

05;12

Влияние фрактально-матричных резонаторов на свойства получаемых тонких пленок меди

© И.Н. Серов, Г.Н. Бельская, В.И. Марголин, Н.А. Потсар

Исследовательский центр Фонда развития новых медицинских технологий „Айрес“, С.-Петербург
E-mail: foundation@aires.spb.ru
С.-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“
E-mail: vlad@margolin.etu.spb.ru

Поступило в Редакцию 22 июля 2002 г.

Исследовано воздействие фрактально-матричных резонаторов „Айрес“, расположенных вне зоны контакта с областью газового разряда, на структуру получаемых методом магнетронного ионного напыления тонких субмикронных пленок меди. Применение этой методики позволяет получить субмикронные по толщине пленки с локальными участками, представляющими собой самоорганизованные по фрактальному принципу структуры.

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 с помощью туннельно-зондовых методов переноса отдельных атомов или кластеров прямо на подложку. Однако применение для практических целей методов индивидуальной обработки, таких как туннельно-зондовые, приводит к необходимости обеспечить в течение порядка 100 h непрерывной работы высадку с иглы туннельно-зондового устройства около 100 атомов в секунду для плотного заполнения площади в 1 квадратный микрометр. Поэтому более реально применение не индивидуальных, а групповых методов обработки, когда за один цикл обрабатывается либо вся подложка, либо ее значительная часть.

При этом наибольший интерес представляет получение тонкопленочных покрытий, имеющих упорядоченную структуру, чаще всего возникающую за счет инициации процессов самоорганизации и самоупорядочения пленок в процессе роста. Применение таких упорядоченных структур в практических целях позволит в дальнейшем получать элементы электронной техники со сверхмалыми размерами и без сложностей, связанных с индивидуальными методами обработки. Известны методы получения объемных самоорганизованных структур под влиянием внешнего силового воздействия. При этом необходимо обеспечить определенную мощность воздействия, она должна быть настолько интенсивна, чтобы обеспечить переход системы в особую, нелинейную область, называемую областью, удаленной от равновесия [1]. Результаты локальных изменений распространяются на всю систему, что инициирует появление дальнедействующих корреляций, и реакция системы на внешнее воздействие становится коллективной и охватывает уже весь объем такой системы [2].

Внешнее влияние может осуществляться в виде грубого силового энергетического воздействия — потока ионов, либо применения лазерной обработки для модифицирования свойств металлических поверхностей и создания пространственно-организованных структур [2], либо применения в качестве структурирующего агента микроволнового [3] или рентгеновского [4] излучений. Обоснование того, каким образом система накапливает необходимую энергию и переходит к когерентному поведению, требует специального исследования и может быть получено в рамках теории ВПР [5].

С целью реализации в дальнейшем возможности получения самоорганизованных тонкопленочных структур в данной работе исследовался метод магнетронного ионного напыления тонких субмикронных пленок меди на кремниевые подложки с использованием фрактально-матричных резонаторов разработки и производства Фонда „Айрес“, основой которых является искусственным образом геометрически синтезированная штриховая голограмма с размером штриха к настоящему времени порядка $1.0\ \mu\text{m}$ [6].

Применение метода магнетронного распыления в обычном режиме приводит к получению тонких пленок, практически полностью повторяющих структуру подложки [7]. Экспериментальные исследования проводились на установке магнетронного напыления, разработанной на базе стандартного вакуумного поста ВУП-4 и модифицированной на ка-

факультета ЭИВТ С.-Петербургского государственного электротехнического университета „ЛЭТИ“. На вакуумном колпаке установки закреплено магнетронное распылительное устройство с диаметром катода 40 мм. Источник питания обеспечивает напряжение до 1 кВ и ток разряда до 2.5 А. Расстояние катод — подложка равно 80 мм. В установке предусмотрена подача постоянного потенциала на стол в пределах от 0 до ± 300 В. Магнетронное устройство изготовлено на базе бариевого магнита и позволяет легко производить смену катода.

В качестве подложек выбраны пластины оптически полированного кремния марки 76 КДБ-7.5 с ориентацией пластин $\langle 100 \rangle$, в качестве материала катода выбрана электролитическая медь. Полученные образцы тонкопленочных структур исследовались с помощью интерферометра МИИ-4 и оптического микроскопа SM-LUX HL, с регистрацией полученного изображения с помощью цифровой камеры VNC-702. Толщина получаемых пленок меди лежит в пределах 0.4–0.9 μm . Экспериментальные исследования проводились по следующей схеме. В начале каждого экспериментального цикла медная пленка напылялась на контрольные образцы без присутствия в вакуумной камере резонаторов. Полученные пленки практически полностью повторяют структуру подложки и не имеют элементов упорядоченности и самоорганизованности. Затем производилось напыление пленок на подложки в присутствии в вакуумной камере соответственным образом расположенных резонаторов, причем в условиях осуществления физического контакта подложки с резонатором или без такового. В случае осуществления физического контакта резонатор или система резонаторов, имеющая определенную конфигурацию, закреплялись на подложке вне зоны действия газового разряда. При проведении экспериментов при отсутствии физического контакта резонаторов с подложкой они располагались по определенной схеме вне зоны газового разряда и на некотором удалении от подложки.

В результате проведенных экспериментальных исследований получены следующие результаты. Пленки меди, что подтверждено оптическими исследованиями, полученные при участии резонаторов, имеют вполне определенную и достаточно разнообразную структуру фрактального характера. Фазовый состав пленок меди контролировался методом рентгенофазового анализа. На периферии образца (рис. 1) наблюдается образование достаточно упорядоченных структур, имеющих кольцевой и сферический характер. По ходу движения от периферии к центру

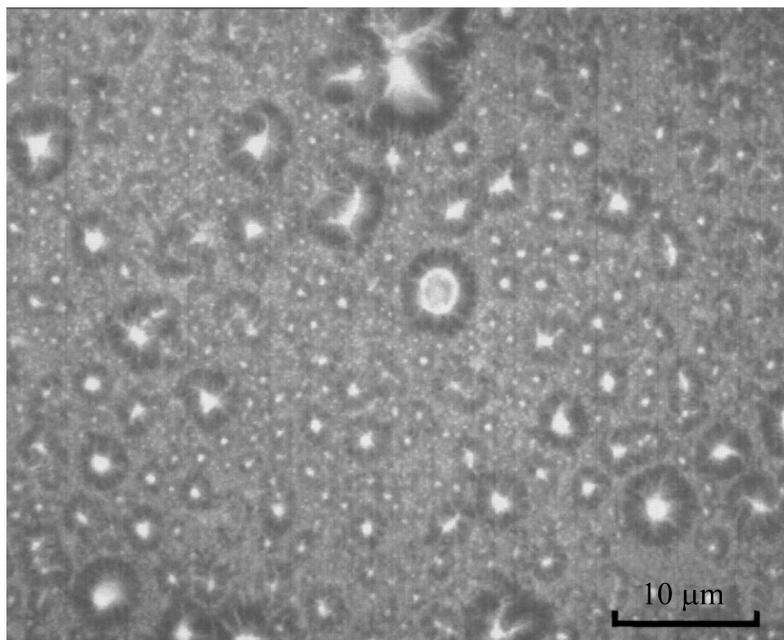


Рис. 1. Микрофотография фрактальных структур, полученных на подложке в периферийной зоне.

пластины имеет место увеличение размеров кольцевых образований, при этом наблюдается градация элементов от мелких до более крупных. В центральной зоне подложки имеются крупные кольцевые образования, высота которых по предварительным грубым оценкам достигает в отдельных случаях единиц микрон. Причем следует отметить, что образования, локализованные в центральной зоне, имеют существенно более сложную структуру (рис. 2), чем расположенные в периферийной зоне. Во внутреннем пространстве элементов, расположенных в центральной зоне, обнаружены зародышевые зерна, причем их расположение носит не хаотический характер. Вне этих крупных кольцевых образований наблюдаются кольцевые элементы различного диаметра, причем как изолированные один от другого, так и имеющие сложную взаимо-

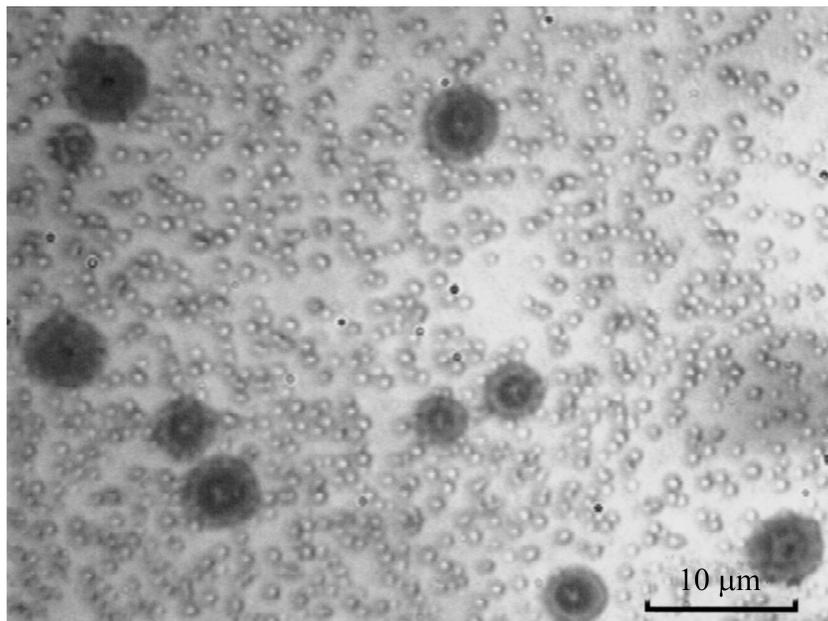


Рис. 2. Микрофотография фрактальных структур, полученных на подложке в центральной зоне.

проникающую структуру. Общая картина представляет собой сложное фрактальное образование, имеющее, по нашим наблюдениям, несколько уровней самоорганизации и самоподобия. По мере продвижения от периферии к центру подложки (при этом по условиям эксперимента возрастает воздействие резонаторов на процесс роста пленок) наблюдаемые структуры имеют более высокую степень самоорганизации: в каждом кластерном образовании присутствует несколько уровней фрактальности.

При увеличении времени напыления и соответственно толщины пленки уже в краевой области наблюдается фрактальная картина из мелких кольцевых элементов. Так, крупные кольца окружены более мелкими, которые в свою очередь образуют некую упорядоченную структуру кольцеобразного характера, и т. д.

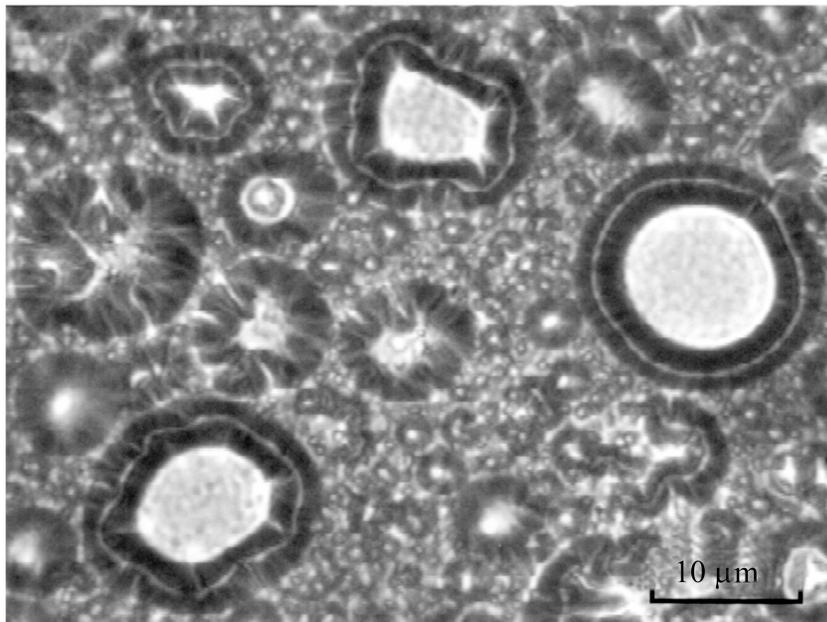


Рис. 3. Микрофотография фрактальных структур, полученных на подложке в зоне максимального воздействия резонаторов.

При движении от края к центру наблюдается поуровневая градация фрактального объекта за счет большой толщины пленки. Все элементы имеют помимо описанной выше планарной геометрии еще и куполообразную структуру. Среди них встречаются конструкции в виде срезанных 3-, 4-, 6-гранных „квазипирамид“ (рис. 3), окруженных подобными более мелкими образованиями. Некоторые из этих „квазипирамид“ имеют в центре отверстие в виде кратера. Помимо этих элементов наблюдаются куполообразные спиральные элементы с фрактальным характером компоновки.

Характер структуры полученной пленки можно описать следующим образом. На краях, где наблюдается краевой эффект, видны крупные фрактальные кольцевые образования, причем клонирование каждого

из них идет внутрь элемента. Все они имеют ярко выраженную вертикальную составляющую, поэтому выглядят как куполообразные конструкции, некоторые из которых образуют кратеры внутрь себя. В центральной зоне плотность расположения всех вышеописанных элементов значительно увеличивается. Кроме того, наблюдается увеличение размеров некоторых кольцевых и куполообразных составляющих с собственной внутренней градацией, что подчеркивает уровневую градацию полученной пленки как фрактально-скомпонованного объекта.

Авторы обнаружили, что по мере перехода от одного образца к последующему при одинаковых условиях напыления и параметрах процесса картина структуры пленки меняется в сторону конкретизации фрактального рисунка и увеличения отдельных элементов. Это говорит о том, что получаемая пленка является репликантом структуры резонатора, равно как и пленка, осаждающаяся на конструкционные элементы, что приводит к „эффекту памяти“ и подтверждается экспериментами по использованию полученных высокофрактальных медных пленок в качестве квазирезонаторов. При проведении дальнейших экспериментальных исследований появляется возможность путем подбора конфигурации, структуры и системного расположения резонаторов добиться получения на субмикронной пленке управляемого роста на основе принципов самоорганизации упорядоченных структур, что будет отвечать принципам групповой обработки и может быть использовано для получения элементов электронной техники.

В заключение авторы считают своим долгом выразить глубокую благодарность сотрудникам СПбГУ профессору О.В. Франк-Каменецкой и зав. рентгеновской лаборатории Т.Н. Каменской за проведенные рентгенографические исследования структур полученных медных пленок и обсуждение полученных результаов.

Список литературы

- [1] *Николис Г., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. 512 с.
- [2] *Хмелевская В.С.* // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. № 6. С. 85–91.
- [3] *Бердоносев С.С.* // Соросовский образовательный журнал. 2001. № 1. С. 32–38.

- [4] *Перегудов В.Н., Пашаев Э.М., Якунин С.Н.* // Тез. докл. Всероссийск. науч.-техн. конф. „Микро- и нано-электроника“. 2001. Т. 2. С. 33–34.
- [5] *Серов И.Н.* Общий курс ВПР. СПб: Акцидент, 2002. 492 с.
- [6] *Алексеицев А.В., Бельская Г.Н., Бонитедт Б.Э., Егорова Н.Б., Марголин В.И., Потсар Н.А., Серов И.Н.* // Тез. докл. XIX Российской конференции по электронной микроскопии. 28 мая–31 мая 2002 г. Черноголовка, 2002. С. 26.
- [7] *Броудай И., Мерей Дж.* Физические основы микротехнологии / Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 496 с., ил.