

На правах рукописи

Николаевский Анатолий Владимирович *Н.В. Николаевский*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕСКОНТАКТНОГО
ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ НАНОСТРУКТУР
МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ТУННЕЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ**

Специальность 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный институт электроники и математики (технический университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Львов Борис Глебович

Официальные оппоненты: **Васичев Борис Никитович**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова», профессор

Соколов Игорь Викторович, кандидат технических наук, ГИЦ ФГУП «Исследовательский центр имени М. В. Келдыша», старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Защита диссертации состоится «29» мая 2012 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д.212.133.05 Московского государственного института электроники и математики (технического университета) по адресу: 109028, г. Москва, Б. Трехсвятительский пер., д.3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИЭМ.

Автореферат разослан «26» апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.212.133.05,
кандидат технических наук, доцент


Чернов А.А.

2012 А
15400

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

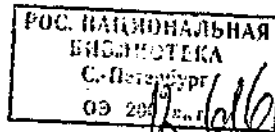
Актуальность работы

С развитием нанотехнологий в микро- и нанoeлектронике, в гетерогенном катализе, микромеханике, трибологии и других областях знаний значительное место занимают исследования различных явлений, происходящих на поверхности твердого тела. При этом поверхность рассматривается как основа для формирования и исследования латерально-ограниченных объектов нанометрового размера, основные свойства которых могут существенно отличаться от свойств макрокристаллов того же вещества.

В низкоразмерных системах, в частности в наноструктурах, количество вещества на поверхности и в объеме становятся соизмеримыми, поэтому роль поверхности как более активной составляющей существенно возрастает. Поверхностные наноструктуры с их особыми свойствами играют значительную роль в таких объектах, как сверхрешетки, высокодисперсные системы – адсорбенты и катализаторы, наполнители композиционных материалов, пленочные и мембранные системы, являющихся элементами изделий и оборудования электронной техники.

Современная электроника, двигаясь по пути миниатюризации, подходит к пределу характерных размеров основных элементов в 20 нм, при которых резервы дальнейшего улучшения параметров на основе дрейфово-диффузионного переноса носителей практически исчерпываются и определяющими становятся квантово-размерные и туннельные эффекты. При этом существенно усиливается влияние границ раздела отдельных элементов микросхем.

Актуальность проводимых исследований обусловлена перспективами применения нанoeлементов, полученных методами сканирующей туннельной микроскопии, в качестве активных и пассивных элементов устройств электроники, сенсоров различного назначения, потенциальным переходом нанотехнологий от лабораторных исследований к промышленному выпуску.



Низкие энергии туннелирующих электронов (десятки миллиэлектрон-вольт) в режиме измерения в совокупности с возможностью получения высокой напряженности электрического поля (10^8 В/см) и плотности электронного тока ($>10^9$ А/см²) в локальной области на поверхности в сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) позволяют совмещать метрологические и технологические функции, делая СТМ уникальным методом, позволяющим формировать и исследовать наноструктуры.

Современная сканирующая зондовая литография в основном представлена контактными методами пластической деформации: формирование или выравнивание рельефа подложки, селективное оксидирование. В то же время методам бесконтактной локальной модификации поверхности уделяется недостаточно внимания в связи со сложностью получения заведомо сконфигурированных геометрических областей, обусловленной далекодействующим характером электростатических сил.

Также весьма важным для применения сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) в широкомасштабных научных исследованиях является отслеживание и систематизация возможных механизмов возникновения артефактов, т.е. аппаратных эффектов, приводящих к наблюдению ложных или искаженных свойств исследуемого объекта.

В рамках данной работы проводились экспериментальные и теоретические исследования бесконтактного метода локальной модификации поверхности проводящих подложек методом сканирующей туннельной микроскопии.

Цели и задачи работы

Целью настоящей работы является создание воспроизводимой контролируемой наноструктуры на поверхности твердого тела методом сканирующей туннельной микроскопии для элементов изделий и оборудования электронной техники.

Для достижения поставленных целей в работе поставлены и решены следующие задачи:

- анализ искажений и ограничений методов сканирующей зондовой микроскопии и разработка методики, учитывающей их влияние на формирование нанобъектов и наноструктур;
- исследование процессов и определение режимов бесконтактного формирования нанобъектов и наноструктур на поверхности тонких пленок методами сканирующей зондовой микроскопии;
- исследование влияния параметров туннельного зазора на формирование нанорельефа на поверхности тонких пленок;
- проведение комплекса экспериментальных исследований локальной модификации поверхности тонких пленок;
- изучение структуры модифицированных участков поверхности;
- разработка методики создания, контроля и визуализации процессов бесконтактного формирования наноструктур на поверхности тонких металлических пленок на воздухе.

Научная новизна работы

1. Впервые разработана методика бесконтактной управляемой модификации поверхности тонких металлических пленок, применяемых в производстве электронных приборов, с образованием воспроизводимых объектов и структур нанометрового диапазона методом сканирующей туннельной микроскопии на воздухе.

2. Установлены основные физические процессы и факторы формирования нанометровых структур, приводящие к локальному изменению свойств поверхности образца под зондом СТМ и образованию нанорельефа, на основе которых предложены расчетные зависимости определения плотности токов электронной эмиссии, локального повышения температуры, электрического поля для массопереноса и пластической деформации для управляемого формирования заданного нанорельефа поверхности.

3. Установлены взаимосвязи между основными физическими характеристиками процесса взаимодействия зонд-поверхность (сила туннельного тока, напряжение между зондом и подложкой, скорость и шаг взаимодействия)

и характером модификации поверхности подложки, что позволило обеспечить воспроизводимое контролируемое формирование объектов и структур нанометрового диапазона.

4. На основе сравнительных экспериментальных исследований шаговых поверхностных структур методами сканирующей зондовой и растровой электронной микроскопии установлены и описаны эффекты занижения высоты профиля в СТМ режиме и эффект уширения профиля в режиме атомно-силовой микроскопии (АСМ).

5. Впервые определены основные закономерности влияния воздушного адсорбата на интерпретацию СТМ изображений: пятна адсорбата с размерами, соизмеримыми с расстоянием между зондом и образцом, воспроизводятся как возвышенности, а изображение сплошных участков скопления адсорбата сопровождается понижением рельефа относительно «чистой» поверхности. Установлен эффект формирования локализованных центров размером 50-100 нм, образованных скоплениями поляризованных молекул адсорбата под действием сильного электрического поля в межэлектродном зазоре.

6. Разработана методика локального удаления воздушного адсорбата с исследуемого участка поверхности при импульсном бесконтактном взаимодействии электродов СТМ, что обеспечивает значительное улучшение качества и достоверности получаемого изображения поверхности.

Практическая значимость работы

1. Предложенные методики позволяют осуществить технологические процессы бесконтактного формирования поверхностных наноструктур с заданной геометрией и размерами (5-20 нм) и сплошной модификации поверхности с образованием нанообъектов высокой плотности и увеличением поверхностной площади материала (до 40%), предназначенные для:

– создания элементной базы нанoeлектроники – наноконтактов и нанопроводников, квантовых точек и одноэлектронных транзисторов;

– повышения эффективности работы катализаторов и сенсоров путем увеличения поверхностной площади поверхностно-активных материалов для материалов;

– улучшения характеристик и выходных параметров лазеров и дисплеев на основе квантовых точек (низкое энергопотребление и интенсивность шума, нечувствительность к колебаниям температур).

2. Установленные закономерности и эффекты, приводящие к наблюдению ложных или искаженных свойств исследуемого объекта, позволяют правильно интерпретировать и использовать полученную с помощью СЗМ информацию.

Достоверность результатов

Достоверность проведенных теоретических исследований и представленных в работе экспериментальных результатов обеспечивается строгим математическим обоснованием предлагаемых подходов, результатами компьютерного моделирования, использованием современных экспериментальных методик, а также согласованностью полученных результатов с теоретическими и экспериментальными данными, имеющимися в российской и зарубежной литературе.

Реализация результатов работы

Результаты диссертации использованы в ФБГНУ «Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий» при проведении экспериментальных исследований материалов методами сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии и внедрены в учебный процесс МИЭМ, где используются при чтении лекций и проведении лабораторных работ по дисциплинам «Технология материалов и изделий электронной техники», «Устройства и элементы наномеханики».

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментальных исследований бесконтактного формирования наноструктур на поверхности тонких пленок золота и платины в воздушной среде.

2. Пороговые значения туннельного тока и приложенного поля, соответствующие необратимым изменениям рельефа поверхности тонких металлических пленок при СТМ воздействии на воздухе.

3. Основные закономерности бесконтактного формирования наноструктур: формирование выступов при отрицательной полярности на образце, впадин – при положительной полярности на образце.

4. Методика бесконтактной управляемой модификации поверхности тонких металлических пленок с образованием объектов нанометрового диапазона с заданной геометрией расположения методом сканирующей туннельной микроскопии на воздухе.

5. Результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния искажений и воздушного адсорбата на интерпретацию СЗМ информации: эффекты занижения высоты профиля в СТМ режиме и уширения профиля в АСМ режиме, основные закономерности отображения воздушного адсорбата СТМ изображениях.

6. Методика локального удаления адсорбата с исследуемого участка поверхности при импульсном бесконтактном взаимодействии СТМ электродов.

Методы исследования

Для решения поставленных задач использовались основные положения квантовой механики и математической физики.

Выполненные теоретико-экспериментальные исследования и практические расчеты базируются на использовании методов вычислительной математики, современных методов программирования и компьютерного моделирования.

Результаты представленных в диссертации экспериментальных исследований получены с использованием методов сканирующей туннельной, атомно-силовой и растровой электронной микроскопии.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

– "Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ" (Москва, 2007-2012 гг.),

– Научно-техническая конференция "Вакуумная наука и техника" (Сочи, 2009-2010 гг.),

– Международная научно-техническая конференция "Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов" (Алма-Ата, 2009 г.),

– 2 Всероссийская научная школа для молодежи "Концентрированные потоки энергии в индустрии наносистем, материалов и живых систем" (Москва, 2009 г.),

– Международная научно-техническая конференция "Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте" (Одесса, 2010 г.),

– VI Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодежи "Кадровое обеспечение развития инновационной деятельности в России" (Москва, 2010 г.),

– 1-ая и 2-ая Всероссийская школа-семинар студентов, аспирантов и молодых ученых по тематическому направлению деятельности национальной нанотехнологической сети "Функциональные наноматериалы для космической техники" (Москва, 2010-2011 гг.).

Публикации по теме работы

По теме диссертации опубликовано 19 работ, в том числе 3 статьи в научно-технических журналах и сборниках, 11 тезисов докладов и материа-

лов конференций по итогам научных мероприятий, 1 патент РФ на полезную модель. По результатам работы разработано 4 учебно - методических пособия.

Структура и объем работы

Диссертация изложена на 115 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 120 наименований, содержит 34 иллюстрации, 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, поставлены цели работы и задачи для ее достижения, определены объект и предметы исследования, сформулированы научная новизна и практическая ценность, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведены обзорно-аналитические исследования современного состояния нанотехнологий в электронике, методов формирования и применения наноструктур. Обоснована необходимость применения комбинированного технологического оборудования, сочетающего в себе возможность получения материалов и устройств с заданными свойствами и контроль параметров технологического процесса.

С учетом проведенных обзорно-аналитических работ намечены пути теоретических и экспериментальных исследований на базе метода сканирующей зондовой микроскопии, в основе которой лежит применение туннельного зонда для одновременного создания, контроля и визуализации объектов в нанометровых областях.

Вторая глава посвящена теоретическому обоснованию процессов формирования нанометровых структур методом сканирующей туннельной микроскопии.

Выявлены основные факторы, определяющие процессы зондовой нанотехнологии: локальные электрические поля, сравнимые с внутримолекулярными и атомными полями; сверхбольшие плотности токов до 10^9 А/см² и их

электродинамическое воздействие; сверхплотные локальные потоки тепла, вызванные протекающими токами; возможны и внешние иницирующие воздействия.

Выделены основные процессы, вызывающие необратимые изменения исследуемой поверхности:

– поверхностная ионизация – процесс, вызывающий испарение атомных слоев материала одного из электродов и осаждение атомов на противоположном электроде;

– автоэлектронная эмиссия – процесс, вызывающий разогрев острия и локальной области образца под действием токов эмиссии высокой плотности. Возможен сильный разогрев острия вплоть до взрывной эмиссии;

– поверхностная диффузия и пластическая деформация – изменение величины внешнего электрического поля может влиять на скорость химических реакций, протекающих на поверхности, и энергию связи частиц, вызывая поверхностную диффузию материала к острию зонда.

При исследовании и модификации поверхности тонких пленок методами СЗМ на воздухе решается задача туннелирования электронов в системе металл-диэлектрик-металл или металл-диэлектрик-полупроводник.

В работе приведена теоретическая модель взаимодействия зонд-образец на воздухе с выводом формулы туннельного тока в системе металл-диэлектрик-металл, в которой введены упрощающие положения:

– твердое тело (металл) представляется как трехмерная потенциальная яма с гладким дном (модель Зоммерфельда) и электроны между собой не взаимодействуют;

– так как все электроны считаются невзаимодействующими, то решение уравнения Шредингера для системы электронов сводится к решению уравнения Шредингера для одного электрона, движущегося в этом усредненном поле.

Пользуясь данной моделью, выведена формула расчета туннельного тока, протекающего в системе металл-диэлектрик-металл (М-Д-М), в случае потенциального барьера произвольной формы и допущения, что весь протекающий ток обусловлен туннельным эффектом, тогда

$$I = \frac{e^3 F^2}{8\pi^2 \hbar \phi_1 \beta^2} \exp\left(-\frac{2\beta}{eF} \phi_1^{1/2} \frac{\sqrt{2m}}{\hbar}\right)$$

Плотность тока электронной эмиссии рассчитывается по формулам Фаулера-Нордгейма:

$$j = 1.55 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{\phi} \exp\left(-6.836 \cdot 10^7 \phi^{1/2} \Theta / E\right), \quad \Theta = 0.935 - 10.79 \cdot 10^{-9} E / \phi^2,$$

где E – напряженность электрического поля, В/см, ϕ – работа выхода электрона из электрода, к которому приложено электрическое поле, В.

Сверхплотный пучок электронов, возникающий в зазоре зонд-подложка, вызывает на подложке локальный разогрев. Локальное повышение температуры по радиусу r вдоль поверхности от оси пучка для квазиизотропных подложек оценивается по формуле:

$$\delta T(r) = \frac{UI}{4\pi\kappa l} \left(2 \frac{l}{r} (1 - e^{-r/l}) - e^{-r/l} \right),$$

где κ – коэффициент термической проводимости подложки; l – длина неупругого рассеяния электронов в подложке.

Электростатическое поле E порождает нормальное к поверхности электродов механическое напряжение: $\sigma = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 E^2$, где ϵ – диэлектрическая проницаемость среды между электродами, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума. Это поле при $E > E_0$ (E_0 – электростатическое поле порога пластической деформации), где $E_0 = 2,1 \cdot 10^8 \tau^{1/2}$, В/см, (τ – пороговое значение механического напряжения, при котором наблюдается пластическая деформация, Па), достаточно для локальных упругих и пластических деформаций поверхности тонких пленок.

В главе даны также формулы расчета критического электрического поля E_m для образования молекулярных мостиков, электрического поля E_p^+ , достаточного для массопереноса в виде положительных ионов и E_p^- – для массопереноса в виде отрицательных ионов, расчета пондеромоторных объемных сил и давления электронного пучка на приповерхностный слой.

Совокупность указанных факторов и процессов приводит к локальному изменению свойств поверхности образца под зондом СТМ и образованию нанорельефа.

В третьей главе проведены экспериментальные исследования искажений изображений в сканирующей зондовой микроскопии.

На основе сравнительных экспериментальных исследований шаговых поверхностных структур с трапециевидным профилем (неоднородная поверхность Au на Si подложке, Al поверхность DVD диска) методами сканирующей зондовой и растровой электронной микроскопии установлены и описаны эффект занижения высоты профиля в СТМ режиме и эффект уширения профиля в АСМ режиме.

Эффект уширения профиля АСМ заключается в том, что отдельные микрообъекты, адсорбированные на плоскую подложку и визуализированные АСМ, имеют завышенные значения ширины профиля (рисунок 1).

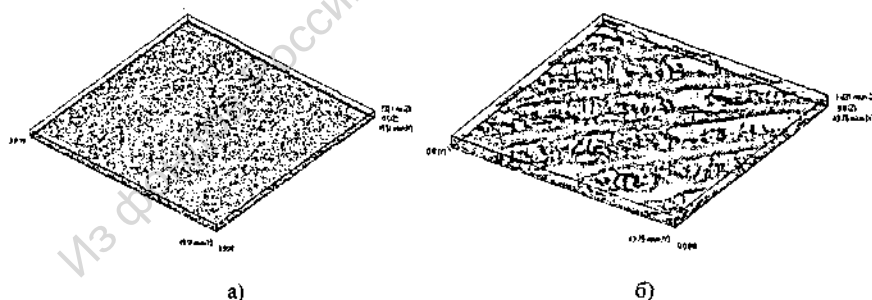


Рисунок 1 – Изображение поверхности неоднородной Au пленки на Si подложке методами СТМ (а) и АСМ (б)

Это связано с конечным радиусом кривизны острия АСМ зонда, который не может быть уменьшен без увеличения давления в области контакта,

что, в свою очередь, приведет к частичному разрушению зонда и образца при исследовании поверхности.

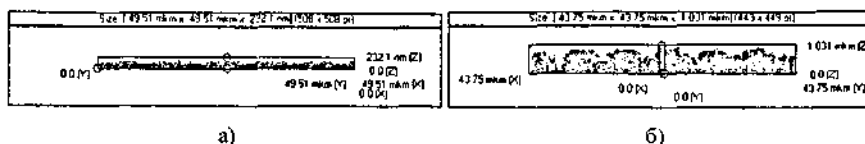


Рисунок 2 – Эффект занижения рельефа в СТМ-изображении (а) по сравнению с АСМ-изображением (б)

Эффект занижения высоты профиля в СТМ-режиме (рисунок 2) проявляется при исследовании отдельно расположенных проводящих объектов с большими высотными характеристиками на полупроводящей или непроводящей структуре. При переходе с проводящего объекта на непроводящую подложку зонд перестает “чувствовать” поверхность и отводится, при этом не происходит сличения выходного параметра (туннельного тока или зазора) и определения его разности. Таким образом, высота профиля такого образца определяется шероховатостью его вершины.

Скопление молекул воздушного адсорбата создает дополнительный потенциальный барьер, неоднородный на разных участках поверхности исследуемого объекта, что приводит к неравномерному распределению электронных свойств поверхности и регистрации дополнительного псевдорельефа в получаемом изображении при проведении СТМ исследований.

Рассмотрена физическая модель пятна адсорбата с работой выхода ϕ_a , представленного в виде дипольного пласта на металлической поверхности с работой выхода ϕ_s . Нормальная компонента электрического поля E_z вдоль центральной оси z дипольного диска радиуса r с удельным дипольным моментом d равна:

$$E_z = \pm 2\pi d \left[\frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2}} - \frac{z^2}{(r^2 + z^2)^{3/2}} \right].$$

В пределе, при большом диске адсорбата либо при большом расстоянии от пятна $E_z \rightarrow 0$ и максимальна при $r \sim z$.

Определены и экспериментально установлены основные закономерности влияния воздушного адсорбата на интерпретацию СТМ изображений: пятна адсорбата с размерами, соизмеримыми с туннельным зазором, воспроизводятся как возвышенности, а изображение сплошных участков скопления адсорбата сопровождается понижением рельефа относительно «чистой» поверхности.

Разработана методика локального удаления воздушного адсорбата с исследуемого участка поверхности при импульсном бесконтактном взаимодействии электродов СТМ, позволяющего в радиусе до 20 микрон от места воздействия исключить искажение геометрических размеров элементов рельефа на изображении поверхности.

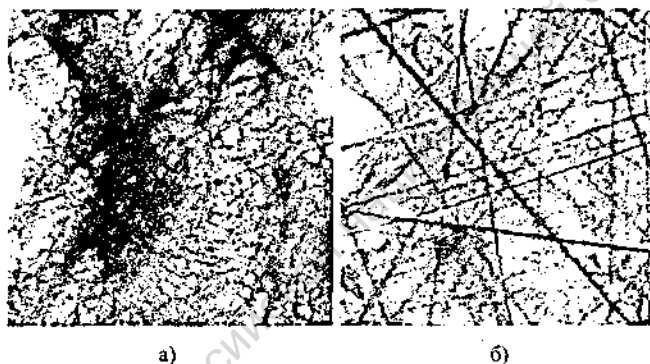


Рисунок 3 – Изображение поверхности тонкой пленки платины, полученное при первичном СТМ сканировании (а) и после кратковременного воздействия с повышенным напряжением (б)

На рисунке 3 представлены изображения участка поверхности платины до и после указанного воздействия. Предварительное сканирование выбранного участка поверхности проводилось с параметрами: ток $I=3$ нА, напряжение $U=50$ мВ, шаг $Step=14,7$ Å, скорость $V=36,85$ мкм/с, число измерений в точке $Meas=8$, при положительной полярности на образце. Затем в нижней части полученного изображения была выбрана узкая (в несколько проходов зонда) область и просканирована с повышенным напряжением ($U=1500$ мВ), скоростью ($V=72,34$ мкм/с) и шагом ($Step=40,5$ Å). После этого вновь прово-

дилось сканирование первоначального участка в режиме исследования поверхности.

Установлен эффект скопления поляризованных молекул адсорбата под действием сильного электрического поля в межэлектродном зазоре с образованием локализованных центров размером 50-100 нм (рисунок 4).

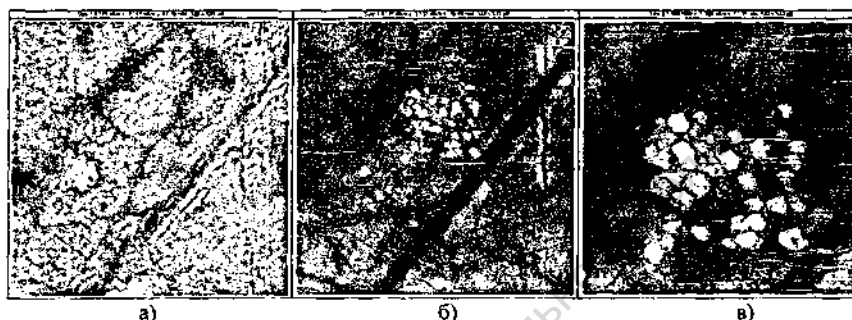


Рисунок 4 – Адсорбат на поверхности тонкой пленки платины: а) СТМ изображение исходной поверхности (3.149 x 3.149 мкм), б) СТМ изображение поверхности после воздействия с параметрами: $i=10$ нА, $U=1500$ мВ, $Step=14,7$ Å, $V=18,43$ мкм/с, $Meas=16$, в) скопление поляризованных молекул адсорбата после воздействия (1.568 x 1.568 мкм)

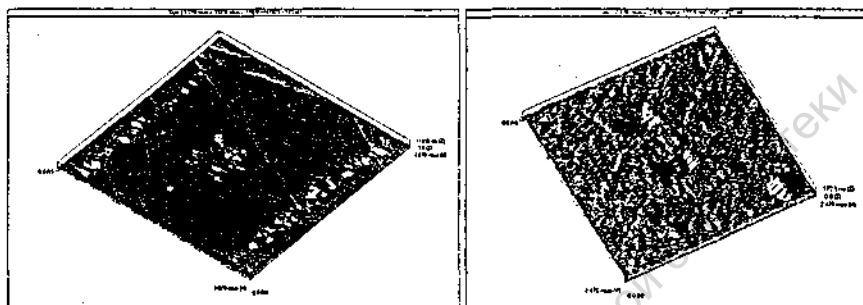
Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию процессов бесконтактного формирования упорядоченных поверхностных наноструктур методом сканирующей туннельной микроскопии.

Проводилось последовательное изменение режимов сканирования с целью определения пороговых значений плотности тока и приложенного поля, соответствующим необратимым изменениям морфологии поверхности, и осуществления управляемой модификации рельефа поверхности тонкой металлической пленки платины на воздухе. Диапазон изменения туннельного тока I – от 0,5 до 16 нА, диапазон напряжения в зазоре зонд-образец U – от 50 до ± 2500 мВ.

Установлено, что формирование выступов на СТМ-изображении происходило при отрицательном напряжении на образце. При перемене полярно-

сти (плюс на образце) участок, где проводилось сканирование при повышенном напряжении, воспроизводился как впадина (рисунок 5).

Определено, что оптимальный режим для осуществления управляемого воздействия находится в узком диапазоне значений туннельного тока 12-16 нА и напряжения 2000-2300 мВ при шаге 7-15 Å, и скорости $V=50-80$ мкм/с.



а) Pt 3.078 мкм × 3.078 мкм

б) Pt 2.476 мкм × 2.476 мкм

Рисунок 5 – Изображения поверхности тонкой пленки Pt, модифицированной:

а) при отрицательной полярности на образце с параметрами воздействия:

$I=10$ нА, $U=2000$ мВ, $Step=7,37$ Å, $V=12,3$ мкм/с, $Meas=8$

б) при положительной полярности на образце с параметрами воздействия:

$I=13$ нА, $U=2000$ мВ, $Step=7,37$ Å, $V=10,5$ мкм/с, $Meas=8$

Перед воздействием на выбранный участок размером 6×6 мкм осуществлялось точечное бесконтактное воздействие с целью удаления адсорбата с исследуемой поверхности. Контрольные исследования поверхности проводились при следующих параметрах: $I=3$ нА, $U=50$ мВ, $Step=14,7$ Å, $V=36,85$ мкм/с, $Meas=8$. Проведена серия последовательных геометрически сконфигурованных воздействий на поверхность пленки (в сочетании с промежуточными контрольными измерениями) с параметрами: $I=16$ нА, $U=2200$ мВ, $Step=14,7$ Å, $V=73,70$ мкм/с, $Meas=8$.

В результате получен участок с заданной геометрией модификации поверхности (рисунок 6).

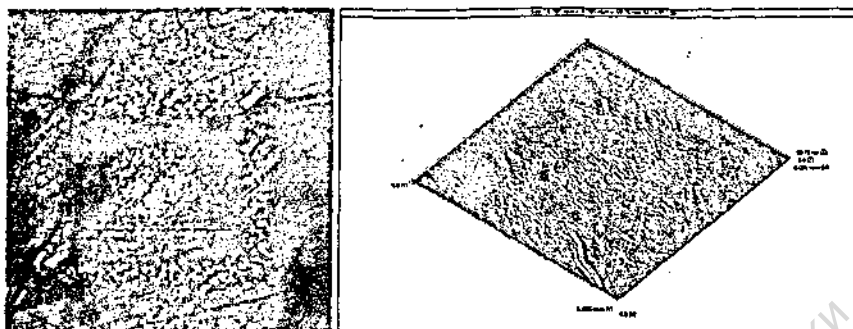


Рисунок 6 – Модифицированная поверхность Pt

Также получены модифицированные участки поверхности на площадке размером 5×5 мкм при воздействии с повышенным напряжением $U=2300$ мВ, что в свою очередь стало причиной увеличения плотности размещения модификации, однако не повлияло на высоту полученных наноструктур (рисунок 7). Определение параметров шероховатости изображаемой поверхности проводилось по профилю, полученному в заданном сечении. На рисунке 8 представлены результаты измерения шероховатости по профилю сечения исходной поверхности и модифицированной области.

Возникающая в результате сплошной модификации пластическая деформация тонкой пленки Pt приводит к увеличению поверхностной площади поверхности на 30-40%, что связано с регулярным образованием нанобъектов высокой плотности (рисунок 9).

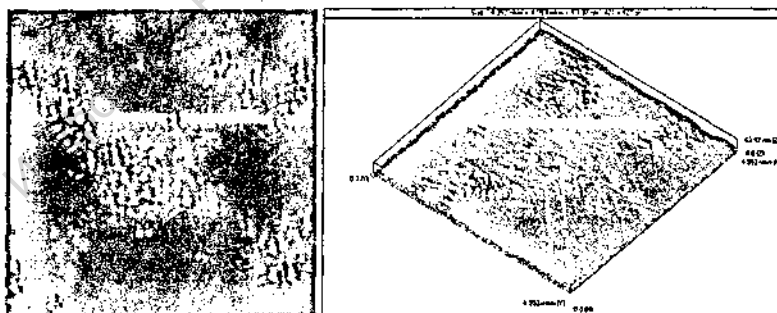
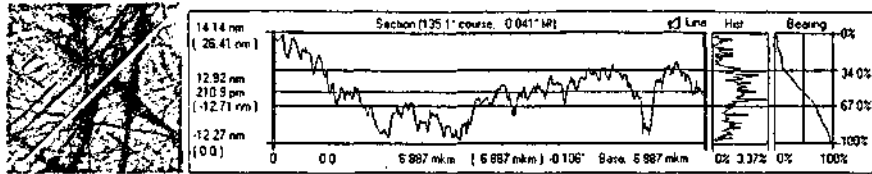
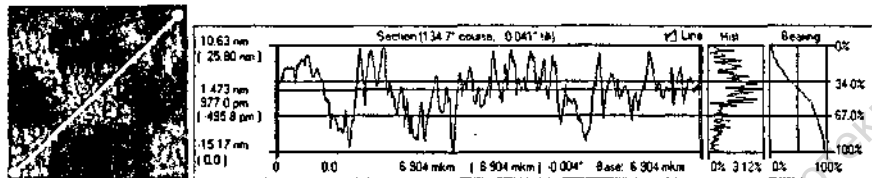


Рисунок 7 – Модифицированная поверхность Pt, полученная при воздействии с параметрами: $I=16$ нА, $U=2300$ мВ, $Step=14,7$ А, $V=73,70$ мкм/с, $Meas=8$

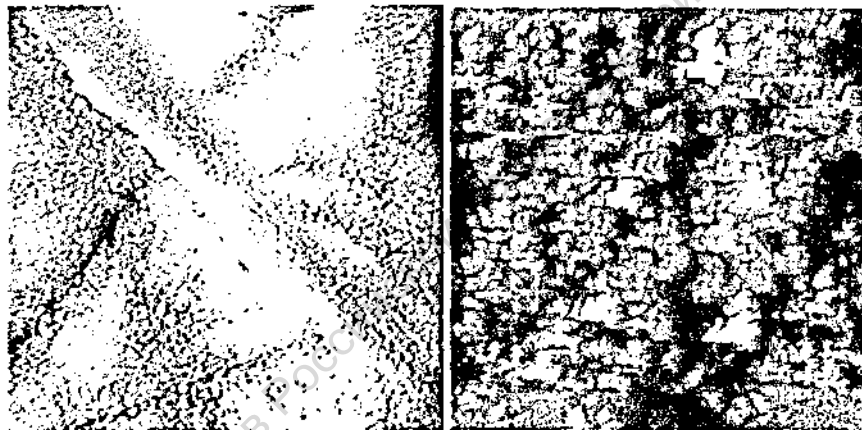


а) шероховатость по профилю исходной поверхности тонкой пленки Pt в заданном сечении



б) шероховатость по профилю модифицированной области тонкой пленки Pt в заданном сечении

Рисунок 8 – Измерение шероховатости поверхности по профилю до и после воздействия



а) Pt 520.0 nm × 520.0 nm
(исходная поверхность)

б) Pt 2.0 мкм × 2.0 мкм
(модифицированная поверхность)

Рисунок 9 – Изменение морфологии поверхности тонкой пленки Pt в результате электрополевой пластической деформации

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выделены основные процессы, вызывающие необратимые изменения исследуемой поверхности: поверхностная ионизация, вызывающая испарение атомных слоев материала одного из электродов и осаждение атомов на противоположном электроде, автоэлектронная эмиссия, вызывающая разогрев острия и локальной области образца под действием токов эмиссии высокой плотности, поверхностная диффузия материала к острию зонда, возникающая при изменении значений внешнего электрического поля, и пластическая деформация.

2. Предложены расчетные зависимости определения плотности токов электронной эмиссии, локального повышения температуры, электрического поля для массопереноса с целью осуществления воспроизводимого формирования заданного нанорельефа поверхности.

3. Установлены взаимосвязи между основными физическими характеристиками процесса взаимодействия зонд-поверхность (сила туннельного тока, напряжение между зондом и подложкой, скорость и шаг взаимодействия) и характером модификации поверхности подложки, что позволило обеспечить воспроизводимое контролируемое формирование латерально-ограниченных объектов и структур нанометрового диапазона.

4. Проведено комплексное экспериментальное исследование влияния параметров туннельного зазора СТМ на формирование геометрически сконфигурированных наноструктур на воздухе. Определен пороговый характер формирования наноструктур тонких пленок платины и золота, установлено, что управляемая модификация рельефа поверхности происходит в диапазоне тока 10-16 нА, напряжений 2100-2300 мВ; выявлено, что при отрицательной полярности на образце происходит формирование выступов, а в случае воздействия при положительной полярности на образце – формирование впадин.

5. На основе сравнительных экспериментальных исследований шаговых поверхностных структур методами сканирующей зондовой и растровой элек-

тронной микроскопии установлены и описаны эффекты занижения высоты профиля в СТМ режиме и уширения профиля в АСМ режиме.

6. Установлено влияние воздушного адсорбата на интерпретацию СТМ изображений: пятна адсорбата размерами, соизмеримыми с расстоянием между зондом и образцом, воспроизводятся как возвышенности, а изображение сплошных участков скопления адсорбата сопровождается понижением рельефа относительно исследуемой «чистой» поверхности; выявлен эффект формирования локализованных центров размером 50-100 нм, образованных скоплениями поляризованных молекул адсорбата под действием сильного электрического поля в межэлектродном зазоре.

7. Разработана методика локального удаления воздушного адсорбата с исследуемого участка поверхности при импульсном бесконтактном взаимодействии электродов СТМ ($I=5$ нА, $U=1500$ мВ, $V=72,34$ мкм/с, $Step=40,5$ Å), что обеспечивает значительное улучшение качества и достоверности получаемого изображения поверхности.

8. Разработана методика бесконтактной управляемой модификации поверхности тонких металлических пленок ($I=12-16$ нА, $U=2200-2300$ мВ, $Step=14,7$ Å, $V=73,70$ мкм/с), применяемых в производстве электронных приборов, с образованием объектов нанометрового диапазона методом сканирующей туннельной микроскопии на воздухе. Продемонстрирована возможность одновременного создания, контроля и визуализации процессов модификации поверхности с помощью сканирующей туннельной микроскопии.

9. Предложенные методики позволяют осуществить технологические процессы бесконтактного формирования поверхностных наноструктур с заданной геометрией и размерами (5-20 нм), а также сплошной модификации поверхности с образованием нанообъектов высокой плотности и увеличением поверхностной площади материала (до 40%), предназначенные для:

– создания элементной базы нанoeлектроники – наноконтактов и нанопроводников, квантовых точек и одноэлектронных транзисторов;

- повышения эффективности работы катализаторов и сенсоров путем увеличения поверхностной площади поверхностно-активных материалов для материалов;

- улучшения характеристик и выходных параметров лазеров и дисплеев на основе квантовых точек (низкое энергопотребление и интенсивность шума, нечувствительность к колебаниям температур).

10. Установленные закономерности и эффекты, приводящие к наблюдению ложных или искаженных свойств исследуемого объекта, позволяют правильно интерпретировать и использовать полученную с помощью СЗМ информацию.

Публикации автора по теме диссертации

1. Николаевский А. В. Анализ методов сканирующей зондовой микроскопии на примере топографии поверхности толстых пленок Pt и Au / А. В. Николаевский // Тезисы докладов "Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ". – М.:МИЭМ, 2007. – С. 348.

2. Николаевский А. В. Локальная модификация поверхности тонкой пленки платины методом сканирующей туннельной микроскопии / Б. Г. Львов, А. В. Николаевский // Матер. XVI науч.-техн. конф. "Вакумная наука и техника". – М.: МИЭМ, 2009. – С. 171-174.

3. Николаевский А. В. Локальная модификация поверхности методом сканирующей туннельной микроскопии / В. И. Кузькин, Б. Г. Львов, А. В. Николаевский // Матер. межд. науч.-техн. конф. "Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов". – М.: МГИУ, 2009. – С. 846-853.

4. Николаевский А. В. Исследование формирования наноструктур на поверхности тонких пленок Pt методом сканирующей туннельной микроскопии / Б. Г. Львов, А. В. Николаевский // Труды 2 всероссийской научной школы для молодежи "Концентрированные потоки энергии в промышленности наносистем, материалов и живых систем". – М.: МИЭМ, 2009. – С. 243-250.

5. Николаевский А. В. Применение сканирующей туннельной микроскопии для повышения каталитической активности тонких пленок платины / Б. Г. Львов, А. В. Николаевский // Тез. докл. международной науч.-техн. конф. "Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте 2010". – Одесса, 2010. – С. 148-152.

6. Николаевский А.В. Бесконтактное формирование нанорельефа поверхности методом сканирующей туннельной микроскопии / А.В. Николаевский // Современные наукоемкие технологии. –2010. – №8. – С. 104-106.

7. Николаевский А. В. Исследование геометрических свойств рельефа поверхности методами сканирующей зондовой микроскопии / А. В. Николаевский // Тезисы докладов "Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ", – М.:МИЭМ, 2010. – С. 328.

8. Николаевский А. В. Ограничения сканирующей зондовой микроскопии при исследовании поверхностных наноструктур / А. В. Николаевский // Тезисы докладов 1-ой всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по тематическому направлению деятельности национальной нанотехнологической сети "Функциональные наноматериалы для космической техники". – М.:МИЭМ, 2010. – С. 176-179.

9. Николаевский А. В. Туннельно-зондовая технология формирования поверхностных структур нанометрового диапазона / А. В. Николаевский // Тезисы докладов VI Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи "Кадровое обеспечение развития инновационной деятельности в России". – М.:РГУИТП, 2010. – С. 87-90.

10. Николаевский А. В. Экспериментальное исследование процессов формирования поверхностных структур методом сканирующей зондовой микроскопии / А. В. Николаевский // Тезисы докладов "Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ". – М.:МИЭМ, 2011. – С. 315.

11. Николаевский А. В. Локальное изменение рельефа поверхности при модификации импульсом напряжения в сканирующем туннельном микроскопе / А. В. Николаевский // Тезисы докладов 2-ой всероссийской школы-семинара

студентов, аспирантов и молодых ученых по тематическому направлению деятельности национальной нанотехнологической сети "Функциональные наноматериалы для космической техники". – М.:МИЭМ, 2011. – С. 164-167.

12. Николаевский А.В. Исследование процессов электрополевого воздействия туннельного зазора на поверхность металлизированных тонких пленок / Б. Г. Львов, А. В. Николаевский // Вакуумная техника и технология. – 2011. – Т. 21, № 2. – С. 113-114.

13. Николаевский А.В. Получение монокристаллов натрий-ванадиевых бронз и исследование их физико-химических и эмиссионно-геттерных характеристик / Е. Э. Дунаева, Л. И. Ивлева, Б. А. Логинов, А. В. Николаевский, В. В. Осико, В. С. Петров, Н. Н. Степарева // Российские нанотехнологии – 2011. – Т. 6, № 5-6. – С. 115-120.

14. Николаевский А. В. Влияние воздушного адсорбата на достоверность изображения поверхности тонких металлизированных пленок в сканирующей туннельной микроскопии / А. В. Николаевский // Тезисы докладов "Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ". – М.:МИЭМ, 2012. – С. 259.

15. Патент на полезную модель № 72796 Российская Федерация, МПК7 H02H3/00. Устройство локального измерения температуры поверхности / Е. Н. Ивашов, В. И. Кузькин, А. В. Николаевский; заявитель и патентообладатель МИЭМ. Москва.; заявл. 13.12.2007; опубл. 27.04.2008. Бюл. № 19.

16. Николаевский А. В. Исследование качества изображения рельефа поверхности тестового образца в зависимости от параметров сканирования в СТМ режиме микроскопа СММ-2000 / В. И. Кузькин, Б. Г. Львов, А. В. Николаевский // Методические указания к лабораторной работе по курсу "Устройства и элементы наномеханики". – М.: МИЭМ, 2008.

17. Николаевский А. В. Обработка и анализ изображений в сканирующем зондовом микроскопе СММ-2000 / В. И. Кузькин, Б. Г. Львов, А. В. Николаевский // Методические указания к лабораторной работе по курсу "Устройства и элементы наномеханики". – М.: МИЭМ, 2008.

18. Николаевский А. В. Исследование сканирующей туннельной литографии в сканирующем зондовом микроскопе СММ-2000 / В. И. Кузькин, Б. Г. Львов, А. В. Николаевский // Методические указания к лабораторной работе по курсу "Устройства и элементы наномеханики". – М.: МИЭМ, 2008.

19. Николаевский А. В. Сканирующая зондовая микроскопия в исследовании поверхностной структуры наноматериалов / Г. Г. Бондаренко, Б. Г. Львов, А. В. Николаевский // Методическое пособие для проведения семинарского занятия с элементами инженерного тренинга / Подготовлено для 1-й Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по тематическому направлению деятельности национальной нанотехнологической сети "Функциональные наноматериалы для космической техники". – М.: МИЭМ, 2010.

Из фондов Российской национальной библиотеки

Подписано к печати " 19 " апреля 2012 г.
Отпечатано в отделе оперативной полиграфии МИЭМ.
Москва, ул. М. Пионерская, д. 12.
Заказ № 72. Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз.

Из фонда Российской национальной библиотеки

Из фондов Российской национальной библиотеки

2012A
15400
12-15400

3

Из фондов Российской национальной библиотеки

616