

# МЕТОДИКА СРАВНЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ СЕГМЕНТАЦИИ И МОРФИНГА

**А. В. Тюриков, А. С. Суворов, Н. И. Осипов,  
С. Р. Кизнерцев, С. И. Липанов**

Институт прикладной механики УрО РАН  
г. Ижевск

В настоящее время стало актуальным применение в современном материаловедении наноразмерных ультрадисперсных частиц. Их использование позволяет существенно усовершенствовать характеристики традиционных материалов, при этом свойства новых материалов крайне чувствительны к размерам частиц. Известные физико-химические и механические методы изготовления частиц нанометровых размеров не позволяют сосредоточить их размеры в достаточно узком диапазоне, поэтому задача контроля дисперсности наночастиц при создании новых перспективных наноматериалов на их основе является актуальной.

При контроле дисперсности наночастиц с применением сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) большое значение имеет решение задачи формирования и автоматической идентификации их изображений, что требует получения максимально достоверных теоретических и экспериментальных СТМ-изображений наночастиц, поэтому их моделирование является важной задачей в рамках поставленной цели. Для моделирования туннельного тока разработан метод, включающий в себя трехмерную информацию об электронно-атомном строении исследуемой поверхности. Подобная модель не может быть реализована аналитически и допускает лишь численную обработку с применением методов математического моделирования. Такая методика создана согласно теории Бардина, использующей модель туннельного матричного элемента в рамках теории возмущений. Расчет туннельных матричных элементов выполнялся с применением разложения электронных состояний поверхности и зондирующей иглы по базису функций гауссова типа.

Полученные теоретические СТМ-изображения наночастиц используются далее для автоматической идентификации реальных изображений наночастиц, которая затруднена вследствие ряда факторов (таких как точность позиционирования и острота

зондирующего острия СТМ, наличие внешних помех и др). Степень достоверности построения теоретических СТМ-изображений, в свою очередь, зависит от погрешности метода расчета и принятых допущений. Поэтому сравнение теоретических и экспериментальных СТМ-изображений для оценки степени их соответствия является важной задачей.

На начальном этапе процесса сравнения теоретических и экспериментальных СТМ-изображений производится их нормализация в соответствии с размером и углом наклона (рисунок 1).

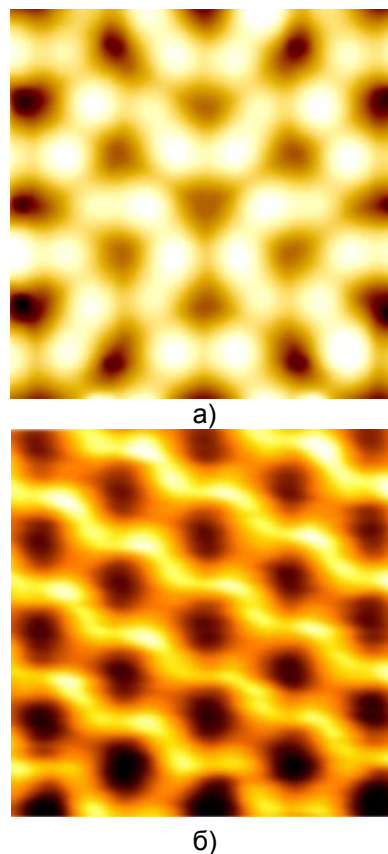


Рисунок 1 – Нормализованные СТМ-изображения структуры графита в соответствии с размером и углом наклона: а – теоретическое; б – экспериментальное

Следующим шагом является процесс автоматического выравнивания уровней цветовых каналов STM-изображений, признаком окончания которого является максимальное соответствие друг другу соответствующих гистограмм STM-изображений (рисунок 2) [3].

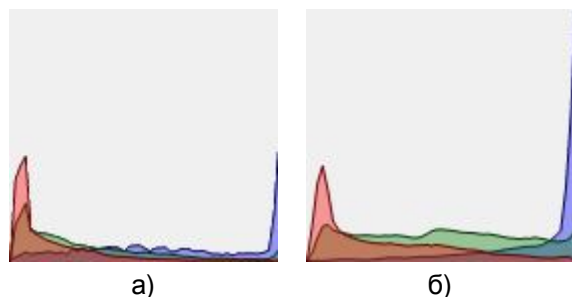


Рисунок 2 – Гистограммы цветочных каналов STM-изображений структуры графита: а – теоретического; б – экспериментального

Далее полученные STM-изображения подвергаются сегментации, заключающейся в следующем. Сначала определяется пороговое значение на основе вычисления градиента яркости STM-изображения. Затем производится разделение изображения на два слоя (объекты и фон) на основе сопоставления значения яркости каждой точки изображения с заданным значением порога [1]. Модуль градиента яркости для каждой точки изображения определяется согласно:

$$G(m, n) = \max \{ |G_m(m, n)|, |G_n(m, n)| \}$$

$$G_m(m, n) = f(m+1, n) - f(m-1, n)$$

$$G_n(m, n) = f(m, n+1) - f(m, n-1).$$

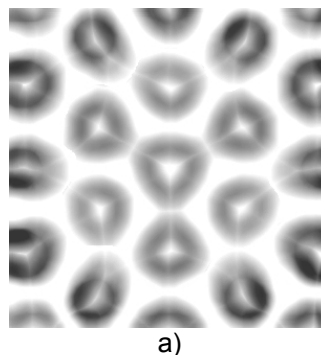
Вычисление порогового значения выполняется следующим образом:

$$t = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) G(m, n)}{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} G(m, n)}.$$

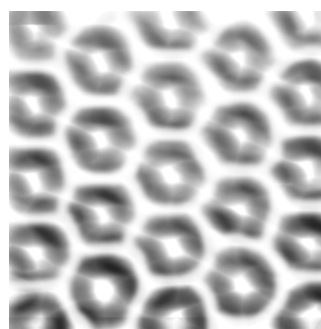
Полученные в результате данной операции STM-изображения приведены на рисунке 3.

Следующим этапом сравнения STM-изображений является JSEG-сегментация [4], которая заключается в выделении границ объектов на изображении (рисунок 4).

На заключительной стадии происходит выделение паттернов изображения, сравнивается площадь и расположение объектов относительно друг друга, происходит поиск зависимостей между объектами.

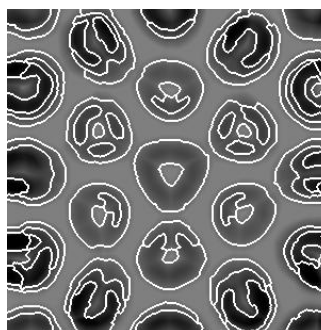


а)

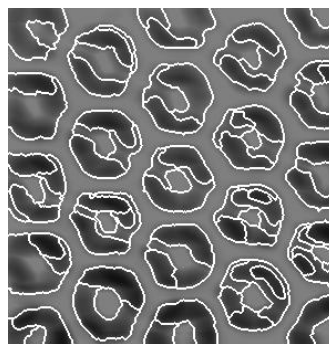


б)

Рисунок 3 – Сегментированные STM-изображения структуры графита: а – теоретическое; б – экспериментальное



а)



б)

Рисунок 4 – STM-изображения структуры графита после JSEG-сегментации: а – теоретическое; б – экспериментальное

## МЕТОДИКА СРАВНЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ СЕГМЕНТАЦИИ И МОРФИНГА

Степень соответствия теоретического и экспериментального СТМ-изображений можно оценить погрешностью  $E$  с помощью алгоритма морфинга одного изображения в другое [2], которая вычисляется по формуле:

$$E = \frac{S_m}{N},$$

где  $S_m$  – число шагов, необходимых для трансформации одного изображения в другое;  $N$  – число точек одного изображения.

Для СТМ-изображений структуры графита, представленных на рисунке 4, погрешность  $E$  составила ~12%.

Таким образом, можно констатировать, что разработана методика сравнения СТМ-изображений на основе алгоритмов сегментации и морфинга. Она позволяет количественно оценить степень соответствия теоре-

тических и экспериментальных СТМ-изображений, их достоверность, что является необходимым для решения задачи автоматического распознавания экспериментальных СТМ-изображений наночастиц.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хуанг Т.С. и др. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. – М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.
2. Image Metamorphosis With Scattered Feature Constraints IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics, vol. 2, no. 4, pp. 337-354, 1996.
3. Сойфер В.А. Компьютерная обработка изображений. Часть 2. Методы и алгоритмы. – Соросовский образовательный журнал №3, 1996.
4. Yining Deng, B.S. Manjunath. JSEG - segmentation of color-texture regions in images and video // Vision Research Lab, UCSB. 2000.