologii rel'efa i ehlektricheskikh harakteristik plenok zolota i serebra metodom skaniruyushchej tunnel'noj mikroskopii / A.S. Antonov, D.V. Ivanov, N.Yu. Sdobnyakov, V.V. Kulagin // Monitoring. Nauka i tekhnologii. – 2016. – no. 3 (28). – P. 50-54.
14. **Roldugin, V.I.** Svojstva fraktal'nyh dispersnyh sistem / V.I. Roldugin // Uspekhi himii. – 2003. – V. 72. – I. 11. – P. 1027-1054.
15. **Belko, A.V.** Fraktal'naya struktura klasterov zolota, obrazovannyh pri osazhdenii v vakuume na dielektricheskie podlozhki / A.V. Belko, A.V. Nikitin, N.D. Strelak, A.E. German // Poverhnost'. Rentgenovskie, sinhrotronnye i nejtronnye issledovaniya. – 2009. – no. 5. – P. 11-15.
16. **Dohlikova, N.V.** Opredelenie morfologii i lokal'noj ehlektronnoj struktury oksidnogo sloya titanovogo pokrytiya na poverhnosti vysokoorientirovannogo piroehlektricheskogo grafita metodami ASM i STM/STS / N.V. Dohlikova, S.Yu. Sarvadij, V.A. Haritonov, A.A. Kirsankin // Metodologicheskie aspekty skaniruyushchej zondovoj mikroskopii: Minsk, 16-19 oktyabrya 2018: sbornik dokladov. – Minsk: Belaruskaya navuka, 2018. – P. 141-146.
17. **Zykov, T.Yu.** Issledovanie morfologii rel'efa poverhnosti zolota na slyude metodom skaniruyushchej tunnel'noj mikroskopii / T.Yu. Zykov, N.Yu. Sdobnyakov, V.M. Samsonov, A.N. Bazulev, A.S. Antonov // Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granicy. – 2009. – V. 11. – no. 4. – P. 309-313.

ABOUT «TECHNOLOGICAL» PROPERTIES OF NANO-SIZED NICKEL AND COPPER FILMS

D.V. Ivanov¹, A.S. Antonov¹, N.Yu. Sdobnyakov¹, H.N. Shimanskaya², E.V. Romanovskaia²,
M.S. Afanasiev^{3,4}

¹*Tver State University*

²*Belarusian State Technological University*

³*MIREA - Russian Technological University*

⁴*Fryazino Branch of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of
Russian Academy of Sciences*

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.291

Abstract: As an example of studying morphology of the relief of nickel and copper nano-sized films on the mica surface, it is possible to create a technology to «grow» structures with a given surface morphology using a scanning tunneling microscope. The characteristic features of the film surface nanorelief are described, including fractal properties. The current-voltage characteristics of a metal-to-metal contact for nickel and copper films with a tungsten tip are obtained. It is shown that for surface areas containing fractal structures, the current-voltage characteristics may differ from the dependences obtained on ordinary surfaces.

Keywords: scanning tunneling microscopy, nanorelief, fractal dimension, nanoscale films of nickel and copper, current-voltage characteristic, tunnel contact.

**Физико-химические аспекты изучения кластеров,
наноструктур и наноматериалов**

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

Антонов Александр Сергеевич – к.ф.-м.н., научный сотрудник ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

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

Шиманская Анна Николаевна – к.т.н., ассистент, научный сотрудник кафедры технологии стекла и керамики, УО «Белорусский государственный технологический университет»

Романовская Елена Владимировна – к.х.н., ассистент кафедры химии, технологии электрохимических производств и материалов электронной техники, УО «Белорусский государственный технологический университет»

Афанасьев Михаил Сергеевич – д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник, ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет», Фрязинский филиал ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук»

Dmitry V. Ivanov – postgraduate student of the General Physics Department, Tver State University

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

Alexander S. Antonov – Ph. D., Researcher, Tver State University

Hanna N. Shymanskaya – Ph. D., Assistant Lecturer, Researcher of the Department of Glass and Ceramics Technology, Belarusian State Technological University

Elena V. Romanovskaia – Ph. D., Assistant of the Department of Chemistry, Technology of Electrochemical Production and Electronic Engineering Materials, Belarusian State Technological University

Mikhail S. Afanas'ev – Dr. Sc., Docent, Leading Researcher, MIREA - Russian Technological University, Fryazino Branch of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences