На правах рукописи

Антонов Александр Сергеевич

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Тверь – 2018

Работа выполнена на кафедре общей физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тверской государственный университет».

Научный руководитель кандидат физико-математических наук, доцент, **Сдобняков Николай Юрьевич**,

Официальные оппоненты: **Измайлов Владимир Васильевич**, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»;

Кусов Андрей Леонидович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения».

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»

Защита состоится «23» марта 2018 года в 14:00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.263.09 при ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» по адресу: 170002, г. Тверь, Садовый пер., 35, ауд. 226.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» по адресу: 170000, г. Тверь, ул. Володарского, 44а и на сайте в сети Интернет: http://dissertations.tversu.ru/

Автореферат разослан «___»_____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Е.В. Барабанова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы данной диссертационной работы обуславливается тем, что к настоящему времени одним из наиболее интенсивно развивающихся разделов науки является физика поверхностных явлений. Развитие микро- и наноэлектроники, технологий гетерогенного катализа, космических технологий и даже биотехнологий стимулируется фундаментальными исследованиями в области физики поверхности твердого тела. В современной технике находят свое применение разнообразные типы покрытий, для их получения могут быть использованы различные технологии, которые способны обеспечить получение материалов с заданными поверхностными (морфологическими), электрическими и, например, трибологическими свойствами. Кроме того, необходимо учитывать роль электронных, атомных (молекулярных) и химических процессов, происходящих на поверхности твердых тел как в процессе получения нанопокрытий, так и в ходе их технологического использования. Основной задачей, развиваемой в методике эксперимента в последние годы, остается как обеспечение непосредственного наблюдения за поведением отдельных атомов на поверхности твердого тела, так и изучение закономерностей протекания процессов с участием одиночных или групп атомов. Необходимо накопление экспериментальных данных по различным объектам исследования, а также отработка основных методик анализа получаемых результатов. Для туннельной микроскопии актуальны проблемы анализа и выделения границ объектов и проблемы развития и апробации методик расчета структурных (морфологических) характеристик нанопокрытий. В настоящее время развит способ получения зондов с заданной электронной структурой при использовании ориентированных монокристаллических игл с заранее известной кристаллографической структурой. В этой связи актуальной задачей является моделирование процессов, происходящих при технологическом использовании зонда.

Степень разработанности. Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) «УМКА – 02G» (Тверь, Россия) позволяет исследовать структуру поверхности различных покрытий, в том числе металлических пленок, в частности – на наличие фрактальных структур. Данная работа претендует на комплексный подход при рассмотрении морфологических и фрактальных характеристик металлических пленок на диэлектрических поверхностях. Кроме того, ценность исследования заключается в возможности моделировать, а значит, прогнозировать изменения структуры зонда и, как следствие, электрических характеристик туннельного контакта при взаимодействии зонда туннельного микроскопа с образцом для реальной, а уже не модельной системы. Это позволяет оценить степень влияния характеристик туннельного контакта и структуры зонда на получаемые результаты и повышает их достоверность. Результаты моделирования подтверждаются экспериментальными исследованиями и теоретическими оценками по изменению характера вольт-амперных характеристик (ВАХ) туннельного контакта при проведении долговременного эксперимента. Кроме того, полученные количественные значения температурного диапазона, в котором происходит моделирование, позволяющие фиксировать разрушение зонда и/или

массоперенос в компьютерном эксперименте, согласуются с экспериментальными и теоретическими результатами российских и иностранных исследователей, что позволяет комплексно оценить адекватность используемых нами методов и подходов при сравнении результатов как с экспериментальными данными, данными компьютерных экспериментов, так и с теоретическими результатами.

Объекты исследования. В качестве объектов исследования нами использовались металлические пленки/нанопокрытия (золото, серебро, хром) на диэлектрических поверхностях/подложках (слюда, стекло). Особое внимание было уделено исследованию морфологических характеристик, определению фрактальной размерности профиля и поверхности металлических пленок. Важным, но вспомогательными объектом исследования является туннельный контакт зонд-образец – для изучения его ВАХ в процессе сканирования.

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование и теоретический анализ морфологических и фрактальных характеристик металлических пленок (золото, серебро, хром) на диэлектрических поверхностях (слюда, стекло) методом сканирующей туннельной микроскопии.

В работе были поставлены следующие **основные задачи:**

1. Разработка методики подготовки образцов (получение металлической пленки на диэлектрической поверхности) для сохранения информации об особенностях морфологии отдельных объектов поверхности размером менее 100 нм для изучения фрактальных свойств.
2. Изучение морфологии отдельных участков профиля и поверхности нанопокрытий золота, серебра на наличие фрактальных структур, расчет фрактальной размерности профиля и поверхности образцов.
3. Исследование вольт-амперной характеристики туннельного контакта металл – металл для нанопокрытий золота, серебра и хрома с острием из вольфрама и оценка параметров, влияющих на туннельный ток, для извлечения информации об электронной структуре образца.
4. Разработка интерфейса компьютерной программы для моделирования и визуализации взаимодействия зонда туннельного микроскопа и образца. Моделирование методом Монте-Карло с использованием многочастичного потенциала Гупта взаимодействия в системе зонд (медь) – образец (золото) при термическом расширении в зависимости от расстояния между ними для двух конфигураций острия: стержень и конус с использованием модернизированной программной оболочки (X-Shell). Определение характера теплового расширения острия по отношению к ширине туннельного промежутка и описание лавинообразного процесса теплового расширения острия, приводящего к возникновению контакта между острием зонда и поверхностью образца.

Научная новизна работы:

1. Впервые проведено комплексное исследование профиля и поверхности нанопокрытий золота и серебра на наличие фрактальных структур, определены соответствующие фрактальные размерности, а также построены гистограммы распределения вероятности обнаружения на поверхности металлических пленок структур с определенной фрактальной размерностью профиля и поверхности.

2. Для образцов «золото на слюде», «серебро на слюде» определены факторы, влияющие на формирование рельефа образца с фрактальной структурой. Факторами, влияющими как на толщину получаемых пленок и ее рельеф (увеличивается скорость роста и слияния островковых пленок), так и плотность структуры, являются скорость осаждения наночастиц на диэлектрическую подложку и температура подложки.
3. Проведенное исследование ВАХ контакта металл – металл для образцов золота, серебра и хрома с острием из вольфрама показывает необходимость тщательного контроля параметров, влияющих на туннельный ток при получении изображений поверхности металлической пленки. Отмечено, что тепловое расширение острия может достигать величин, сравнимых с шириной туннельного промежутка, и возможно возникновение лавинообразного процесса теплового расширения острия, приводящего к возникновению контакта между острием зонда и поверхностью образца.
4. Впервые проведено моделирование методом Монте-Карло с использованием многочастичного потенциала Гупта взаимодействия в системе зонд (медь) – образец (золото) при термическом расширении в зависимости от расстояния между ними для двух конфигураций острия: стержень и конус. Показано, что характер теплового расширения острия по отношению к ширине туннельного промежутка может приводить к возникновению контакта между острием зонда и поверхностью образца.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана методика получения металлических пленок на диэлектрической поверхности с кластерной структурой поверхности методом термовакуумного испарения и конденсации с целью сохранения информации об особенностях морфологии отдельных объектов поверхности для изучения морфологических и фрактальных характеристик с помощью сканирующего туннельного микроскопа.
2. Проведено комплексное изучение отдельных участков профиля и поверхности нанопокрытий золота и серебра на наличие фрактальных структур и исследование вольт-амперной характеристики туннельного контакта металл-металл для нанопокрытий золота, серебра и хрома с острием из вольфрама, также продемонстрирована перспективность объектов исследования в качестве базы для элементов микро- и наноэлектроники, в частности для использования технологии «выращивания» структур с заранее прогнозируемыми свойствами и структурой.
3. Предложен и апробирован подход по моделированию методом Монте-Карло с использованием многочастичного потенциала Гупта взаимодействия системы зонд (медь) – образец (золото) при термическом расширении в зависимости от расстояния между ними для двух конфигураций острия: стержень и конус для прогнозирования поведения зонда в процессе эксперимента и учета этого при анализе результатов. Полученные результаты моделирования могут быть использованы для сравнения с данными, получаемыми в рамках термодинамического подхода к исследованию размерных зависимостей температуры плавления, и прогнозирования условий для прямого эксперимента;
4. На основе оценки размерного и температурного интервалов штатного функционирования сканирующего туннельного микроскопа для изучения

отдельных участков поверхности возможно прогнозировать границы применимости методики определения фрактальной размерности профиля и поверхности для металлических нанопокрытий.

Личный вклад автора. Лично автором получены и проанализированы экспериментальные данные для определения морфологических и фрактальных характеристик металлических пленок (золото, серебро, хром) на диэлектрических поверхностях (слюда, стекло) и электрических характеристик туннельного контакта зонд-образец, получены и описаны в результате моделирования методом Монте-Карло закономерности взаимодействия зонда туннельного микроскопа и поверхности нанопокрытия с модернизацией программной оболочки (X-Shell), которая позволяет упростить запуск расчёта различных вычислительных движков (отдельные ее структурные элементы разработаны сотрудником кафедры общей физики д. ф.-м. н. П.В. Комаровым, к. ф.-м. н. Д.Н. Соколовым и научным руководителем доцентом кафедры общей физики к. ф.-м. н. Н.Ю. Сдобняковым). Автор лично выполнил обработку и анализ всех экспериментальных данных, провел расчеты физических параметров и участвовал в обобщении и интерпретации результатов совместно с научным руководителем и соавторами. Автор принимал участие в представлении результатов на научных конференциях и подготовке публикаций в научных журналах. Кроме того, результаты исследований были получены в рамках выполнения работ диссертантом по грантам РФФИ № 12-03-31593 «Исследование термодинамических и структурных характеристик наночастиц металлов при фазовых переходах (плавление/кристаллизация) и процессах самоорганизации» (исполнитель по проекту), № 13-03-00119 «Атомистическое и континуальное моделирование нанокластеров и гетерогенных наносистем с различной геометрией» (исполнитель по проекту), № 17-53-04010 «Моделирование и разработка новых методов направленного синтеза биметаллических и металлокерамических каталитических наноматериалов различной морфологии» (исполнитель по проекту), грантам в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (исполнитель по проекту) и Минобрнауки РФ по выполнению государственных работ в сфере научной деятельности (проект № 3.2448.2014/K).

Положения, выносимые на защиту:

1. Металлические нанопокрытия (золото, серебро), сформированные на диэлектрической подложке (слюде), имеют фрактальную структуру.
2. Методика определения фрактальной размерности профиля/поверхности и распределения вероятности обнаружения структур с определенной фрактальной размерностью профиля/поверхности в образцах исследуемых нанокластеров.
3. Экспериментальные закономерности изменения формы ВАХ контакта зонд (вольфрам) – образец (золото, серебро и хром) с оценкой общих черт и различий.
4. Модель взаимодействия в системе зонд (медь) – образец (золото) при термическом расширении острия для различных конфигураций острия (стержень, конус) и определенные на её основе значения температурных интервалов при термическом расширении зонда до контакта с образцом.

Обоснованность и достоверность полученных в работе результатов обусловливается как корректностью постановки задачи, так и использованием промышленного оборудования СТМ «УМКА – 02G». При этом основные результаты данной работы по исследованию морфологических и фрактальных характеристик были дополнительно верифицированы с использованием сканирующего зондового микроскопа MFP-3D (Asylum Research, США) в режиме АСМ (НИТУ «МИСиС», Москва). Все проведенные расчеты в рамках компьютерного эксперимента являются воспроизводимыми, используемая модель применительно к исследуемым задачам адекватна и тщательно протестирована, потенциал взаимодействия в достаточной степени апробирован, полученные нами результаты моделирования термического расширения острия для различных конфигураций острия (стержень, конус) согласуются с известными экспериментальными данными и данными компьютерных экспериментов.

Апробация работы. Результаты данной работы были доложены и обсуждены на ряде как российских, так и международных конференций, а именно: XVII региональных Каргинских чтениях и областной научно-технической конференции молодых ученых «Физика, химия и новые технологии» (Тверь, 2010 г.), IV Всероссийской конференции по наноматериалам (Москва, 2011 г.), 15-м Международном симпозиуме «Упорядочение в минералах и сплавах» (Ростов-на-Дону, 2012 г.), 8-х, 9-х Курдюмовских чтениях «Синергетика в естественных науках» (Тверь, 2012–2013 гг.), Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (Москва, 2012 г.), VII Международной научной конференции «Кинетика и механизм кристаллизации и материалы нового поколения» (Иваново, 2012 г.), IX Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» (Москва, 2012 г.), Международных междисциплинарных симпозиумах «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы» (Нальчик, 2012–2014 гг.), Международном симпозиуме «Физика кристаллов» (Москва, 2013 г.), IX, X Международных научно-практических конференциях «Нанотехнологии – производству» (Фрязино, 2013–2014 гг.), XXV Российской конференции по электронной микроскопии и 2-й Школе молодых ученых «Современные методы электронной и зондовой микроскопии в исследовании наноструктур и наноматериалов» (Черноголовка, 2014 г.), XIX, XX International conference on chemical thermodynamics in Russia (Moscow, 2013, 2015 гг.), 18-м Международном симпозиуме «Упорядочение в минералах и сплавах» (Ростов-на-Дону, 2015 г.), Российском симпозиуме по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел и 3-й Школе молодых ученых «Современные методы электронной и зондовой микроскопии в исследованиях наноструктур и наноматериалов» (Черноголовка, 2015 г.), XXVI Российской конференции по электронной микроскопии и 4-й Школе молодых ученых «Современные методы электронной и зондовой микроскопии в исследованиях наноструктур и наноматериалов» (Зеленоград, 2016 г.), IX Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике» (Нальчик, 2017 г.), 7-й Международной конференции «Кристаллофизика и

деформационное поведение перспективных материалов» (Москва, 2017 г.), Международном форуме «Технюнити – Электронно-лучевые технологии для микроэлектроники - 2017» (Зеленоград, 2017 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликована 21 печатная работа, из них 9 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и одно свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ.

Структура и объём работы. Данная диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, приложения, а также списка цитируемой литературы, включающего 255 наименований. Объем работы составляет 198 страниц, включая 72 иллюстрации и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертации, приведен краткий обзор статей, описывающий как современное состояние исследуемой области, так и конкретное место, которое данная работа занимает в ней. Помимо этого сформулированы цели и задачи диссертации, перечислены полученные результаты, продемонстрирована их научно-практическая ценность, а также показаны их обоснованность и достоверность. И наконец, приведены выносимые на защиту положения и кратко изложено содержание разделов диссертации.

В первой главе представлен обзор современного состояния исследований в области изучения морфологических, фрактальных характеристик наночастиц, электрических свойств туннельного контакта зонд-образец методами атомной и туннельной микроскопии, в частности, отмечены теоретические и практические аспекты изучения фрактальной размерности в наносистемах. Кроме того, рассмотрена проблема взаимосвязи между механизмом напыления наноразмерных пленок и их морфологическими характеристиками. В постановочном плане рассматривается вопрос моделирования формы зонда и механизма его взаимодействия с образцом.

Во второй главе описаны технологические основы современных сканирующих зондовых микроскопов, проведен обзор основных методик туннельной микроскопии (методы постоянного тока и постоянной высоты). Изложена методика подготовки образцов для изучения фрактальной размерности и электрических свойств образцов с помощью сканирующего туннельного микроскопа. К объектам для исследования на СТМ предъявляются два основных требования: низкая шероховатость поверхности и хорошая проводимость материала.

Кроме того, излагаются вспомогательные, но важные результаты, связанные с пониманием процессов, влияющих на формирование СТМ изображения. Эти результаты получены на основе компьютерного эксперимента с использованием метода Монте-Карло [1] для моделирования процесса взаимодействия зонда СТМ с образцом на примере системы медь (зонд) – золото (образец). Условия эксплуатации, в частности физические характеристики острия (размер и структура, коэффициент теплового расширения, проводимость), могут существенно влиять на разрешающую способность СТМ и качество визуализации

поверхности образца. В связи с этим моделирование взаимодействия зонда СТМ и образца является важной задачей в целях разработки рекомендаций по технологическому использованию СТМ для применения к конкретным задачам физики и химии поверхности на атомном уровне, изучения трибологических свойств поверхности, а также может быть важным при исследовании биологических структур. Должна приниматься во внимание возможность выхода из строя зонда СТМ, приводящая к искажению визуальной картины поверхности образца и изменению параметров проводимости между образцом и зондом, что существенно ограничивает применение СТМ для изучения больших площадей образца с высоким разрешением для определения геометрических параметров наноструктур, в том числе фрактальных. Параметры потенциала взяты из [2]. При моделировании была выбрана медь в качестве металла, из которого изготовлен зонд, поскольку перекрестные параметры потенциала Гупта для системы вольфрам – золото в литературе не встречаются, что, по нашему мнению, не изменит качественно результатов моделирования.

На рис. 1-4 показана эволюция системы острие – образец до и после проведения процесса моделирования для различных конфигураций острия: стержень и конус, а также для различных расстояний между образцом и острием зонда в начальной конфигурации. Очевидно, что термическое удлинение острия зонда может привести как к механическому контакту между образцом и острием (см. рис. 1-3), так и к частичному переносу вещества зонда на образец (случай изображен на рис. 4). Начальная конфигурация соответствует комнатной температуре $293K$. В моделируемых случаях изменение температуры при термическом расширении до контакта кс образцом для конфигурации конус составляет $150K$, а для случая стержня – $177K$, что находится в хорошем согласии с результатами работы [3]. При исследовании характеристик туннельного контакта металл-металл (в частности, получения ВАХ) необходим тщательный учет параметров, влияющих на туннельный ток, для извлечения информации об электронной структуре образца. Форма и ширина туннельного барьера и их изменение от приложенного напряжения оказывают существенное влияние на получаемые данные. Причем эффект термического расширения острия оказывает существенное влияние на форму вольт-амперных характеристик системы даже при малых, по сравнению с работой выхода, напряжениях смещения. В данном случае изменение длины острия происходит в основном за счет термического расширения. При этом тепловое расширение острия может достигать величин, сравнимых с шириной туннельного промежутка, и возможно возникновение лавинообразного процесса теплового расширения острия, приводящего к возникновению контакта между острием зонда и поверхностью образца. Доказательством служит проведенное моделирование взаимодействия острия зонда с поверхностью образца в процессе нагревания зонда при прохождении туннельного тока.

Процесс образования наноструктур на поверхности образца носит вероятностный характер и зависит от амплитуды импульса напряжения (и соответственно величины термического расширения зонда). Необходимо

отметить, что для измерения ВАХ неприемлемо наличие механического контакта между образцом и острием или даже частичный перенос вещества острия (см. правую картинку на рис. 4 после проведения процесса моделирования) на образец, однако данная технология может быть реализована при поверхностной модификации (нанолитографии) образца с использованием СТМ.

а Б

Рисунок 1. Система острие – образец до (а) и после проведения (б) процесса моделирования. Конфигурация зонда – конус. Расстояние между образцом и острием в начальной конфигурации составляет 0,1 нм.

а Б

Рисунок 2. Система острие – образец до (а) и после проведения (б) процесса моделирования. Конфигурация зонда – конус. Расстояние между образцом и острием в начальной конфигурации составляет 0,15 нм.

а Б

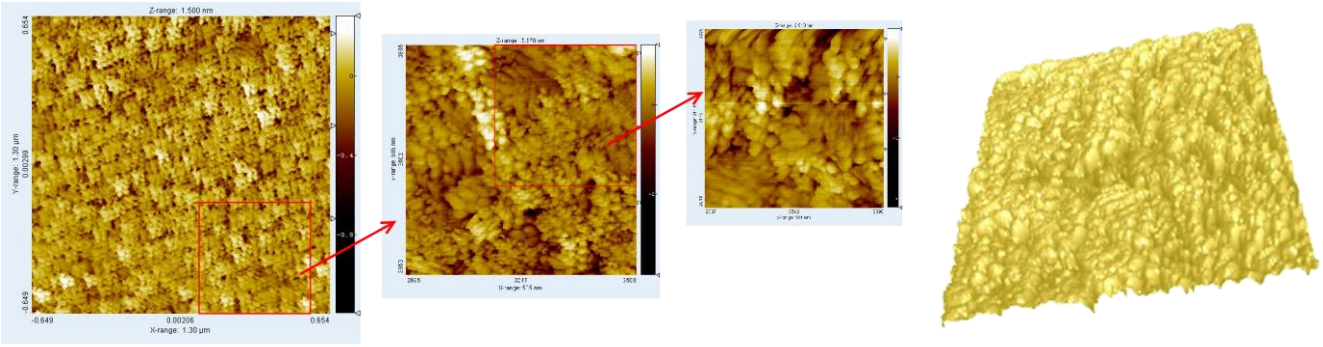
Рисунок 3. Система острие – образец до (а) и после проведения (б) процесса моделирования. Конфигурация зонда – стержень. Расстояние между образцом и острием в начальной конфигурации составляет 0,1 нм.

А Б

Рисунок 4. Система острие – образец до (а) и после проведения (б) процесса моде□ирования. Конфигурация зонда – стержень. Расстояние между образцом и острием в начальной конфигурации составляет 0,15 нм

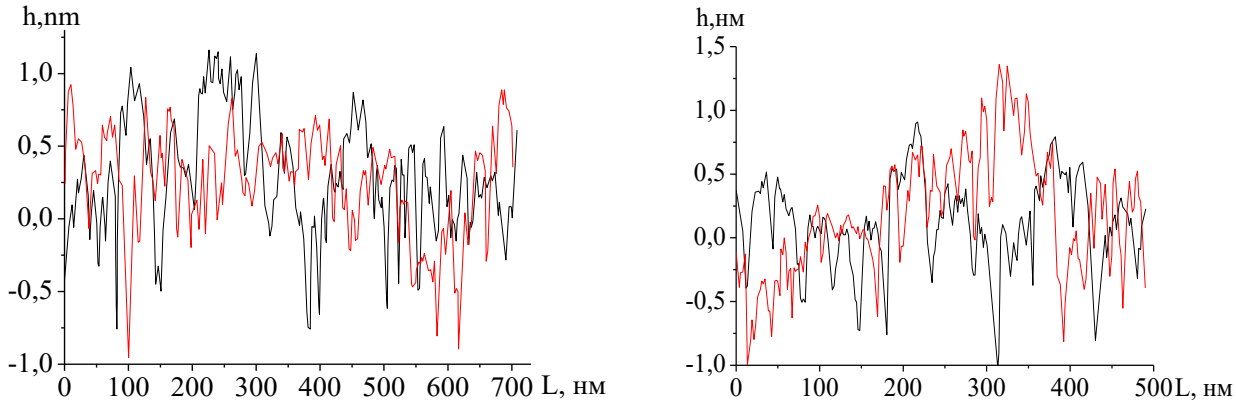
Третья глава посвящена непосредственному описанию экспериментальных результатов на примере образцов «золото на слюде», «серебро на слюде», «хром на стекле» по определению морфологических характеристик поверхности и факторов, влияющих на формирование рельефа образца. Размер изображения образца «золото на слюде» порядка половины микрометра, изменения по высоте составили 5,17 нм (см. рис. 5). Сканирование производилось на туннельном

микроскопе в режиме постоянной высоты. Для оценки морфологических характеристик нами были построены профили поверхности (см. рис. 6).



а б

Рисунок 5. Изображение поверхности в разных масштабах (а) и $3D$ изображение нанопокрытия (б) образца «золото на слюде» (размер области сканирования 490×490 нм^2).



а б

Рисунок 6. Профили поверхности образца «золото на слюде» по направлению диагоналей (а) и перпендикуляров, проведённых через центр изображения (б).

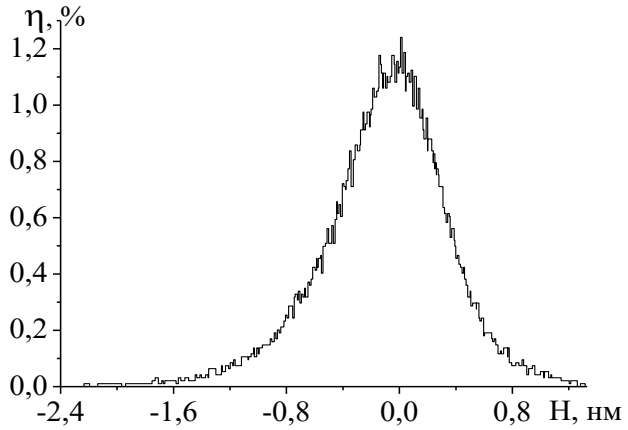


Рисунок 7. Гистограмма появления пиков на поверхности «золото на слюде».

В расчёт были приняты профили вдоль главной (черная линия на рисунке) и побочной (красная линия на рисунке) диагоналей, а также профили, проведённые перпендикулярно к краям рисунка через его центр. Проанализировав шероховатость поверхности, можно сделать вывод о том, что центр области сканирования имеет ярко выраженный пик, что может говорить о локации оседающих частиц с пучка при напылении в этом месте.

Также заметны часто повторяющиеся скопления частиц порядка 50–70 нм, что может говорить о довольно высокой скорости напыления и наличии своеобразных «центров конденсации», которые, в свою очередь, могут быть центрами роста/зарождения фрактальных структур. Из рис. 6 видно, что разница

высот между подобными скоплениями составляет порядка 1 нм. Для оценки поверхности нами построена гистограмма появления пиков, из которой следует, что наибольшая часть пиков приходится на $-0,4 \div +0,4$ нм. Можно сделать вывод о том, что в целом поверхность достаточно однородна − типа «плато» (см. рис. 7).

Микроскопический анализ поверхности, полученной в результате протекания неравновесных физико-химических процессов, показывает, что для целого ряда макроскопических систем основным структурообразующим элементом является фрактальный кластер – объект дробной размерности [4]. При этом ряд теоретических и экспериментальных исследований по изучению физических свойств поверхностей с различной геометрией шероховатости, включая сложные фрактальные системы, показывает, что сильно флуктуирующие поля в масштабно-самоподобных объектах (например, фрактальные кластеры наночастиц благородных металлов) могут значительно превышать внешнее возбуждающее поле [5], а значит, влиять на свойства самой поверхности. Поэтому возникает необходимость в детальном изучении фрактальной структуры кластеров, а также ее влияния на физические свойства этих поверхностей.

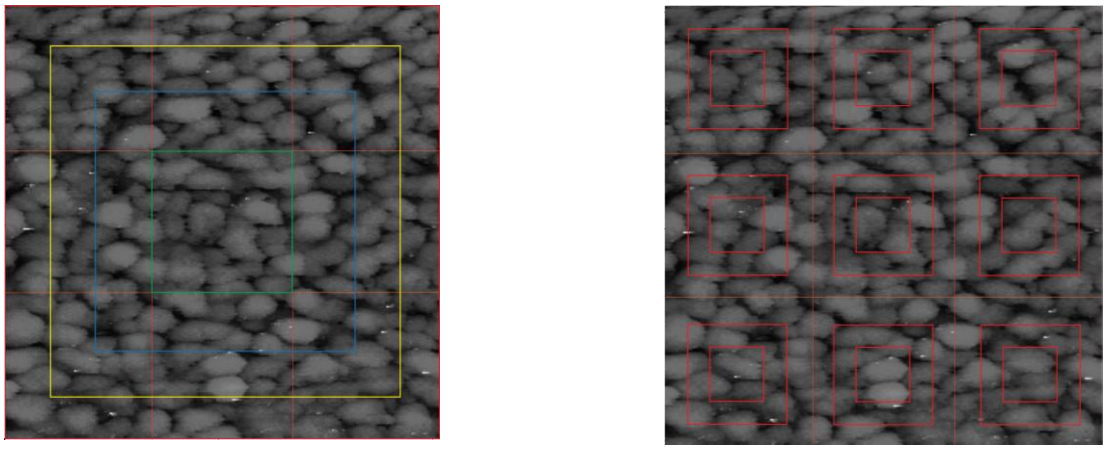
В основу фрактального анализа микроструктур изучаемых объектов была положена процедура представления их плоских электронных изображений в виде конечного дискретного множества простых элементов. Кроме того, учитывалось изменение рельефа поверхности. Анализ изображений проводился по методике, изложенной в работах [6, 7]. В [7] для расчета фрактальной размерности кластеров, образующихся в процессе роста пленок при различных температурах подложки и скорости напыления золота, полученные АСМ изображения морфологии поверхности покрывались двухмерной решеткой аналогичной размерности. При этом поверхность представлялась в виде системы двух уровней: нижнего («пусто») и верхнего («занято»). Ячейка решетки считается занятой, если высота в соответствующей точке снимка больше среднего значения, в противном случае ячейка решетки считается свободной. Занятые ячейки либо изолированы друг от друга, либо образуют группы (кластеры), состоящие из ближайших соседей. Фактически соприкасающиеся элементы определенной яркости образовывают структурные объекты – кластеры. Яркость того или иного элемента изображения свидетельствует о принадлежности или непринадлежности этого элемента к исследуемому кластеру (см. рис. 8).

После ввода границ области находился центр масс кластера, а после покрытия исследуемой области квадратами различного размера с центром в центре масс кластера производился подсчет числа элементов, принадлежащих кластеру, внутри каждого квадрата. Таким образом, формируются кластеры, структура которых определяется взаимным расположением занятых ячеек. Описанный метод определения фрактальной размерности был модифицирован в соответствии с [6], поскольку нами учитывалось изменение рельефа (высоты поверхности), что является своего рода аналогом метода триангуляции.

Для характеристики основного свойства фрактальных объектов – самоподобия их внутренней структуры – можно ввести понятие фрактальной размерности D_f, определяемой из соотношения

$$N = (R/a)^{D_f}, \quad (1)$$

где N – число частиц в кластере (число мономеров), R – линейный размер кластера (агрегата), a – размер частиц, из которых состоит кластер (средний размер мономера). Если структура объекта самоподобна, то график зависимости натурального логарифма числа частиц от натурального логарифма размера объекта будет линейным, а тангенс угла наклона определяет фрактальную размерность. Таким образом, изучение рельефа поверхности для системы кластеров и для каждого кластера в отдельности позволяет установить, является ли структура фрактальной. В конечном итоге мы получаем таблицу данных о распределении элементов по квадратам разных размеров и точечный график зависимости логарифма числа частиц внутри данного квадрата от логарифма его линейного размера (см. рис. 8). Для образца «золото на слюде» нами было проведено исследование поверхности и отдельных образований покрытия с точки зрения обнаружения фрактальной структуры.



а б

Рисунок 8. К методике изучения фрактальной структуры покрытия (а – для исследования структуры в целом, б – для исследования отдельных кластеров).

На рис. 9 приведены графики зависимости (в дважды логарифмической шкале) числа частиц от размера кластера для отдельных участков и всей поверхности образца, полученные с помощью метода вложенных квадратов. Анализ полученных зависимостей показывает, что для поверхности в целом наблюдается линейная зависимость, как для размерности профиля, так и для размерности поверхности, и, следовательно, структура поверхности является фрактальной. Для описания системы фрактальных кластеров недостаточно определить фрактальную размерность какого-либо кластера в отдельности. Также для изучения структуры используют построение гистограммы вероятности обнаружения кластеров с определенной фрактальной размерностью на определенных участках поверхности (см. рис. 10), что позволяет провести анализ распределения отдельных фрагментов покрытия по фрактальной размерности, а также установить величину фрактальной размерности, преобладающей для данной поверхности.

Для профиля и поверхности образца «золото на слюде» наиболее вероятное значение фрактальной размерности лежит соответственно в диапазоне

$1,00 \le D_L \le 1,25$ и $2,00 \le D_f \le 2,25$ (при получении образов были использованы пучки высокой плотности, в работе для пучков низкой плотности были получены следующие значения: $1,75 \le D_L \le 2,00$ и $2,25 \le D_f \le 2,50$). В работе [5] исследовались пленки Au/ВОПГ, полученные при высоких скоростях осаждения. Установлено, 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 процедурой оцифровки изображения – «пиксельный эффект». Используемый нами метод определения фрактальной размерности связан в первую очередь с определением принадлежности того или иного кластера к выбранному участку «сетки» измерений (см. рис. 8). 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 $0^o, 90^o, 180^o, 270^o$, будет представлен заведомо хуже после оцифровки. В [8] полученная фрактальная размерность профиля Au/ВОПГ составляет $D_L = 1,26 \pm 0,09$, что входит в интервал наиболее вероятных значений фрактальной размерности, полученных нами для образца «золото на слюде» (см. рис. 6). При этом максимальная фрактальная размерность без учета «пиксельного эффекта» составляет D_L : $1,7$. Фрактальная размерность поверхности определялась для образцов Au/ВОПГ, полученных двумя методами: импульсным лазерным осаждением D_f : $2,6$ и термическим осаждением D_f : $2,34$. И несмотря на тот факт, что значение D_f : $2,34$ не учитывает «пиксельного эффекта», который должен только уменьшить абсолютное значение фрактальной размерности, наши результаты по выявлению наиболее вероятных значений фрактальной размерности в целом совпадают с работой [8] при использовании фактически аналогичного метода получения образцов. На наш взгляд, серьёзным недостатком методики обработки изображений в [8] является существенная ошибка за счет «пиксельного эффекта» ΔD_L : $0,24$, т.е. порядка 20% от D_L, и к данному значению должна быть добавлена ошибка самого метода определения фрактальной размерности – метода озер [9]. В нашем случае такая ошибка была бы даже больше величины интервала в распределении вероятности P обнаружения кластеров с определенной фрактальной размерностью (см. рис. 6).

Таким образом, результаты для отдельных кластеров в целом удовлетворяют уравнению связи фрактальной размерности для профиля и поверхности: $D_L = D_f - 1$. При этом важно отметить, что распределение вероятности P в исследуемом образце кластеров с определенной фрактальной размерностью профиля и поверхности не является симметричным, при этом в нем наблюдается тенденция наличия соответствия минимумов и максимумов, что косвенно подтверждает выполнение уравнения связи. Установлено, что система кластеров на поверхности исследуемых нами образцов является фрактальной.

Кроме того, зависимость натурального логарифма частиц от натурального логарифма размера кластера для каждого кластера в отдельности близка к линейной, что позволяет в целом считать структуру отдельных кластеров профиля и поверхности фрактальной.

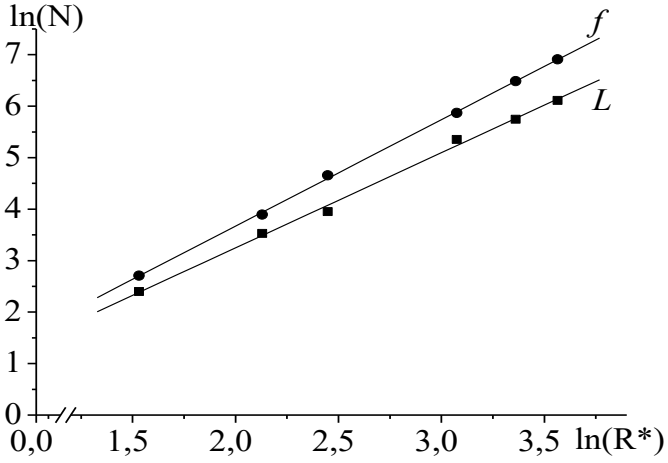


Рисунок 9. Зависимость числа частиц от приведенного размера $R^* = R/a$ кластера для всей поверхности образца «золото на слюде». Фрактальные размерности исследуемого образца: профиль – $D_L = 1,85 \pm 0,05$, поверхность – $D_f = 2,07 \pm 0,02$.

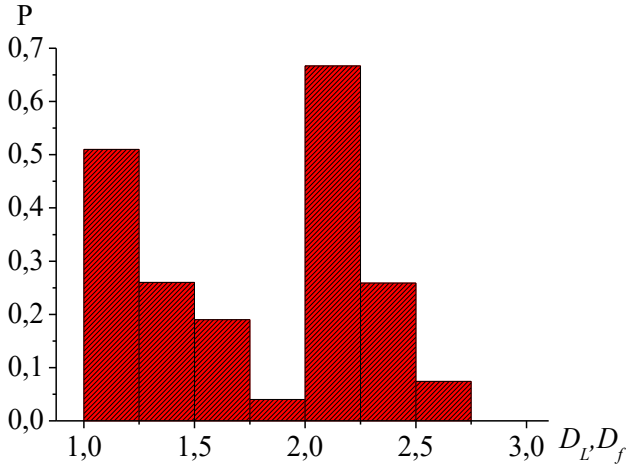


Рисунок 10. Распределение вероятности P обнаружения в образце «золото на слюде» кластеров с определенной фрактальной размерностью профиля и поверхности.

В работе [10] авторы для оценки фрактальной размерности использовали данное соотношение:

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

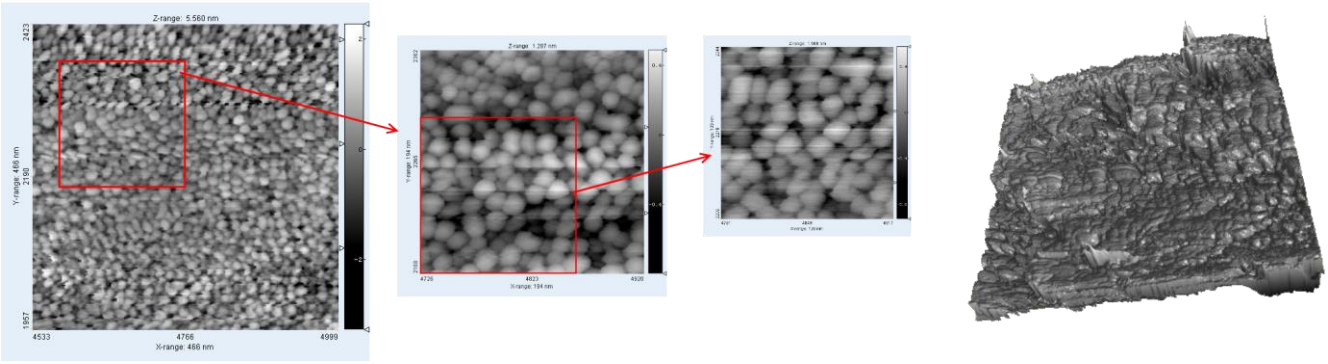
где d – радиус кластера, ρ^* – безразмерный параметр, который можно интерпретировать как приведенную плотность фрактального объекта. На количественное значение фрактальной размерности незначительно будет влиять параметр ρ^*, точнее, его логарифм. В целях сравнения получаемых результатов мы приведем полученные значения в [10] как для безразмерного параметра ρ^*, так и значения фрактальной размерности D_L, определяемой по линейной аппроксимации отдельных значений D_{L_i}, а также среднее значение фрактальной размерности $\bar{D}$, полученное расчетно, с учетом вероятности появления p_i отдельных значений D_{L_i} (см. Таблицу 1).

Таблица 1. Сравнение теоретических результатов данной работы и результатов работы [10] для пленок золота.

ρ^* [7]	D_L [7]	$\bar{D}$ [7]	ρ^*	D_L
1,1	1,57	1,6	1,22±0,11	1,85±0,05

Исследуемые в [10] размеры изображения до шести раз меньше, чем полученные в данной работе. Получаемые результаты по порядку величины хорошо согласуются с результатами [10].

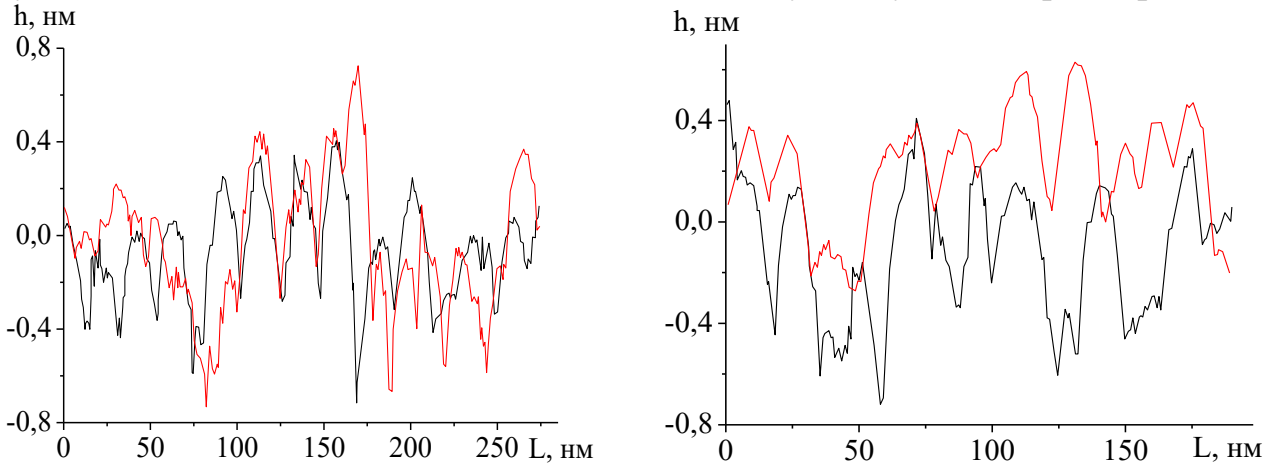
Также было проведено исследование морфологии рельефа и фрактальных свойств образца «серебро на слюде» (см. рис. 11). Было получено изображение образца «серебро на слюде» и $3D$ изображение нанопокрытия. Размер изображения порядка $0,2$ мкм, изменения по высоте составили $5,63$ нм.



а б

Рисунок 11. Изображение нанопокрытия в разных масштабах (а) и $3D$ изображение нанопокрытия (б) образца «серебро на слюде» (размер 194×194 нм^2).

Кроме того, были построены профили поверхности (рис. 12). В данном случае под h понимается относительная высота/глубина участков рельефа.



а б

Рисунок 12. Профили поверхности образца «серебро на слюде» по направлению диагоналей (а) и перпендикуляров, проведённых через центр изображения (б).

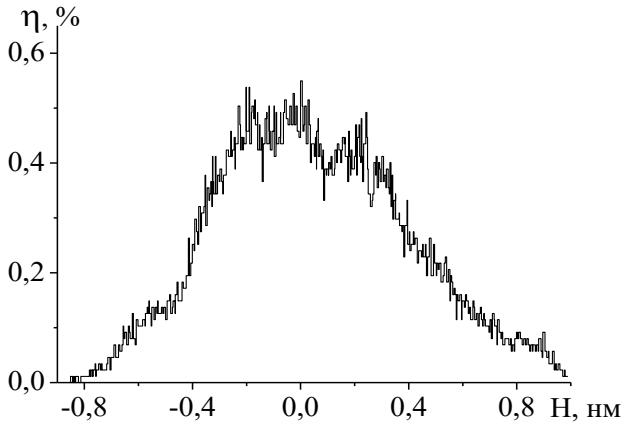


Рисунок 13. Гистограмма появления пиков на поверхности серебра.

Нулевой уровень выбран с учетом симметрии профиля. В расчёт были приняты профили вдоль главной (черная линия на рисунке) и побочной (красная линия на рисунке) диагоналей. Для оценки поверхности нами была построена гистограмма появления пиков, из которой следует, что наибольшая часть пиков приходится на $-0,4\div+0,4$ нм. Можно сделать вывод о том, что в целом поверхность

достаточно однородна − типа «плато», как и для образца «золото на слюде» (см. рис. 13).

Методика оценки фрактальной размерности образца «серебро на слюде» аналогична описанной для образца «золото на слюде». Остановимся в данном случае на особенностях полученных результатов для образца «серебро на слюде».

На рис. 14 приведены графики зависимости (в дважды логарифмической шкале) числа частиц от размера кластера для отдельных участков и всей поверхности образца, полученные с помощью метода вложенных квадратов. Для профиля и поверхности образца «серебро на слюде» наиболее вероятное значение фрактальной размерности лежит соответственно в диапазоне $1,00 \le D_L \le 1,25$ и $2,00 \le D_f \le 2,50$ (см. рис. 15), т.е. для поверхности образца диапазон значений фрактальной размерности несколько шире, чем соответствующий диапазон для образца «золото на слюде». При этом, по нашим оценкам, как и для образца «золото на слюде», для образца «серебро на слюде» были обнаружены кластеры с максимальными размерностями профиля и поверхности – соответственно $D_L \approx 1,9$ и $D_f \approx 2,75$.

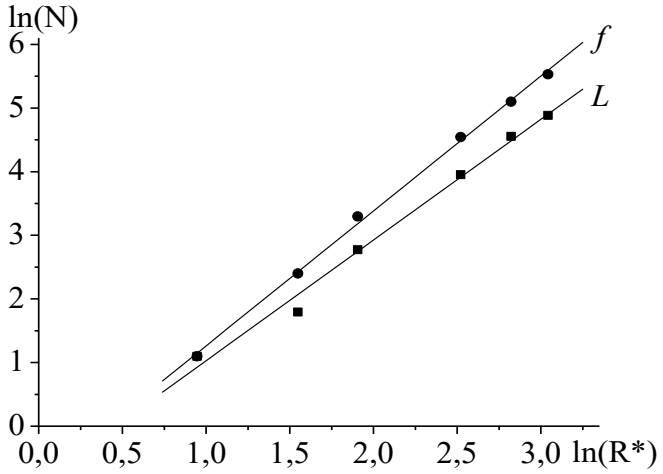


Рисунок 14. Зависимость числа частиц от приведенного размера кластера для всей поверхности образца «серебро на слюде». Фрактальные размерности исследуемого образца: профиль – $D_L = 1,90 \pm 0,09$, поверхность – $D_f = 2,11 \pm 0,04$.

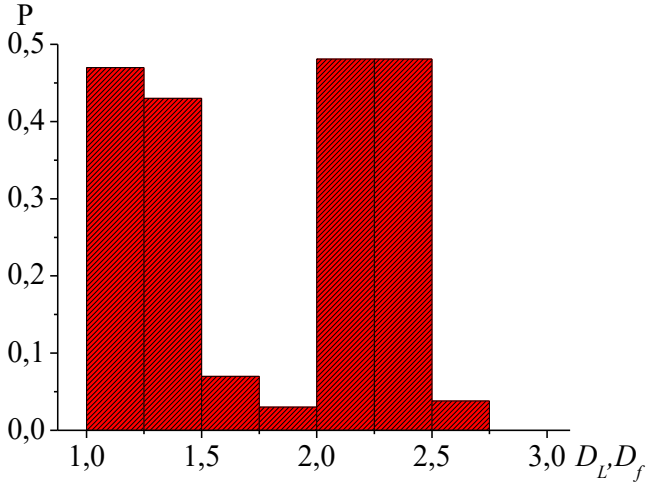


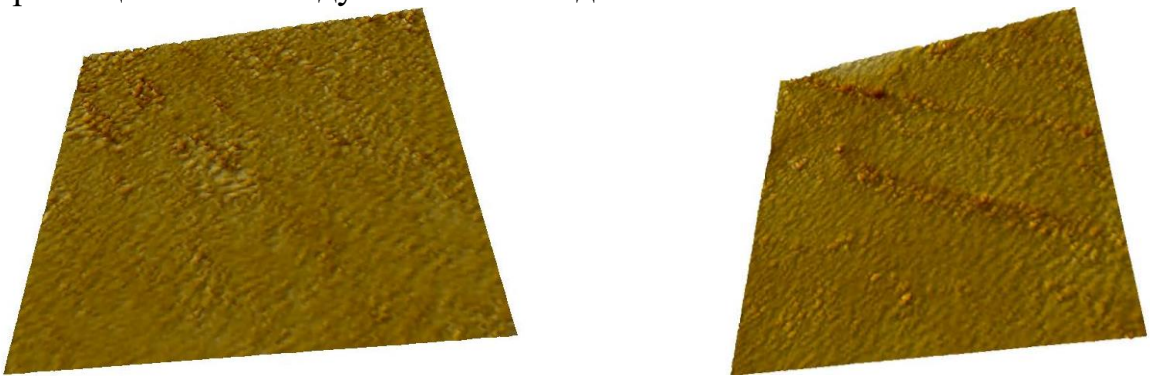
Рисунок 15. Распределение вероятности P обнаружения в образце «серебро на слюде» кластеров с определенной фрактальной размерностью профиля и поверхности.

В [11] с использованием просвечивающей электронной микроскопии исследовались агломераты наночастиц серебра, полученные методами конденсации и выпаривания при дальнейшей коагуляции наночастиц. По итогам исследований были соответственно получены следующие значения фрактальной размерности профиля: $D_L = 1,84 \pm 0,03$ (для агломератов серебра – размером 80 нм).

Проведено исследование морфологии образца «хром на стекле», получены $3D$ изображения нанопокрытий хрома на диэлектрической поверхности (стекло) (см. рис. 16) и установлено, что на наноуровне структурные образования нанопокрытия хрома на диэлектрической подложке (стекло) могут быть

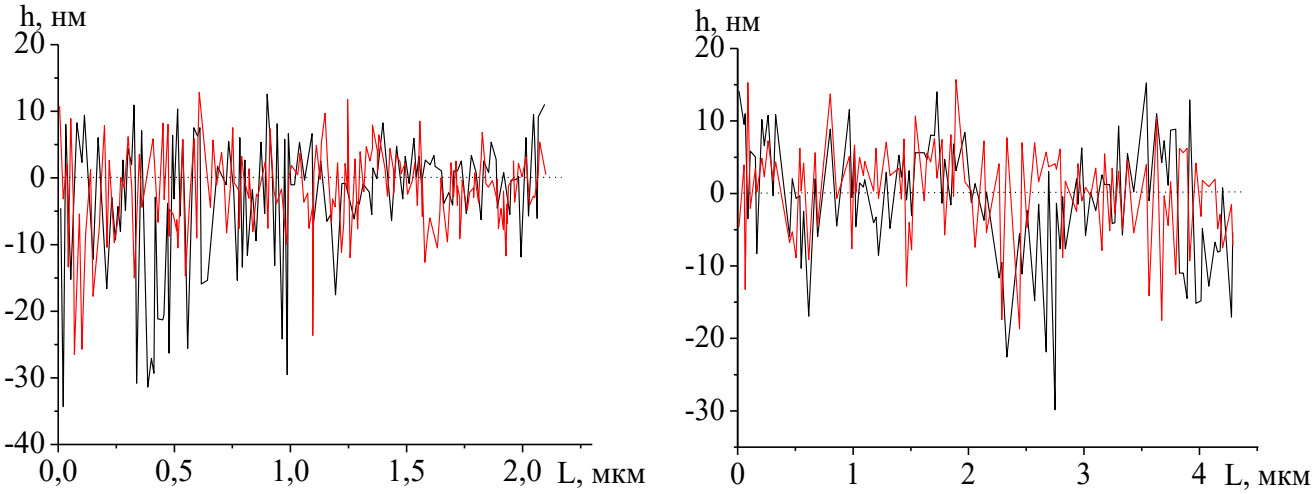
расположены равномерно и иметь размеры, значительно меньшие нанотехнологической границы 100 нм во всех направлениях, т.е. они относятся к наноструктурным образованиям (характерный размер порядка $40-60$ нм).

Отметим существующую неоднородность толщины пленки: на поверхности имеются структуры, отличающиеся по размерам. Глубина впадин лежит в пределах 30 нм, а высота пиков не превышает 15 нм. При этом анализ рис. 13 показывает, что образец в целом имеет достаточно ровные участки – «плато», когда разница высот между пиками и впадинами составляет менее 15 нм.



а б

Рисунок 16. 3*D* изображения пленок хрома на диэлектрической поверхности (стекло): а – $1,6\times1,6$ мкм^2 и б – $3,0\times3,0$ мкм^2.



а б

Рисунок 17. Профиль поверхности образца «хром на стекле» по направлениям главной (черная кривая) и побочной (красная) диагоналей образцов, показанных на рис. 16.

Несмотря на то, что исследование именно таких структурных элементов нанопокрытия представляет интерес с точки зрения обнаружения фрактальной структуры, в данной работе получить хорошо разрешенные снимки образца «хром на стекле» с выявлением отдельных кластеров и агломератов не получилось, чтобы провести исследование фрактальных свойств покрытия. По-видимому, это связано с тем, что покрытие в целом получается более однородным, чем для пленок золота и серебра. Для оценки поверхности нами построена гистограмма появления пиков, из которой следует, что наибольшая часть пиков приходится на $-0,2\div+0,2$ нм (см. рис. 18). Можно сделать вывод о том, что в целом поверхность достаточно однородна − типа «плато», как и для образца «золото на слюде».

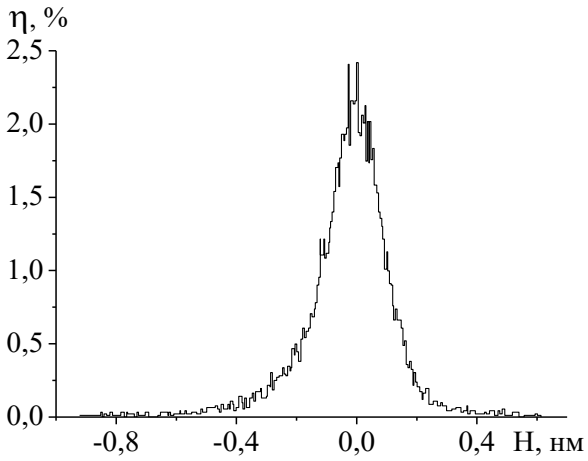


Рисунок 18. Гистограмма появления пиков на поверхности «хром на стекле».

СТМ позволяет исследовать не только морфологию поверхности образца, но и ее локальную электронную структуру. Получаемая из этих данных информация об электронной структуре образца может быть сильно искажена вследствие влияния различных факторов, которые не всегда можно учесть. С помощью СТМ можно снимать ВАХ туннельного контакта в различных точках поверхности, что позволяет судить о локальной проводимости образца и изучать особенности локальной плотности состояний в энергетическом спектре электронов.

Для регистрации ВАХ туннельного контакта в СТМ применяется следующая процедура. На СТМ изображении поверхности выбирается область образца, в которой предполагается произвести измерения. Зонд СТМ выводится сканером в соответствующую точку поверхности. Для получения ВАХ контакта обратная связь на короткое время разрывается и к туннельному промежутку прикладывается линейно нарастающее напряжение. При этом синхронно с изменением напряжения регистрируется ток, протекающий через туннельный контакт. Во время снятия ВАХ на время разрыва обратной связи на электрод сканера подается потенциал, равный потенциалу непосредственно перед разрывом. В каждой точке производится снятие нескольких ВАХ. Итоговая ВАХ получается путем усреднения набора ВАХ, снятых в одной точке. Усреднение позволяет существенно минимизировать влияние шумов туннельного промежутка.

Для характерных напряжений на туннельном контакте порядка $0{,}1 \div 1$ В и туннельных токов на уровне $0{,}1 \div 1$ нА сопротивление туннельного контакта R_t по порядку величин составляет $10^8 \div 10^{10}$ Ом. Как правило, сопротивление исследуемых в СТМ образцов R_s существенно меньше R_t, и характер ВАХ определяется, в основном, свойствами небольшой области образца вблизи туннельного контакта. Одним из приложений СТМ и спектроскопии является исследование неоднородности электрических свойств образцов сложного состава. В этом случае совместный анализ морфологии поверхности и ВАХ, снятых в различных точках поверхности, позволяет судить о распределении различных фаз на поверхности композитных структур, исследовать корреляции между технологическими параметрами их получения и электронными свойствами.

Было изучено влияние параметров туннельной системы на вид ВАХ на примере модельной системы острие (вольфрам) – образец (золото). На рис. 19 приведены результаты серии измерений ВАХ, сделанных без замены острия. После двух первых последовательных измерений наблюдается резкий скачок наклона графика (см. рис. 19), что свидетельствует о резком увеличении сопротивления туннельного контакта. Анализ статистики измерений показывает,

что уменьшение силы тока (по абсолютному значению) при $U = \pm 0,5$ В по сравнению со значением, фиксируемым при начале измерений, составляет в $2,7$ и $2,0$ раза соответственно. Отчасти это может быть связано с существованием на поверхности образца крупных агломератов, для которых кривые ВАХ при положительном напряжении могут иметь несколько другую форму в отличие от отдельных наночастиц [12].

Кроме того, можно сделать вывод, что электронная структура острия изменилась, что может быть объяснено массопереносом с образца на острие. Необходимо отметить, что в наиболее общем случае форма туннельного барьера зависит от работ выхода из материалов образца и острия, приложенного напряжения, расстояния между электродами. Кроме того, необходимо учитывать потенциал сил зеркального изображения. Проведенные расчеты ВАХ показали, что учет потенциала сил зеркального изображения приводит к различиям не только в значениях туннельного тока, но и в форме кривых.

Особый интерес представляет собой сравнение получаемых нами результатов с данными работы [13]. Расчеты были проведены без учета и с учетом потенциала сил зеркального изображения. Также при изменении напряжения между острием и образцом может происходить термический разогрев острия, вызванный энергией, выделяющейся в приповерхностной области острия в процессе туннелирования электронов (термическое расширение острия, связанное с выделением энергии Джоуля–Ленца, и термическое расширение острия, связанное с выделением энергии Ноттингама) [3].

Этот эффект может оказать влияние на ВАХ туннельного барьера, т.к. ширина зазора зависит от приложенного напряжения. Описанные выше эффекты изменяют значения силы тока в окрестности 2 В в $2-3$ раза. Расчеты [13] подтвердили возможность лавинообразного увеличения тока, приводящего к образованию электрического контакта между острием зонда и поверхностью образца. Характерной особенностью этого процесса является скачкообразное падение сопротивления туннельного промежутка при приложении модифицирующего импульса напряжения. При этом изменение температуры вершины острия остается невелико. Анализ и сопоставление результатов, представленных на рис. 19, показывают, что вид ВАХ для туннельного контакта вольфрам – золото совпадает, но по порядку величины туннельного тока они различаются, что связано, по-видимому, с исследованием пленок золота разной толщины в работе [13], а также разными методами получения пленок. Эффект термического расширения острия оказывает существенное влияние на форму ВАХ системы даже при малых, по сравнению с работой выхода, напряжениях смещения.

Было изучено изменение формы ВАХ для системы острие (вольфрам) – образец (серебро) при долговременном использовании зонда СТМ. Анализ ВАХ показывает существование «запрещенной зоны» только у образцов серебра (это говорит о наличии оксидной плёнки на поверхности). В каком-то смысле наличие оксидной пленки на поверхности серебра аналогично напылению слоя полимера с точки зрения влияния на форму ВАХ. Для пленок серебра, в отличие от пленок золота (см. рис. 19), изменение ВАХ со временем идет более плавно, и лишь

кривая, соответствующая наибольшему времени измерения, резко отличается при положительных напряжениях (см. рис. 20).

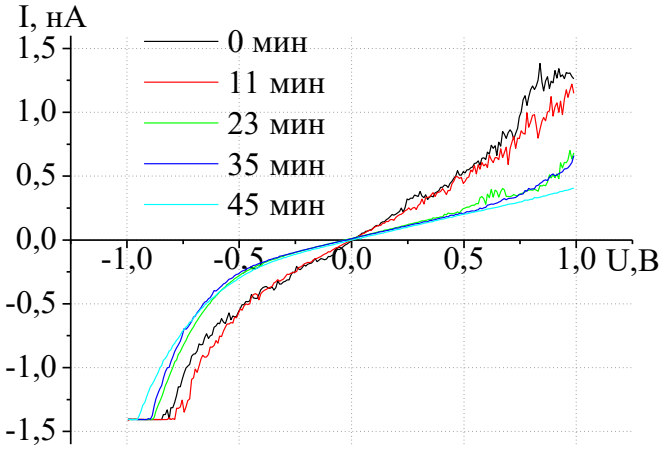


Рисунок 19. Кривые ВАХ для серии измерений для контакта вольфрам – золото.

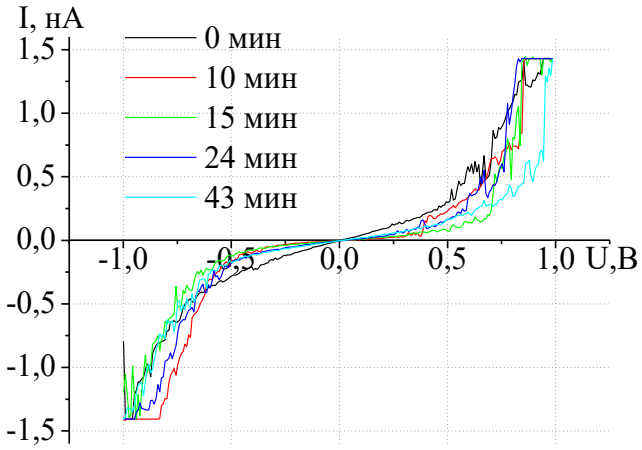


Рисунок 20. Кривые ВАХ для серии измерений для контакта вольфрам – серебро.

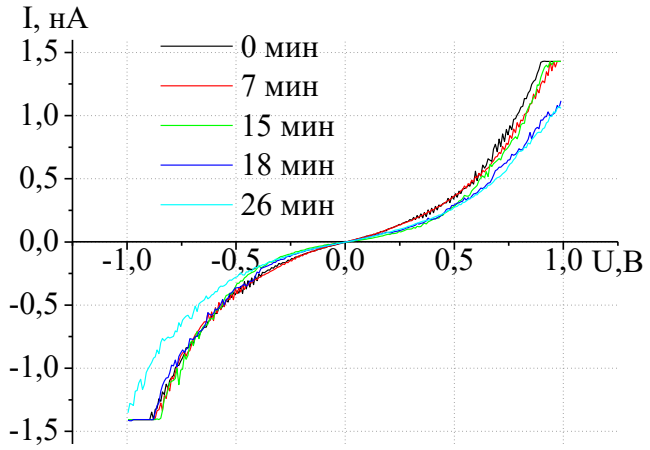


Рисунок 21. Кривые ВАХ серии измерений для контакта вольфрам – хром.

На рис. 21 приведены результаты серии измерений ВАХ, сделанных без замены острия для образца (хром на стекле). Кривая, соответствующая одному из первых сканов (см. рис. 21, черная кривая), оказалась асимметричной относительно знака напряжения, что свидетельствует о влиянии электронной структуры острия. При проведении многократных измерений с одним и тем же острием зависимость становится более симметричной относительно знака напряжения (рис. 21, голубая кривая). В данном случае термический разогрев острия, вызванный энергией, выделяющейся в приповерхностной области острия в процессе туннелирования электронов при напряжениях порядка $U = \pm 0{,}8$ В, приводит к уменьшению тока (по абсолютной величине) практически на 35% как для правой, так и для левой ветки ВАХ. Этот эффект также оказывает влияние на форму ВАХ туннельного барьера, т.к. ширина зазора зависит от приложенного напряжения. Насколько сильно влияние описанных выше эффектов на ВАХ, можно видеть из сравнения кривых, соответствующих первому и последнему измерению серии (см. рис. 21) во всем диапазоне напряжений.

Геометрия зонда, а также расстояние между его вершиной и поверхностью образца являются ключевыми факторами, определяющими межмолекулярные и поверхностные силы взаимодействия, что может оказывать влияние на определяемые в эксперименте характеристики. Вопрос, насколько сильно влияние описанных выше эффектов на ВАХ, требует дополнительного рассмотрения и зависит прежде всего от выбранных экспериментальных образцов и типа рельефа их поверхности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1). Для образцов «золото на слюде», «серебро на слюде», «хром на стекле» определены морфологические характеристики отдельных объектов поверхности, а также факторы, влияющие на формирование рельефа образца.
2). Для образцов «золото на слюде» и «серебро на слюде» исследованы отдельные участки профиля и поверхности на наличие фрактальных структур. Установлено, что система кластеров на поверхности исследуемых образцов является фрактальной.
3). Для профиля и поверхности образцов «золото на слюде» и «серебро на слюде» установлены наиболее вероятные значения фрактальной размерности. На исследуемых образцах золота и серебра были обнаружены кластеры с максимальными размерностями профиля и поверхности соответственно $D_L \approx 1{,}9$ и $D_f \approx 2{,}75$.
4). В образцах «хром на стекле», полученных двумя различными способами напыления: термовакуумным и магнетронным, не образуются фрактальные структуры, в отличие от образцов «золото на слюде» и «серебро на слюде».
5). Исследование ВАХ контакта металл – металл для образцов золота, серебра и хрома с острием из вольфрама показывает, что экспериментальные результаты свидетельствуют о необходимости тщательного учета параметров, влияющих на туннельный ток. Тепловое расширение острия может достигать величин, сравнимых с шириной туннельного промежутка, возможно возникновение лавинообразного процесса теплового расширения острия, приводящего к возникновению контакта между острием зонда и поверхностью образца, что подтверждается данными компьютерного моделирования.
6). Методом Монте-Карло с использованием многочастичного потенциала Гупта проведено моделирование взаимодействия системы зонд (медь) – образец (золото) в зависимости от расстояния между ними для двух конфигураций острия: стержень и конус. В моделируемых нами случаях изменение температуры при термическом расширении зонда до контакта с образцом для конфигурации конус составляет $150K$, а для случая стержня – $177K$, что находится в хорошем качественном согласии с имеющимися экспериментальными данными и теоретическими оценками.

Основные положения диссертации опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Сдобняков, Н.Ю. О взаимосвязи между размерными зависимостями температур плавления и кристаллизации для металлических наночастиц / Н.Ю. Сдобняков, Д.Н. Соколов, А.Н. Базулев, В.М. Самсонов, Т.Ю. Зыков, А.С. Антонов // Расплавы. – 2012. – № 5. – С. 88-94.
2. Сдобняков, Н.Ю. Измерение вольт-амперных характеристик туннельного контакта вольфрам-золото / Н.Ю. Сдобняков, А.С. Антонов, Д.Н. Соколов, Е.А. Воронова, О.В. Михайлова // Нанотехника. – 2012. – № 2 (30). – С. 16-19.
3. Сдобняков, Н.Ю. О влиянии формы манжеты жидкости между двумя сферическими наночастицами на размерные зависимости термодинамических

характеристик / Н.Ю. Сдобняков, Д.Н. Соколов, А.Ю. Колосов, А.С. Антонов, А.Н. Базулев, Н.В. Новожилов // Нанотехника. – 2013. – № 2 (34). – С. 75-77.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Антонов, А.С. Моделирование процесса взаимодействия в системе зонд СТМ – образец со сложным рельефом: рекомендации по штатному технологическому режиму работы / А.С. Антонов, Д.Н. Соколов, Н.Ю. Сдобняков, А.Ю. Колосов, В.С. Мясниченко, В.И. Романовский // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2017. – Вып. 9. – С. 6-18.
9. 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.
10. Свидетельство № 2017615319 РФ. Оболочка управления вычислительными процессами: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / Д.Н. Соколов, Н.Ю. Сдобняков, П.В. Комаров, А.Ю. Колосов, А.С. Антонов; заявл. и правообл. ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет». – № 2017612141; заявл. 16.03.2017; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 12.05.2017. – 1 с.

Список цитируемой литературы:

1. Metropolis, N. Equation of state calculations by fast computing machines / N. Metropolis, A.W. Rosenbluth, M.N. Rosenbluth et al. // The Journal of Chemical Physics. – 1953. – V. 21. – I. 6. – P. 1087-1092.
2. Cleri, F. Tight-binding potentials for transition metals and alloys / F. Cleri, V. Rosato // Physical Review B. – 1993. – V. 48. – I. 1. – P. 22-33.
3. Рабинович, Р.М. Теоретическое исследование изменения длины острия СТМ вследствие разогрева энергией Ноттингама / Р.М. Рабинович // Тезисы ВНКСФ-7. – Санкт-Петербург: СПбГУ, 2001. – С. 242.

4. Смирнов, Б.М. Физика фрактальных кластеров / Б.М. Смирнов. – М.: Наука, 1991. – 156 с.
5. Шалаев, В.М. Оптические свойства фрактальных кластеров (восприимчивость, гигантское комбинационное рассеяние на примесях) / В.М. Шалаев, М.И. Штокман // ЖЭТФ. – 1987. – Т. 92. – № 2. – С. 509-521.
6. Торхов, Н.А. Определение фрактальной размерности поверхности эпитаксиального $n-GaAs$ в локальном пределе / Н.А. Торхов, В.Г. Божков, И.В. Ивонин, В.А. Новиков // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43. – Вып. 1. – С. 38-47.
7. 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
8. 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.
9. Встовский, Г.В. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов / В.Г. Встовский, А.Г. Колмаков, И.Ж. Бунин. – Москва-Ижевск: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 116 с.
10. Самсонов, В.М. О фрактальных свойствах агрегатов металлических нанокластеров на твердой поверхности / В.М. Самсонов, Ю.В. Кузнецова, Е.В. Дьякова // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86. – Вып. 2. – С. 71-77.
11. Shin, W.G. Structural properties of silver nanoparticle agglomerates based on transmission electron microscopy: relationship to particle mobility analysis / W.G. Shin, J. Wang, M. Mertler et al. // Journal of Nanoparticle Research. – 2009. – V. 11. – I. 1. – P. 163-173.
12. Гришин, М.В. Адсорбция и взаимодействие водорода и кислорода на поверхности единичных кристаллических наночастиц золота / М.В. Гришин, А.К. Гатин, Н.В. Дохликова и др. // Кинетика и катализ. – 2015. – Т. 56. – № 4. – С. 539-546.
13. Корнилов, О.А. Изучение влияния формы туннельного барьера на туннельный ток в СТМ / О.А. Корнилов, Г.Г. Владимиров // Тезисы ВНКСФ-7. – Санкт-Петербург: СПбГУ, 2001. – С. 187.

Подписано в печать 22.01.2018. Формат 60 x 84 $^{1}/_{16}$.
Усл.печ.л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 48.
Тверской государственный университет,
Редакционно-издательское управление
Адрес: Россия, 170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33.
Тел. РИУ: (4822) 35-60-63.