

О ПРОБЛЕМЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖЕК В ПРОСТРАНСТВЕ ХАРАКТЕРИСТИК ШЕРОХОВАТОСТИ

М.С. Глянько¹

¹Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В работе исследуется проблема определения зависимости параметров процесса смачивания и растекания капли жидкости по поверхности твердого тела от характеристик шероховатости этой поверхности. Для описания шероховатости поверхности и параметров процесса растекания капли предложены векторы характеристик. Предложено использовать методы кластерного анализа для разделения исследуемых подложек по группам качества обработки поверхности.

В современных технологиях создания устройств электроники и оптики ознаменовался переход на новый уровень – уровень наноразмерных структур. Вследствие этого появилась потребность в учете тех явлений, эффектов и закономерностей, которые действуют на данном уровне. К факторам, определяющим свойства поверхности, относятся наличие, характерные размеры и размещение структурных элементов топологии поверхности подложки, на которой создается элемент электроники или оптики. Элементы микро- и наноструктуры, размеры которых сравнимы с размерами элементов формируемой топологии, могут стать причиной значительного искажения получаемых с их помощью результатов [1-3]. Поэтому для повышения качества и процента выхода пригодных к эксплуатации элементов требуется проводить контроль шероховатости поверхности подложки.

В настоящий момент для контроля шероховатости поверхности подложки широко применяется метод атомно-силовой микроскопии (АСМ), использующийся в сканирующих зондовых микроскопах (СЗМ). Достоинством АСМ является высокая точность получаемых результатов (разрешение по вертикали до единиц ангстрем). Однако в условиях, когда необходимо быстро оценить параметры шероховатости поверхности на большой площади (десятки мм²), использование СЗМ приводит к значительным временным затратам. Поэтому для быстрой оценки шероховатости поверхности образца часто используются методы экспресс-анализа, позволяющие быстро, в течение нескольких секунд, получить информацию о микрорельефе поверхности с приемлемой точностью. Среди методов экспресс-контроля шероховатости поверхности выделяют группу методов, в основе которых лежит процесс смачивания и растекания жидкости по исследуемой поверхности. Как правило, в таких методах калиброванная капля жидкости наносится на исследуемую поверхность, при этом оцениваются такие характеристики процесса растекания капли как краевой угол смачивания, скорость растекания капли в радиальном направлении, время растекания, площадь пятна контакта капли по окончании процесса растекания, максимальный и минимальный радиусы пятна контакта капли в статическом режиме. Недостатком данного типа методов является отсутствие каких-либо функциональных зависимостей и методик, позволяющих однозначно соотнести характеристики капли в процессе ее растекания по поверхности подложки с параметрами шероховатости поверхности подложки. Вследствие этого применение методов экспресс-анализа шероховатости поверхности позволяет получить только качественную оценку шероховатости поверхности.

Целью настоящей работы является исследование зависимости между характеристиками шероховатости поверхности, полученными с помощью методов СЗМ, и параметрами процесса растекания капли по поверхности подложки.

При использовании метода АСМ для исследования микрогеометрии поверхности образца исследуемый рельеф представляется в виде двумерной функции $Z = f(x,y)$, что позволяет рассчитать различные статистические характеристики поверхности образца на нанометровом уровне. Для описания микронеровностей поверхности твердых тел также используются некоторые феноменологические характеристики, например, максимальный перепад высот, среднее значение и средняя квадратичная шероховатость.

В таблице 1 перечислены параметры шероховатости, которые мы используем в данном исследовании. Такой набор характеристик дает достаточно полное представление о шероховатости поверхности.

Таблица 1. Характеристики шероховатости поверхности

Характеристика	Описание
S_z	десять точек по высоте, (ten point height, ISO 4287/1), параметр выражает шероховатость поверхности по выбранным пяти максимальным высотам и впадинам, нм
M	Среднее значение, первый момент, нм
S_a	Средняя арифметическая шероховатость (average roughness, ISO 4287/1), нм
μ_2	Начальный момент второго порядка, нм ²
S_q	Средняя квадратичная шероховатость (root mean square roughness, ISO 4287/1), нм
S_{sk}	Коэффициент асимметрии, характеризует несимметричность распределения высот рельефа
S_{ka}	Коэффициент эксцесса, характеризует протяженность распределения

В отличие от шероховатости параметры процесса смачивания и растекания капли жидкости не регламентируются нормативными актами и документами. Наиболее часто используемой характеристикой здесь является краевой угол смачивания. Однако использование одного лишь краевого угла для характеристики процесса смачивания и растекания имеет существенный недостаток, заключающийся в сильной зависимости краевого угла от формы капли на поверхности подложки и точки, из которой ведется наблюдение за краевым углом. В случаях, когда достигается смачивание, близкое к полному, измерение краевого угла представляет собой трудную задачу. Кроме того, если форма капли на поверхности близка к дисковой, то краевой угол дает некорректную информацию о смачивании жидкостью поверхности образца. Ввиду данного недостатка контроля смачивания и растекания капли по краевому углу было предложено использовать набор параметров, которые характеризуют форму пятна контакта капли на поверхности твердого тела (таблица 2). Данные характеристики определяются поведением линии трехфазного контакта, которая демонстрирует высокую чувствительность к любым неоднородностям на поверхности.

В исследовании нами использовались подложки из оптического стекла, на которые с помощью метода магнетронного напыления на установке «Каролина-15» наносились слои материалов. В экспериментах использовались пленки молибдена и подложки из оптического стекла. Подложки с напылением молибдена проходили процедуру плазмохимического травления с различным временем выдержки – от 1 до 4 минут с шагом в 30 секунд.

Исследование шероховатости поверхности подложек проводилось с помощью СЗМ Solver Pro (размер участков сканирования – 10 мкм × 10 мкм, полуконтактный метод АСМ) и специализированного программного обеспечения Image Analysis от фирмы NT-MDT. Для исследования параметров процесса растекания капли на поверхности подложки использовалось разработанное в ИСОИ РАН устройство экспресс-контроля чистоты и шероховатости подложек и разработанное для него программное обеспечение [4-5].

Таблица 2. Анализируемые параметры процесса растекания капли

Параметр	Описание
Минимальный радиус пятна контакта по окончании растекания, R_{min}	Минимальное расстояние от центра тяжести капли до линии трехфазного контакта
Максимальный радиус пятна контакта по окончании растекания, R_{max}	Максимальное расстояние от центра тяжести капли до линии трехфазного контакта
Коэффициент формы	Отношение квадрата периметра области к ее площади
Угол ориентации	Угол между горизонтальной плоскостью на изображении и большей осью эллипса, который имеет такие же вторые моменты инерции как и рассматриваемая область
Эквивалентный диаметр	Диаметр круга, который имеет такую же площадь, как и рассматриваемая область
Коэффициент округлости формы	Квадрат отношения эквивалентного диаметра к периметру фигуры, $[0,1]$. Чем ближе значение к 1, тем ближе форма области к кругу.
Коэффициент заполнения	Отношение площади области к площади ограничивающего ее прямоугольника
Коэффициент выпуклости	Отношение площади области к площади ее выпуклой оболочки
Площадь пятна контакта	Площадь области, ограниченной пятном контакта капли с поверхностью

На рисунках 1 и 2 представлены изображения поверхности молибденовых и хромовых пленок с разным временем травления, полученные с помощью СЗМ “Solver Pro”. В таблицах 3 и 4 приведены результаты анализа полученных изображений с помощью программного обеспечения Image Analysis. Характеристики шероховатости рассчитывались для нескольких точек на поверхности подложки.

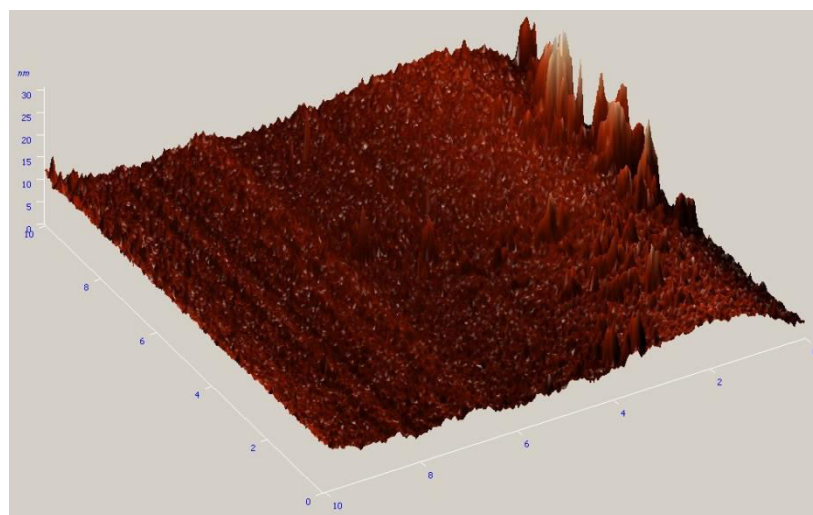


Рисунок 1 – СЗМ-изображение поверхности пленки молибдена, подвергнутой процедуре ПХТ в течение 1 минуты

Таблица 3. Результаты анализа СЗМ-изображений пленок молибдена (длительность ПХТ – 1 минута)

№ эксперимента	S_z , нм	M , нм	S_a , нм	μ^2	S_q , нм	S_{sk}	S_{ka}
1	34.250	14.818	3.240	238.064	4.298	0.861	3.926
2	117.887	33.713	8.163	1325.730	13.753	1.769	12.669
3	11.508	4.087	1.473	19.868	1.777	0.458	2.558

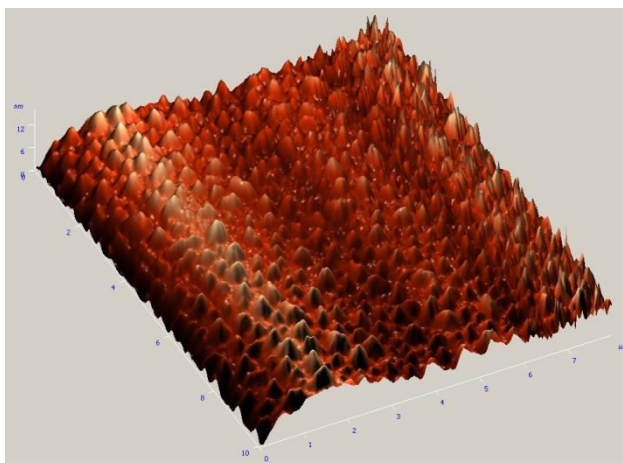


Рисунок 1 – СЗМ-изображение поверхности пленки молибдена, подвергнутой процедуре ПХТ в течение 3 минут

Таблица 4. Результаты анализа СЗМ-изображений пленок молибдена (длительность ПХТ – 3 минуты)

№ эксперимента	S_z , нм	M , нм	S_a , нм	$\mu 2$	S_q , нм	S_{sk}	S_{ka}
1	41.156	11.310	3.775	150.213	4.720	0.936	3.641
2	15.344	7.174	1.620	55.683	2.052	0.022	3.484
3	17.294	6.920	1.969	54.132	2.497	0.133	3.096

Как показывают результаты анализа, с помощью вектора признаков малой размерности, например, состоящего из значений среднего арифметического и среднеквадратического отклонения высот рельефа, невозможно охарактеризовать шероховатость поверхности, поскольку экспериментальные данные, полученные в разных точках на поверхности одного образца, демонстрируют сильное расхождение в значениях параметров шероховатости. Следовательно, однозначная характеристика шероховатости поверхности возможна только при использовании многокомпонентных векторов признаков, что в свою очередь требует применения методов кластерного анализа в многомерном пространстве для разбиения всего множества таких векторов на подмножества, соответствующие различным уровням качества обработки поверхности.

С помощью устройства экспресс-контроля чистоты и шероховатости поверхности исследовался вопрос влияния шероховатости на параметры растекания капли. На рисунках 3 и 4 представлены изображения капли в процессе растекания по поверхности подложек с напылением молибдена. Увеличение времени травления подложек приводит к увеличению радиуса пятна контакта капли. Также по мере увеличения времени травления наблюдается приближение формы пятна контакта капли к форме круга.

Анализ экспериментальных данных показал, что для более достоверного описания шероховатости поверхности предпочтительнее использовать многокомпонентные векторы признаков шероховатости. Увеличение длительности обработки поверхности подложки с помощью процедуры ПХТ ведет к увеличению площади пятна контакта капли, при этом форма капли меняется незначительно и остается близкой к круговой. Целью дальнейших исследований по данной проблеме является поиск разбиения множества векторов в многомерном пространстве, которое задается выбранными характеристиками шероховатости, на подмножества (кластеры), соответствующие различным уровням качества обработки поверхности подложек, и соотнесение полученного разбиения с анализируемыми параметрами процесса растекания капли.

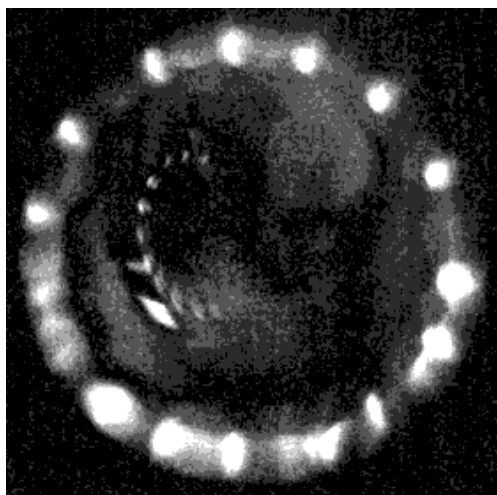


Рисунок 3 – обработанное изображение капли на поверхности пленки молибдена (длительность процедуры ПХТ – 1 минута)

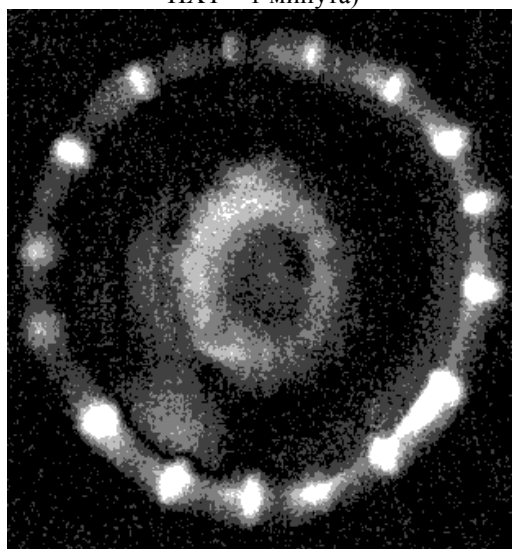


Рисунок 4 – обработанное изображение капли на поверхности пленки молибдена (длительность процедуры ПХТ – 3 минуты)

Литература

1. D.Aurongzeb, M. Holtz, J.M. Berg, A. Chandolu and H. Temkin The influence of interface roughness on electrical transport in nanoscale metallic multilayers, *J. Appl. Phys.* 98, 063708 (2005)
2. Toshinori Harada, Hiroshi Murotani, Shigeharu Matumoto, and Hirotomu Honda Influence of substrate surface roughness on light scattering of TiO₂ optical thin films, *Chinese Optical Letters*, col. 11 (suppl.), S10303 (2013)
3. Mark P. Blodgett, Chizoba Vivian Ukpabi and Peter B. Nagy Surface roughness influence on Eddy Current Electrical Conductivity Measurements, *Materials Evaluation*, June 2003 pp. 765 – 772.
4. Изотов П.Ю. Модификация прибора индикации чистоты и гладкости оптических подложек / П.Ю. Изотов, М.С. Глянько, С.В. Суханов // *Компьютерная оптика*. – 2011. – Т. 35, № 1. – С. 63-69. – ISSN 0134-2452
5. Изотов, П.Ю. Программное обеспечение для устройства контроля чистоты и шероховатости оптических подложек / П.Ю. Изотов, М.С. Глянько // *Компьютерная оптика*. – 2012. – Т. 36, № 2. – С. 242-248. – ISSN 0134-2452.