

ФРАКТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК НИКЕЛЯ И ХРОМА

Д.В. Иванов¹, А.С. Антонов^{1,2}, Н.Ю. Сдобняков¹, Е.М. Семенова¹, В.Л. Скопич¹,
Е.В. Романовская³, М.С. Афанасьев^{4,5}

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

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

³УО «Белорусский государственный технологический университет»
220006, Республика Беларусь, Минск, ул. Свердлова, 13а

⁴ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет»
119454, Россия, Москва, пр. Вернадского, 78

⁵Фрязинский филиал ФГБУН «Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова Российской академии наук»
141190, Россия, Московская область, Фрязино, пл. Введенского, 1
nsdobnyakov@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascn/2019.11.138

Аннотация: Проведено исследование морфологии рельефа наноразмерных пленок никеля и хрома на поверхности слюды с помощью сканирующего зондового микроскопа. Описаны характерные особенности нанорельефа поверхности исследуемых пленок, включая фрактальные свойства. Полученные данные по фрактальной размерности сравниваются с имеющимися экспериментальными данными, а также данными полученными с использованием сканирующей туннельной микроскопии. Предложены рекомендации по развитию технологии «выращивания» структур с заданной морфологией поверхности.

Ключевые слова: сканирующая зондовая микроскопия, нанорельеф, фрактальная размерность, наноразмерные пленки никеля и хрома.

1. Введение

Применение методов сканирующей зондовой микроскопии к исследованию морфологических характеристик наноразмерных пленок на диэлектрических поверхностях является актуальной задачей для интенсивного развития физики поверхностных явлений наnanoуровне [1]. В частности, для зондовой микроскопии в настоящее время актуальны проблемы анализа и выделения границ объектов и проблемы развития и апробации методик расчета структурных характеристик нанопокрытий – наноразмерных (по толщине) пленок. В наших предыдущих работах экспериментально было установлено [2-6], что пленки золота, серебра, никеля и меди на диэлектрических подложках могут образовывать фрактальные структуры. Однако, для наноразмерных пленок хрома, полученных методом термовакуумного напыления, не удавалось получить фрактальные структуры на всей площади поверхности пленки [7, 8].

С целью комплексного исследования морфологических характеристик получаемых покрытий и отдельных агломератов на

поверхности, включая фрактальную размерность, нами последовательно применяются различные методики исследования поверхности для получения и накопления статистических данных.

Имеется мнение [9, 10], 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. Однако, как правило, в технологических процессах требуется не только использовать наноразмерные пленки с заданным значением фрактальной размерности, но и производить контроль определенных высотных параметров, а иногда и требуется комплексный учет всех вышеперечисленных параметров [11-13]. Современные технологии искусственного создания деталей рельефа [14-17] уже позволяют обеспечивать воспроизводимость условий для формирования наноразмерных металлических пленок с фрактальной структурой на твердых поверхностях.

2. Методика эксперимента и описание результатов

Исследования топографии поверхности пленок никеля и хрома были выполнены при комнатной температуре на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) SolverNext (ООО «НТ-МДТ СИ») (см. рис. 1 а). В качестве зонда использовался кантileвер серии MFM10 (геометрия которого представлена на рис. 1 б), предназначенный для измерений с высоким пространственным разрешением. Специальное защитное покрытие помогает избежать окисления и значительно увеличивает срок службы. При этом радиус закругления кантileвера остается довольно малым для получения изображений с высоким пространственным разрешением – порядка 20–30 нм. Типичное значение резонансной частоты кантileвера – 150 кГц, типичная силовая константа – 5,1 Н/м. Кантileвер имеет покрытие из алюминия с отражающей стороны для увеличения сигнала лазера. При сканировании в полуконтактном режиме (атомно-силовая микроскопия) нами регистрировался рельеф поверхности.

Пленки из никеля и хрома формировались на подложке из слюды методом электронно-лучевого напыления на установке A700QE/DI12000. Величина вакуума в процессе напыления составляла 10^{-4} Па. Скорость напыления $2,0 \pm 0,2$ Å/с. Размер подложки 50×40 мм². Толщина получаемых пленок: никеля 65 нм с погрешностью ± 2 нм, хрома 90 нм с погрешностью ± 2 нм. Температура подложки в процессе напыления была 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 ранее в наших работах [5-8] пленки изготавливались только методом термовакуумного напыления.

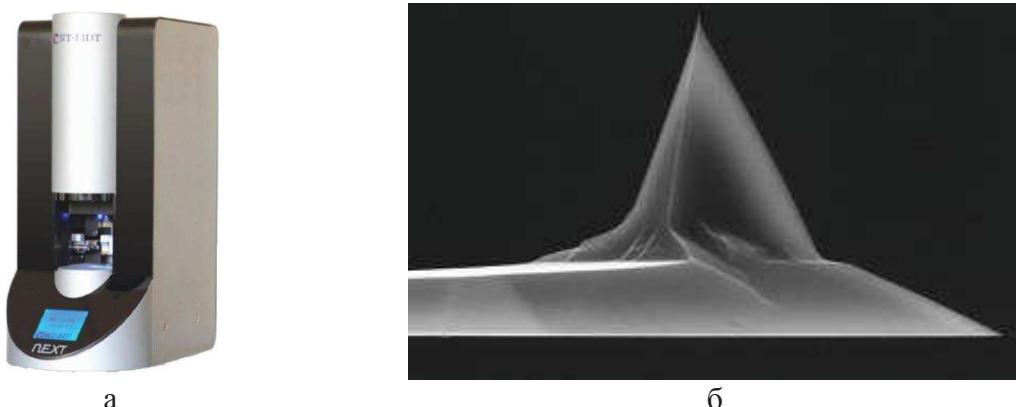


Рис. 1. С3М SolverNext (а) и кантileвер серии MFM10 (б).

Несмотря на тот факт, что к настоящему времени существует достаточно обширный комплекс методик по распознаванию и анализу изображений (как экстенсиональные, так и интенсиональные [18]), и, в частности, одной из интересных методик является классификация С3М-изображений наноструктур с применением нейро-нечетких сетей [19], полученные в данной работе результаты с использованием С3М SolverNext позволяют верифицировать результаты, полученные на С3М «УМКА-02Г» и осуществлять контроль получаемых изображений с целью исключения артефактов, масштабных несоответствий и учета влияния возможного появления оксидных пленок и т.п.

Как правило [1-10, 20] для характеристики основного свойства фрактальных кластерных агрегатов – самоподобия их внутренней структуры, мы вводили 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

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

определяющей кластерную размерность D_c [21]. Здесь ρ^* – безразмерный параметр, играющий роль приведенной плотности и называемый лакунарностью (или префактор) [22, 23]. Использование соотношений (1)-(2) согласно методике, изложенной в [1-8, 20, 24], проводилось смешанным способом (вручную и с привлечением программного продукта

[25]). В данной работе оценка фрактальной размерности и обработка графических материалов производилась в программном комплексе Image Analysis (версия 3.5.30.19856). Предлагаемая методика определения фрактальной размерности изложена в [26]. Приведем лишь кратко отдельные ее положения. Для определения фрактальной размерности используется следующее соотношение

$$D_c = 3 - \alpha, \quad (3)$$

где α – скейлинговый коэффициент, называемый показателем шероховатости (показатель Херста H). Показатель Херста определяется через наклон $\operatorname{tg}\beta$ начального участка корреляционной функции высота-высота для выбранного направления, построенной в логарифмических координатах

$$H = \operatorname{tg}\beta / 2. \quad (4)$$

На наш взгляд методика [26] имеет ряд преимуществ, таких как простота расчета для пользователя и стандартизированная ошибка. Однако, известно [27], что при определении фрактальной размерности посредством математической обработки изображений необходимо учитывать «инструментальную» погрешность двух типов: 1) искажение изображения; 2) собственная ошибка метода определения фрактальной размерности. Первая ошибка связана с искажениями, вносимыми самим прибором, и является устранимой, а также с процедурой оцифровки изображения – «пиксельный эффект». Используемый нами ранее метод определения фрактальной размерности [1-8] связан в первую очередь с определением принадлежности того или иного кластера к выбранному участку «сетки» измерений. По нашему мнению, такой способ обеспечивает уменьшение ошибки измерений, т.к. в этом случае экспериментатор единожды учитывает принадлежность объекта изображения участку «сетки» и совершенно не важно, что любой участок (даже гладкий) границы объекта, не лежащий под углом $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$, будет представлен заведомо хуже после оцифровки. Заметим, что использование программного обеспечения [26] не снимает вопросов адекватности методики определения границ объекта, применения соответствующих граничных условий в процессе обработки изображений, а также методики вычисления корреляционной функции высота-высота для выбранного направления.

Также отметим, что фрактальная размерность поверхности, найденная как с помощью метода вложенных квадратов [1-8, 20, 24], так и посредством соотношения (3) может отождествляться с соответствующей кластерной размерностью трехмерных агрегатов.

На рис. 2, 3 представлен результат сканирования в полуконтактном режиме (атомно-силовая микроскопия) поверхности пленок никеля и

хрома и 3D изображение пленок. Анализируя 3D изображение пленок, можно увидеть отдельные агломераты, распределенные по поверхности и в достаточной степени равномерно. Для нанопокрытия хрома характерен несколько другой тип покрытия – отдельные крупные агломераты с развитым внутренним рельефом. Интерес в изучении таких агломератов связан в первую очередь с тем, что они могут быть центрами зарождения фрактальных структур [1-8, 20, 24]. В целом поверхность достаточно однородна (см. рис. 2 и 3), с отдельными зернами, представленными агломератами никеля и хрома, сформированными в процессе конденсации атомов и последующей коалесценции или возможно посредством механизма смачивания в твердом состоянии [15]. Отметим, что нам ранее не удавалось получить хорошо разрешенные снимки образца «хром на стекле» [1, 2, 7, 8] с выявлением отдельных кластеров и агломератов, чтобы провести исследование фрактальных свойств покрытия (вручную и с привлечением программного продукта [25]). По-видимому, это связано с тем, что покрытие, полученное при термовакуумном напылении, в целом получается значительно более однородным, чем для пленок золота и серебра, меди и никеля. Кроме того, необходимо отметить, что на получаемых пленках хрома на поверхности стекла при использовании магнетронного напыления фрактальные структуры также не обнаружены [1, 2, 7, 8]. В этом случае исследуемые образцы тонких пленок хрома синтезировались в вакуумной технологической камере SUNPLA 40TM (Корея) на подложки из стекла. Однако, необходимо отметить некоторые особенности данного технологического процесса, которые по нашему мнению могли стать косвенной причиной получаемых достаточно планарных покрытий. Синтез проходил в среде аргона при давлении 0,5 Па и мощности магнетрона 150 Вт, подложки предварительно очищались ионной пушкой в течение 5 минут. Ионная пушка применялась для удаления только органических примесей на поверхности подложки. В процессе осаждения пленок подложки были смешены относительно центра зоны распыления и вращались со скоростью 2 об/мин. Толщина пленок, измеренная на сканирующем зондовом микроскопе MFP-3D (Asylum Research, США), составила 260 ± 2 нм. При этом известно, что для дополнительной планаризации рельефа поверхностей небольшой площади, в том числе нанометрового масштаба, в настоящее время применяется эффект преимущественного распыления выступов рельефа поверхности по сравнению с распылением впадин/«плато» на поверхности при облучении образца наклонно падающими пучками ионов. Например, в работе [28] методом СТМ исследовалась поверхность пленок хрома, осажденных на полированную поверхность стекла до и после облучения пучком ионов аргона, при этом шероховатость поверхности после облучения

уменьшается в 5–8 раз в зависимости от режима ионного облучения.

На рис. 4 представлены профили поверхности наноразмерных пленок никеля и хрома вдоль главной и побочной диагоналей для анализа развитости рельефа, как в центральной части пленки, так и на периферии.

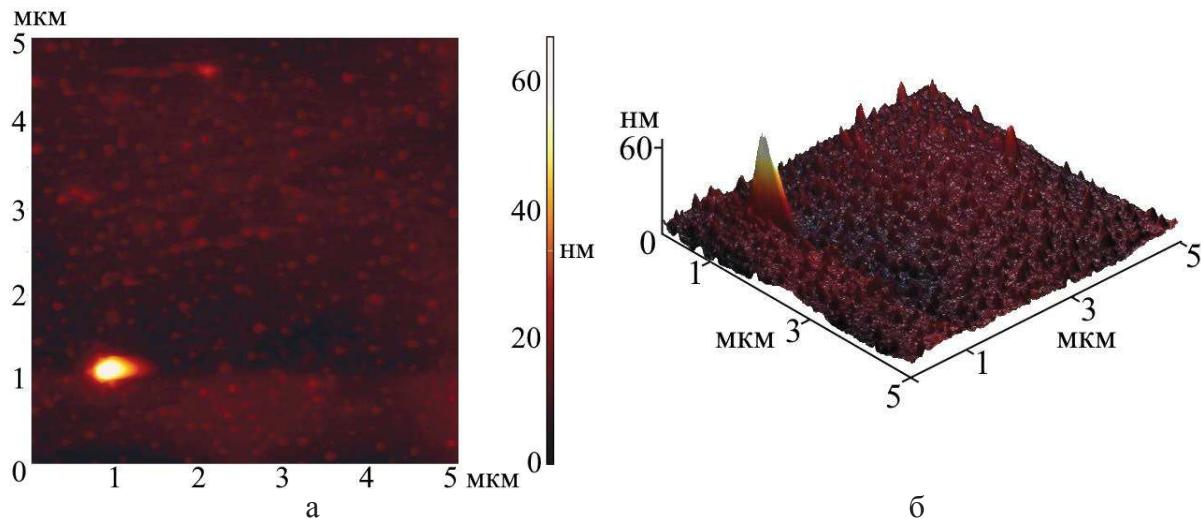


Рис. 2. Изображения поверхности и 3D изображение наноразмерной пленки никеля.

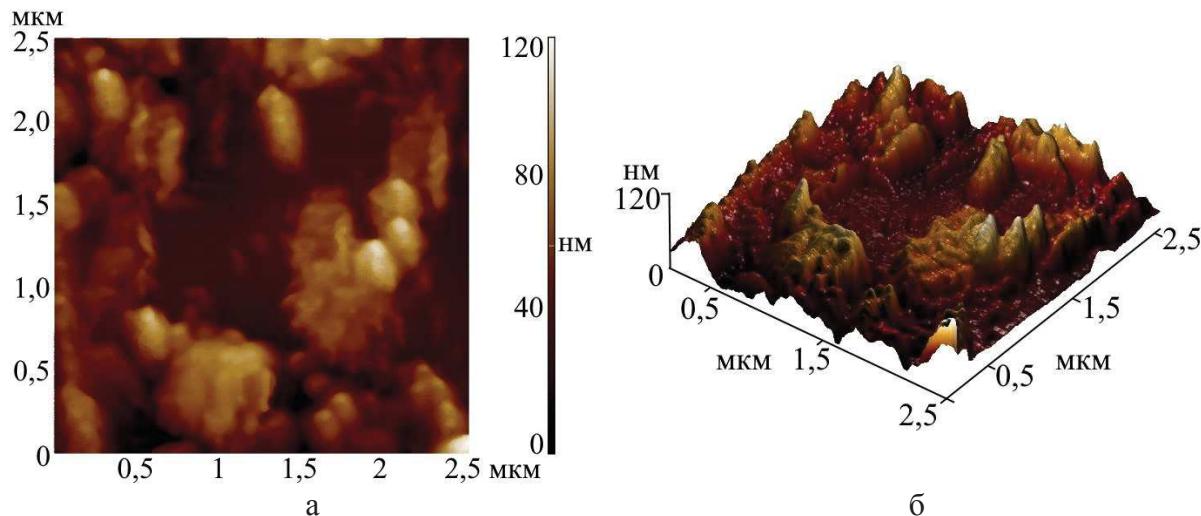


Рис. 3. Изображения поверхности и 3D изображение наноразмерной пленки хрома.

Проанализировав шероховатость поверхности с использованием программного продукта [26], нами были определены морфологические характеристики поверхности образца, а именно высотные параметры (см. данные Таблицы 1): среднее арифметическое из абсолютных значений

отклонений профиля в пределах базовой длины $S_a = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} |z(x_k, y_l)|$,

среднеквадратичное 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 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 [1-8].

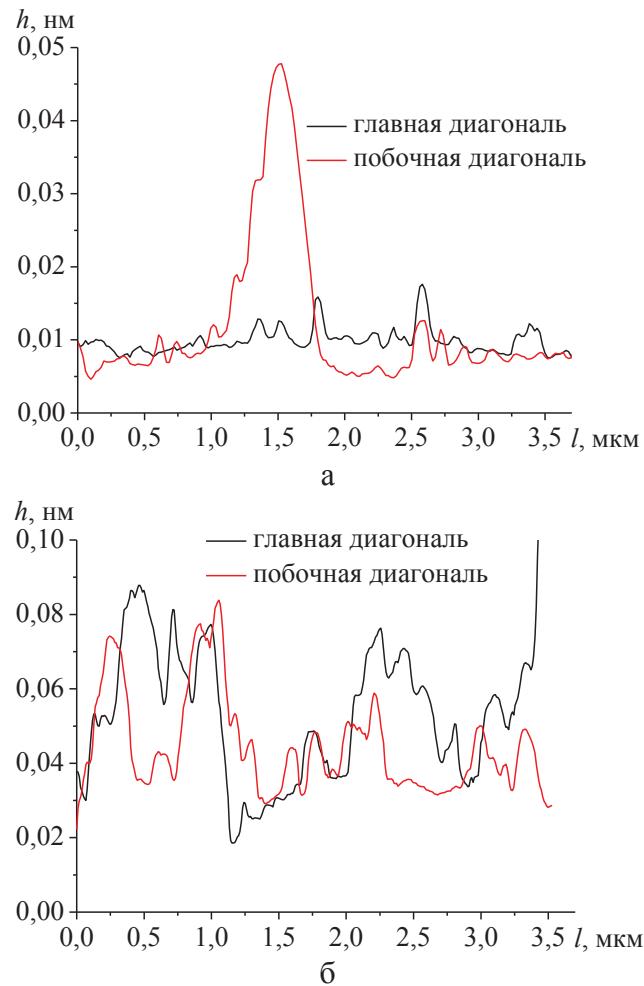


Рис. 4. Профили рельефа поверхности: а – нанопокрытия пленки никеля, б – нанопокрытия пленки хрома. Нулевой уровень выбирался в [26] автоматически.

Таблица 1. Диапазон изменения морфологических характеристик плёнок хрома и никеля на исследованных масштабах

Граница диапазона	хром				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	10,31	13,39	86,28	2,1	0,97	1,34	13,31	2,3
максимальное значение	24,98	35,67	257,07	2,24	2,11	3,83	29,54	2,64

* значение выбиралось из серии измерений на одном образце.

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 хрома. Данный вывод в частности подтверждается результатами работы [29], т.е. нам удалось получить воспроизводимость морфологических характеристик пленок никеля, полученных именно методом электронно-лучевого напыления. В отличие от пленок никеля, пленки хрома, полученные методом электронно-лучевого напыления, имеют достаточно развитый рельеф, о чем говорит разброс данных по высотным параметрам. Видимо именно это послужило фактором зарождения фрактальных структур по сравнению с пленками, полученными нами в [1, 2, 7, 8]. Однако, ради справедливости, заметим, что слабо развитый рельеф поверхности является одним из возможных, но точно не определяющим фактором возможности зарождения фрактальных структур, это в частности демонстрируют образцы никеля. По-видимому, при получении пленок в [1, 2, 7, 8] методом термовакуумного напыления формирование «фрактального рельефа» не произошло (исследование проводилось методом сканирующей туннельной микроскопии) в силу других факторов, связанных, прежде всего, с подвижностью частиц в агломератах хрома и их способности к коалесценции при заданных внешних условиях. Можно утверждать, что комбинация методики получения наноразмерных покрытий и внешних факторов, а также учет физико-химических характеристик, в частности поверхностного и межфазного натяжений, должны обеспечить формирование «фрактального рельефа» для металлических пленок на диэлектрических поверхностях пусть не на всей площади образца, но хотя бы локально. Диапазон изменения кластерной фрактальной размерности для наноразмерной пленки никеля несколько шире $\Delta\bar{D}_c = 0,34$, чем для хрома – $\Delta\bar{D}_c = 0,14$, но при этом максимальная фрактальная размерность для никеля, зафиксированная в данной работе, соответствует диапазону значений фрактальной размерности, полученной нами в [29], что еще раз подтверждает факт возможного воспроизведения «фрактального рельефа».

3. Заключение

При подготовке образцов методом электронно-лучевого напыления как для наноразмерных пленок никеля, так и для пленок хрома, проведенные исследования свидетельствуют о формировании достаточно развитого фрактального рельефа, даже при том, что для наноразмерных пленок никеля сам рельеф поверхности в большей степени соответствует типу «плато». Очевидно, что изучение и описание механизма образования фрактальных структур, в том числе за счет механизма ассоциации, тесно связано как с учетом состояния поверхности диэлектрической подложки (шероховатости поверхности, наличия дефектов, периодических структур),

так и с влиянием ряда внешних факторов – температуры подложки (или скорости ее изменения), внешнего давления.

Полученные результаты для фрактальной размерности нанопокрытия никеля находятся в хорошем согласии с результатами следующих работ: в [30] наблюдалась участки с фрактальной размерностью $\bar{D}_c = 2,25 \pm 0,03$, в [31] фрактальная размерность находилась в пределах $\bar{D}_c = 2,29 \div 2,49$ – начало диапазона соответствует модели k –корреляции для автоковариантной функции для пространственной частоты (the k –correlation model for the auto-covariance function for spatial frequency), конец диапазона – использованию встроенного программного обеспечения в атомно-силовой микроскоп (примечательно, что в этой работе нанопокрытия никеля были получены методом электроосаждения). Что касается нанопокрытий хрома, имеется работа [32], в которой для достаточно крупных агломератов (1–10 мкм) установлено, что покрытия из хрома образуют высокоразвитый «фрактальный рельеф» – $\bar{D}_c = 2,95$.

Основным технологическим решением для создания и совершенствования методов «выращивания» структур с заданной морфологией поверхности, а также структур, обладающих определенными физическими свойствами, в частности проводимостью, оптическими характеристиками (включая влияние на отражательную способность [33]), является как подбор внешних факторов (температура подложки, внешнее давление, наличие последующей химической обработки и т.д.), так и использование определенных методик подготовки наноразмерных пленок [34].

В таком случае компьютерный эксперимент [35-37] может помочь в обеспечении воспроизводимости результатов в зафиксированных условиях (метод подготовки пленки, внешние факторы, выбранный металл), описания специфических особенностей наноразмерных пленок (тип рельефа (например, тип «плато»), площадь локальных зон, в которых не сформировался «фрактальный рельеф», пределы значений для фрактальной размерности профиля и поверхности).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 18-03-00132, № 18-38-00571 мол_а, № 18-29-11029, № 19-07-00271, № 19-29-03042) и Минобрнауки РФ в рамках конкурса научных проектов, выполняемых научными коллективами исследовательских центров и (или) научных лабораторий образовательных организаций высшего образования (проект № 2019-0126).

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: Тверской государственный университет, 2019. – 168 с.
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 тунNELьная микроскопия / А.С. Антонов, Н.Ю. Сдобняков, Д.В. Иванов и др. // Химическая физика и мезоскопия. – 2017. – Т. 19. – № 3. – С. 473-486.
4. **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, nanoструктур и наноматериалов. – 2017. – Вып. 9. – С. 19-26.
5. **Зыков, Т.Ю.** Исследование морфологии рельефа поверхности золота на слюде методом сканирующей тунNELьной 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.
6. **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. – № 41. – Вып. 6. – С. 112-119.
7. **Антонов, А.С.** Получение 3 – D изображений нанопокрытия хрома на стекле и измерение вольт-амперных характеристик / А.С. Антонов, Т.Ю. Зыков, Е.А. Воронова, Н.Ю. Сдобняков, П.С. Кутилин, А.С. Михайлов, О.В. Михайлова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, nanoструктур и наноматериалов. – 2013. – Вып. 5. – С. 14-19.
8. **Антонов, А.С.** Оценка геометрических характеристик нанопокрытия 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.
9. **Брылкин, Ю.В.** Фрактальная геометрическая модель микроповерхности / Г.С. Иванов, Ю.В. Брылкин // Геометрия и графика. – 2016. – Т. 4. – № 1. – С. 4-11.
10. **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.
11. **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.
12. **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.
13. **Серов, И.Н.** Получение и исследование наноразмерных пленок меди с фрактальной структурой / И.Н. Серов, Г.Н. Лукъянов, В.И. Марголин и др. // Микросистемная техника. – 2004. – № 1. – С. 31-38.
14. **Любимов, В.В.** Обоснование микро- и нанорельефов на поверхности режущего инструмента и выбора методов их получения / В.В. Любимов, В.М. Волгин, И.В. Гнидина, М.С. Саломатников // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – Вып. 1. – С. 148-159.

15. **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,nanoструктур и наноматериалов. – 2018. – Вып. 10. – С. 83-92.
16. **Slătineanu, L.** Nanoreliefes obtained by various machining methods / L. Slătineanu, O. Dodun, M. Coteață, I. Beșliu. In: Nanostructures and thin films for multifunctional applications. – Springer International Publishing Switzerland, 2016. – Ch. 14. – P. 447-472.
17. **Harp, G.R.** Epitaxial growth of metals by sputter deposition / G.R. Harp, S.S.P. Parkin // Thin Solid Films. – 1996. – V. 288. – I. 1-2. – P. 315-324.
18. **Поспелов, Д.А.** Ситуационное управление: теория и практика / Д.А. Поспелов. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
19. **Липанов, С.И.** Математические модели, программно-аппаратные и технологические средства для контроля и классификации изображений nanoструктур в туннельном микроскопе: дисс. ... канд. тех. наук: 05.11.13, 05.11.14: защищена 30.06.2017 / Липанов Святослав Иванович. – Ижевск: Институт механики УрО РАН, 2017. – 167 с.
20. **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.
21. **Федер, Е.** Фракталы / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 260 с.
22. **Ролдугин, В.И.** Фрактальные структуры в дисперсных системах / В.И. Ролдугин // Успехи химии. – 2003. – Т. 72. – Вып. 10. – С. 931-959.
23. **Ролдугин, В.И.** Свойства фрактальных дисперсных систем / В.И. Ролдугин // Успехи химии. – 2003. – Т. 72. – Вып. 11. – С. 1027-1054.
24. **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.
25. 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.
26. Image Analysis P9. Справочное руководство. – М.: NT-MDT SI, 2019. – 582 с.
27. **Пушкин, М.А.** Фрактальная структура и электронные свойства нанокластеров металлов сформированных при высоких скоростях осаждения: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / Пушкин Михаил Александрович. – М.: МИФИ, 2003. – 161 с.
28. **Holzwarth, M.** Preparation of atomically smooth surface via sputtering under glancing incidence conditions / M. Holzwarth, M. Wissing, D.S. Simeonova et al // Surface Science. – 1995. – V. 331-333. – Part B. – P. 1093-1098.
29. **Иванов, Д.В.** О «технологических» свойствах наноразмерных пленок никеля и меди / Д.В. Иванов, А.С. Антонов, Н.Ю. Сдобняков, А.Н. Шиманская, Е.В. Романовская, М.С. Афанасьев // Физико-химические аспекты изучения кластеров, nanoструктур и наноматериалов. – 2018. – Вып. 10. – С. 291-303.
30. **Makabe, A.** Surface fractal dimension of anodic dissolved nickel films / A. Makabe, W. Oshikawa, M. Saitou // Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A. – 2001. – V. 67. – I. 664. – P. 1955-1958.
31. **Torabi, M.** An investigation of the surface morphology of nanostructured nickel thin films prepared by electrodeposition / M. Torabi, A. Dolati // International Journal of Surface Science and Engineering. – 2016. – V. 10. – I. 5. – P. 444-455.
32. **Sokolov, Yu.V.** Synthesis, structure, and some physical properties of carbon and

- chromium deposits possessing a fractal structure / Yu. V. Sokolov, V.S. Zheleznyi // Technical Physics Letters. – 2003. – V. 29. – № 8. – P. 627-628.
33. **Колесников, А.И.** Роль нановыступов в появлении бликов на полированных поверхностях монокристаллов германия при отражении лазерного света / А.И. Колесников, И.А. Каплунов, М.Б. Ляхова и др. // XII международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», Екатеринбург, 21-25 мая 2018: сборник материалов. – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2018. – С. 163.
34. **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, nanoструктур и наноматериалов. – 2014. – Вып. 6. – С. 15-21.
35. **Бембель, А.Г.** Молекулярно-динамическое моделирование эпитаксиального роста наноразмерных гетероструктур свинца на никеле / А.Г. Бембель, С.А. Васильев, В.М. Самсонов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, nanoструктур и наноматериалов. – 2012. – Вып. 4. – С. 10-18.
36. **Соколов, Д.Н.** О моделировании термических эффектов при взаимодействии зонда сканирующего туннельного микроскопа с образцом / Д.Н. Соколов, Н.Ю. Сдобняков, П.С. Кутилин, Н.В. Новожилов, О.В. Михайлова, А.С. Антонов // Нанотехника. – 2013. – № 2 (34). – С. 78-80.
37. **Колосов, А.Ю.** Моделирование процесса коалесценции наночастиц золота методом Монте-Карло / А.Ю. Колосов, Н.Ю. Сдобняков, П.В. Комаров, Д.Н. Соколов, Т.Ю. Зыков, В.А. Хашин // Физико-химические аспекты изучения кластеров, nanoструктур и наноматериалов. – 2012. – Вып. 4. – С. 129-142.

References:

1. **Sdobnyakov, N.Yu.** Morphological characteristics and fractal analysis of metal films on dielectric surfaces: monograph / N.Yu. Sdobnyakov, A.S. Antonov, D.V. Ivanov. – Tver: Tverskoj gosudarstvennyi universitet, 2019. – 168 p. (In Russian).
2. **Antonov, A.S.** Morphological characteristics and fractal analysis of metal films on dielectric surfaces: diss. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.07: zashhishhena 23.03.2018; utv. 13.08.2018 / Antonov Aleksandr Sergeevich. – Tver: Tverskoj gosudarstvennyi universitet, 2018. – 198 p. (In Russian).
3. **Antonov, A.S.** Investigation of the fractal properties of nanoscale films of gold, silver and copper: atomic force and tunneling microscopy / A.S. Antonov, N.Yu. Sdobnyakov, D.V. Ivanov et al. // Khimicheskaya fizika i mezoskopiya. – 2017. – V. 19. – № 3. – P. 473-486. (In Russian).
4. **Antonov, A.S.** Research of morphology of the relief of copper films on the mica surface / A.S. Antonov, N.Yu. Sdobnyakov, D.V. Ivanov, K.B. Podbolotov // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2017. – I. 9. – P. 19-26. (In Russian).
5. **Zykov, T.Yu.** The study of the morphology of the surface relief of gold on mica by scanning tunneling microscopy / T.Yu. Zykov, N.Yu. Sdobnyakov, V.M. Samsonov, A.N. Bazulev, A.S. Antonov // Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy. – 2009. – V. 11. – № 4. – P. 309-313. (In Russian).
6. **Sdobnyakov, N.Yu.** Determination of the fractal dimension of island films of gold on mica / N.Yu. Sdobnyakov, T.Yu. Zykov, A.N. Bazulev, A.S. Antonov // Vestnik TGU, seriya

- «Fizika». – 2009. – № 41. – I. 6. – P. 112-119. (In Russian).
7. **Antonov, A.S.** The production of 3-D images of the chrome nanocoating on the glass substrate and the measurement of the current-voltage characteristics / A.S. Antonov, T.Yu. Zykova, E.A. Voronova, N.Yu. Sdobnyakov, P.S. Kutilin, A.S. Mikhajlov, O.V. Mikhajlova // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2013. – I. 5. – P. 14-19. (In Russian).
8. **Antonov, A.S.** Evaluation of geometric characteristics of chromium nanocoating on glass and measurement of current-voltage characteristics / A.S. Antonov, E.A. Voronova, N.Yu. Sdobnyakov, O.V. Mikhajlova // Nanotekhnika. – 2014. – №2(38). – P. 8-10. (In Russian).
9. **Brylkin, Yu.V.** Fractal geometric microsurface model / G.S. Ivanov, Yu.V. Brylkin // Geometriya i grafika. – 2016. – T. 4. – № 1. – P. 4-11. (In Russian).
10. **Brylkin, Yu.V.** Testing a rough surface relief modeling algorithm based on fractal theory / Yu.V. Brylkin, A.L. Kusov, A.V. Florov // Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2014. – V. IV. – № 5. – P. 86-89. (In Russian).
11. **Serov, I.N.** The application of magnetron sputtering to obtain structured thin films / I.N. Serov, G.N. Bel'skaya, V.I. Margolin et al. // Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya. – 2003. – V. 67. – I. 4. – P. 575-578. (In Russian).
12. **Serov, I.N.** Investigation into the influence of fractal-matrix structurizers on the formation and growth of nanostructures / I. N. Serov, V. A. Zhabrev, V. I. Margolin // Glass Physics and Chemistry. – 2004. – V. 30. – I. 1. – P. 32-50.
13. **Serov, I.N.** Preparation and study of nanoscale films of copper with a fractal structure / I.N. Serov, G.N. Luk'yanov, V.I. Margolin et al. // Mikrosistemnaya tekhnika. – 2004. – № 1. – P. 31-38. (In Russian).
14. **Lyubimov, V.V.** Explanation of micro- and nanoreliefes on the surface of a cutting tool and the choice of methods for their preparation / V.V. Lyubimov, V.M. Volgin, I.V. Gnidina, M.S. Salomatnikov // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2016. – I. 1. – P. 148-159. (In Russian).
15. **Bembel', A.G.** Solid state wetting and dynamics of solid surface nanorelief / A.G. Bembel', I.V. Talyzin, V.M. Samsonov // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2018. – I. 10. – P. 83-92. (In Russian).
16. **Slătineanu, L.** Nanoreliefes obtained by various machining methods / L. Slătineanu, O. Dodun, M. Coteață, I. Beșliu. In: Nanostructures and thin films for multifunctional applications. – Springer International Publishing Switzerland, 2016. – Ch. 14. – P. 447-472.
17. **Harp, G.R.** Epitaxial growth of metals by sputter deposition / G.R. Harp, S.S.P. Parkin // Thin Solid Films. – 1996. – V. 288. – I. 1-2. – P. 315-324.
18. **Pospelov, D.A.** Situational management: theory and practice / D.A. Pospelov. – M.: Nauka, 1986. – 288 p. (In Russian).
19. **Lipanov, S.I.** Mathematical models, software and hardware and technological tools for monitoring and classifying images of nanostructures in a tunneling microscope: diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.11.13, 05.11.14: zashhishhena 30.06.2017 / Lipanov Svyatoslav Ivanovich. – Izhevsk: Institut mekhaniki UrO RAN, 2017. – 167 p. (In Russian).
20. **Samsonov, V.M.** Fractal properties of aggregates of metal nanoclusters on solid surface / V.M. Samsonov, Y.V. Kuznetsova, E.V. D'yakova // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 2016. – V. 61. – I. 2. – P. 227-232.
21. **Feder, E.** Fractals / E. Feder. – M.: Mir, 1991. – 260 p. (In Russian).
22. **Roldugin, V.I.** Fractal structures in disperse systems / V.I. Roldugin // Russian Chemical Reviews. – 2003. – V. 72. – I. 10. – P. 823-847.

23. **Roldughin, V.I.** The characteristics of fractal disperse systems / V.I. Roldughin // Russian Chemical Reviews. – 2003. V. 72. I. 11. P. 913-937.
24. **Belko, A.V.** Fractal structure of gold clusters formed by deposition in vacuum on dielectric substrates / A.V. Belko, A.V. Nikitin, N.D. Strekal', A.E. German // Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i nejtronnye issledovaniya. – 2009. – № 5. – P. 11-15. (In Russian).
25. Introduction Scanning Probe Image Processor. – Access mode: www.url: <http://www.imagemet.com/WebHelp6/Default.htm>. – 15.11.2017.
26. Image Analysis P9. Manual. – M.: NT-MDT SI, 2019. – 582 p. (In Russian).
27. **Pushkin, M.A.** Fractal structure and electronic properties of metal nanoclusters formed at high deposition rates: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.07 / Pushkin Mikhail Aleksandrovich. – M.: MIFI, 2003. – 161 p. (In Russian).
28. **Holzwarth, M.** Preparation of atomically smooth surface via sputtering under glancing incidence conditions / M. Holzwarth, M. Wissing, D.S. Simeonova et al // Surface Science. – 1995. – V. 331-333. – Part B. – P. 1093-1098.
29. **Ivanov, D.V.** About «technological» properties of nano-sized nickel and copper films / D.V. Ivanov, A.S. Antonov, N.Yu. Sdobnyakov, A.N. Shimanskaya, E.V. Romanovskaya, M.S. Afanas'ev // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2018. – I. 10. – P. 291-303. (In Russian).
30. **Makabe, A.** Surface fractal dimension of anodic dissolved nickel films / A. Makabe, W. Oshikawa, M. Saitou // Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A. – 2001. – V. 67. – I. 664. – P. 1955-1958.
31. **Torabi, M.** An investigation of the surface morphology of nanostructured nickel thin films prepared by electrodeposition / M. Torabi, A. Dolati // International Journal of Surface Science and Engineering. – 2016. – V. 10. – I. 5. – P. 444-455.
32. **Sokolov, Yu.V.** Synthesis, structure, and some physical properties of carbon and chromium deposits possessing a fractal structure / Yu. V. Sokolov, V.S. Zheleznyi // Technical Physics Letters. – 2003. – V. 29. – № 8. – P. 627-628.
33. **Kolesnikov, A.I.** The role of nano-protrusions in the appearance of glare on the polished surfaces of germanium single crystals upon reflection of laser light / A.I. Kolesnikov, I.A. Kaplunov, M.B. Lyakhova et al. // XII mezhdunarodnaya konferentsiya «Mekhanika, resurs i diagnostika materialov i konstruktij», Ekaterinburg, 21-25 maya 2018: sbornik materialov. – Ekaterinburg: IMASh UrO RAN, 2018. – P. 163. (In Russian).
34. **Antonov, A.S.** On the technique of preparing samples to study fractal dimension and electrical properties of samples using a scanning tunneling microscope / A.S. Antonov, O.V. Mikhajlova, E.A. Voronova, N.Yu. Sdobnyakov // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2014. – I. 6. – P. 15-21. (In Russian).
35. **Bembel', A.G.** Molecular-dynamics simulation of epitaxial growth of nanosized lead heterostructures on nickel / A.G. Bembel', S.A. Vasil'ev, V.M. Samsonov // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2012. – I. 4. – P. 10-18. (In Russian).
36. **Sokolov, D.N.** On the simulation of thermal effects in interaction between a probe tip of the scanning tunneling microscope and a sample / D.N. Sokolov, N.Yu. Sdobnyakov, P.S. Kutilin, N.V. Novozhilov, O.V. Mikhajlova, A.S. Antonov // Nanotekhnika. – 2013. – № 2 (34). – P. 78-80. (In Russian).
37. **Kolosov, A.Yu.** Simulation of the coalescence process of gold nanoparticles by Monte-Carlo method // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2012. – I. 4. – P. 129-142. (In Russian).

FRACTAL PROPERTIES OF NANOSIZED FILMS OF NICKEL AND CHROMIUM

D.V. Ivanov¹, A.S. Antonov^{1,2}, N.Yu. Sdobnyakov¹, E.M. Semenova¹, V.L. Scopich¹,
E.V. Romanovskaya³, M.S. Afanasiev^{4,5}

¹*Tver State University, Tver, Russia*

²*Tver State Agricultural Academy, Tver, Russia*

³*Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus*

⁴*MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia*

⁵*Fryazino Branch of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Fryazino, Russia*

DOI: 10.26456/pcascn/2019.11.138

Abstract: The morphology of the relief of nanoscale films of nickel and chromium on the surface of the mica was studied using a scanning probe microscope. The characteristic features of nanorelief of the surface of the studied films, including fractal properties, are described. The obtained fractal dimension data are compared with the available experimental data, as well as data obtained using scanning tunneling microscopy. Recommendations on the development of the technology of «growing» structures with a given surface morphology are proposed.

Keywords: *scanning probe microscopy, nanorelief, fractal dimension, nanoscale films of nickel and chromium.*

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», старший преподаватель ФГБОУ ВО «Тверская государственная сельскохозяйственная академия»

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

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

Скопич Виктор Леонидович – к.ф.-м.н., доцент кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный 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

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

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

Elena M. Semenova – Ph. D., Docent of the Condensed Matter Physic Department, Tver State University

Victor L. Scopich – Ph. D., Docent of the General Physics Department, Tver State University

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

Mikhail S. Afanasiev – 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

Поступила в редакцию/received: 15.10.2019; после рецензирования/revised: 07.11.2019; принятa/accepted 20.11.2019.