



УДК 538.95

Исследование влияния фрактально-матричных резонаторов на структуру пленок меди

© И.Н. Серов¹, В.И. Марголин¹, В.А. Мошников², С.В. Кошечев²,
А.И. Максимов², Н.А. Потсар², Д.Б. Чеснокова²

¹ Исследовательский центр Фонда развития новых медицинских технологий "Айрэс", Санкт-Петербург,

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ".

Проведены исследования влияния фрактально-матричных резонаторов на структуру пленок меди, полученных методом магнетронного ионного напыления. Приведены результаты оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии и атомно-силовой микроскопии. Установлено формирование многоуровневой фрактальной топологии, проявляющейся в закономерном образовании системы холмов в микро- и наномасштабе.

Развитие субмикронной технологии и нанотехнологии приводит к прогрессирующему уменьшению размеров производимых элементов электронной техники и, соответственно, элементов их структуры. В идеале представляется возможным реализовать технологию атомной сборки, заключающуюся в осуществлении переноса отдельных атомов или кластеров с помощью туннельно-зондовых методов прямо на подложку. К сожалению, все методы индивидуальной обработки являются практически нереализуемыми вследствие чрезмерно больших затрат времени на процесс создания даже однородной пленки, не говоря уже об организованной структуре. Поэтому представляется целесообразным обратиться к применению групповых методов обработки, позволяющих за один цикл обрабатывать значительные площади подложки.

Применение традиционных литографических методов, таких, как фото-, рентгено-, или электроно-литография невозможно в связи с техническими трудностями изготовления соответствующего шаблона для переноса изображения. В качестве методов обработки возможно использование какого-либо адекватного физического агента, обеспечивающего инициацию процессов осаждения тонкопленочной структуры по определенной закономерности. Иницируемые таким агентом неоднородности должны играть роль центров зародышеобразования. Таковым агентом может быть структурированное электромагнитное поле, создающее на поверхности подложки упорядоченную систему максимумов и минимумов. Осаждение тонких пленок под таким воздействием позволяет получить тонкопленочные структуры, существенно отличные от тех, кото-

рые получаются при условиях, соответствующих классической теории конденсации.

Дальнейшая инициация роста тонкопленочных структур на таких центрах приводит к формированию тонких наноразмерных пленок с фрактальной (основанной на принципах самоподобия) структурой, т.е. получению отдельных локальных участков тонкой пленки с фрактальной топологией.

Недавно было установлено, что при использовании фрактально-матричных резонаторов "Айрэс" (в дальнейшем структуризаторов, что методически более обоснованно), изменяются свойства пленок меди, нанесенных с помощью магнетронного ионного напыления [1]. Основой этих структуризаторов является синтезированная по определенному алгоритму штриховая голограмма, представляющая собой сложную криволинейную дифракционную решетку с размером штриха порядка 1,0 мкм.

Целью настоящей работы являлось углубленное изучение влияния фрактально-матричных резонаторов на изменение структуры пленок меди, с помощью методов оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии и атомно-силовой микроскопии.

В качестве подложек были выбраны пластины оптически полированного монокристаллического кремния с ориентацией $\langle 100 \rangle$ и пластины из оптического стекла.

Формирование слоев меди проводилось на установке магнетронного напыления, разработанной

на базе переоборудованного и модифицированного стандартного вакуумного поста ВУП-4. Визуальный контроль осуществлялся методами оптической микроскопии с помощью интерферометра МИИ-4 и оптических микроскопов OLYMPUS BX60 в режимах темного и светлого поля и SMLUX HL с регистрацией полученного изображения цифровой камерой VNC-702 и цифровым фотоаппаратом "Minolta Dimage 7".



Рис. 1 Топология медной пленки, сформированная под воздействием фрактально-матричного структуризатора.

Анализ деталей фрактальных структур в микро- и наномасштабе осуществляли методами атомно-силовой микроскопии (сканирующий зондовый микроскоп AutoProbe M5) и электронной микроскопии на сканирующем электронном микроскопе HITACHI S-3500N, оснащенный детектором вторичных электронов и детектором обратно рассеянных электронов "Robinson" с возможностью увеличения от 15 до 300000 крат и вариации ускоряющего напряжения от 0,3 до 30 кВ.

Тонкие пленки, полученные магнетронным напылением без участия в процессе фрактально-матричных структуризаторов, практически полностью повторяли поверхностную структуру подложки и не имели элементов упорядоченности и самоорганизованности в полном соответствии с классической теорией конденсации [2, 3]. Топология слоев меди, сформированных с применением структуризаторов, обладала явными признаками фрактального характера (рис 1).

Анализ результатов визуального наблюдения с помощью обычной и вы-

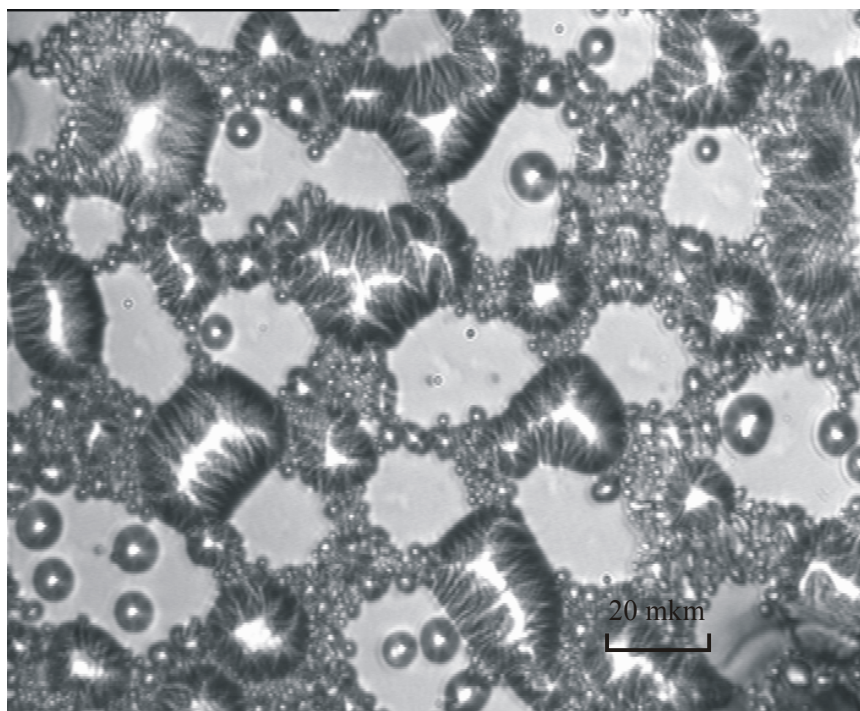


Рис.2 Квазирегулярная фрактальная структура, сформированная под воздействием фрактально-матричного структуризатора.

сокоразрешающей оптической микроскопии позволяет охарактеризовать следующие особенности распределения локальных неоднородностей по поверхности пленок. Во-первых, все пленки представляют собой фрактально скомпонованный объект с собственной уровневой градацией [4]. Во-вторых, можно выделить несколько типов структурных образований, из которых состоят напыляемые пленки [5]. К ним относятся:

1. Линейные структуры, где все элементы, представляющие собой фрактальные образования, выстраиваются в виде параллельных линий, как правило, расположенных на одинаковом расстоянии друг относительно друга. Причем сами отдельные элементы часто также имеют удлиненный характер вдоль направления линейности. В некоторых случаях линии, образованные элементами, могут иметь несколько направлений, образуя подобие ромбической сетки.

2. Образования, в которых элементы пленки образуют регулярную структуру в виде сетки из ячеек одинаковой величины округлой или гексагональной формы. Такая сетка может быть образована с высокой плотностью заполнения отдельными элементами (рис. 2) или, наоборот, быть разряженной по плотности. Причем элементы, образующие ячеистую структуру, могут иметь градацию по размеру, образуя мелкую или крупную сетку в соответствии с различными уровнями фрактализации. Кроме того сетка может быть образована одинокими крупными элементами неправильной формы, являющимися, в свою очередь, сложными фрактальными образованиями, имеющими несколько уровней самоорганизации и самоподобия.

3. Образования, представляющие собой фрактальную проекцию фрагмен-

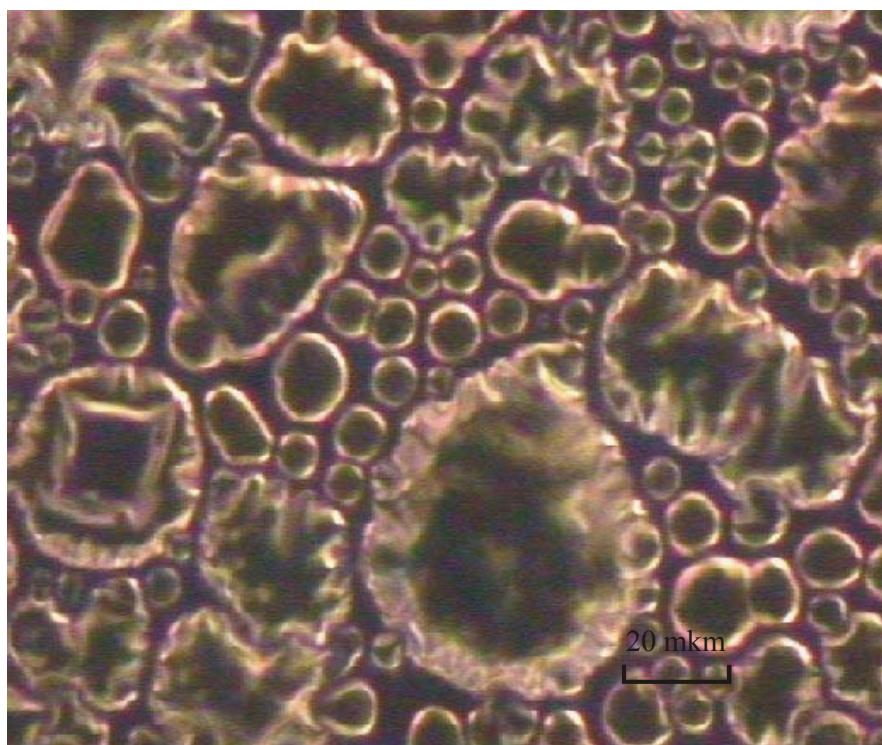


Рис. 3 Локальный участок стеклянной подложки с фрактальным элементом, конформно отображающим топологию резонатора.

тов топологического рисунка фрактально-матричной топологии, используемой при создании структуризаторов "Айрэс" и являющихся их репликантами. Один из последних вариантов структуризатора второго поколения представляет собой вышеупомянутый кремниевый чип с топологическим рисунком, расположенный в центре круглой пластиковой подложки диаметром 22 мм, на поверхности которой создана, в свою очередь, фрактально матричная топология бо-

лее низкого уровня с размерами линий порядка 200 мкм. Фрактальное образование, полученное на медной пленке и конформно отображающее схему структуризатора приведено на микрофотографии, представленной на рис. 3 и полученной методами высокоразрешающей оптической микроскопии.

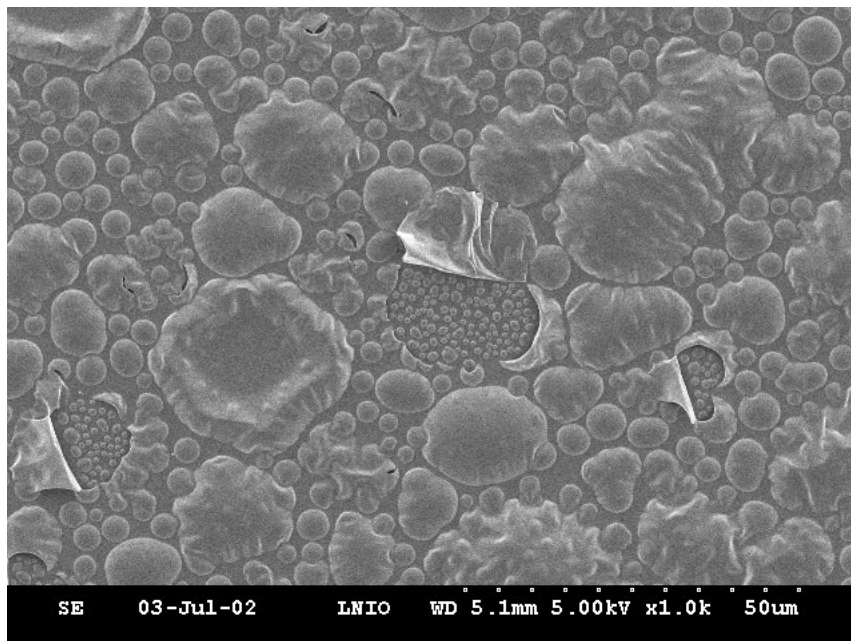


Рис. 4 Микрофотография фрактальной структуры, полученная методами растровой электронной микроскопии.

имеет в свою очередь сложную форму, в которой также наблюдается поуровневая фрактальная градация.

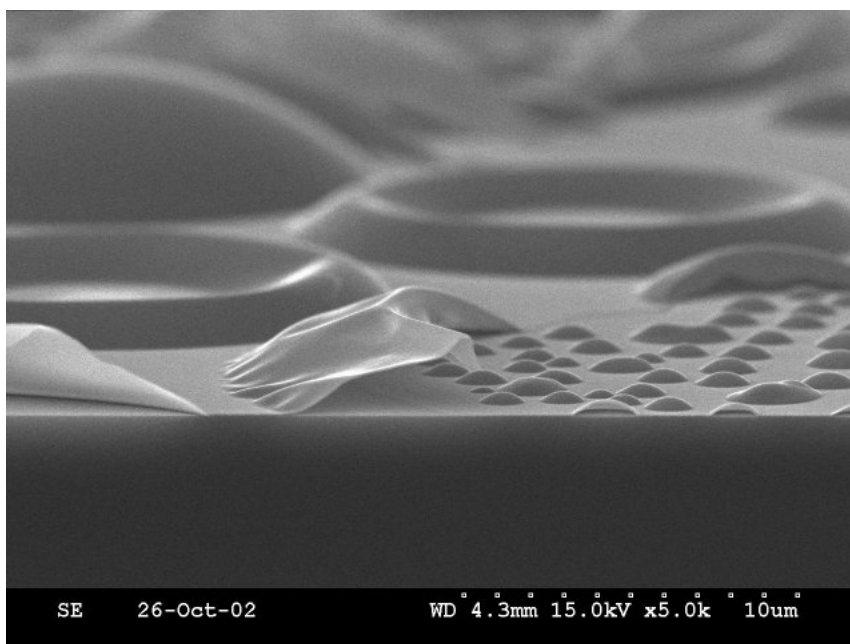


Рис. 5 Микрофотография скола образца с фрактальной структурой, полученная методами растровой электронной микроскопии.

жиме вторичных электронов (вид сверху), а на рис.5 микрофотография деталей пленки (вид сбоку) с большим увеличением фрактального фрагмента. Масштаб изображений показан линейкой точек под микрофотографиями, цифровая информация (50 мкм и 10 мкм) относится к полной длине линейки.

4. Структуры, имеющие кольцевой и сферический характер с внутренним упорядоченным заполнением мелкими элементами, являющиеся сложными фрактальными образованиями с поуровневой градацией элементов. Часто такие образования имеют помимо планарной геометрии еще и куполообразную структуру, причем эта трехмерная куполообразная структура

Отмечено также образование куполообразных структур, что согласно утверждениям авторов [6] говорит о том, что в таких случаях на стадии освальдовского созревания островковый механизм роста меняется на послойный рост. Строение "куполов" детально анализировалось методом электронной микроскопии. На рис.4 приведено изображение фрактальной структуры в ре-

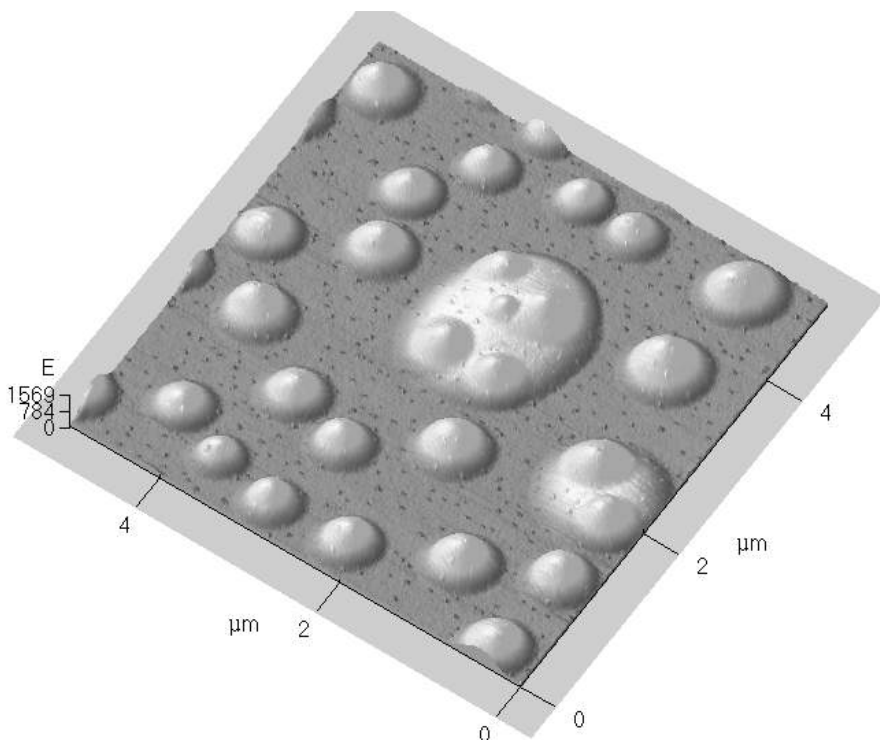


Рис. 6 АСМ изображение фрактальной структуры, полученной на кремниевой подложке.

ведены результаты атомно-силовой микроскопии по анализу рельефа участка поверхности в области спиралеобразного скопления "куполов". Изображения получены под двумя различными углами зрения. На рис. 6 хорошо наблюдается

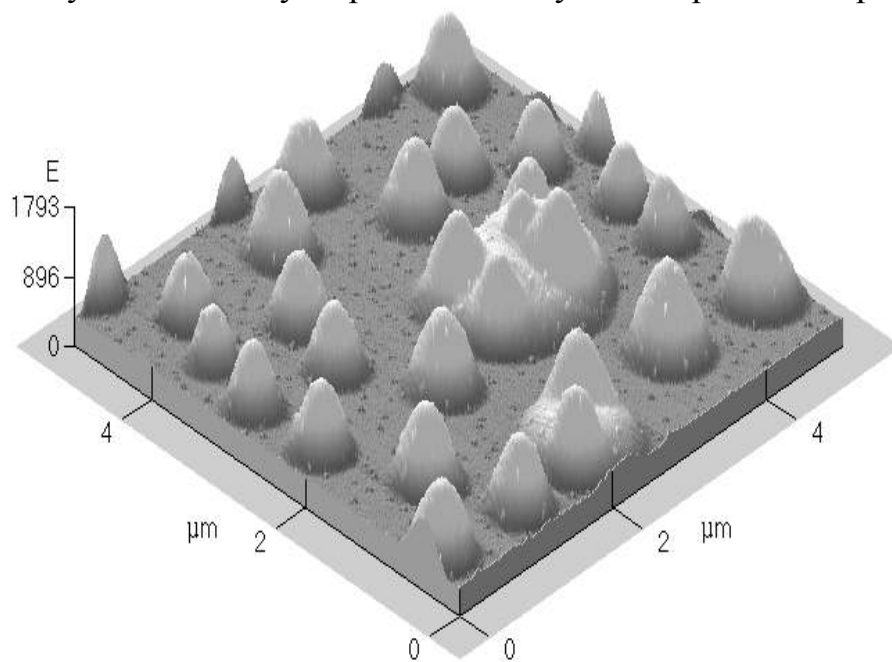


Рис. 7 АСМ изображение куполообразных фрактальных элементов.

указаны по осям координат в микрометрах, высота рельефа - в ангстремах.

Как видно из рисунков, пленка меди представляет собой ряд куполообразных образований при незанятом пространстве под "куполами". На представленных микрофотографиях виден рост фрактальной структуры из мелких куполообразных зародышей под вскрытыми большими "куполами", причем невскрытые области фрактальной структуры таких зародышевых образований не имеют.

На следующих микрофотографиях при анализе рельефа участка поверхности пленки содержит более мелкие элементы рельефа. Из рис. 7 видно, что поверхность "куполов" негладкая. Это отчетливо демонстрируется на рис. 8, где представлены результаты зондовой микроскопии одного из "куполов" и близлежащей поверхности. Размеры области сканирования

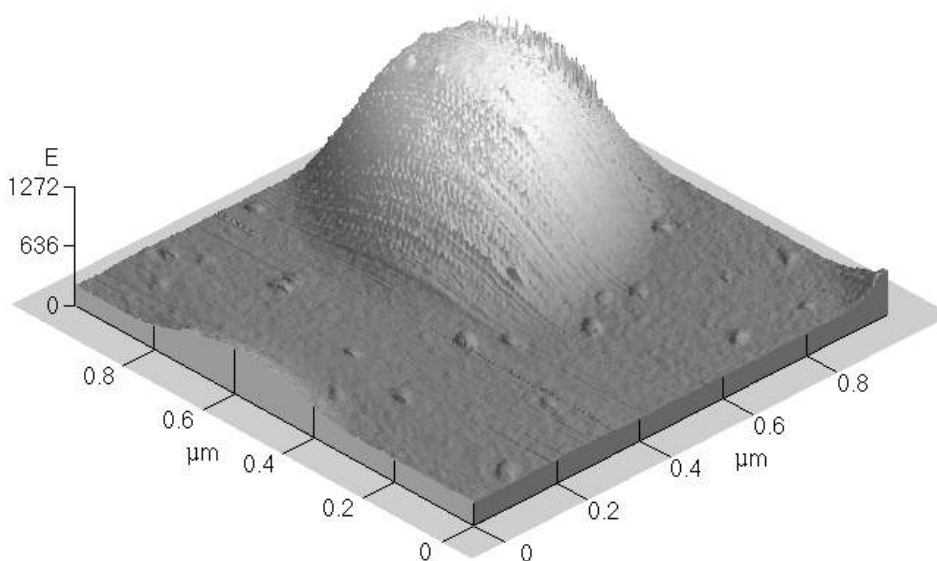


Рис. 8 АСМ изображение отдельной куполообразной системы с фрактальными элементами следующего уровня.

Поверхностные структуры полученных пленок носят регулярный и упорядоченный характер и, как правило, заполняют собой практически всю поверхность пленки. Варьированием условий технологического формирования слоев удается получать элементы различного размера, конфигурации, а также оказывать влияние на их взаимное расположение [1]. Однако по мере перехода от одного образца к

последующему при одинаковых условиях напыления и параметрах процесса структура пленки меняется в сторону конкретизации фрактального рисунка. Это говорит о том, что получаемая пленка является репликантом схемы структуризатора, равно как и пленка, осаждающаяся на конструкционные элементы, что приводит к "эффекту памяти" и подтверждается экспериментами по использованию полученных высокофрактальных пленок в качестве квазиструктуризаторов. Были проведены экспериментальные исследования ступенчатого процесса напыления медных пленок, в котором на первой ступени медная пленка напылялась на стеклянную подложку под непосредственным воздействием фрактально-матричного структуризатора. На второй ступени структуризатор изымался из вакуумной камеры и его место устанавливалась подложка с только что нанесенной медной пленкой. На этой подложке, уже играющей роль структуризатора, устанавливалась чистая подложка и процесс напыления меди повторялся при строгом соблюдении параметров процесса предыдущего напыления.

После чего весь процесс повторялся. В результате осуществления такого циклического напыления при числе ступеней до 30 были получены тонкие пленки с исключительно высокой степенью фрактализации, причем наблюдается явно не монотонный рост степени фрактализации в зависимости от числа ступеней. Имеется явно циклическая зависимость. Причем удалось добиться получения на одной подложке двух рядом лежащих локальных областей с двумя совершенно разными уровнями фрактализации, разделенными вполне четко фиксируемой границей. В одной области сосредоточены куполообразные структуры большого диаметра с имеющей сложную форму границей, отделен-



ные один от другого совершенно гладкой медной пленкой, не имеющей даже признаков фрактальных образований. В другой области сосредоточено большое количество мелких куполообразных структур с ровной границей и свободное пространство фактически отсутствует.

Таким образом в работе получены новые результаты по исследованию закономерностей образования фрактальных структур, подтверждающие эффективность модернизации структуры материалов при использовании структуризаторов Фонда «Айрэс».

В настоящее время проводятся эксперименты по получению и анализу пленок титана, индия, а также селенида свинца. Предварительные результаты свидетельствуют о перспективности развития концепции Фонда «Айрэс» для целей изменения физико-химических свойств широкого класса материалов.

Более полные данные об электронно-микроскопических и атомно-силовых исследованиях планируется опубликовать в ближайшее время.

Список литературы

1. Серов И.Н., Бельская Г.Н., Марголин В.И., Потсар Н.А. Влияние фрактально-матричных резонаторов на свойства получаемых тонких пленок меди // Письма в ЖТФ, 2002, том 28, вып. 24, С. 68 – 75.
2. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии: пер. с англ.- М.: Мир, 1985.- 496 с. , ил. 5
3. Кукушкин С.А., Осипов А.В. Процессы конденсации тонких пленок // УФН, Том 168.- № 10. 1998.- С. 1083 – 1116.
4. Серов И.Н., Алексейцев А.В., Бельская Г.Н., Бонштедт Б.Э., Егорова Н.Б., Марголин В.И. Применение фрактально-матричных транспарантов для активации процессов самокоррекции в тонкопленочных структурах // Тезисы докладов 4-го Международного семинара "Нелинейные процессы и проблемы самоорганизации в современном материаловедении", 3 – 5 окт. 2002 г., Астрахань, 2002.- С 112 – 113.
5. Алексейцев А.В., Бельская Г.Н., Бонштедт Б.Э., Егорова Н.Б., Марголин В.И., Потсар Н.А., Серов И.Н. Исследование влияния фрактально-матричных транспарантов на свойства получаемых тонкопленочных структур // Тезисы докладов XIX Российской конференции по электронной микроскопии, 28 мая 31 мая 2002 г., Черноголовка, 2002. с. 26.
6. Kukushkin S.A., Sakalo T.V. Diffusional coalescence of island films on the real crystal surface in the case of layer-by-layer growth of islands.-1, A conservative system. Acta. metal. mater. Vol. 41, № 4. pp. 1237 – 1241, 1993.



SUMMARY

The paper is concerned with the investigation into the effect of the fractal-matrix resonators on the structure of copper films obtained by magnetron ion deposition technique. The findings were gained by means of optical microscopy, scanning electron microscopy, and atomic force microscopy. It was established that a multilevel fractal topology as a regular system of hillocks was formed on a micro- and nano-scale.