

УДК 539.25: 620.187

## СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗ 2D 3D ИЗОБРАЖЕНИЯ В СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОСКОПИИ

Григоров И.Г., Строшков В.П., Зайнулин Ю.Г.

Возможности современных вычислительных средств и методов машинной графики стимулируют развитие новых направлений в разработке методов формирования "реалистичных изображений". Речь идет об изображениях, которые можно наблюдать визуально с помощью оптических или оптоэлектронных устройств. Необходимость в создании такого типа изображений возникает в тех случаях, когда это может быть использовано для оценки качества сканирования трехмерного объекта, либо для получения дополнительной информации о пространственных характеристиках объекта. В этом случае формирование трехмерного (3-D) изображения должно обеспечивать передачу всей совокупности особенностей объекта: объемность, расположение деталей, полутона, текстура поверхности и т. д. [1].

Применительно к микроскопии методика построения 3-D изображения микрообъекта имеет свои особенности относительно методов машинной графики, обусловленные спецификой процесса формирования изображения в микроскопе.

Основным отличием является то обстоятельство, что для систем машинной графики источником входной информации являются не сами физические объекты, а их математические модели. Общим же для всех систем, формирующих 3-D изображения, является отображение объекта в виде синтезированного 3-D изображения на экране дисплея. При этом обрабатывающие программы должны передавать ощущение глубины пространства, пространственной формы и структуры объектов. Определяющим при этом является уровень соответствия (подобия) синтезируемого изображения оригиналу.

К наиболее наглядным и прямым методам визуализации 3-D параметров микро- и нанообъектов, относятся методы растровой электронной микроскопии (РЭМ) и сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ): туннельной (СТМ) и атомно-силовой (АСМ) [2, 3]. Методы СЗМ, в отличие от РЭМ, позволяют непосредственно в процессе сканирования поверхности исследуемого объекта создавать ее трехмерный образ, однако диапазон измеряемого перепада высот ( $\pm 1$  мкм), а также размер поля сканирования (менее  $50 \times 50$  мкм<sup>2</sup>), существенно меньше чем у РЭМ, для которых они составляют сотни микрон.

Для того чтобы получить наиболее полную информацию об исследуемом объекте с помощью РЭМ, необходимо иметь четкое представление о процессе формирования изображения, включая:

1 - принцип сканирования, используемый для построения изображения;

2 - природу механизмов формирования контраста, возникающих из-за взаимодействия электронного пучка с образцом;

*Описана методика формирования трехмерного изображения в цифровой форме реального физического объекта, путем получения микрорельефа его поверхности методом растровой электронной микроскопии и коррекцией данных трехмерного преобразования методами сканирующей зондовой микроскопии.*

3 - характеристики регистрирующих детекторов и их выходных сигналов;

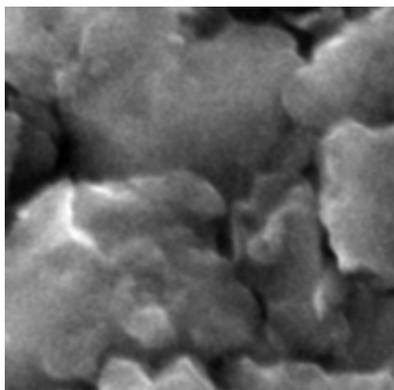
4 - влияние на качество окончательного изображения предварительной обработки сигналов.

Кажущаяся простота интерпретации изображений объектов с шероховатой поверхностью, понятная даже для людей, незнакомых с работой РЭМ, может зачастую содержать гораздо больше информации, чем видит глаз. Поэтому, чтобы быть уверенным, что изображение правильно сформировано и синтезировано с помощью компьютера, необходимо иметь четкое представление о процессе его формирования [4].

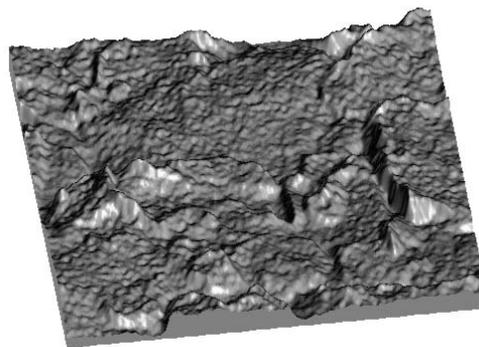
Электронная оптика РЭМ позволяет сформировать электронный пучок, который характеризуется тремя параметрами: ток пучка ( $10^{-12} \div 10^{-6}$  А), диаметр пучка (1 нм  $\div$  1 мкм) и угол схождения ( $10^4 \div 10^2$  ср.). Соотношение между ними дает уравнение для яркости видеосигнала. Контрастность видеосигнала можно определить, как разность между максимальным и минимальным сигналами яркости, деленную на максимальный сигнал яркости.

При сканировании электронного пучка по поверхности образца внутри области взаимодействия происходит как упругое, так и неупругое рассеяние, в результате чего в детекторах возникают сигналы за счет упругих (отраженных) вторичных и поглощенных электронов, характеристического и непрерывного рентгеновского излучения, катодолюминесцентного излучения [4-7]. Детекторы и видеосистема РЭМ преобразует эти сигналы в пропорциональный сигнал яркости на экране монитора. Поэтому на экране можно наблюдать только монохромное (одноцветное) изображение в градациях "серого". Следовательно, синтезированное изображение, полученное с помощью РЭМ, должно соответствовать оригиналу только, как модель одноцветного зрения [8].

Видеосистема РЭМ синтезирует двухмерное изображение, в котором теряется информация, определяемая бинокулярным зрением. Она способна воспроизводить лишь условия монокулярного наблюдения. Объемность изображения оригинала воспринимаются благодаря характеру теней, изменению тона, загромождению одних объектов другими и линейной перспективе. Существенное значение для восприятия объема и пространства изображения, полученного с помощью РЭМ, имеет опыт наблюдателя, благодаря которому объемная структура может быть "достроена".



а)



б)

Рис. 1. Пример формирования трехмерного изображения микрорельефа поверхности:

а) 2-D изображение 12x12 мкм поверхности излома сплава, РЭМ, увеличение 5000;

б) 3-D изображение поверхности излома сплава с тем же увеличением, сформированное по его 2-D изображению.

Максимальное приближение к оригиналу можно обеспечить, если математически создать модель съемки, т. е. обрабатывающая программа должна учесть расположение объекта относительно первичного электронного пучка и регистрирующих детекторов, геометрическую форму объектов, их взаимное положение, условия энергетического подбора, размер и положение теней и т. д. [1].

В данной работе предлагается методика комплексного использования РЭМ и СЗМ (СТМ и АСМ) для формирования 3-D изображения поверхности, исследуемых с большой протяженностью (>100 мкм) и шероховатостью (>1 мкм) объектов.

Первоначально рассмотрим способ моделирования 3-D изображения, полученного методом РЭМ. Для формирования 2-D изображения использовался парносимметричный детектор РЭМ BS-301 Tesla в режиме А+В. Контрастность и яркость такого изображения пропорциональны изменению высот деталей рельефа относительно базового уровня, что соответствует фронтально освещенному объекту оптического изображения (рис. 1, а) [4-7]. Организация цифрового образа двумерного (2-D) изображения осуществлялась при помощи контроллера ввода изображения с РЭМ в персональный компьютер (ПК) [9]. Данный контроллер разработан в Институте химии твердого тела УрО РАН и позволяет вводить в ПК изображение с РЭМ за один кадр сканирования (оптимальный размер кадра 1900x1500 пиксель). Для создания 3-D изображения (рис. 1, б), введенного в ПК с РЭМ 2-D, дополнительно использовались сканирующий зондовый микроскоп CMM-2000T и пакет программ Scan Master (www.zproton.ru).

Так как поле сканирования СЗМ было значительно меньше поля сканирования РЭМ, то, первоначально, для получения точных количественных характеристик шероховатости поверхности определялись среднеквадратичная шероховатость ( $R_q$ ) и максимальная высота профиля ( $R_{max}$ ) 3-D изображений, полученных на СЗМ в наиболее характерных участках исследуемой поверхности.

В дальнейшем, критерием для выбора увеличения при съемке на РЭМ являлось получение «представительного» вида изображения поверхности образца. Иначе говоря, увеличение выбиралось таким образом, чтобы хорошо были видны особенности микрорельефа поверхности, а характер их расположения на поверхности был бы равномерен и соответствовал среднему удельному значению их плотности

относительно площади поверхности.

Программа Scan Mast позволяет преобразовывать 2-D изображение в цифровом формате BMP в градациях серого (монохромное изображение) в 3-D изображение, если предварительно заданы максимальные параметры ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) трехмерного образа изображения.

Параметры  $x$  и  $y$  задавались увеличением при съемке на РЭМ, а для определения параметра  $z$  использовались данные  $R_{max}$ , полученные на СЗМ. Кроме того, данные  $R_q$  и  $R_{max}$  использовались для корректировки при преобразовании 2-D изображения с РЭМ в 3-D программой Scan Master путем сравнения и подгонки параметров, получаемых при данном преобразовании с данными СЗМ анализа шероховатости образца [10].

#### Литература

1. Иванов В. П. Трехмерная компьютерная графика / В. П. Иванов, А. С. Батраков. М.: Радио и связь, 1995. 224 с.
2. Барндо Д. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля / Д. Барндо, У. Каплан. М.: Техносфера, 2004. 384 с.
3. Мионов В. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004. 144 с.
4. Голдштейн Дж. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ / Дж. Голдштейн, Д. Ньбери, П. Эплин и др.: В 2 т. М.: Мир, 1984. Т. 1. 303 с.
5. Кальнер В. Д. Практика микроскопических методов исследования металлов и сплавов / В. Д. Кальнер, А. Г. Зильберман. М.: Металлургия, 1981. 216 с.
6. Физическое металловедение / Под ред. Р. У. Кана и П. Хаазена: В 3 т. М.: Металлургия, 1987. Т. 1. 640 с.
7. Гаранин В. К. Применение электронно-зондовых приборов для изучения минерального вещества / В. К. Гаранин, Г. П. Кудрявцева. М.: Недра, 1983. 216 с.
8. Прэнт У. Цифровая обработка изображений: В 2 т. М.: Мир, 1982. Т. 1. 312 с.
9. Григоров И. Г. Изучение особенностей микроструктуры и физико-механических характеристик сплавов на основе карбонитрида титана методом цифровой растровой микроскопии. Автореф. дис. ... канд. хим. наук Екатеринбург, 2002. 31 с.
10. Строщков В. П. Высокоточное электрохимическое формообразование сложнопрофильного инструмента для деталей машин / В. П. Строщков, В. А. Пшеничников, В. Л. Кожевников. Екатеринбург: Изд. УрО РАН, 2005. 212 с.