

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ОСТРИЯ ЗОНДА НА ФРАКТАЛЬНУЮ РАЗМЕРНОСТЬ ПРОФИЛЯ РЕЛЬЕФА

А. М. Евтухов

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, ул. Советская 104, 246050 г. Гомель, Беларусь

Сейчас, когда развитие техники идёт в сторону всё большей миниатюризации элементов механических и, в частности, радиоэлектронных систем, всё большее значение приобретают методы измерения геометрических свойств поверхностей на микро- и наноуровне. Метод сканирующей зондовой микроскопии относится как раз к таким методам. Более того, этот метод позволяет получить не просто двумерное изображение, как, например, в случае электронного микроскопа, а трёхмерный образ рельефа. Однако у метода СЗМ есть и недостатки. Один из них заключается в том, что зонд, которым проводятся измерения, не идеален по форме и вносит искажения в получаемый образ рельефа. Некоторые из этих искажений достаточно хорошо теоретически исследованы в работе [1].

В настоящей работе использовалось предположение, что большинство поверхностей в природе имеет фрактальную природу [2], из-за чего для описания таких объектов уже нельзя использовать такие базовые понятия геометрии, как длина, площадь или объём, и многие физические свойства у объектов с фрактальной природой приходится выражать через такую величину, как фрактальная размерность. Поэтому важно уметь точно оценить фрактальную размерность у рельефов, отсканированных при помощи СЗМ-методов. Однако, как было сказано, неидеальность формы острия зонда вносит искажения в форму получаемого образа рельефа. Выяснение того, насколько значительны эти искажения, является целью данной работы.

Исследования проводились с использованием АСМ-изображений, предоставленных лабораторией «Микромеханика поверхности» ИММС НАНБ, и полученных при помощи атомно-силового микроскопа «Нанотоп-203». На основе одного из этих цифровых рельефов (рис. 1) была рассчитана форма острия зонда, которым был отсканирован другой рельеф (рис. 2).

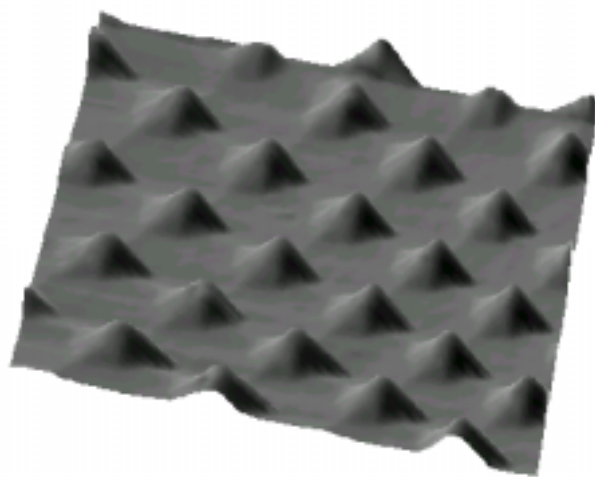


Рис. 1. АСМ-изображение тест-образца TGT-01

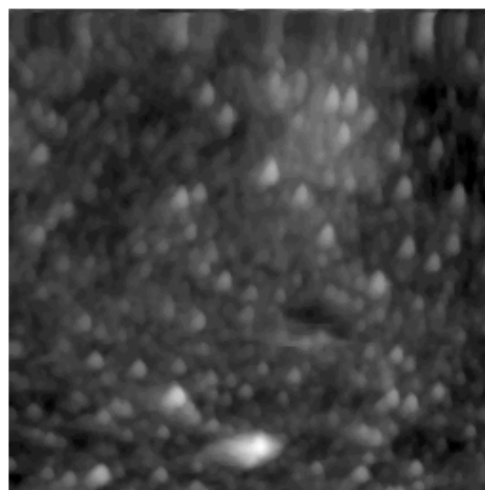


Рис. 2. Исходное АСМ-изображение, использованное при реконструкции рельефа с учетом формы острия зонда. Размеры поля сканирования $12,5 \times 12,5$ мкм, амплитуда высот 3440 нм

В работе [1] излагается метод оценки формы наиболее толстой иглы, которой всё ещё можно получить данный рельеф. На основе этого метода была создана программа, которая производит эту оценку. Метод работает таким образом, что наиболее точная оценка получается лишь в том случае, если поверхность рельефа представляет собой плоскость, на которой расположен единственный дельта-импульс. В реальности, разумеется, нам такой тонкий объект, как дельта-импульс, недоступен. Поэтому для получения оценки формы иглы был использован тест-образец, состоящий из заострённых выступов. Результат сканирования этого тест-образца представлен на рис. 1.

После проведения расчётов по вышеуказанному алгоритму была получена оценка формы острия зонда, которая приводится на рис. 3. Сечение острия показано на рис. 4. Анализируя эти результаты, прежде всего следует выделить то, что оценка иглы – это не сама игла, поэтому к этим результатам следует относиться с осторожностью. Прежде всего, необходимо отметить наличие на рис. 3 широкой зоны у основания, недоступной для корректной оценки формы острия зонда. Причина ее появления в том, что выступы, показанные на рис. 1, имеют недостаточно большую высоту. Даже если высота реального зонда превышает 700 нм, алгоритм это не учитывает и настроен на максимальную ширину зонда. Также заметна значительная асимметричность формы, причина которой – в наклоне сканируемого рельефа. Однако верхняя часть зонда высотой 600 нм выглядит достаточно правдоподобно (рис. 4). Это позволило применить рассчитанную форму зонда для реконструкции рельефа по алгоритму, изложенному в [1].

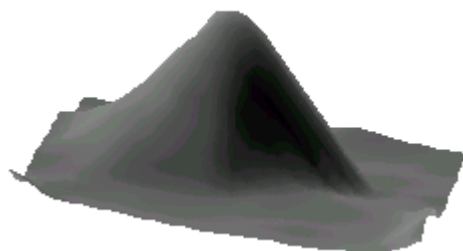


Рис. 3. Конфигурация острия зонда, определенная при обработке АСМ-изображения тест-образца

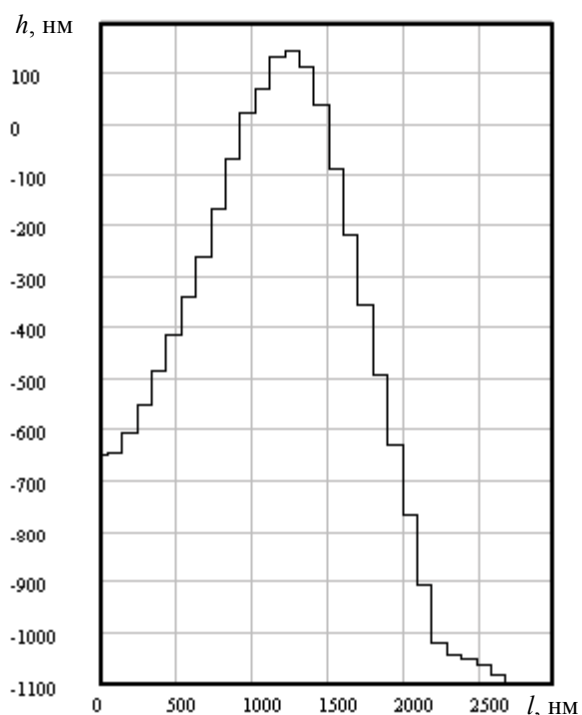


Рис. 4. Сечение острия зонда, восстановленное при обработке АСМ-изображения тест-образца

Для сравнения на рис. 5 приведены профили рельефа АСМ-изображения (рис. 2) до и после вычитания формы острия зонда. Видно, что зонд почти не вносит в него искажений, и реконструированный рельеф незначительно отличается от исходного рельефа. Данный результат объясняется пологостью рельефа.

После получения профилей рельефов до и после вычитания формы острия зонда была рассчитана фрактальная размерность этих профилей методом покрытия каждого профиля окружностями одинакового радиуса. При подсчёте фрактальной размерности использовалась зависимость числа окружностей от их диаметра [2]:

$$\ln(N) = \ln(a) - D \ln(\delta) \quad (1)$$

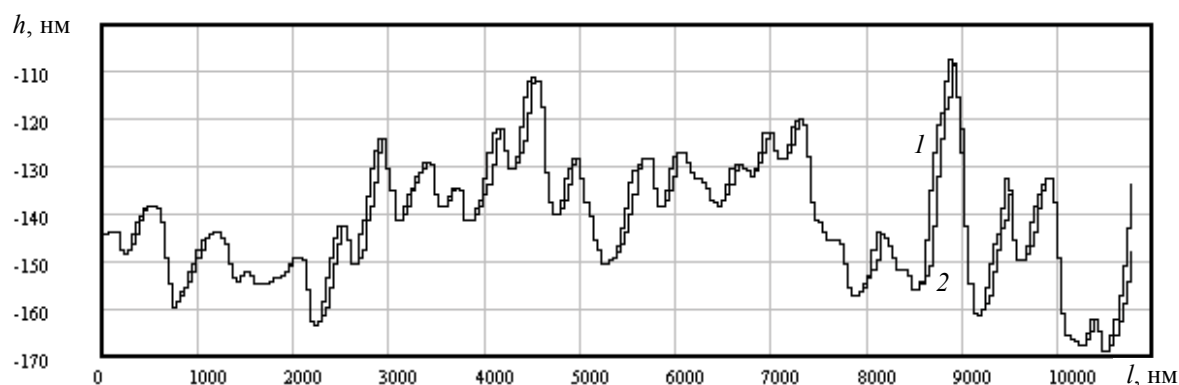


Рис. 5. Профили рельефа АСМ-изображения до (1) и после (2) вычитания формы острия зонда

где N – количество окружностей; a – постоянная; δ – диаметр окружности; D – фрактальная размерность.

То есть, для вычисления фрактальной размерности достаточно вычислить угловой коэффициент в (1), что и было проделано по полученным точкам при помощи метода наименьших квадратов. Результаты расчёта зависимости натурального логарифма количества окружностей от натурального логарифма их диаметра приводятся на рис. 6. По этим последовательностям точек были найдены фрактальные размерности, которые оказались одинаковыми и равными 1,0251.

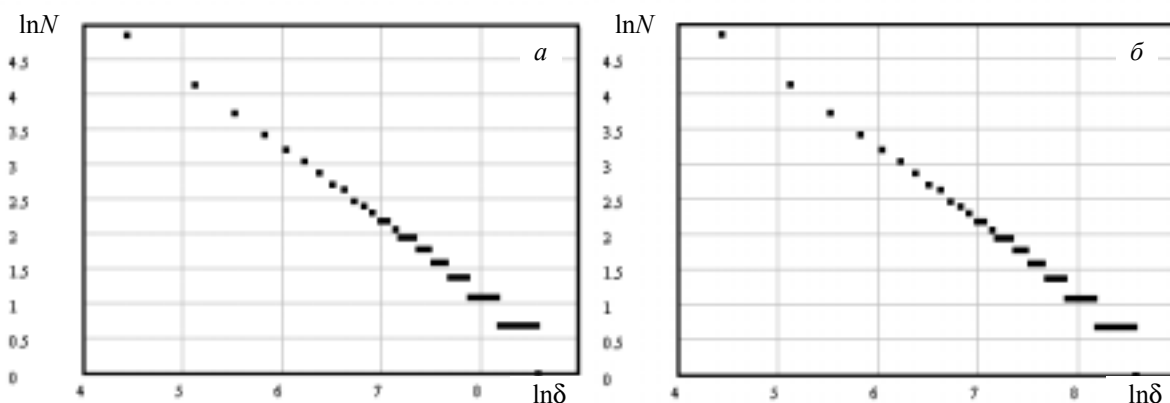


Рис. 6. Зависимость натурального логарифма количества окружностей от натурального логарифма их диаметра для исходного (а) и реконструированного (б) рельефа

На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что искажения, вносимые в рельеф формой зонда, практически не сказываются на фрактальной размерности рельефа.

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории «Микромеханика поверхности», и особенно заведующему лабораторией д. т. н. С. А. Чижику за помощь при обсуждении результатов и написании данной статьи.

Литература

1. Villarubia J. S. Algorithms for Scanned Probe Microscope Image Simulation, Surface Reconstruction and Tip Estimation // J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 102, 425 (1997)
2. Федер Е. Фракталы / Перевод с англ. Ю. А. Данилова, А. Шукурова. – М.: Мир, 1991. – 260с.