



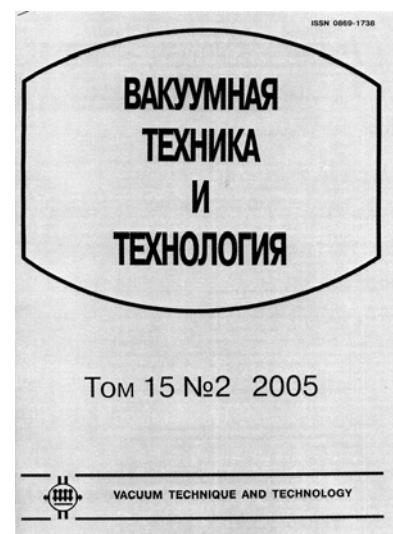
ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ТОНКИХ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК

Потехин М.С.¹, Солтовская И.А.², Тупик В.А.¹,
Фантиков В.С.¹

¹ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», E-mail: v.margolin@mail.ru

² ФРНМТ «Айрэс», E-mail: foundation@aires.fund

Представлены результаты исследования топологии и структуры тонких наноразмерных пленок меди и титана с фрактальной структурой методами оптической, растровой электронной и атомно-силовой микроскопии. Для получения пленок были использованы фрактально-матричные структуризаторы.



Естественные науки начали интенсивно исследовать объекты и структуры, размеры которых измеряются в пределах нанометров, что обусловило появление терминов «наномир» и «нанотехнологии». Для описания наномира применяют и законы квантовой механики и законы классической физики, но его объекты уже нельзя рассматривать как абсолютно одинаковые и статистически неразличимые. Все они индивидуальны, и одна наночастица отличается от другой наночастицы составом, строением и множеством других параметров и невозможно игнорировать наличие неоднородности и нерегулярности в структуре объекта и пользоваться для его описания интегральными характеристиками, как это принято в классической физике. Многие процессы, характерные для наномира, происходят в условиях далеких от равновесного состояния, а объекты наномира чаще всего представляют собой открытые системы, обменивающиеся с внешней средой веществом, энергией и информацией. Вследствие этого для описания процессов и физических явлений, протекающих в наномире, приходится использовать аппарат нелинейной динамики, а для исследования объектов наномира использовать понятия и методы фрактальной физики.

Одними из наиболее интересных объектов нанотехнологии являются фрактальные наноразмерные пленки (ФНРП), свойства которых отличаются от свойств обычных наноразмерных пленок, что открывает большие перспективы для их использования в технике и технологии. Фрактальные структуры получают в открытых нелинейных динамических системах в условиях, далеких от равновесного состояния, например, с помощью метода магнетронного ионного распыления при определенных условиях. Полученные в неравновесных условиях после прекращения технологического процесса такие структуры стремятся к равновесному состоянию, вследствие чего в них продолжается процесс их эволюции. По всей видимости, было бы неверно определять эти процессы как деградацию или старение, поскольку речь не идет об ухудшении каких-то характеристик или процессах распада, скорее здесь был бы более уместен термин созревание, но мы полагаем, что термин эволюционирование вполне адекватно и самодостаточно описывает эти процессы.

Для получения ФНРП был выбран метод ионного магнетронного распыления, как наиболее полно отвечающий перечисленным выше требованиям. Поскольку необходимым условием является получение пленок в условиях, далеких от равновесия, то на поверхности под ложки, на которую напыляется ФНРП необходимо создать требуемые условия. На рис. 1 представлена микрофотография поверхности наноразмерной медной пленки (оптическая микроскопия, размер марки 20 мкм), выращенной методом ионного магнетронного распыления на подложке из оптически полированного стекла К-8 (обычное фотошаблонное

стекло) в стандартных условиях, в соответствии со всеми канонами общепринятой теории конденсации [1,2]. Эта пленка полностью повторяет структуру подложки и с точки зрения фрактальной физики особого интереса не представляет.

Надо особо отметить, что целью микротехнологий всегда было получение именно таких пленок, полностью повторяющих структуру подложки, которая для этого специально обрабатывалась, чтобы максимально уменьшить ее шероховатость, дефектность и неоднородность. Получение пленок, имеющих какую-то свою собственную структуру, являлось производственным браком, на борьбу с которым расходовались немалые силы и средства. Поэтому, несмотря на то, что пленки, подобные ФНРП, известны, исследованиями как методов получения таких пленок, так и их свойств практически никто не занимался.



Рис.1. Микрофотография медной пленки, полученной магнетронным распылением в стандартных условиях

Возможно получение ФНРП при специальной подготовке подложек, но процессы зарождения и роста фрактальных структур в этом случае полностью протекают в условиях самоорганизации, поэтому невозможно внести какое-либо организующее или директивное начало, если не считать мало осуществимую возможность предварительного создания на поверхности подложки упорядоченной структуры из каких-либо нанообъектов. Однако для этих целей можно воспользоваться специально преобразованным электромагнитным полем. Преобразованием электромагнитных полей с целью создания в фокальной области определенной структуры максимумов и минимумов интерференционной картины (светового поля), возникающей за счет дифракции первичного электромагнитного излучения, занимается научная школа В.А. Сойфера, заложившего основы новой науки - компьютерной оптики [3]. Одной из задач быстроразвивающейся компьютерной оптики является создание специального дифракционного оптического элемента (ДОЭ) для преобразования электромагнитного поля, падающего на плоскость ДОЭ, в определенную конфигурацию максимумов и минимумов.

Применение бинарных или полутонных ДОЭ позволяет сформировать в пространстве световое поле достаточно сложной конфигурации, причем его структурная сложность определяется возможностями вычислительной техники и программного обеспечения для решения прямой и обратной дифракционной задачи. Мы использовали для своих исследований фрактально-матричные структуризаторы (ФМС) «Айрэс» [4]

Необходимо отметить, что ФМС представляют собой чрезвычайно сложную дифракционную решетку, в которой за счет пересечения образующих ее линий получается большое количество фрагментов, которые можно рассматривать как индивидуальные дифрагирующие элементы. Число таких элементов в ФМС последних разработок может достигать 400000, и хотя все они и самоподобны, поскольку строится структура ФМС по фрактальному принципу, но имеют разную конфигурацию и размеры. Это обеспечивает

ФМС значительную широкополосность при обработке электромагнитного излучения, причем минимальная длина волны определяется размером вершины угла, образованного пересечением двух линий, а максимальная длина волны максимальными размерами самого большого элемента, т.е. в принципе диаметром ФМС.

Формирование тонкопленочных слоев меди, титана, алюминия и никеля проводилось на установке магнетронного напыления, разработанной на базе переоборудованного и модифицированного стандартного вакуумного поста ВУП-4. На вакуумном колпаке установки закреплено магнетронное распылительное устройство с диаметром катода 40 мм, расстояние катод - подложка равно 80 мм. В установке предусмотрена подача на рабочий стол постоянного потенциала в пределах - 300... + 300 В. Магнетронное устройство изготовлено на базе бариевого магнита и позволяет легко производить смену катода. При стандартном отработанном режиме катодное напряжение составляло величину порядка 900 В, ток газового разряда до 2,5 А, время напыления варьировалось от 10 до 35 с, в качестве рабочего газа использовался аргон с рабочим давлением в камере $3 \cdot 10^{-4}$ мм. рт. ст. при величине остаточного вакуума $3 \cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст.

Визуальный контроль осуществлялся методами оптической микроскопии с помощью интерферометра МИИ-4 и оптических микроскопов OLYMPUS BX60 (в режимах темного и светлого полей), Wild Epimakroskop M-450 и SM-LUX HL с регистрацией полученного изображения цифровыми камерами VNC-702 и «Minolta Dimage 7». Анализ деталей фрактальных структур в микро- и наномасштабе осуществляли методами атомно-силовой микроскопии (Solver P47 и Solver P47H) и электронной микроскопии на сканирующих электронных микроскопах Hitachi S-3500N и JSM-35, оснащенных детекторами вторичных электронов и детекторами обратно рассеянных электронов «Robinson», с возможностью увеличения от 15 до 300000 крат и вариации ускоряющего напряжения от 0,3 до 30 кВ. Исследования фазового и химического состава осуществлялось методами рентгеновской дифрактометрии на установке Дрон-2, а микрозондовый анализ осуществлялся на рентгеновском микроанализаторе энергодисперсионного типа Link 860.

При визуальном исследовании под микроскопом образцов медных фрактальных пленок, полученных под воздействием ФМС, наблюдается следующая картина: на периферии стеклянной пластины пленка состоит из достаточно хаотичной системы мелких зерен, имеющих вид кольцевых и мелких куполообразных структур приблизительно одинакового размера. Наблюдается некий общий порядок расположения этих элементов, как это показано на рис. 2. Поскольку структура топологии ФМС имеет радиальную симметрию - в центре наиболее плотное заполнение, плавно уменьшающееся к периферии, то естественно ожидать, что и структура получаемых пленок будет подобна структуре фрактальной топологии.

По мере продвижения от края к центру пластины происходит увеличение диаметра кольцевых образований, при этом наблюдается рост разнообразия элементов от мелких до более крупных. Наблюдаются кольцевые и куполообразные элементы и образования более сложной формы. В средней зоне подложки наблюдается конкуренция между элементами одного типа между собой и элементами разных типов, что приводит к их взаимному проникновению и искажению первоначальной формы структурных образований, как это показано на рис. 3. Надо отметить, что в этой области наблюдается уже многоуровневая система. Внутри кольцевых образований растут мелкие куполообразные структуры типа зародышевых следующего уровня самоподобия. В зоне центрального пятна имеются крупные кольцевые образования, высота стенки которых достигает в отдельных случаях единиц микрон. Причем следует отметить, что кольцевые образования, локализованные в центральной зоне, имеют существенно более сложную структуру, чем расположенные в периферийной зоне.

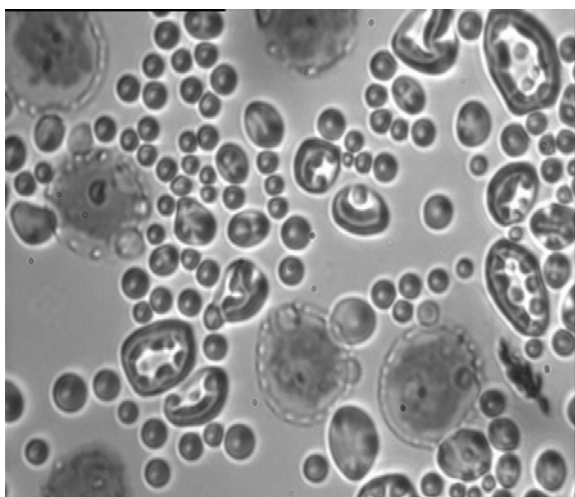


Рис.2. Микрофотография медной пленки, полученной магнетронным распылением под воздействием ФМС, край подложки, марка - 20 мкм

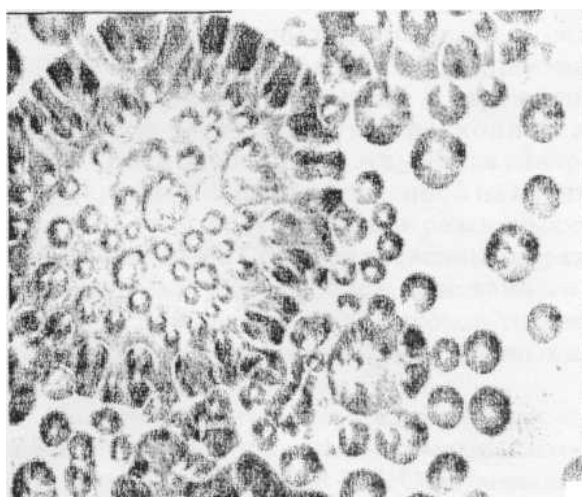


Рис.3. Микрофотография медной пленки, полученной магнетронным распылением под воздействием ФМС, средняя зона подложки, марка — 20 мкм

Во внутреннем пространстве элементов, расположенных в центральной зоне, укрупняются зародышевые зерна, причем их расположение носит не хаотический характер. Форма самих кольцевых образований изменяется и сильно деформируется (рис. 4). Вне этих крупных кольцевых образований наблюдаются более мелкие кольцевые элементы различного диаметра и куполообразные элементы, причем как изолированные один от другого, так и имеющие сложную взаимопроникающую структуру. Общая картина представляет собой сложное фрактальное образование, имеющее, по нашим соображениям и наблюдениям, несколько уровней самоподобия.

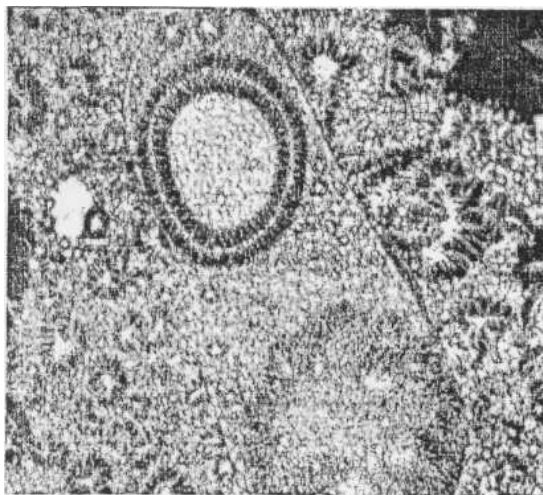


Рис.4. Микрофотография медной пленки, полученной магнетронным распылением под воздействием ФМС, центральная зона подложки, марка — 20 мкм

Надо отметить, что наблюдаются различные виды упорядоченности, куполообразные структуры могут выстраиваться в цепочки, образовывать линейные и взаимно пересекающиеся структуры, а также четкие спиралевидные структуры. К сожалению, нам пока не удалось обнаружить явную и бесспорную корреляцию между характером упорядочения получаемых структур, технологическими режимами их получения и взаимным расположением и фрактальной топологией структуризаторов.

Для более углубленных исследований топологии и морфологии получаемых пленок и степени их фрактальности использовался метод растровой электронной микроскопии в различных точках и на различных образцах. При этом один и тот же локальный участок образца сканировался при различных степенях увеличения, что позволило при дальнейшей обработке полученных результатов определять фрактальную размерность локальных структур и оценивать наличие масштабной инвариантности, которая является неотъемлемым свойством фрактальных структур.

Пример такого подхода приведен на рис.5 и рис.6, на которых показано сформированное в режиме истинно-вторичных и отраженных электронов электронно-микроскопическое изображение одного и того же участка наноразмерной медной пленки, нанесенной на кремниевую подложку, полученное при различных степенях увеличения. При этом косвенным образом по методу Яковица-Ньюбери, основанного на зависимости К-фактора от массовой толщины пленки, определялась толщина исследуемых пленок с помощью программы TFOS.

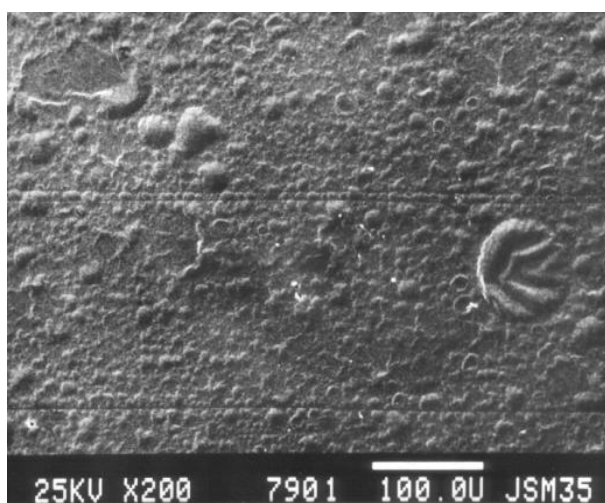


Рис.5. РЭМ изображение локального участка ФМП

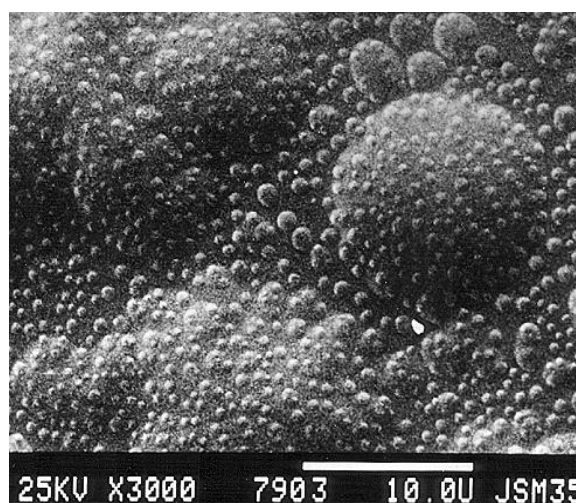


Рис.6. РЭМ изображение локального участка ФМП

На рис. 7 представлены результаты исследования полученных фрактальных медных пленок с помощью ACM SOLVER P47. Отчетливо видна фрактальная структура первого уровня (большие купола) и структура второго уровня. Заманчивым является возможность директивного управления ростом и расположением как больших куполообразных структур, так и структур следующих уровней. Реализация на практике методов подобного управления позволила бы получать на подложке структуры, выросшие в соответствии с принципами самоорганизации и самосогласования, однако не спонтанно, а под воздействием директивного упорядочивающего фактора. Это позволило бы в перспективе получать на подложке систему из упорядоченно расположенных образований одного типа или набор систем из образований различного типов, что явилось бы значительным шагом к реализации идеи выращивания на подложке одновременно в одном технологическом цикле требуемой структуры, т.е. реализации принципов групповой обработки на нанотехнологическом уровне.

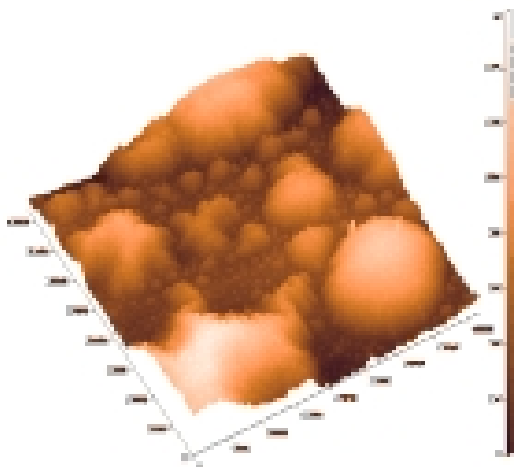


Рис.7. АСМ изображение локального участка ФМНП

Заключение

В результате комплекса проведенных исследований обнаружено влияние фрактально-матричных структуризаторов на процессы, протекающие при конденсации тонких наноразмерных пленок из парогазовой или плазменной среды с использованием методов магнетронного ионно-плазменного напыления. Обнаруженные экспериментально факты представляют большой интерес как с чисто практической точки зрения, так и с точки зрения углубления представлений о процессах конденсации материалов и образования твердотельных фаз.

Summary

Results of research of topology and structure thin nano-dimensional films are submitted to copper and titan with fractal structure methods of optical, scanning electron and atomic-power force microscopy. For reception films have been used fractal-matrix structurizators.

Литература

1. Барвинок В.А. Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления /В.А. Барвинок, В.И. Богданович. - М: Машиностроение, 1999. - 309 с.
2. Кукушкин С.А. Процессы конденсации тонких пленок / С.А. Кукушкин, А.В. Осипов // УФН. Т. 168, № 10. 1998. С. 1083- 1116.
3. Методы компьютерной оптики / Под ред.В.А. Сойфера. - М.: Физматлит, 2000. – 688 с.
4. Патент РФ № 2249862. Устройство для структурирования электромагнитного поля. Серов И.Н. МПК G 12 В 17/02 Приоритет от 02.07.2004, Зарегистрировано 10.04.2005, Опубл. 10.04.2005, Бюл. № 10