

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ЗОЛОТА НА СЛЮДЕ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ТУННЕЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ

© 2009 Т. Ю. Зыков, Н. Ю. Сдобняков, В. М. Самсонов, А. Н. Базулев, А. С. Антонов

Тверской государственный университет, Садовый пер. 35, 170002 Тверь, Россия

Поступила в редакцию 27.09.2009 г.

Аннотация. В данной работе проведено исследование поверхности тонких металлических пленок золота на диэлектрической подложке (слюде) с помощью сканирующего зондового микроскопа в режиме СТМ (сканирующего туннельного микроскопа). Определены характерные линейные размеры рельефа поверхности объектов (впадин и выступов), а также фрактальная размерность гетероструктур.

Ключевые слова: сканирующая туннельная микроскопия, тонкие пленки золота, фрактальная размерность.

ВВЕДЕНИЕ

Наноразмерные по толщине пленки различных материалов находят широкое применение во всех направлениях нанотехнологии. Особый интерес представляют собой 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. Получать такие пленки можно различными способами. Главное условие — технологический процесс должен осуществляться в условиях, далеких от равновесия. Во-первых, для обеспечения неравновесных условий при получении пленок используется специальная предварительная обработка подложек перед напылением, в том числе и с помощью облучения поверхности подложек потоком ускоренных ионов различных материалов и в разных технологических режимах [1]. Во-вторых, исследуется возможность влияния на структуру получаемых пленок с помощью различных температурных режимов на поверхности подложки. Оба подхода оказываются достаточно эффективными для получения наноразмерных пленок с фрактальной структурой. Необходимо отметить существующую зависимость между структурой и морфологией получаемых пленок и особенностями технологических режимов их получения, что открывает определенные перспективы в направлении получения пленок с заранее заданными свойствами.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В нашей работе объектом исследования на нанотехнологическом комплексе «УМКА-02G» был выбран образец «золото на слюде». Известно, что одним из недостатков СТМ является ограничение на проводимость образцов. Так как слюда является хорошим изолятором, то получение адекватных результатов морфологии поверхности образца в данном случае невозможно. Эта проблема решается с помощью технологии вакуумного напыления. Технология напыления основана на создании направленного потока частиц (атомов, молекул или кластеров) наносимого материала на поверхность образцов и их конденсации в условиях вакуума (10^{-1} — 10^{-7} Па). Данный процесс включает несколько стадий: переход напыляемого вещества или материала из конденсированной фазы в газовую, перенос молекул газовой фазы к поверхности изделия, их конденсацию на поверхности, образование и рост зародышей, формирование пленки. Принципиально возможны и реализуемы на практике два механизма конденсации молекулярных пучков испаренных веществ на различных подложках: пар-кристалл (ПК) и пар-жидкость-кристалл (ПЖК). Если реализуется механизм ПК, то частицы, конденсирующиеся на начальных стадиях испарения навески, имеют кристаллическое строение, и в дальнейшем формируется только кристаллическая пленка. Механизм ПЖК проявляется в том, что образование конденсированной фазы на подложке начинается с появления на ней

жидкой фазы в виде капель, которые длительное время существуют на поверхности, после чего начинается процесс кристаллизации. Механизмы кристаллизации определяют различные типы формирования и роста пленки из паровой фазы, что, в конечном счете, определяет свойства пленок [2]. Для напыления золота на образец слюды наиболее оптимальным является механизм пар-кристалл (ПК) [3]. Данная процедура, во-первых, увеличивает проводимость образца, что дает возможность исследовать его на СТМ, а во-вторых, предотвратит появления окисла на поверхности, что даст хорошую повторяемость результатов с минимальным количеством паразитных артефактов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведен результат сканирования рельефа образца «золото на слюде» (размер области сканирования $0,19 \times 0,19$ мкм). При анализе поверхности подложки на наноуровне установлено, что ее структурные образования расположены равномерно и имеют размеры, значительно меньшие нанотехнологической границы 100 нм во всех направлениях, т.е. относятся к наноструктурным образованиям (характерный размер порядка 40 нм). Толщина пленки варьируется в широких пределах, на поверхности имеются структуры, отличающиеся по размерам. По нашей оценке, глубина впадин лежит в пределах 30 нм, а высота пиков не превышает 60 нм.

Метод напыления в вакууме позволяет создать общую структурную модель проводящих покры-

тий, с помощью которой можно будет направленно создавать пленки с заданным комплексом свойств, а также разрабатывать новые методы нанесения золота на различные поверхности. Использование методов туннельной микроскопии позволяет изучать свойства поверхностей, полученных с помощью вакуумного напыления, в частности, структуру покрытий. Отметим также, что в настоящее время метод туннельной микроскопии находит все более широкое использование для определения линейных размеров микронных и наноразмерных структур, которые находят свое применение в производстве элементной базы современной электроники [4—7], а также является одним из тестовых методов качества поверхности образцов. С практической точки зрения, кроме высокой точности при получении трехмерных изображений поверхности, главным достоинством туннельной микроскопии является возможность оперативного контроля изделий без их разрушения, поскольку измерения не требуют специальной подготовки образца и могут проводить в воздухе, или какой либо другой среде, в течение нескольких минут. Контроль геометрических параметров наночастиц с размерами до 100 нм имеет большое значение для обеспечения определенных свойств кластерных материалов на их основе. При использовании сканирующего туннельного микроскопа для такого контроля необходимо существенное повышение требований к его характеристикам, что обусловлено, прежде всего, массовым характером производимых измерений.

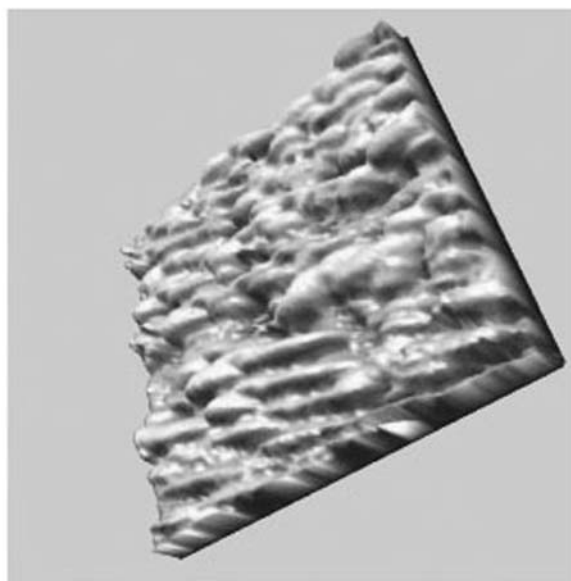


Рис. 1. Результат сканирования рельефа образца «золото на слюде» (размер области сканирования $0,19 \times 0,19$ мкм, левый рисунок — вид сверху, правый рисунок — вид сбоку).

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 [8]. 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 [9], 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 [10, 11]. В [10] для расчета фрактальной размерности кластеров, образующихся в процессе роста пленок при различных температурах подложки и скорости напыления золота полученные АСМ или СТМ изображения морфологии поверхности покрывались двумерной 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 образуют структурные объекты — кластеры. Яркость того или иного элемента изображения свидетельствует о принадлежности или непринадлежности этого элемента к исследуемому кластеру (см. рис. 3). 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 кото-

рых определяется взаимным расположением занятых ячеек. Описанный метод определения фрактальной размерности был модифицирован в соответствии с [11], поскольку нами учитывалось изменение рельефа (высоты поверхности), что является своего рода аналогом метода триангуляции [12].

Для характеристики основного свойства фрактальных объектов — самоподобия их внутренней структуры, можно ввести понятие фрактальной размерностью D_f , определяемой из соотношения:

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

где N — число частиц в кластере, R — линейный размер кластера, a — размер частиц, из которых состоит кластер. Если структура объекта самоподобна, то график зависимости натурального логарифма числа частиц от натурального логарифма размера объекта будет линейным [12—14], 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. Для образца «золото на слюде» (см. СТМ изображение рис. 2) нами было прове-

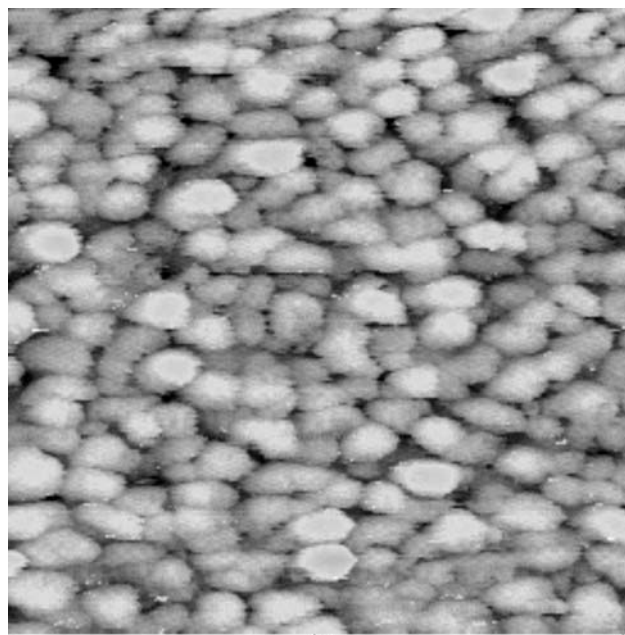


Рис. 2. Результат сканирования рельефа образца «золото на слюде» (размер области сканирования $0,2 \times 0,2$ мкм) для изучения фрактальной структуры покрытия.

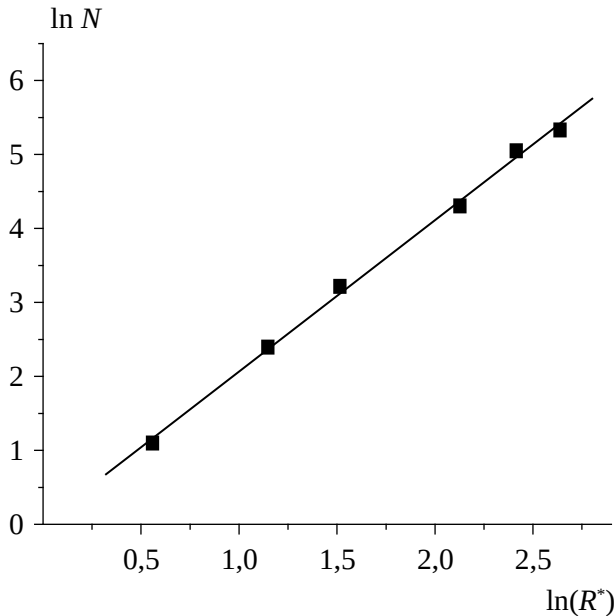


Рис. 3. Зависимость числа частиц от приведенного размера $R^* = R/a$ кластера для всей поверхности образца. Фрактальная размерность для исследуемого образца $D_f = 2,09 \pm 0,01$.

дено исследование поверхности и отдельных образований покрытия с точки зрения обнаружения фрактальной структуры.

На рис. 3 приведен график зависимости (в дважды логарифмической шкале) числа частиц от размера кластера для всей поверхности образца, полученный с помощью метода вложенных квадратов. Для изучения наличия фрактальной структуры у отдельных объектов изображение разбивалось сеткой квадратов равной площади, и к каждой области в отдельности применялся метод вложенных квадратов. Анализ полученных зависимостей показывает, что для поверхности в целом наблюдается линейная зависимость, 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. 4), что позволяет провести анализ распределения отдельных фрагментов покрытия по фрактальной размерности, а также установить величину фрактальной размерности, преобладающей для данной поверхности. Для поверхности нашего образца наиболее вероятное значение фрактальной размерности лежит в диапазоне $2,25 \leq D_f \leq 2,50$.

Отметим также, что результаты работы [10] не обнаруживают самоподобия для всей поверхности исследуемых образцов, однако для отдельных кластеров фрактальная структура обнаруживается. Примечательно, что для всех исследованных в [10] образцов фрактальная размерность профиля $D_L \leq 1.9$. При этом по нашим оценкам на поверхности исследуемого образца были обнаружены кластеры с максимальной размерностью $D_f \approx 2,9$. Таким образом, полученные результаты в целом удовлетворяют уравнению связи фрактальной размерности профиля и поверхности [11, 12]:

$$D_L = D_f - 1. \quad (2)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования показано, что напыление тонких металлических пленок золота на диэлектрической подложке (слюде) позволяет приготовить образцы, удовлетворяющие требованиям при работе со сканирующим зондовым микроскопом в режиме СТМ. При этом сохраняется информация об особенностях морфологии отдельных объектов поверхности размером менее 100 нм. На примере образца «золото на слюде» нами определены линейные размеры отдельных объектов поверхности (впадин и пиков) и исследованы отдельные участки поверхности на наличие фрактальных структур. Установлено, что система кластеров на поверхности исследуемого нами образца является фрактальной. Кроме того, для каждого кластера в отдельности зависимость натурального логарифма

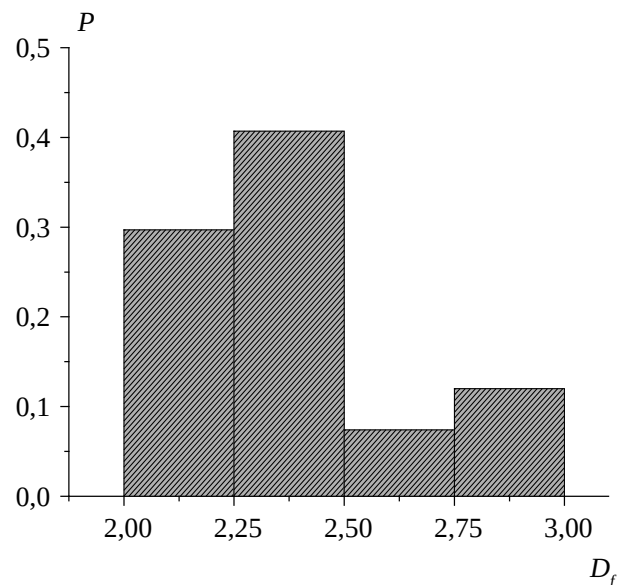


Рис. 4. Распределение вероятности P обнаружения на поверхности исследуемого образца кластеров с определенной фрактальной размерностью.

рифма частиц от натурального логарифма размера кластера близка к линейной, что позволяет в целом считать структуру отдельных кластеров фрактальной. Таким образом, имея возможность сопоставлять данные о режиме вакуумного напыления (плотности пучка, времени напыления и др.), а также рельефе поверхности, можно разработать технологии по «выращиванию» поверхности с заданной наноструктурой. Отметим также, что при исследовании поверхности образцов важными факторами, влияющими как на толщину получаемых пленок (увеличивается скорость роста и слияния островковых пленок), плотность структуры, так и на физические свойства пленок являются скорость осаждения наночастиц на диэлектрическую подложку и температура подложки.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 07-03-00243-а). Авторы выражают благодарность сотрудникам АНО «ИНАТ МФК» и лично директору Ананяну М. А. за предоставленные образцы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серов И.Н. и др. // Микросистемная техника. 2004. № 1. С. 31.
 2. Комник Ю.Ф. Физика металлических пленок. М.: Атомиздат, 1979. 264 с.
 3. Костржицкий А.И. и др. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме. М.: Машиностроение, 1991. 176 с.
 4. Драгунов В. П. и др. Основы нанoeлектроники. М.: Физматкнига, 2006. 496 с.
 5. Антоненко С.В., Малиновская О.С., Мальцев С.Н. // Приборы и техника эксперимента. 2007. Т. 50. № 4. С. 123.
 6. Антоненко С.В., Малиновская О.С., Мальцев С.Н. // ЖЭТФ. 2007. Т. 132. № 1. С. 227.
 7. Антоненко С.В., Малиновская О.С., Мальцев С.Н. // Нанотехника. 2007. № 3 (11). С. 8.
 8. Смирнов Б.М. Физика фрактальных кластеров. М.: Наука, 1991. 156 с.
 9. Шалаев В.М., Штокман М.И. // ЖЭТФ. 1987. Т. 92. № 2. С. 509.
 10. Белко А.В., Никитин А.В., Стрекаль Н.Д., Герман А.Е. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. № 5. С. 11.
 11. Торхов Н.А., Божков В.Г., Ивонин И.В., Новиков В.А. // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43. Вып. 1. С. 38.
 12. Федер Е. Фракталы. М: Мир, 1991. 260 с.
 13. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
 14. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. М.: Постмаркет, 2000. 350 с.
-
- Зыков Тимур Юрьевич* — младший научный сотрудник кафедры теоретической физики Тверского государственного университета; тел.: (920) 690-4558; e-mail: firmweb@ya.ru
- Szykov Timur Y.* — the minor scientific employee of chair of the theoretical physics, Tver State University; e-mail: firmweb@ya.ru
- Сдобняков Николай Юрьевич* — доцент кафедры теоретической физики Тверского государственного университета; тел.: (903) 075-9377; e-mail: nsdobnyakov@mail.ru
- Sdobnyakov Nickolay Y.* — the senior lecturer of chair of the theoretical physics, Tver State University; e-mail: nsdobnyakov@mail.ru
- Самсонов Владимир Михайлович* — профессор, заведующий кафедрой теоретической физики Тверского государственного университета; тел.: (4822) 421-487; e-mail: samsonoff@inbox.ru
- Samsonov Vladimir M.* — professor, the chief of chair of the theoretical physics, Tver State University; e-mail: samsonoff@inbox.ru
- Базулев Анатолий Николаевич* — доцент кафедры теоретической физики Тверского государственного университета; тел.: (920) 690-4558; e-mail: tolikbn@mail.ru
- Bazulev Anatolii N.* — the senior lecturer of chair of the theoretical physics, Tver State University; e-mail: tolikbn@mail.ru
- Антонов Александр Сергеевич* — младший научный сотрудник кафедры теоретической физики Тверского государственного университета; тел.: (920) 690-4558; e-mail: tolikbn@mail.ru
- Antonov Alexander S.* — the minor scientific employee of chair of the theoretical physics, Tver State University; e-mail: s014451@mail.ru