

Составители: д-р техн. наук, проф. Б.Г. Львов, д-р физ.-мат.наук, проф. Г.Г. Бондаренко, ассистент А.В. Николаевский

УДК 621.38

Цифровая обработка и анализ изображений поверхностных наноструктур в сканирующем зондовом микроскопе СММ-2000 / Учебно-методическое пособие для инженерного тренинга / Подготовлено для 2-й Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по тематическому направлению деятельности национальной нанотехнологической сети «Функциональные наноматериалы для космической техники» // Моск. гос. ин-т электроники и математики; Сост.: Б.Г. Львов, Г.Г. Бондаренко, А.В. Николаевский. М., 2011. – 18 с.

Содержанием работы является изучение методов улучшения качества СТМ изображений, способов удаления искажений результатов сканирования, полученных в СТМ и АСМ режимах СЗМ СММ-2000, обработка и количественный анализ СЗМ изображений.

Учебно-методическое пособие для инженерного тренинга написано в соответствии с заданием по Государственному контракту на выполнение работ в рамках направления 2 федеральной целевой программы «Развитие инфраструктуры nanoиндустрии в Российской Федерации на 2008-2011 годы» (Гос. контракт № 16.647.12.2002 от 11 октября 2010 г.; Шифр: 2010-02-2.3-03; Тема: Всероссийская школа-семинар студентов, аспирантов и молодых ученых по тематическому направлению деятельности национальной нанотехнологической сети «Функциональные наноматериалы для космической техники»).

ISBN 978-5-94506-284-9

1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

За последние 10 лет сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) превратилась в один из наиболее широко используемых методов исследования поверхности функциональных материалов для космической техники. В отличие от традиционных методов, зондовые микроскопы компактны, не требуют наличия вакуума для работы, способны осуществлять неразрушающий контроль над получаемой структурой в реальном режиме времени.

В Московском государственном институте электроники и математики совместно с ГНУ «НИИ перспективных материалов и технологий» проводятся исследования процессов влияния воздействия факторов космического пространства на структуру поверхности функциональных наноматериалов для космической техники методами сканирующей туннельной (СТМ) и атомно-силовой (АСМ) микроскопии. При проведении данных исследований был разработан комплекс оригинальных методик обработки и анализа получаемых СЗМ изображений, который лег в основу методического пособия.

Целью настоящей работы является получение практических навыков в области обработки и количественного анализа СЗМ изображений.

Содержанием работы является изучение методов улучшения качества СТМ изображений и способов удаления искажений результатов сканирования, полученных в СТМ и АСМ режимах сканирующего зондового микроскопа СММ-2000, обработка и количественный анализ СЗМ изображений.

Пособие рассчитано на учащихся, владеющих физическими основами и приемами эксплуатации оборудования сканирующей зондовой микроскопии [1,2].

2. ОБРАБОТКА И КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ СЗМ ИЗОБРАЖЕНИЙ

2.1. Улучшение качества СЗМ изображений

В современной нанотехнологии сканирующей зондовый микроскоп (СЗМ) является одним из базовых измерительных приборов. Визуализация микро- и наноструктур на поверхности образцов в СЗМ основана на детектировании локального взаимодействия между твердотельным нанозондом и образцом. Измеряя туннельный ток или механическую силу взаимодействия в процессе прецизионного механического сканирования, можно не только визуализировать топографию поверхности, но и построить пространственную карту электронных и механических характеристик образца. Кроме того, СЗМ используется как нанолитограф, так как он обеспечивает наномодификацию поверхности за счет высокой плотности туннельного тока, высокой напряженности электрического поля и сильного механического давления в области наноконтакта. Следует отметить, что объектами визуализации, диагностики и модификации в СЗМ могут быть не только твердотельные

наноструктуры, но и образцы биологического характера. СЗМ может функционировать как в вакууме, так и в газе и жидкости.

Являясь на сегодняшний день наиболее совершенными инструментами исследования поверхности вещества в атомном масштабе, сканирующая туннельная (СТМ) и атомно-силовая (АСМ) микроскопия, тем не менее, обладает определенными ограничениями, к которым, прежде всего, следует отнести различные виды искажений, присутствующие в получаемых данных. Это связано с вибрацией зонда относительно образца, акустическими помехами, шумами электрической аппаратуры, всегда присутствующими при измерении слабых сигналов. Искажения в изображении также вносятся из-за теплового дрейфа зонда относительно образца, нелинейности и крипа в пьезокерамических элементах, из которых изготавливается сканер.

В связи с этим для получения СЗМ изображений высокого качества и проведения их количественного анализа требуется специальная цифровая обработка этих изображений.

2.2. Основные методы фильтрации СЗМ изображений

Матричная фильтрация.

Алгоритм фильтрации состоит в следующем. Из списка для выбора матричного фильтра выбирается указанная пользователем матрица-фильтр. Для каждой точки кадра матрица позиционируется так, чтобы ее центр лежал в данной точке кадра. Считается, что матрица задана на сетке кадра, т.е. для тех точек, в которых были измерены высоты кадра. Затем в каждой точке вычисляются сумма произведений высот кадра в точках, накрытых матрицей, на соответствующие элементы матрицы (веса) и сумма весов матрицы. При вычислении сумм, в том случае, если элемент матрицы находится за пределами кадра, соответствующий вес полагается равным нулю. Высота в каждой точке после фильтрации определяется как частное от деления вычисленных для данной точки сумм (первая сумма делится на вторую). Матричная фильтрация позволяет выполнять широкое множество операций над изображениями - сглаживание, дифференцирование и т.д. Операция конкретизируется путем задания размерности матрицы и весов.

Сглаживание. Сглаживание изображения в простейшем случае выполняется путем замены значения в каждой точке усредненным значением величин в некоторой окрестности этой точки.

Удаление наклона изображения путем вычитания плоскости. Наклон изображения может быть следствием наклонного положения образца по отношению к плоскости, в которой перемещается зонд при сканировании, а также может возникать вследствие теплового дрейфа.

Вычитание поверхности второго порядка. Методами СЗМ преимущественно исследуют тонкую структуру поверхности, поэтому грубый рельеф часто не информативен, и его необходимо устранять.

Удаление горизонтальных полос на изображении путем выравнивания средних значений элементов в каждой строке изображения. Наличие горизонтальных полос на изображении является характерным искажением СЗМ изображений. Это связано с тем, что изображения в СЗМ эксперименте обычно получаются путем построчного сканирования, и время между измерениями в соседних точках одной строки существенно меньше времени между измерениями соседних точек в направлении, перпендикулярном направлению сканирования.

Медианная фильтрация.

При медианной фильтрации для каждой точки изображения строится вариационный ряд для некоторой ее окрестности, то есть все элементы этой окрестности располагаются в порядке возрастания, и значение в этой точке заменяется на значение элемента, занимающего центральное положение в вариационном ряду. Медианная фильтрация особенно эффективна при обработке изображений, содержащих импульсные помехи. Медианная фильтрация полезна и в тех случаях, когда нужно убрать отдельные сильно выделяющиеся по высоте мелкие дефекты изображения.

2.3. Количественный анализ СЗМ изображений

Построение гистограммы изображения.

Одним из методов анализа изображений является построение гистограммы значений в точках изображения. При построении гистограммы горизонтальная ось содержит весь диапазон значений в точках изображения, а по вертикальной оси откладываются множества точек, имеющих данное значение для всех значений из этого диапазона.

Определение параметров шероховатости поверхности.

Для количественной характеристики СЗМ изображений часто используют параметры шероховатости изображения, которые определяются следующим образом:

$$\text{Средняя шероховатость } S_a = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} |z(x_k, y_l) - \mu|, \quad (1)$$

где μ средняя высота изображения:
$$\mu = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} z(x_k, y_l);$$

$$\text{Среднеквадратичная шероховатость } S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} [z(x_k, y_l) - \mu]^2}. \quad (2)$$

Для корректного определения шероховатости необходимо предварительно удалить неровность фона изображения, для этого вычистить плоскость либо удалить поверхность второго порядка.

Построение Фурье-спектра изображения.

Фурье-спектр пространственных частот изображения является его частотным представлением в ортонормальном базисе, состоящем из комплексных экспонент. Представление изображения в таком пространстве дает возможность наблюдать его структурные особенности, связанные с периодичностью повторения элементов, наличием мелких деталей и др. Пространственные частоты имеют размерность, обратную единицам измерения расстояний на изображении.

Представление изображения в базе комплексных экспоненциальных функций задается парой преобразований Фурье (рассматривается случай непрерывной функции интенсивности $a(x, y)$, заданной на бесконечном поле):

$$F(f_x, f_y) = \iint_{-\infty-\infty}^{\infty} a(x, y) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy \quad (3)$$

- прямое преобразование,

$$a(x, y) = \iint_{-\infty-\infty}^{\infty} F(f_x, f_y) \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy \quad (4)$$

- обратное преобразование,

где x, y - координаты в плоскости изображения,

f_x, f_y - пространственные частоты.

Понятия, связанные частотным представлением бесконечных непрерывных сигналов, также распространены на случаи сигналов ограниченной протяженности и дискретных сигналов, встречающиеся при цифровой обработке на практике.

Рассмотрим прямоугольное изображение шириной N и высотой M . Преобразование Фурье такого изображения имеет вид:

$$F(u, v) = \int_{-M/2-N/2}^{M/2} \int_{-N/2}^{N/2} f(x, y) \exp(-i2\pi(ux + vy)) dx dy \quad (5)$$

Преобразование Фурье ограниченного в пространстве сигнала ($f(x, y) = 0$ при $|x| > N/2$ и $|y| > M/2$), если его представить периодически размноженным по всей плоскости, является дискретным, т.е. содержит лишь счетное количество гармоник на частотах $[k/N, l/M]_{-\infty < k, l < \infty}$.

Спектр неограниченного в пространстве дискретного изображения является периодической функцией. Если расстояния между точками, в которых заданы отсчеты изображения по осям OX и OY , равны соответственно Δx и Δy , то периоды преобразования Фурье равны $1/\Delta x$ и $1/\Delta y$. Если начало отсчета поместить в центральной точке матрицы периодически повторяющегося фурье-образа, то максимальные пространственные частоты будут равны $\pm 1/2\Delta x$ и $\pm 1/2\Delta y$. Максимальная частота, которая может быть получена при заданном шаге дискретизации сигнала, называется частотой Найквиста. В полученном периодическом преобразовании Фурье дублирующиеся спектральные

составляющие можно отбросить и считать, что дискретный сигнал имеет ограниченный по частоте спектр.

Таким образом, просуммировав приведенные рассуждения, можно сделать вывод, что преобразование Фурье ограниченного в пространстве дискретного изображения является также дискретным и ограниченным по частоте. Максимальные пространственные частоты определяются шагом дискретизации изображения.

Ограниченность спектра дискретного изображения по частоте можно продемонстрировать, рассмотрев простой пример. Самый маленький период повторения на изображении мы можем получить, если будем чередовать белые и черные точки, например, вдоль оси OX . Этот период будет равен $2\Delta x$, а соответствующая пространственная частота равна $1/2\Delta x$.

Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) изображения, заданного в точках $f_{k,l}, k = 0, \dots, M-1, l = 0, \dots, n-1$ определяется по формуле

$$F_{m,n} = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{n-1} f_{k,l} \exp\left[-i2\pi\left(\frac{km}{M} + \frac{ln}{N}\right)\right] \quad (6)$$

Для графического представления Фурье-образа изображения строится матрица модулей комплексных величин преобразования, полученных по формуле (6). Для действительного изображения такая матрица является центрально симметричной. Отсчет частот ведется от ее центра. Значения пространственных частот увеличиваются от центра Фурье-образа к его краям. Фурье-образ изображения, состоящего из горизонтальных синусоидальных полос, представляет собой две точки, расположенные на вертикальной оси в частотной плоскости на одинаковом расстоянии f_0 от центра. При этом период T повторения полос на изображении равен $T = 1/f_0$.

3. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА МИКРОСКОПЕ СММ-2000

3.1. Режим расчета шероховатости сечения поверхности

- запустите программу микроскопа «Scan Master»;
- откройте файл ранее полученного 2D изображения рельефа, с которым будет проводиться работа;

- нажмите кнопку  на панели инструментов программы (указатель мышки изменяет свой вид на  R);

- нажатием левой кнопкой мышки проведите линию на изображении, вдоль которой хотите измерить шероховатость поверхности (рис. 1).

Команда  *Measure|Roughness|Section Roughness* предназначена для расчета шероховатости заданного пользователем сечения поверхности, изображаемой в активном 2D окне. Сечение задается с помощью задания

отрезка прямой в плоскости изображения. Секущая плоскость параллельна оси z (перпендикулярна плоскости изображения) и проходит через заданный отрезок.

При выполнении команды приложение переходит в режим задания отрезка для построения сечения поверхности изображения. Режим выключается при повторной выдаче команды *Measure | Roughness | Section Roughness*, а также при выдаче любой другой команды и при переходе в любое другое окно приложения.

С помощью мышки задается отрезок прямой, через который нужно провести секущую плоскость (левая кнопка нажимается на одном из концов отрезка, при нажатой кнопке мышка перемещается на второй конец отрезка, левая кнопка отпускается). После отпускания левой кнопки мышки информация о выбранном отрезке передается в окно измерения шероховатости по профилю (если это окно существует, то оно активизируется, если нет - то загружается). Окно осуществляет построение профиля сечения поверхности изображения на заданном отрезке прямой, для построенного профиля производится расчет и вывод параметров шероховатости.

Процедуру выбора мышкой сечения (отрезка) можно повторять многократно, при этом содержание измерительного окна будет обновляться при каждом выборе.

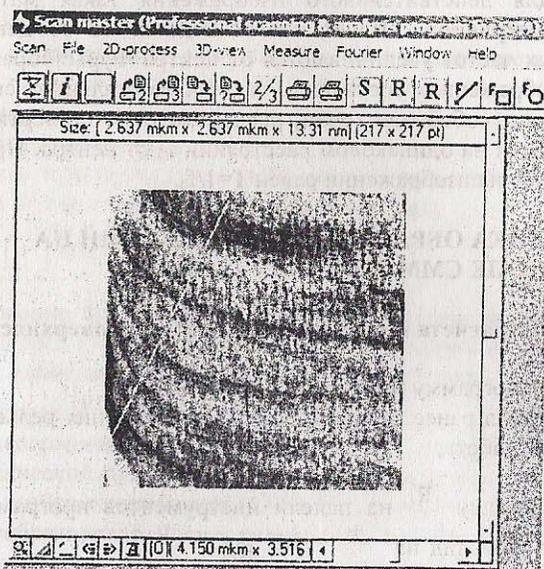


Рис. 1. Линия на изображении рельефа поверхности, вдоль которой измеряется шероховатость

- на экране появляются результаты измерения шероховатости вдоль выбранного направления (рис.2).

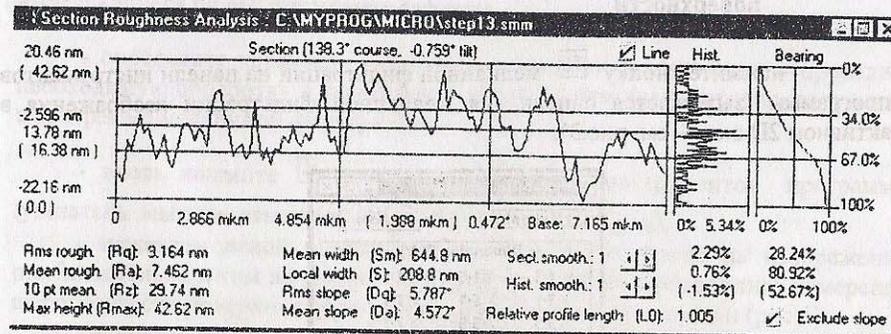


Рис. 2. Результаты измерения шероховатости вдоль выбранного направления

Окно на рис.2 предназначено для определения параметров шероховатости профиля, полученного в результате сечения изображаемой в 2D окне поверхности по выбранной мышкой линии.

Окно содержит три графика - график полученного в результате сечения профиля, гистограмму распределения точек профиля по высотам и график интеграла от гистограммы. Для определения параметров и координат точек кривых в окне имеются 4 измерительных маркера (две вертикальных и две горизонтальных линии на графиках), положение которых на графиках можно изменять с помощью мышки. Координаты маркеров выводятся в подписях к осям графиков.

Перед выводом на экран и расчетом параметров шероховатости графики могут быть сглажены. Уровень сглаживания задается регуляторами Sect.smooth и Hist.smooth. Способ получения и вывода графиков на экран задается переключателями Line и Exclude slope.

В нижней части окна выводятся рассчитанные по профилю параметры шероховатости профиля.

Для получения информации о методе расчета конкретного параметра шероховатости, элементе измерительного окна, графике и т.д. наведите указатель мышки на интересующий Вас элемент окна и после изменения вида указателя мышки щелкните левой кнопкой мышки.

- измерьте и зафиксируйте параметры шероховатости поверхности.

3.2. Режим медианной фильтрации изображения рельефа поверхности

- нажмите кнопку  медианной фильтрации на панели инструментов программы (загружается панель для медианной фильтрации изображения в активном 2D окне – см. рис.3).

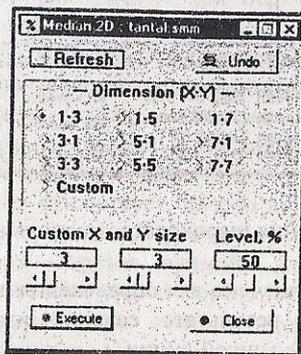


Рис.3. Панель для медианной фильтрации изображения

Команда  `2D-process|Median filtering` загружает панель для медианной фильтрации изображения в активном 2D окне. Для каждого из 2D окон может быть открыта своя панель (имя файла 2D окна, для которого панель загружена и фильтрацией изображения в котором управляет, указано на заголовке панели). Панель связана со своим окном; при закрытии окна панель также автоматически закрывается.

Панель позволяет проводить медианную фильтрацию изображения с задаваемым пользователем уровнем по заданной пользователем матрице точек изображения. Имеется возможность отмены операций фильтрации.

Панель предназначена для выполнения операции медианной фильтрации над изображаемым в 2D окне кадром (сканом). Алгоритм фильтрации состоит в следующем. Для каждой точки кадра строится прямоугольник (матрица) с размерами, указанными пользователем, и центром, расположенным в данной точке кадра. Размеры прямоугольника можно либо выбрать из списка нескольких наиболее употребительных с помощью переключателя Dimension, либо задать произвольные размеры с помощью регуляторов Custom X and Y size. Из высот точек кадра, попавших в прямоугольник, формируется список; список сортируется в порядке возрастания высот. В качестве нового значения высоты данной точки кадра из списка выбирается та высота, номер которой в отсортированном списке ближе всего к номеру, определяемому условием: $n = (N_x * N_y - 1) * (Level / 100)$, где N_x , N_y - размеры прямоугольника по x, y соответственно (размерность матрицы), Level - уровень медианной фильтрации в % (задается пользователем с помощью регулятора Level). Медианная

фильтрация полезна в тех случаях, когда нужно убрать отдельные сильно выделяющиеся по высоте мелкие дефекты.

- определите характер имеющихся искажений изображения и проведите необходимую обработку и фильтрацию данных с помощью методов, доступных в программе медианной фильтрации;

- вновь нажмите  кнопку на панели инструментов программы (указатель мышки изменяет свой вид на  R);

- нажатием левой кнопки мышки проведите линию на изображении приблизительно в том же направлении, вдоль которого проводились измерения шероховатости поверхности до операции медианной фильтрации (рис.1);

- измерьте и зафиксируйте параметры шероховатости (рис.2) поверхности после медианной фильтрации изображения;

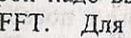
- сравните результаты измерения шероховатости до и после медианной фильтрации изображения.

3.3. Фурье-преобразование изображений поверхности

- вернитесь к исходному 2D изображению рельефа;

- нажмите  кнопку на панели инструментов программы.

Команда  выполняет двумерное быстрое преобразование Фурье – БПФ (фильтрация производится с помощью фильтра Баттерворта 1-го, 2-го, 4-го или 8-го порядка) указанной пользователем части изображения активного 2D окна и создает новое 2D окно с *Фурье-образом изображения*. Дополнительно создается 2D окно, в которое помещается выбранная пользователем для БПФ часть изображения. Имена новых окон совпадают с именем исходного окна, расширение окна с БПФ заменяется на .fft, а для окна с выбранной частью изображения на .cut.

При выдаче команды приложение переходит в режим выбора части изображения, БПФ которой надо выполнить. При этом вид указателя мышки изменяется на  FFT. Для выбора нужной части изображения пользователь должен нажать левую кнопку мышки и, удерживая ее, выбрать размер и положение преобразуемой части изображения (см. ниже). При отпускании левой кнопки программа выполнит БПФ и создаст новые окна.

При нажатии левой кнопки мышки на экране появляется квадрат размером 16x16 точек, перемещающийся вместе с указателем мышки. Часть изображения, попадающая в квадрат в момент отпускания левой кнопки мышки, выделяется для преобразования. Размер квадрата можно изменять путем нажатия на правую кнопку мышки (при удерживаемой левой). При каждом нажатии размеры квадрата увеличиваются в 2 раза. Если размеры нового квадрата больше размеров изображения, то размер квадрата

принимается равным 16×16 . Другими словами, размер преобразуемой части изображения меняется циклически по кругу: $(16 \times 16) \Rightarrow (32 \times 32) \Rightarrow \dots \Rightarrow$ (максимально возможный, кратный $2^{**}n$, не превосходящий размеров изображения) $\Rightarrow (16 \times 16) \Rightarrow \dots$

- удерживая левую кнопку мышки, правой кнопкой выбираем размер квадрата для преобразования, который перемещается вместе с указателем мышки;

- выбрав площадку для преобразования, отпускаем левую кнопку мышки (на экране открывается окно с Фурье-образом части исследуемой поверхности (рис. 4) и второе окно с изображением рельефа выбранной площадки).

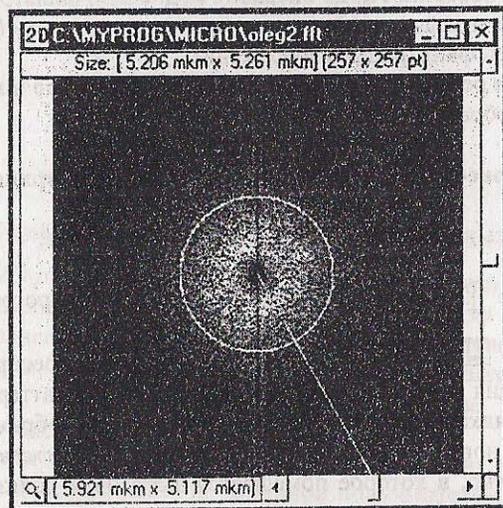


Рис. 4. 2D окно с Фурье-образом изображения поверхности

Окно с Фурье-образом поверхности открывается в результате применения двумерного быстрого преобразования Фурье к поверхности и отображается и обрабатывается 2D окном специальным образом. Состав окна и управление окном (увеличением, прокруткой) практически совпадают с составом и управлением 2D окна с изображением поверхности.

Результаты Фурье-преобразования хранятся в окне (и в файле с Фурье-образом, расширение .FFT) в виде двух массивов вещественных чисел - вещественной и мнимой частей Фурье-амплитуд. Размерность этих массивов совпадает с размерностью выбранной для БПФ части поверхности 2D окна с изображением, и равна $N \times N$, где N является степенью двойки, $N=2^{**}m$.

Для отображения Фурье-образа в окне строится симметризованный относительно центральной точки Фурье-образа (точки с частотами по X и Y , равными нулю) массив модулей амплитуд. Размерность симметризованного

массива модулей амплитуд равна $(N+1) \times (N+1)$. Из массива исключается центральная точка (амплитуда в ней полагается равной нулю), затем все элементы массива логарифмируются (точнее, вычисляется $\log_{10}(A_{ij}+1)$, где A_{ij} - модуль амплитуды в i -й точке по X и j -й точке по Y массива). Прологарифмированный массив отображается в палитре окна обычным образом (см. описание 2D окна с изображением). Принятый способ отображения обусловлен большим разбросом Фурье-амплитуд по порядку величины. При отображении в линейном масштабе картинка на экране выглядит неинформативно - за исключением одной-двух точек, все полученное изображение будет черным.

Все операции с Фурье-образом (фильтрация, обратное БПФ и т.д.) выполняются над массивами вещественных и мнимых частей Фурье-амплитуд, каждый раз после операции массив модулей амплитуд и изображение в окне формируются заново.

- нажмите кнопку  на панели инструментов программы (рис.5).

Многие из операций измерения и математической обработки для Фурье-образа не имеют смысла, поэтому кнопки для выполнения этих операций убираются с инструментальной панели (при переходе в 2D окно с Фурье-образом). Соответствующие пункты меню делаются для окна недоступными. Вместо них на инструментальную панель добавляются кнопки для выполнения операций частотной фильтрации. Проведение измерений на Фурье-образе проводится с помощью специального окна анализа Фурье-образа. При загрузке окна анализа в окне появляются два маркера (белый круг вокруг центра Фурье-образа и луч, выходящий из центра), положение которых связано с положением измерительных маркеров в окне анализа Фурье-образа.

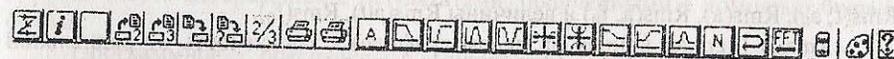


Рис.5. Панель инструментов, открывающаяся при Фурье-анализе

Команда  *Fourier|Analyze FFT* загружает окно анализа Фурье-образа (рис.6), позволяющее получать информацию об амплитудах Фурье-изображения в зависимости от радиуса и углов. Одновременно в 2D окне с Фурье-образом изображения появляются маркеры, указывающие радиус и угол сечений, для которых построены графики в окне анализа Фурье-образа.

Окно содержит два графика. Каждый из графиков может содержать две кривые, выводом которых на график управляют два переключателя над графиком (при включенном переключателе соответствующая кривая рисуется на графике, при выключенном - нет). Масштабом осей графиков (линейный или логарифмический) управляют два переключателя, расположенных в правом нижнем углу окна. В правой части окна имеются три регулятора *Angle step*, *Cells num*, *Filter Width*, с помощью которых выбирается шаг по углу и количество ячеек по радиусу в сетке, используемой для получения

зависимостей (кривых), построенных на графиках, и уровня сглаживания кривых перед выводом их на экран.

На левом графике строятся зависимости $Rms(f)$ (черная кривая) и $Rms(f, a_0)$ (синяя кривая), на правом - $Rms(a)$ (черная кривая) и $Rms(a, f_0)$ (синяя кривая).

Фурье-образ, полученный в результате БПФ части поверхности из 2D окна размером $N \times N$ точек (N должно быть равно 2^{**m}) и отображаемый в окне с Фурье-образом 2D изображения, также содержит $N \times N$ точек. Точки расположены на прямоугольной (близкой к квадратной) сетке в плоскости пространственных частот (f_x, f_y) .

Прежде всего рассчитывается величина Rms как корень квадратный из суммы квадратов амплитуд всех точек Фурье-образа, за исключением нулевой (той, у которой $f_x=f_y=0$). (Rms связан со среднеквадратичным разбросом высот точек исходной поверхности).

Затем в плоскости (f_x, f_y) вводится полярная система координат (f, a) , где f - радиальная частота, a - полярный угол. В полярной системе строится равномерная по углам и радиальной частоте сетка, шаг по углу и количество ячеек по радиальной частоте в которой определяется регуляторами Angle step и Cell num. Сетка покрывает диапазон углов 0-360 градусов (из-за центральной симметрии Фурье-образа на графиках достаточно отображать диапазон углов 0-180 градусов) и радиальных частот 0- f_{max} . В качестве f_{max} принимается минимальная из двух максимальных по точкам Фурье-образа частот f_{xmax}, f_{ymax} .

Далее, для каждой ячейки построенной сетки вычисляется величина $S(f, a)$, равная сумме квадратов модулей Фурье-амплитуд точек, попавших в данную ячейку (f нумерует ячейки по радиусу, a - по углу). Точка, соответствующая началу координат (у которой $f_x=f_y=0$), из подсчетов исключается. По вычисленной $S(f, a)$ рассчитываются зависимости $Rms(f)$, $Rms(f, a_0)$, $Rms(a)$, $Rms(a, f_0)$ и величины $Rms(a_0)$, $Rms(f_0)$.

$Rms(f)$ (черная кривая на левом графике) - зависимость от радиальной частоты f корня квадратного из суммы $S(f, a)$ по углам a (зависимость корня из суммы квадратов амплитуд точек, попавших в кольцо сетки с радиальной частотой f).

$Rms(a)$ (черная кривая на правом графике) - зависимость от полярного угла a корня квадратного из суммы $S(f, a)$ по частотам f (зависимость корня из суммы квадратов амплитуд точек попавших в ячейки сетки с полярным углом a (т.е. в сектор плоскости с углом a)).

$Rms(f, a_0)$ (синяя кривая на левом графике) - зависимость от радиальной частоты f корня квадратного из $S(f, a)$ при фиксированном угле $a=a_0$ (зависимость Rms от частоты f на луче с углом a_0). Угол a_0 задан черным измерительным маркером на правом графике.

$Rms(a, f_0)$ (синяя кривая на правом графике) - зависимость от полярного угла a корня квадратного из $S(f, a)$ при фиксированной частоте $f=f_0$ (зависимость Rms от угла a_0 на кольце радиуса f_0). Частота f_0 задана черным измерительным маркером на левом графике.

$Rms(a_0)$ (синее число у флажка над левым графиком) - значение $Rms(a)$ при угле $a=a_0$. Угол a_0 выбран черным измерительным маркером на правом графике. $Rms(a_0)$ равен корню квадратному из суммы квадратов ординат всех точек синей кривой левого графика.

$Rms(f_0)$ (синее число у флажка над правым графиком) - значение $Rms(f)$ при частоте $f=f_0$. Частота f_0 выбрана черным измерительным маркером на левом графике. $Rms(f_0)$ равен корню квадратному из суммы квадратов ординат всех точек синей кривой правого графика.

- откройте соответствующее окно в программе обработки изображений (например, Команда  Measure|Scan Section, позволяющая строить и измерять параметры заданных пользователем сечений поверхности). Определите по характеру спектра, имеются ли на изображении периодические структуры. Если имеются, то измерьте величины преобладающих частот, указав на них на изображении Фурье-образа. Сравните измеренную периодичность изображений с результатами, полученными с помощью Фурье-образа.

Программное обеспечение микроскопа «Scan Master», кроме сканирования и двух-, трёхмерного просмотра кадров в редактируемых палитрах, производит практически все возможные виды обработки и анализа кадров и является наиболее полнофункциональным пакетом для зондовой микроскопии, применяемым и для микроскопов других видов и других производителей.

Описание всех функций обработки кадров (процентильная, медианная, матричная, конволюция, гауссовы и сдвиговые фильтры, междукадровая арифметика, сшивка кадров, спецфункции устранения наклона кадров и сбоев иглы, вычитания N -мерной функции подложки, вычленения мелких деталей и др.), а также всех видов анализа изображений (Фурье, полный морфологический, корреляционный, автокорреляционный, фрактальный, анализ параметров шероховатости, гистограмм высот и др.) - находится во встроенной контекстнозависимой функции Help. Если необходима помощь в использовании какой-либо опции программного обеспечения, необходимо щёлкнуть мышью на знак вопроса в меню программы и далее курсором,

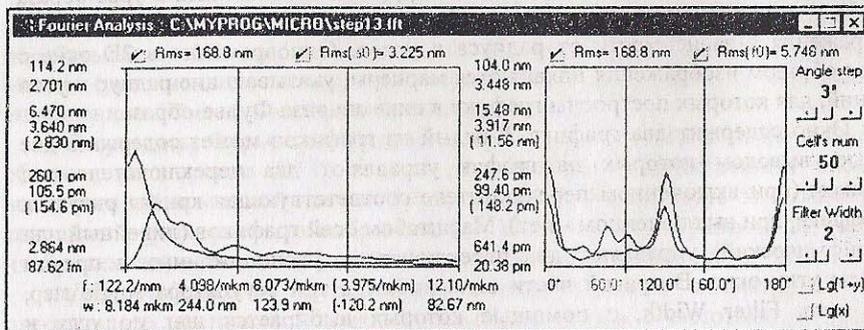


Рис.6. Измерительное окно анализа Фурье-образа

ставшим после этого по виду как знак вопроса, щёлкнуть на любом окне и любом параметре. При этом возникнет не только справка в виде относящейся именно к нужному окну одной из более чем 200 страниц гипертекста, но и примерный вид нужного окна, на котором при щелчке мыши выдаются объяснения любого параметра окна. Такой уникальный вид объяснения параметров в любом окне даёт возможность чрезвычайно быстрого нахождения помощи – объяснения по нужному вопросу быстрее, чем чтение гипертекста.

4. ЗАДАНИЕ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ

Проведите анализ ранее полученного изображения:

- Изучите основные методы и алгоритмы обработки изображений в сканирующей зондовой микроскопии.
- Выполните медианную фильтрацию ранее полученного изображения.
- Измерьте и сравните параметры шероховатости изображения до и после фильтрации.
- Постройте Фурье-спектр изображения и измерьте величины преобладающих пространственных частот спектра; сравните соответствующие этим частотам периоды повторения элементов изображения с интервалами, полученными при измерениях на 2D изображении.

5. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет составляется в соответствии с порядком выполнения заданий и должен включать:

- наименование работы;
- цель работы;
- краткое описание оборудования, образцов, методик анализа изображений в СЗМ - исследованиях;
- изображения рельефа поверхности тестового образца с периодической структурой до и после медианной фильтрации;
- анализ шероховатости выбранного профиля сечения образца до и после медианной фильтрации;
- анализ рельефа поверхности тестового образца с измеренной периодической структурой до и после обработки методом Фурье-анализа.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Какие типы искажений характерны для СЗМ изображений и по каким причинам они возникают?
- Каковы основные методы фильтрации СЗМ изображений?
- Назовите некоторые методы определения количественных характеристик изображений.

- Для каких изображений следует воспользоваться частотным представлением?
- Какую информацию об изображении можно получить по его Фурье-образу?

Рекомендуемая литература

1. Львов Б. Г., Бондаренко Г. Г., Николаевский А. В. Сканирующая зондовая микроскопия в исследовании поверхностной структуры наноматериалов – МИЭМ. М., 2010. – 26 с.
2. Львов Б. Г., Бондаренко Г.Г., Николаевский А. В. Изучение приемов эксплуатации сканирующего зондового микроскопа СММ-2000 – МИЭМ. М., 2010. – 28 с.
3. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен – М. : Мир, 1976. – 511 с.
4. Прэтт У. Цифровая обработка изображений – М. : Мир, 1982. – 790 с.
5. Ярославский Л.П. Введение в цифровую обработку изображений – М. : Сов.радио, 1979. – 312 с.

Учебное издание

Цифровая обработка и анализ изображений поверхностных наноструктур в сканирующем зондовом микроскопе СММ-2000

Составители:

ЛЬВОВ Борис Глебович
БОНДАРЕНКО Геннадий Германович
НИКОЛАЕВСКИЙ Анатолий Владимирович

Редактор Е.С. Резникова
Технический редактор О.Г. Завьялова

Подписано в печать 29.03.2011 г. Формат 60x84/16.

Бумага офсетная. Печать-ризография.

Усл. печ. л. 1,1. Уч.-изд. л. 0,9. Тираж 50 экз.

Заказ 82. Изд. №31.

Московский государственный институт электроники и математики.

109028, Москва, Б. Трехсвятительский пер., 3.

Отдел оперативной полиграфии Московского государственного института
электроники и математики.

115054, Москва, ул. М. Пионерская, 12.