

УДК 539.25+620.18

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ОСТРОВКОВЫХ ПЛЁНОК ЗОЛОТА НА СЛЮДЕ**

**Н. Ю. Сдобняков, Т. Ю. Зыков, А. Н. Базулев, А. С. Антонов**

Тверской государственный университет

*кафедра теоретической физики*

Проведено исследование поверхности тонких пленок золота на диэлектрической подложке (слюде) с помощью сканирующего зондового микроскопа в режиме СТМ. Определены характерные линейные размеры рельефа (впадин и выступов), а также фрактальная размерность профиля и поверхности плёнок.

**Ключевые слова:** островковые тонкие плёнки, сканирующая зондовая микроскопия, фрактальная размерность

## **DETERMINATION OF THE FRACTAL DIMENSIONS OF ISLAND FILMS OF GOLD ON MICA**

**N. Yu. Sdobnyakov, T. Yu. Zykov, A. N. Bazulev, A. S. Antonov**

A study is made of the surface of thin films of gold on dielectric substrate (mica) using a scanning probe microscope in STM regime. The characteristic linear sizes of the relief (peaks and cavities) and fractal dimensions of the profile and surface of the films were determined.

**Keywords:** island thin films, scanning probe microscopy, fractal dimensions

**Введение.** Наноразмерные по толщине пленки различных материалов находят широкое применение в 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 применяется предварительная обработка подложек перед напылением, в том числе и с помощью облучения их поверхности потоком ускоренных ионов различных материалов [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 морфологией получаемых пленок и особенностями технологических режимов их получения, что открывает

определенные перспективы в направлении получения пленок с заранее заданными свойствами.

**Эксперимент.** 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 данных о 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. 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. Метод напыления в вакууме позволяет создать общую структурную модель проводящих покрытий, 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 применение для определения линейных размеров микронных и наноразмерных структур, которые находят свое применение в производстве элементной базы современной электроники [2-5], 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 проводиться на воздухе или в 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.

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.



Рис. 1. Результат сканирования рельефа образца «золото на слюде» (размер области сканирования  $0,19 \times 0,19$  мкм).

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 [6].

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 [7], и, следовательно, 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 и объемных электронных изображений в виде конечного дискретного множества простых элементов. Кроме того, учитывалось изменение

рельефа поверхности. Анализ изображений проводился по методике, изложенной в работах [8; 9]. В [8] 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 («пустого») и верхнего («занятого»). 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/непринадлежности этого элемента к исследуемому кластеру (см. рис. 2). После ввода границ области находится центр масс кластера, а после покрытия исследуемой области квадратами различного размера производится 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 [9], поскольку нами также учитывалось изменение рельефа (высоты поверхности), что является своего рода аналогом метода триангуляции [10].

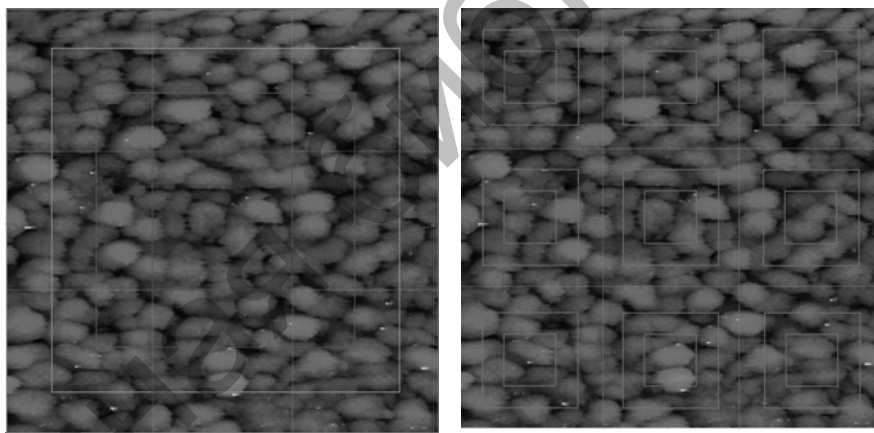


Рис. 2. Результат сканирования рельефа образца «золото на слюде» (размер области сканирования  $0,2 \times 0,2$  мкм) для изучения фрактальной структуры покрытия (левый рисунок – для исследования структуры в целом, правый рисунок – для исследования отдельных кластеров).

Для характеристики основного свойства фрактальных объектов - самоподобия их внутренней структуры, можно ввести понятие фрактальной размерности  $D$ , определяемой из соотношения:  $N = (R/a)^D$ , 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 линейной [10-12], 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 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 проведено исследование поверхности и отдельных образований покрытия с точки зрения обнаружения фрактальной структуры различной размерности.

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 как для размерности профиля, так и для размерности поверхности, и следовательно, структура поверхности является фрактальной.

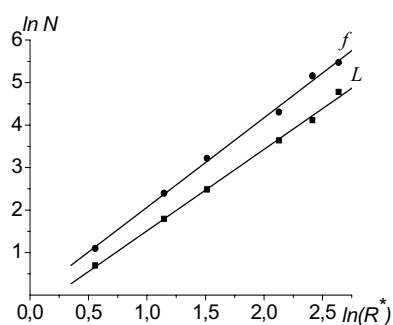


Рис. 3. Зависимость числа частиц от приведенного размера  $R^* = R/a$  кластера для всей поверхности образца. Фрактальные размерности исследуемого образца: профиль –  $D_L = 1,91 \pm 0,05$ , поверхность –  $D_f = 2,10 \pm 0,06$ .

Для описания системы фрактальных кластеров недостаточно определить фрактальную размерность какого-либо кластера в отдельности. Для изучения структуры используют также построение гистограммы вероятности обнаружения кластеров с определенной фрактальной размерностью на определенных участках поверхности (рис. 4), 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 нашего образца наиболее вероятное значение фрактальной размерности лежит соответственно в диапазоне  $1,75 \leq D_L \leq 2,00$  и  $2,25 \leq D_f \leq 2,50$ .

Отметим также, что результаты работы [8] не обнаруживают самоподобия для всей поверхности исследуемых образцов, однако для отдельных кластеров фрактальная структура обнаруживается. Примечательно, что для всех исследованных в [8] образцов фрактальная размерность профиля  $D_L \leq 1,9$ . При этом на исследуемом образце были обнаружены кластеры с максимальными размерностями профиля и поверхности соответственно  $D_L \approx 1,9$  и  $D_f \approx 2,9$ . Таким образом, полученные результаты для отдельных кластеров в целом удовлетворяют уравнению связи фрактальной размерности для профиля и поверхности [9, 10]:  $D_L = D_f - 1$ . При этом важно отметить, что распределение вероятности  $P$  в исследуемом образце кластеров с определенной фрактальной размерностью профиля и поверхности не является симметричным, хотя в нем и наблюдается тенденция наличия соответствия минимумов и максимумов, что также косвенно подтверждает выполнения уравнения связи.

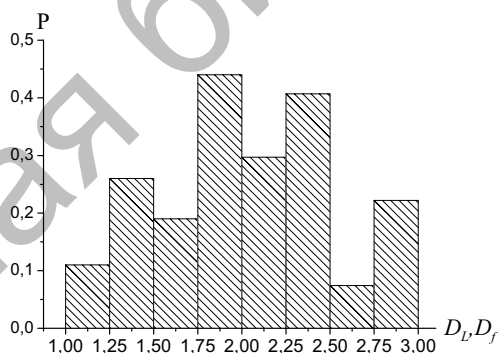


Рис. 4. Распределение вероятности  $P$  обнаружения в исследуемом образце кластеров с определенной фрактальной размерностью профиля  $1 < D_L < 2$  и поверхности  $2 < D_f < 3$ .

**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 профиля и 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 частиц от натурального логарифма размера кластера близка к линейной, что позволяет в целом считать структуру отдельных кластеров профиля и поверхности 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.

Авторы выражают благодарность директору АНО «ИНАТ МФК» М.А. Ананяну и его сотрудникам за предоставленные образцы.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 07-03-00243-а).

#### **Список литературы**

1. Серов И.Н. и др. Получение и исследование наноразмерных пленок меди с фрактальной структурой // Микросистемная техника. 2004. № 1. С. 31-38.
2. Драгунов В.П. и др. Основы нанoeлектроники. М.: Физматкнига, 2006. 496 с.
3. Антоненко С.В., Малиновская О.С., Мальцев С.Н. Синтез углеродных нанотрубок методом токового отжига графитовой бумаги // Приборы и техника эксперимента. 2007. Т. 50. № 4. С. 123-124.
4. Антоненко С.В., Малиновская О.С., Мальцев С.Н. Электрофизические свойства углеродных пленок, содержащих многостенные нанотрубки // ЖЭТФ. 2007. Т. 132. № 1. С. 227-229.
5. Антоненко С.В., Малиновская О.С., Мальцев С.Н. Различные вариации углерода и их применение. Новые углеродные нанообъекты // Нанотехника. 2007. № 3 (11). С. 8-14.

6. Смирнов Б.М. Физика фрактальных кластеров. М.: Наука, 1991. 156 с.
7. Шалаев В.М., Штокман М.И. Оптические свойства фрактальных кластеров (восприимчивость, гигантское комбинационное рассеяние на примесях) // ЖЭТФ. 1987. Т. 92. № 2. С. 509-521.
8. Белко А.В. и др. Фрактальная структура кластеров золота, образованных при осаждении в вакууме на диэлектрические подложки // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. №5. С. 11-15.
9. Торхов Н.А., Божков В.Г., Ивонин И.В., Новиков В.А. Определение фрактальной размерности поверхности эпитаксиального n-GaAs в локальном пределе // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43. Вып. 1. С. 38-47.
10. Федер Е. Фракталы. М: Мир, 1991. 260 с.
11. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований. 2002. 656 с.
12. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. М.: Постмаркет. 2000. 350 с.

*Об авторах:*

СДОБНЯКОВ Николай Юрьевич – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры теоретической физики ТвГУ;

ЗЫКОВ Тимур Юрьевич – студент магистратуры Высшей школы экономики;

БАЗУЛЕВ Анатолий Николаевич – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры теоретической физики ТвГУ;

АНТОНОВ Александр Сергеевич – студент магистратуры физико-технического факультета ТвГУ.