

УДК 538.971

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯРНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ НАНОСТРУКТУР ПО ДАННЫМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ

Ю.В. Грищенко, М.Л. Занавескин, Е.С. Калачикова, А.Л. Толстихина

Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, 119333, Ленинский пр., Москва, Россия.

E-mail: spm@ns.crys.ras.ru

Представлена методика характеристики параметров регулярных наноструктур на поверхности по данным атомно-силовой микроскопии. Предложенный подход основан на анализе функции спектральной плотности мощности. С помощью моделирования регулярных структур установлены зависимости между характеристиками функции спектральной плотности мощности и параметрами регулярных наноструктур. Разработанный метод применен для определения параметров структур реальных объектов.

Введение

В настоящее время все более широкое применение в технологиях эпитаксиального роста находят монокристаллы тугоплавких оксидов с ориентированным нанорельефом на поверхности. Использование структурированных подложек в процессах эпитаксиального роста способствует повышению качества изготавливаемых элементов. В связи с этим важной задачей для дальнейшего развития является характеристика регулярных наноразмерных структур (РНС) на сверхгладких поверхностях.

Исследование РНС в последние годы осуществляется методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Данный метод позволяет получать рельеф поверхности с разрешением порядка нанометра в латеральном направлении и порядка ангстрема – по высоте.

Классический подход определения параметров регулярных структур по данным АСМ заключается в анализе отдельных профилей АСМ-изображений и, следовательно, использует лишь малую долю информации, которую содержат АСМ-данные. В работе предложен статистический подход для определения параметров структурированных поверхностей, основанный на анализе Фурье-образа АСМ-изображения. Этот метод позволяет устанавливать не только такие параметры РНС, как ширина и высота, но и степень разупорядоченности по ширине.

Методика эксперимента

Исследования поверхности образцов проводились с помощью атомно-силового микроскопа NTEGRA Prima (NT-MDT, г. Зеленоград). Измерения выполнялись в полу-контактном режиме зондами с радиусом закругления порядка 10 нм. Атомно-силовой микроскоп размещался в специальном климатическом боксе с контролируемыми параметрами воздушной среды: температурой, влажностью и чистотой.

Исследовалась поверхность кристалла лейкосапфира (Al_2O_3) с ориентацией (0001). Для получения регулярного нанорельефа на подложках сапфира осуществлялся высокотемпературный отжиг в диапазоне температур от 1000 до 1500 °С.

Результаты и обсуждение

Метод атомно-силовой микроскопии позволяет непосредственно получать двумерную функцию топографии поверхности $z(\rho)$, где $\rho \equiv (x, y)$.

Используя теорему о свертке, функцию спектральной плотности мощности (power spectral density — PSD) можно представить как произведение Фурье-образа поверхности с его комплексно-сопряженной функцией:

$$PSD_{2D} = G(\nu)G^*(\nu), \quad (1)$$

где $G(\nu) = \int \exp(2\pi i \nu \rho) z(\rho) d\rho$.

Если рассмотреть выражение (1) с математической точки зрения, то становится ясно, что PSD-функция есть квадрат Фурье-преобразования функции рельефа поверхности. Таким образом, рельеф поверхности представляется как суперпозиция синусоид различной частоты. Сама же PSD-функция для каждого значения пространственной частоты показывает, какую амплитуду (а вернее ее квадрат) имеет синусоида с такой частотой. Таким образом, устанавливается связь между латеральным размером неоднородностей поверхности и их высотой.

Если исследуется поверхность с регулярным рельефом, то на графике функции спектральной плотности мощности образуется особенность в виде пика (рис.1). Естественно связать характеристики пика с параметрами РНС.

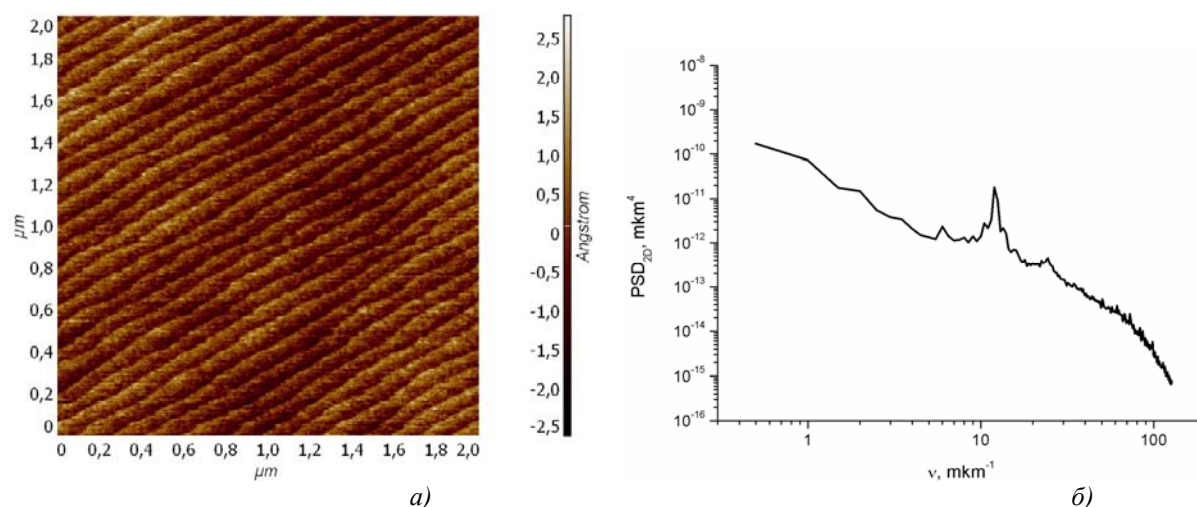


Рис. 1. АСМ-изображение поверхности сапфировой пластины с регулярной террасно-ступенчатой структурой (а) и рассчитанная для нее PSD-функция (б)

Показано, что реальный рельеф поверхности сапфировых пластин с регулярной структурой может быть представлен как суперпозиция РНС и стохастического рельефа. При этом параметры пика PSD-функции зависят только от регулярной составляющей рельефа. Исследование влияния параметров РНС на характеристики пика PSD-функции проводилось для смоделированных с помощью специально разработанной программы поверхностей. В программе задавались период и высота террасной структуры и при необходимости дисперсия этих параметров. Далее выполнялся расчет PSD-функций смоделированных поверхностей. Анализ параметров пика PSD-функции, таких как амплитуда, уширение и положение центра, осуществлялся с помощью аппроксимации пика гауссовой функцией.

В результате были рассчитаны PSD-функции и построены зависимости частоты, амплитуды и уширения пика от параметров ступенчатой структуры смоделированных поверхностей. Установлена связь параметров структуры с ее PSD-функцией: ширина ступеней однозначно определяет положение пика, высота ступеней – амплитуду пика, а уровень структурного совершенства структуры – уширение пика.

Данный подход был применен к анализу реальных ступенчатых структур на поверхности сапфира с разными параметрами РНС.

Для оценки корректности данных, рассчитанных с помощью разработанной методики, определены параметры регулярной структуры по профилям АСМ-изображения. Построено десять профилей поверхности и проведено их усреднение. В табл. 1 представлены результаты расчетов параметров РНС, полученные двумя способами.

Таблица 1

Сравнение параметров регулярной структуры, рассчитанных двумя методами

Номер образца	Параметр РНС	Усреднение 10 профилей АСМ-изображения	Анализ пика PSD-функции
1	Длина ступени	80,3 нм	82,0 нм
	Высота ступени	2,1 Å	2,0 Å
	Дисперсия длины ступени	7,71 %	7,01 %
2	Длина ступени	430 нм	440 нм
	Высота ступени	1,3 нм	1,2 нм
	Дисперсия длины ступени	0,27 %	0,24 %

Показано, что параметры ступенчатой структуры, определенные при анализе PSD-функции, сходятся с данными, которые были рассчитаны по профилям АСМ-изображений. Это свидетельствует о возможности использования предложенного метода для анализа регулярных наноструктур на поверхности.

Заключение

Таким образом, в работе предлагается методика характеристики поверхностных регулярных наноструктур с помощью анализа функции спектральной плотности мощности. Такой подход в отличие от анализа отдельных профилей АСМ-изображения позволяет использовать более полную информацию, содержащуюся в данных АСМ. Кроме того, с помощью анализа PSD-функции возможно определение степени разупорядоченности структуры, что ранее не осуществлялось ни одним другим методом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Ведущей научной школы (грант НШ-5133.2006.2) на приборах ЦКП «Структурная диагностика материалов» при ИК РАН и Министерства науки и образования Российской Федерации (государственный контракт № 02.513.11.3154).