

ПАТТЕРН ФОРМИРОВАНИЯ ФРАКТАЛЬНОГО РЕЛЬЕФА ДЛЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЁНОК МОЛИБДЕНА

В.А. Анофриев¹, А.С. Антонов¹, Д.В. Иванов¹, Е.М. Семенова¹, А.И. Иванова¹,
С.А. Третьяков¹, М.С. Афанасьев^{2,3}, Н.Ю. Сдобняков¹

¹ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

170002, Россия, Тверь, Садовый пер., 35

²ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет»

119454, Россия, Москва, пр. Вернадского, 78

³Фрязинский 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/pcascnn/2023.15.017

Аннотация: Рассмотрены закономерности формирования фрактального рельефа наноразмерных пленок молибдена с использованием атомно-силовой микроскопии. Рассмотрены инструменты и методы редактирования и анализа плоских фотографий, полученных с использованием данной методики исследования. Обсуждается важность вносимого вклада ошибок и погрешностей в итоговый результат получаемых данных. Для анализа фрактальной размерности также был применен метод пороговой фильтрации (threshold analysis), который позволил выделять интересующие области и исключать шумовые компоненты, а также области, не представляющие научного интереса. Определена фрактальная размерность полученных агломератов на различных масштабах от 0,5 до 3 мкм. Значения $D_c = 2,19$ и $D_c = 2,45$ получены соответственно для исходных изображений и $D_c = 2,13$ и $D_c = 2,45$ – для изображений с применением метода пороговой фильтрации. Полученные данные открывают перспективы для дальнейших исследований и разработки новых методов синтеза материалов с определенными свойствами.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, магнетронное распыление, фрактальная размерность, пленки молибдена, программное обеспечение.

1. Введение и описание проблемы

Фрактальные структуры на поверхности тонких пленок вызывают большой интерес среди учёных из-за потенциала использования уникальных свойств таких материалов в различных сферах. Современные методы формирования наноразмерных пленок с определенными физическими характеристиками, такими как оптические или электрические, стимулируют исследователей на поиски общей характеристики поверхности, способной описывать все особенности высотных параметров на заданном масштабе и отражать уровень сложности рельефа. Фрактальная размерность является одним из таких универсальных механизмов описания морфологии поверхности металлических наноразмерных пленок [1, 2].

Описание морфологических характеристик, включая фрактальную размерность, как правило, встречается в публикациях, посвящённых не

чистому молибдену, а его соединениям. Авторы [3] показали обратную связь между фрактальной размерностью и площадью покрытия подложки монослойными и многослойными плёнками. В исследовании [4] внимание уделяется деформации различных материалов (в том числе и молибдена) и его влиянию на фрактальную размерность. Интересно отметить, что в процессе деформации наблюдается увеличение значений фрактальной размерности, что свидетельствует о более интенсивной фрагментации материала и увеличении числа зерен. Этот эффект обусловлен не только пластическими процессами, но и воздействием обратного давления, которое вносит значительный вклад в формирование структуры молибдена при деформации. Показано, что интенсивная пластическая деформация приводит к увеличению значений фрактальной размерности профиля от $D_L = 1,60 \pm 0,03$ до $D_L = 1,80 \pm 0,03$. В работе [5] представлено исследование изменения фрактальной размерности с течением роста молибденсодержащей плёнки. Наблюдается, что с увеличением концентрации дисульфида молибдена в композитной системе происходит постепенное сокращение количества пустых пространств. Таким образом, для наибольших значений концентрации дисульфида молибдена, наблюдается приближение фрактальной размерности к значению 3, что указывает на полное раскрытие трехмерной структуры. Авторы исследования [6] смогли установить корреляцию между поверхностной морфологией, режимом роста, фрактальной размерностью и внутренним остаточным напряжением пленок различных металлов, включая молибден.

Метод получения тонких пленок молибдена оказывает значительное влияние на их электрическую проводимость [7]. В работе [7] показано, что использование магнетронного распыления способствует получению пленок с наименьшим удельным сопротивлением. Этот метод обладает высокой эффективностью, обеспечивая формирование плотной и однородной структуры пленок, что благоприятно влияет на их проводимость. Кроме того, установлено, что мощность магнетрона имеет значительное воздействие на удельное сопротивление тонких пленок молибдена. При повышении мощности магнетрона, наблюдается снижение удельного сопротивления. Толщина плёнки, скорость осаждения и температура подложки также оказывают существенное влияние на электрические свойства молибденсодержащих тонких пленок. Увеличение скорости осаждения приводит к увеличению размеров кристаллитов, что дополнительно способствует улучшению проводимости пленок. Вместе с тем, известно [8], что морфология поверхности тонкоплёночных покрытий влияет на оптические характеристики поверхности, которые часто имеют неравномерные и самоподобные морфологии, которые можно охарактеризовать с помощью фрактального анализа. Фрактальные

свойства поверхностей покрытий связаны с шероховатостью и нелинейными особенностями морфологии. Важным является понимание того, как эти фрактальные характеристики связаны с оптическими свойствами покрытий, включая поглощение и испускание. Более высокие значения индексов Хёрста и мультифрактальности связаны с более низкими оптическими свойствами (поглощением и испусканием), что подразумевает, что покрытия с более сложными морфологиями и нелинейными структурами демонстрируют меньшее поглощение и испускание.

Как нами было отмечено ранее, в научной литературе практически отсутствуют исследования, посвященные детальному анализу морфологических характеристик чистых образцов молибдена. Таким образом, данная работа представляет собой оригинальное исследование, в котором рассматривается морфология молибденовых образцов, включая фрактальную размерность, что подчеркивает её актуальность и новизну в контексте существующей литературы.

2. О методах обработки и о проблеме анализа изображений, полученных при помощи сканирующей зондовой микроскопии

Изображения, полученные с использованием метода сканирующей зондовой микроскопии, обычно подвержены влиянию различных артефактов, которые возникают в процессе сканирования. Эти артефакты могут быть вызваны несовершенствами зонда, внешними воздействиями, и другими факторами. Для точного анализа полученных изображений необходимо проводить их обработку и коррекцию. На сегодняшний день существует ряд программных продуктов [9-12], которые успешно справляются с устранением дефектов на изображениях, полученных при помощи зондовой микроскопии. Эти программы выполняют ряд важных задач, таких как вычитание высокочастотных компонентов, коррекция нелинейных искажений, усреднение по строкам, учет формы зонда, и фильтрация шумов. Кроме того, из-за того, что зонд в микроскопе может находиться под неким углом к образцу, изображения могут иметь наклон. Эти программы также способны корректировать этот артефакт путем вычитания плоскости наклона или поворота изображения. Другими искажениями, которые могут возникнуть при сканировании, являются ступенчатые искажения, вызванные тем, что изображения строятся построчно. Для их устранения применяется вычитание среднего значения высоты изображения. Также важными аспектами обработки изображений в зондовой микроскопии являются настройка калибровочных коэффициентов и коррекция деформаций, вызванных гистерезисом, неортогональностью и нелинейностью пьезосканера. Наконец, программы

также предоставляют средства для фильтрации различных видов шумов, таких как случайные выбросы, пики и высокочастотные шумы. Это процесс, при котором яркостные характеристики каждой точки изображения заменяются другими значениями яркости, которые считаются менее подверженными искажениям от шумов. Существует два основных типа фильтрации: частотная и пространственная [13]. Частотная фильтрация основана на применении математических операций к частотному представлению изображения. Она позволяет управлять различными частотами в изображении, фильтруя или подавляя определенные частоты, включая высокие и низкие. Примеры частотных фильтров включают фильтры нижних и верхних частот, полосовые фильтры и режекторные фильтры. Частотная фильтрация особенно полезна для устранения шумов, так как она может подавить высокочастотные компоненты, которые обычно связаны с шумами. Для этого часто используется метод Фурье-преобразования, который позволяет фильтровать шумы в различных частотных диапазонах. Пространственная фильтрация применяется к значениям пикселей непосредственно в изображении, без перехода к частотному представлению. Этот тип фильтрации зависит от окрестности каждого пикселя и его соседей. Примеры пространственных фильтров включают сглаживающие фильтры (для уменьшения шума и выделения общих структур), усиливающие фильтры (для повышения контрастности), и медианную фильтрацию (для удаления импульсных шумов). Пространственные методы улучшения изображений применяются к растровым изображениям, представленным в виде двумерных матриц. Выбор между частотной и пространственной фильтрацией зависит от конкретной задачи и характера искажений на изображении. Например, частотная фильтрация может быть предпочтительной при работе с шумами низкой частоты, в то время как пространственная фильтрация может быть эффективной при удалении шумов с высокой частотой или улучшении контрастности объектов на изображении.

Для получения точных изображений с помощью сканирующего зондового микроскопа часто приходится применять компенсирующие модели и вносить конструктивные изменения в устройство. Эти меры необходимы для учета различных искажений и артефактов, которые могут возникнуть в процессе сканирования. Однако стоит отметить, что даже при использовании таких методов всегда существует некоторая степень погрешности, которая вводится в конечные результаты и в том числе может оказывать существенный вклад в определение величины фрактальной размерности. В работе [14] поднимается вопрос о точности измерений, проводимых с использованием сканирующего туннельного

микроскопа. Авторы статьи утверждают, что для оценки суммарных и случайных погрешностей, возникающих в результате работы прибора, измерения должны проводиться сериями. Существует несколько основных причин для проведения серий измерений. При сканировании в атмосферных условиях на кончике зонда может образовываться конденсат, что может повлиять на измерения. Проведение серии измерений позволяет учесть этот эффект и оценить его влияние на результаты. Также зонд в процессе сканирования может притупляться, что также может изменить характеристики измерений. Серии измерений позволяют более точно оценить и учесть как систематические, так и случайные погрешности, которые могут возникнуть при работе зондового микроскопа. Это важно для обеспечения надежности и повторяемости измерений и для тщательной оценки точности прибора.

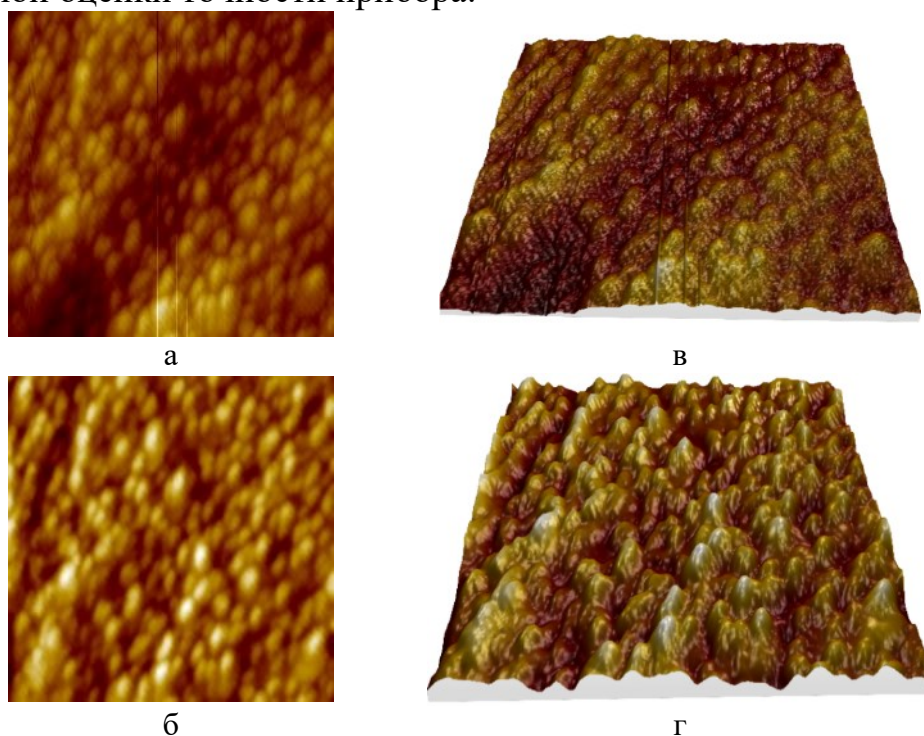


Рис. 1. Примеры использования фильтров на изображении пленки молибдена на слюде: а – изначальное изображение, б – изображение с применением двойной медианной фильтрации матрицей 5x5 с последующим выпрямлением поверхности, в и г – 3D представления изображений а и б. Масштаб – 1 мкм.

На рис. 1 представлен образец молибдена на поверхности слюды, подвергнутый обработке с использованием фильтров и инструментов для устранения артефактов, вызванных при проведении сканирования. В данном примере артефакты включают в себя вертикальные полосы и диагональные перепады уровня, которые находят свое происхождение в дрейфе образца в процессе сканирования. С учетом тщательной обработки изображения также применена двойная медианная фильтрация в качестве дополнительного уровня фильтрации шумовых компонентов. В результате

данной манипуляции удалены шумы и несовершенства, что позволило добиться более точной и репрезентативной реконструкции структуры молибдена на слюде. Графическое представление образца после обработки становится более пригодным для дальнейшего анализа и точного измерения его параметров, подчеркивая важность использования современных методов обработки изображений в зондовой микроскопии.

Также не стоит забывать об ошибках, вносимых в итоговый результат процессом цифровой обработки изображений, который создает пиксельный эффект [15]. Эффект пиксельного искажения проявляется в том, что границы объектов, которые очевидно все не могут лежать строго под углами 0° , 90° , 180° или 270° , подвергаются искажениям при цифровой обработке из-за дискретной природы изображения, состоящего из пикселей на сетке. Данный эффект не поддается устранению в силу структуры современной компьютерной техники. Влияние пиксельного эффекта непосредственно зависит от разрешения, с которым оцифровывается исходное изображение. Этот эффект наиболее существенен для объектов малого размера, с которыми нам часто приходится работать. Программа, используемая для определения размерности, требует анализа большого количества объектов (более 100 объектов на скане), что, в свою очередь, приводит к низкому разрешению изображения (примерно 15-20 пикселей на объект). В этом случае мы не можем игнорировать влияние оцифровки на результаты анализа.

Вышеупомянутые программы предоставляют широкий спектр для описания свойств поверхностей. При этом достаточно условно выделяют четыре группы параметров для анализа: амплитудные, пространственные, функциональные, фрактальные [16]. Оценка амплитудных параметров является самой простой и позволяет на понятийном уровне оценить рельеф поверхности, симметрию распределения профиля поверхности относительно среднего значения и протяженность такого распределения. Функциональные параметры дают возможность оценить степень сохранения гладкости поверхности и гладкости впадин. Пространственные параметры позволяют описать анизотропию поверхности и периодичность исследуемой структуры. Фрактальный анализ поверхности позволяет с одной стороны установить наличие самоподобных структур, с другой стороны определить изменения физических свойств у участков поверхности образца с фрактальной структурой и без нее.

Существует четыре основных метода расчёта фрактальной размерности: метод подсчёта кубов (cube counting), метод триангуляции (triangulation method), метод спектра мощности (power spectrum method) и вариационный метод (variance method). Авторами [17] предложен другой алгоритм определения фрактальной размерности, основанный на методе

подсчёта кубов под названием «схлопывание кубов» (box merging) для быстрого и эффективного вычисления фрактальной размерности изображений. Данный метод позволяет работать с большими и цветными изображениями, что ранее было затруднительно из-за длительного времени обработки. Суть метода заключается в разбиении изображения на сетку разной плотности и подсчёте числа «квадратов» (в широком смысле) разной размерности, которые содержат части изображения. Затем по данным о количестве квадратов и их размерности строится график, и фрактальная размерность вычисляется по наклону этого графика. Основное отличие данного метода от традиционного метода подсчёта кубов заключается в том, что он позволяет снизить вычислительную сложность, обрабатывая каждую точку данных только один раз. Это значительно увеличивает скорость вычислений. Представлены также результаты сравнения этого метода с другими подходами, такими как метод массового распределения (mass distribution) и метод бинарной конкатенации (binary concatenation). Метод схлопывания кубов демонстрирует высокую скорость работы и точность результатов по сравнению с другими методами.

Также, на наш взгляд, важным этапом обработки изображений является выбор градиентной цифровой палитры для $2D$ и $3D$ изображений (данный метод фактически является одной из ступеней метода пороговой фильтрации), что в частности позволяет наряду с методом водораздела упростить задачу поиска объектов исследования и анализа (как отдельных объектов, так и в целом профиля) на поверхности образца. Для улучшения резкости и контраста изображений применяют свёрточные матричные фильтры с положительными коэффициентами в центре ядра свёртки и отрицательными по краям. Это может повысить контраст и сделать изображения более четкими.

Для улучшения восприятия деталей на изображениях, высокие объекты могут подсвечиваться, заменяя значения высоты на углы наклона поверхности. Это делает мелкие детали более видимыми. Также можно применять операции выделения контура, например, заменяя высоту на модуль градиента профиля поверхности. Некоторые программы позволяют создавать трехмерные представления поверхностей и видеоролики, что улучшает визуализацию данных. Разные программы обладают разными возможностями и ориентированы на разные типы микроскопии. Важно разработать программное обеспечение, соответствующее современным требованиям науки, обладающее широким спектром функций для обработки данных и имеющее удобный интерфейс.

3. Исследование морфологии рельефа

Целью настоящей работы является исследование процесса создания

фрактального рельефа пленки молибдена на поверхности слюды. Образцы были получены при помощи магнетронного распыления на напылительной установке JEOL JFC-1600. Катод данной установки содержит постоянный магнит для создания тлеющего разряда. В качестве мишени была использована молибденовая фольга чистотой 99,95%. В процессе напыления были получены образцы, содержащие 35 слоев, толщина плёнок составляет от 31 до 64 нм.

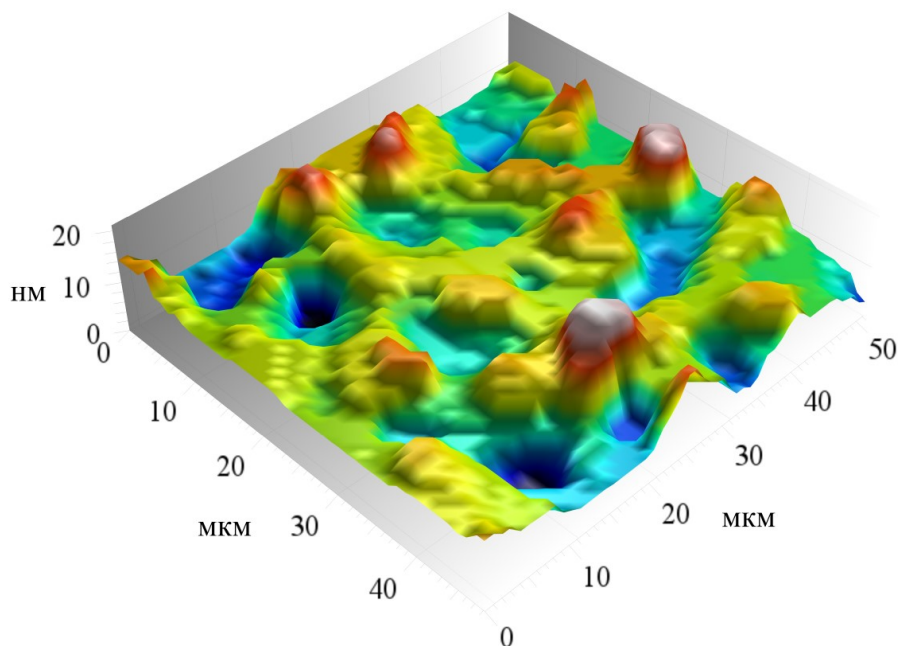


Рис. 2. 3D изображение поверхности пленки молибдена полученные с помощью оптического интерференционного профилометра NanoMap WLI 1000.

Для предварительной оценки толщины и разностей высот агломератов получаемых нами плёнок данные образцы были исследованы с использованием оптического интерференционного профилометра NanoMap WLI 1000 (см. рис. 2). Это позволило удостовериться в наличии на поверхности самоподобных структур и оценить общее качество выращенных плёнок. Снимки поверхности, получаемые с профилометра, имеют крайне низкое разрешение и не позволяют в полной мере провести точную оценку поверхностных характеристик полученных плёнок, поэтому для дальнейшего исследования нами было произведено сканирование поверхности с помощью сканирующего зондового микроскопа.

На рис. 3 представлены изображения поверхности плёнки молибдена, полученные с использованием сканирующего зондового микроскопа SolverNext (ООО «НТ-МДТ СИ»).

Проблема определения области исследования агломератов напыляемого вещества является одним из основополагающих аспектов при вычислении фрактальной размерности изображений. Существует четыре

самых известных метода выделения частиц: метод пороговой фильтрации (threshold detection), метод водораздела (watershed detection), определение границ (edge detection), поиск кругов (circle detection). В данной работе затронем один из них – метод пороговой фильтрации.

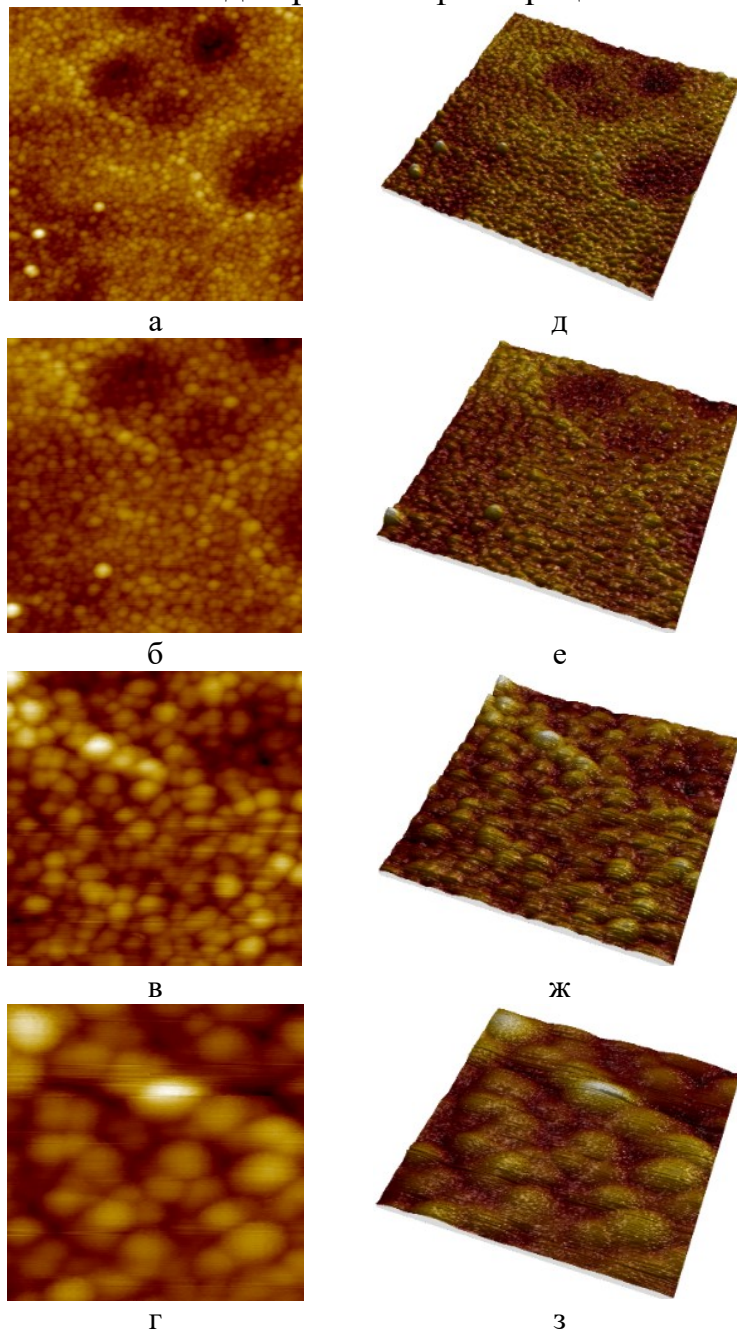


Рис. 3. Изображения пленок молибдена на слюде: а, б, в, г – поверхность на масштабах 3, 2, 1 и 0.5 мкм соответственно; д, е, ж, з – соответствующие 3 D изображения.

Сущность метода заключается в следующем – представление изображений, получаемых с помощью сканирующей микроскопии, в виде гистограммы (см. рис. 4) распределения глубины залегания агломератов от занимаемой ими площади. Этот метод маркирует области с интенсивностью выше определенного порогового уровня. Он прост в

реализации и требует небольших вычислительных ресурсов, но хорошо подходит только для обнаружения областей с высоким контрастом и высокой интенсивностью на равномерном фоне. Однако стоит отметить важность точной настройки порогового уровня. Если порог установлен слишком высоко, возможно упущение интересных объектов (фокусов), а если слишком низко, то фокусы могут объединяться в один объект, что может приводить к неправильному подсчету. Также отмечается, что низкий порог делает алгоритм более чувствительным к фоновому шуму, что может приводить к ложным обнаружениям.

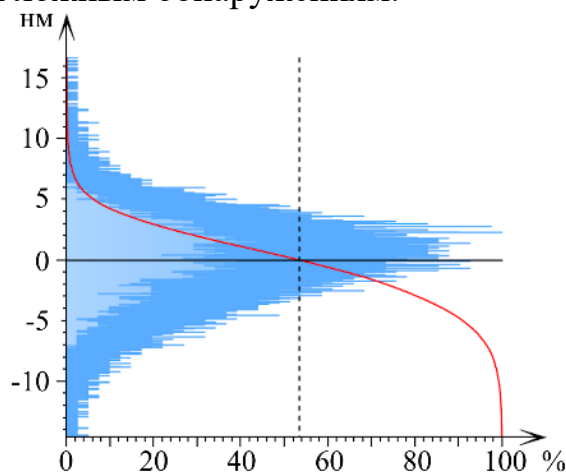


Рис. 4. Гистограмма распределения высот частиц от занимаемой площади.

Выбирая предпочтительные параметры пороговой высоты или пороговой площади агломератов, можно добиться наилучшего выделения границ исследуемого вещества. Благодаря выделению конкретной области, имеющей искомые агломераты, итоговая величина фрактальной размерности будет отлична от величины размерности, получаемой при неизбирательном анализе снимков. На рис. 5 представлены изображения всё тех же плёнок молибдена изображённых на рис. 3, но с применением пороговой фильтрации. Был проведён анализ плоских изображений молибденовых пленок представленных на рис. 3. Оценка фрактальной размерности данных изображений осуществлялась с использованием программного обеспечения собственной разработки [10]. Помимо этого, результаты были подтверждены с применением программного продукта Mountains 10 [11]. Важным аспектом исследования являлся также анализ изображений с применением пороговой фильтрации. Оба анализа показали, что фрактальная размерность существенно уменьшается при уменьшении масштаба изображений. Подчеркнем, что оба программных продукта продемонстрировали схожие результаты, это свидетельствует о высокой точности разработанного нами программного обеспечения. Полученные данные представлены в Таблице 1 для исходных изображений и в Таблице 2 для изображений, обработанных методом пороговой фильтрацией.

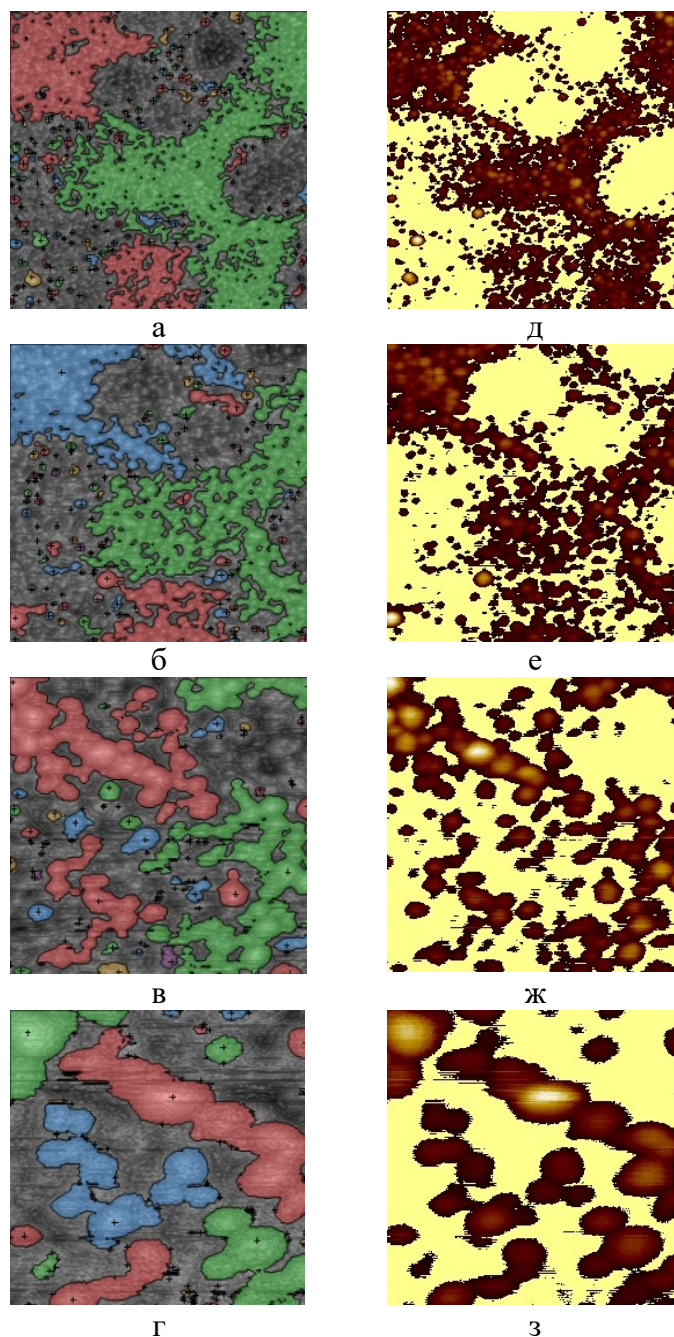


Рис. 5. Изображения пленок молибдена на слюде: а, б, в, г – изначальные изображения с выделенными агломератами с использованием метода пороговой фильтрации, д, е, ж, з – изображения с отфильтрованными по пороговой высоте агломератами.

Таблица 1. Расчётные значения фрактальной размерности для исходных изображений.

Изображение	Фрактальная размерность изображений в различном используемом программном продукте	
	FractalSurface 2.0	Mountains 10
Рис. 3 а	2,45	2,43
Рис. 3 б	2,34	2,35
Рис. 3 в	2,24	2,28
Рис. 3 г	2,19	2,17

Таблица 2. Расчётные значения фрактальной размерности для изображений с выделенными участками агломератов.

Изображение	Фрактальная размерность изображений в различном используемом программном продукте	
	FractalSurface 2.0	Mountains 10
Рис. 5 д	2,45	2,41
Рис. 5 е	2,39	2,37
Рис. 5 ж	2,29	2,25
Рис. 5 з	2,13	2,13

4. Дискуссия и выводы

В настоящей работе рассматриваются проблемы, связанные с синтезом тонких плёнок чистого молибдена, обладающих фрактальными свойствами. Несмотря на значительное количество источников по синтезу плёнок соединений молибдена, работы, посвящённые исследованию фрактальных структур в плёнках чистого молибдена, практически отсутствуют. Анализ морфологии плёнок молибдена выявил, что фрактальная размерность изменяется в диапазоне от 2,19 до 2,45 в зависимости от масштаба изображения. Этот результат открывает перспективы по исследованию взаимосвязи фрактальных характеристик (зависящих от способа синтеза молибденовых плёнок) и их конкретных физических характеристик.

Действительно, использование пороговых фильтров для анализа фрактальной размерности может быть полезным подходом при изучении тонких пленок и других фрактальных структур. Пороговый фильтр позволяет выделять определенные детали или компоненты структуры, которые имеют определенные характеристики, такие как яркость, контраст или интенсивность. Следует отметить, что использование пороговой фильтрации позволяет выделять конкретные области на изображении, обладающие особым интересом, и исключать из анализа области, не представляющие интереса или представляющие собой шумовые компоненты. Отметим, что для данных участков разброс величины фрактальной размерности минимален. Это связано с тем, что такие участки обладают сходством в структуре с точки зрения высотных параметров. Использование пороговой фильтрации позволяет обнаруживать на пленках те области, где значение фрактальной размерности согласуется с определенными функциональными характеристиками. Например, при рассмотрении оптических свойств покрытий, этот метод позволяет выявлять области, в которых можно ожидать особые свойства [1], соответствующих заданным значениям величины фрактальной размерности, а также апробировать методы синтеза плёночных структур, в которых такие участки поверхности будут представлены в большем

количестве, т.е. получать более однородные по высотным параметрам плёнки. Кроме того, такой подход в анализе изображений открывает перспективы при исследовании биологических объектов – областей повреждений в структуре ДНК [18].

Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 0817-2023-0006), а также в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

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. **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.
3. **Jiang, Y.** Analyzing growth kinematics and fractal dimensions of molybdenum disulfide films / Y. Jiang, M. to Baben, Y. Lin et al. // Nanotechnology. – 2021. – V. 32. – № 24. – Art. № 245602. – 13 p. DOI: 10.1088/1361-6528/abedf0.
4. **Zavdoveev, A.** Influence of deformation on fractal dimension of deformed metals structure / A. Zavdoveev, Y. Beygelzimer, V. Varyukhiv, B. Efros // arXiv:1204.6398 [Condensed Matter - Materials Science]. – 2012. – 5 p. DOI: 10.48550/arXiv.1204.6398.
5. **Durmaz, S.** 3D self-assemble formation of molybdenum disulfide (MoS₂) - doped polyacrylamide (PAAm) composite hydrogels doped polyacrylamide (PAAm) composite hydrogels / S. Durmaz, E. Yildiz, B.O. Uysal, O. Pekcan // Turkish Journal of Physics. – 2022. – V. 46. – № 6. – P. 239-251. DOI: 10.55730/1300-0101.2730.
6. **Guisbiers, G.** Fractal dimension, growth mode and residual stress of metal thin films / G. Guisbiers, O. van Overschelde, M. Wautelet et al. // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2007. – V. 40. – № 4. – P. 1077-1079. DOI: 10.1088/0022-3727/40/4/024.
7. **Ануфриев, Л.П.** Исследование влияния условий формирования на свойства тонких пленок молибдена, нанесенных магнетронным распылением / Л.П. Ануфриев, А.С. Турцевич, В.В. Глухманчук и др. // Электронная обработка материалов. – 2004. – Т. 40. – № 3. – С.70-74.
8. **Barrera, E.** Correlation of optical properties with the fractal microstructure of black molybdenum coatings / E. Barrera, F. Gonzalez, E. Rodrigez, J. Alvares-Ramirez // Applied surface Science. – 2010. – V. 256. – I. 6. – P. 1756-1763. DOI: 10.1016/j.apsusc.2009.09.108.
9. Image Analysis P9. Руководство пользователя. – М.: НТ-МДТ СИ, 2019. – 582 с.
10. Свидетельство № 2023614856 Российская Федерация. FractalSurface 2.0: программа для анализа поверхности на наноуровне / Н.Ю. Сдобняков, В.А. Анофриев, А.В. Низенко, А.С. Антонов, Д.В. Иванов, Н.Б. Кузьмин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный университет». – № 2023613525; заявл. 28.02.2023; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 06.03.2023. – 1 с.
11. DigitalSurf. – Режим доступа: [www.url: https://www.digitalsurf.com](http://www.digitalsurf.com). – 15.08.2023.
12. Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM, ...) data analysis software. – Режим доступа: [www.url: http://gwyddion.net](http://gwyddion.net). – 15.09.2023.
13. **Стругайло, В.В.** Обзор методов фильтрации и сегментации цифровых изображений / В.В. Стругайло // Наука и образование. – 2012. – № 5. – С. 270-280. DOI: 10.7463/0512.0411847.
14. **Денисов, А.В.** К вопросу о повторяемости результатов измерений в зондовой сканирующей микроскопии / А.В. Денисов, М.Ю. Першина, Д.А. Горностаев // Нанотехника. – 2010. – № 2 (22). – С. 100-101.
15. **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.
16. **Арутюнов, П.А.** Система параметров для анализа шероховатости и микрорельефа материалов в сканирующей зондовой микроскопии / П.А. Арутюнов, А.Л. Толстихина, В.Н. Демидов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1998. – Т. 65. – № 9. – С. 27-37.
17. **Nikolaidis, N.S.** The box-merging implementation of the box-counting algorithm / N.S. Nikolaidis, I.N. Nikolaidis // Journal of the Mechanical Behavior of Materials. – 2016. – V.25. – I. 1986. – P. 61-67. DOI:

10.1515/jmbm-2016-0006.

18. **Davies, O.** Application of femtosecond lasers in confocal and scanning tunneling microscopy: Doctor of Philosophy thesis / Davies Qwain. – Birmingham: The University of Birmingham, 2010. – 236 p.

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], Tverb Tver State Unibersity Publ., 2019, 168 p. (In Russian).
2. 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).
3. Jiang Y., to Baben M., Lin Y. et al. Analyzing growth kinematics and fractal dimensions of molybdenum disulfide films, *Nanotechnology*, 2021, vol. 32, no. 24, art. № 245602, 13 p. DOI: 10.1088/1361-6528/abedf0.
4. Zavdoveev A., Beygelzimer Y., Varyukhiv V., Efros B. Influence of deformation on fractal dimension of deformed metals structure, *arXiv:1204.6398 [Condensed Matter - Materials Science]*, 2012, 5 p. DOI: 10.48550/arXiv.1204.6398.
5. Durmaz S., Yildiz E., Uysal B.O., Pekcan O. 3D self-assemble formation of molybdenum disulfide (MoS₂) - doped polyacrylamide (PAAm) composite hydrogelsdoped polyacrylamide (PAAm) composite hydrogels, *Turkish Journal of Physics*, 2022, vol. 46, no. 6, pp. 239-251. DOI: 10.55730/1300-0101.2730.
6. Guisbiers G., van Overschelde O., Wautelet M. et al. Fractal dimension, growth mode and residual stress of metal thin films, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, vol. 40, no. 4, pp. 1077-1079. DOI: 10.1088/0022-3727/40/4/024.
7. Anufriev L.P., Turtsevich A.S., Glukhmanchuk V.V. et al. Issledovanie vliyaniya uslovij formirovaniya na svojstva tonkikh plenok molibdena, nanesennykh magnetronnym raspyleniem [Investigation of the influence of formation conditions on the properties of molybdenum thin films deposited by magnetron sputtering], *Elektronnaya obrabotka materialov [Electronic Processing of Materials]*, 2004, vol. 40, issue 3, pp. 70-74. (In Russian).
8. Barrera E., Gonzalez F., Rodriguez E., Alvares-Ramirez J. Correlation of optical properties with the fractal microstructure of black molybdenum coatings, *Applied surface Science*, 2010, vol. 256, issue 6, pp. 1756-1763. DOI: 10.1016/j.apsusc.2009.09.108.
9. *Image Analysis P9. Rukovodstvo pol'zovatelya* [Image Analysis P9. User guide], Moscow, NT-MDT SI Publ., 2019, 582 p. (In Russian).
10. Sdobnyakov N.Yu., Anofriev V.A., Nizenko A.V., Antonov A.S., Ivanov D.V., Kuz'min N.B. *FractalSurface 2.0: programma dlya analiza poverkhnosti na nanourovne* [FractalSurface 2.0: software for surface analysis at nanoscale]. Certificate RF, no. 2023614856, 2023. (In Russian).
11. DigitalSurf. Available at: [www.url: https://www.digitalsurf.com](https://www.digitalsurf.com) (accessed 15.08.2023).
12. Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM, ...) data analysis software. Available at: [www.url: http://gwyddion.net](http://gwyddion.net) (accessed 15.09.2023).
13. Strugailo V.V. Obzor metodov fil'tratsii i segmentatsii tsifrovyykh izobrazhenij [Review of methods of filtering and segmentation of digital images], *Nauka i obrazovanie [Science and Education]*, 2012, no. 5, pp. 270-280. DOI: 10.7463/0512.0411847. (In Russian).
14. Denisov A.V., Pershina M.Y., Gornostaev D.A. K voprosu o povtoryaemosti rezul'tatov izmerenij v zondovoj skaniruyushchej mikroskopii [Toward the repeatability of measurements in probe scanning microscopy], *Nanotekhnika [Nanotechnology]*, 2010, no. 2 (22), pp. 100-101. (In Russian)
15. Pushkin M.A. *Fraktal'naya struktura i elektronnye svojstva nanoklasterov metallov sformirovannykh pri vysokikh skorostyakh osazhdeniya* [Fractal structure and electronic properties of metal nanoclusters formed at high deposition rates], Cand. phys.-math. sci. diss., Moscow, Moscow Engineering Physics Institute Publ., 2003, 161 p. (In Russian).
16. Arutyunov P.A., Tolstikhina A.L., Demidov V.N. Sistema parametrov dlya analiza sherokhovatosti i mikrorel'efa materialov v skaniruyushchej zondovoj mikroskopii [Parameter system for the analysis of roughness and microrelief of materials in scanning probe microscopy], *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*, 1998, vol. 65, no. 9, pp. 27-37. (In Russian).
17. Nikolaidis N.S., Nikolaidis I.N. The box-merging implementation of the box-counting algorithm, *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 2016, vol. 25, issue 1986, pp. 61-67. DOI: 10.1515/jmbm-2016-0006.
18. Davies O. *Application of femtosecond lasers in confocal and scanning tunneling microscopy*, Doctor of Philosophy thesis, Birmingham, The University of Birmingham, 2010, 236 p.

**FORMATION PATTERN OF FRACTAL RELIEF FOR NANOSIZED MOLYBDENUM
FILMS**

V.A. Anofriev¹, A.S. Antonov¹, D.V. Ivanov¹, E.M. Semenova¹, A.I. Ivanova¹, S.A. Tretiakov¹,
M.S. Afanasiev^{2,3}, N.Yu. Sdobnyakov¹

¹Tver State University, Tver, Russia

²MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

³Fryazino Branch of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian
Academy of Sciences, Fryazino, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.017

Abstract: Some patterns of formation of the fractal relief of nanosized molybdenum films on the mica surface are considered using the atomic force microscopy. The tools and techniques for post-processing and analyzing 2D images acquired through this specific research methodology have been thoroughly investigated. The significance of the contributions of errors and uncertainties to the final outcome of the acquired data is discussed. Additionally, a threshold detection method was applied to analyze the fractal dimension, allowing for the identification of areas of interest and exclusion of noise components, as well as regions not having scientific significance. The fractal dimension of the obtained agglomerates was determined at various scales, ranging from 0,5 to 3 μm . The next value $D_c = 2,19$ and $D_c = 2,45$ were obtained for the original images; $D_c = 2,13$ and $D_c = 2,45$, respectively, for the images processed using the threshold detection method. The obtained data provide prospects for further research and development of novel methods for synthesizing materials with specific properties.
Keywords: atomic force microscopy, magnetron sputtering, fractal dimension, molybdenum films, software.

Анофриев Виталий Александрович – аспирант 1-го 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»

Иванов Дмитрий Викторович – научный сотрудник 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»

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

Третьяков Сергей Андреевич – к.ф.-м.н., доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный 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»

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

Vitaly A. Anofriev – 1st year postgraduate student, General Physics Department, Tver State University

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

Dmitry V. Ivanov – Researcher, General Physics Department, Tver State University

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

Sergey A. Tretiakov – Ph. D., Docent, Applied Physic Department, Tver State 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

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

Поступила в редакцию/received: 30.08.2023; после рецензирования/revised: 27.09.2023; принята/accepted: 02.10.2023.