

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата физико-математических наук Кусова Андрея Леонидовича на диссертацию Антонова Александра Сергеевича «Морфологические характеристики и фрактальный анализ металлических пленок на диэлектрических поверхностях», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Математический аппарат фрактального анализа топологической структуры шероховатости поверхностей, предложенный Б. Мандельбротом, позволил строить математические модели физических процессов на поверхности, связанных с её шероховатостью. Среди интенсивно изучаемых свойств можно выделить альбедо отражённого излучения, каталитические свойства, трение и др. После широкого распространения теории фракталов, а также доступности сканирующих туннельных микроскопов (СТМ) в последние годы появилось много работ, в которых рассматриваются фрактальные и связанные с ними физические свойства поверхностей, а также методы создания и исследования поверхностей.

Наноразмерные по толщине пленки различных материалов находят широкое применение во всех направлениях нанотехнологии. Особый интерес представляют собой именно наноразмерные пленки с фрактальной структурой, получаемые в условиях самоорганизации, далеких от равновесных. Свойства таких пленок, как оптические, так и электрофизические, существенно отличаются от их обычных наноразмерных аналогов. Необходимо отметить существующую зависимость между морфологией получаемых пленок и особенностями технологических режимов их получения, что открывает определенные перспективы в направлении получения пленок с заранее заданными свойствами.

Целью данной работы явилось 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 Антонова Александра Сергеевича описывается методика подготовки образцов для сохранения информации об особенностях морфологии отдельных объектов поверхности для изучения фрактальных свойств с помощью СТМ. Описаны методы обработки изображений (фильтрации), полученных на СТМ. На основе численного моделирования взаимодействия острия зонда с поверхностью определена точность восстановления топологии рельефа. На основе численного моделирования протекания туннельного тока между зондом и поверхностью образца проведён анализ погрешностей построения вольт-амперной характеристики (ВАХ). Рассмотрены методики определения фрактальной размерности поверхности и кластеров частиц.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая и практическая значимость работы обусловлена разработкой методики 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. Кроме того, теоретический и прикладной интерес представляет изучение отдельных участков профиля и поверхности нанопокрытий золота и серебра на наличие фрактальных структур и исследованием вольт-амперной характеристики туннельного контакта металл-металл для нанопокрытий золота, серебра и хрома с острием из вольфрама. В работе продемонстрирована перспективность объектов исследования в качестве базы для элементов микро- и наноэлектроники, в частности для использования технологии «выращивания» структур с заранее прогнозируемыми свойствами. 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.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. 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), 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. 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.

Структура диссертации

Диссертационная работа 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.

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. Сформулированы цели и задачи диссертации, перечислены полученные результаты, продемонстрирована их научно-практическая ценность, а также показаны их обоснованность и достоверность, приведены положения, выносимые на защиту, и кратко изложено содержание разделов диссертации.

В первой главе представлен обзор работ в области изучения морфологических, фрактальных характеристик поверхностей и кластеров наночастиц, а также характеристик туннельного тока между зондом и образцом. Для определения точности восстановления рельефа поверхности с помощью СТМ проводится численное моделирование взаимодействия зонда с поверхностью образца. Рассмотрены методы обработки изображений микрофотографий для удаления шумов и других искажений.

Во второй главе описаны принципы работы СТМ и подготовки образцов и зондов. Приводятся результаты численного моделирования взаимодействия зонда силового туннельного микроскопа с поверхностью образца для системы медь (зонд) – золото (образец). Приведены

результаты по оценке размерного и температурного интервала штатного функционирования СТМ для изучения отдельных участков поверхности.

Третья глава посвящена описанию экспериментальных результатов определения фрактальной размерности образцов «золото на слюде», «серебро на слюде», «хром на стекле», а также факторов, влияющих на формирование рельефа образца. Проведено исследование вольт-амперной характеристики (ВАХ) контакта металл - металл для образцов золота, серебра и хрома с острием из вольфрама. При этом была подтверждена необходимость тщательного учета параметров, влияющих на туннельный ток, для извлечения физически адекватной информации об электронной структуре образца. Проведено сравнение результатов определения фрактальной размерности для СТМ и атомно-силового микроскопа (АСМ).

Достоверность результатов работы, обуславливается:

1. Корректностью постановки задачи и использованием современного промышленного оборудования СТМ «УМКА – 02G» и сканирующего зондового микроскопа MFP-3D в режиме АСМ для получения основных результатов по исследованию морфологических и фрактальных характеристик.

2. Проведенной верификацией и валидацией программ, используемых при численном моделировании. Потенциал взаимодействия апробирован, полученные автором результаты моделирования термического расширения острия для различных конфигураций острия (стержень, конус) согласуются с известными экспериментальными данными и данными компьютерных экспериментов других авторов.

Результаты работы были доложены на российских и международных конференциях. 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.

Основные научные положения работы, а также содержащиеся в ней выводы, не вызывают сомнений.

Имеются следующие замечания по работе:

1. В первой главе приведён анализ большого количества интересных литературных данных в части современного состояния вопроса. Но всё же лучше было бы сгруппировать их по рассматриваемым в диссертационной работе вопросам с упоминанием только наиболее значимых достижений.
2. Не следовало бы так подробно описывать принцип работы СТМ, если целью работы не является создание новой установки или ее модернизация.
3. В работе правильно отмечено, что стандартные программы представления результатов измерения топологии поверхности проводят фильтрацию изображения, в связи с этим было бы интересно понять насколько обработка изображения может повлиять на фрактальную размерность.
4. Не определена погрешность каждого эффекта в отдельности, которые влияют на точность восстановления рельефа поверхности с помощью СТМ. Некоторые эффекты могут значительно превосходить по степени влияния все остальные, что сделает бессмысленным рассмотрение последних.
5. Следовало бы подробнее описать методику компьютерного эксперимента, поскольку описание взаимодействия острия иглы и поверхности является важным аспектом проведенных исследований;
6. Объем диссертации больше рекомендуемого (150 м/п страниц), соответственно отмечается ряд неточностей по тексту диссертации, в частности, диссертация Васильева С.Ю. «Туннельная микроскопия/спектроскопия гетерогенных электродных и электроосажденных материалов» была защищена не в 2016 году, а в 2010 году.

Высказанные замечания не снижают ценности диссертационной работы Антонова Александра Сергеевича, которая, безусловно, является научно-квалификационным исследованием, развивающим вопросы физики конденсированного состояния. Полученные в диссертации результаты обладают новизной и практической ценностью, опубликованные работы

отражают ее основное содержание. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

По своей актуальности, научной новизне и практической значимости, а также с учетом наличия 9 публикаций в центральных журналах, представленных в перечне ВАК, диссертационная работа Антонова Александра Сергеевича «Морфологические характеристики и фрактальный анализ металлических пленок на диэлектрических поверхностях» соответствует требованиям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней ВАК Министерства образования и науки РФ (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 № 842), предъявляемым к кандидатским диссертациям по физико-математическим наукам.

Автор работы, Антонов Александр Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник отдела 2101
Федерального государственного унитарного
предприятия «Центральный
научно-исследовательский
институт машиностроения»

А.Л. Кусов

«16 февраля 2018 года

Кусов Андрей Леонидович

Рабочий адрес: 141070, Московская область, г. Королёв, ул. Пионерская, дом 4.

Тел.: +7-916-356-01-40

E-mail: kusoval@tsniimash.ru

Специальность: 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

Подпись Кусова А.Л. удостоверяю
Главный ученый секретарь института,
доктор технических наук, профессор



Ю.Н. Смагин