

УДК 535.317.1/7

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ И ИХ КОРРЕКЦИИ

А. М. Дубравин¹, О. Ю. Комков¹, Н. Н. Браилко²

¹ Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси,
ул. Кирова 32а, г. Гомель, Беларусь

² FUJIFILM Medical Systems USA, Inc.

Рассматриваются преимущества медианной коррекции линий и Фурье-фильтрации для обработки АСМ изображений.

Введение

Качество обработки АСМ изображения во многом определяется методикой его коррекции. Несмотря на то, что методика обработки АСМ-изображения во многом схожа с общим подходом к обработке изображений, однако есть и отличия, связанные со спецификой его получения [1–3]. Изображение формируется за время порядка нескольких минут последовательным набором линий в 2D матрицу. Естественно, что промежуток времени между получением двух соседних линий в матрице гораздо меньше, чем промежуток времени между сбором информации о первой и последней линиях. Такие изображения, как правило, имеют общий наклон, который может быть связан как с нелинейностью сканера, так и температурным дрейфом. Во время сканирования может произойти сбой, проявляющийся в смещении линий сканирования. В представленной работе рассматриваются два варианта искажений: дрейф линий сканирования (рис. 1, а) и дрейф в линиях сканирования (рис. 1, б). Под дрейфом в данном случае подразумевается низкочастотная составляющая регистрируемого сигнала положения зонда над поверхностью, вызванная неконтролируемыми параметрами (низкочастотный шум).

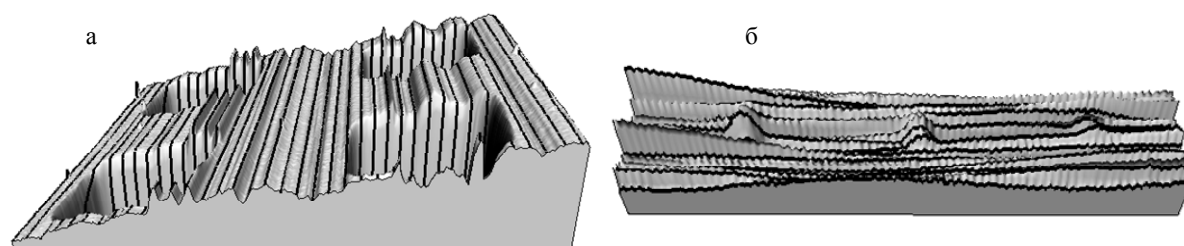


Рис. 1. Дрейф линий (а) и дрейф в линиях (б)

На сегодняшний день существует много коммерческих и некоммерческих программ по обработке АСМ-изображений [2–9], тем не менее, на наш взгляд, преимущества медианной коррекции линий и возможности Фурье-фильтрации с учетом описанной специфики отражены не в полной мере.

Устранение дрейфа линий на АСМ изображении с помощью медианной коррекции

Медианная коррекция линий базируется на изменении высоты линии на основе получения медианной средней разницы высот точек в двух соседних линиях [6, 7, 9]. В отличие от коррекции положения линии на основе среднего арифметического высот всех ее точек медианная коррекция линий особенно незаменима в случае, когда гистограмма высот не попадает под распределение Гаусса (рис. 2). Одновременно с коррекцией линий во многих случаях медианная коррекция выравнивает среднюю плоскость поверхности.

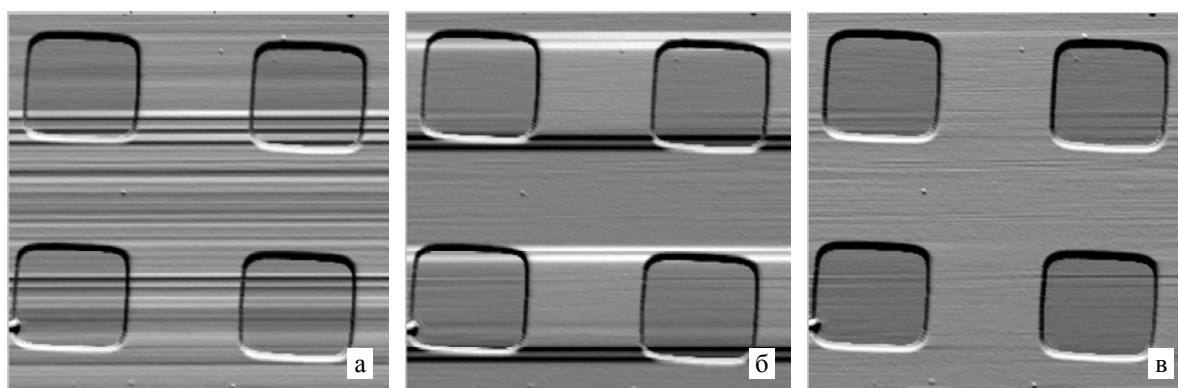


Рис. 2. Фильтрация АСМ-изображения (а) с помощью коррекции линий на основе значения среднеарифметической высоты всех точек линии (б) и с помощью медианной коррекции (с)

Для корректной работы рассматриваемого метода в случае двухуровневой поверхности (рис. 1) необходимо, чтобы более 50 % всех точек во всех линиях принадлежало одному уровню. В противном случае результат будет неудовлетворительным (рис. 2, б). С учетом этой специфики данная методика усовершенствована [7]. Медианная коррекция всех линий используется по выделенной области (рис. 2, б), в которую должны попадать все линии изображения, и в каждой линии более 50 % точек, попадающих в выделенную область, должны принадлежать одному уровню (рис. 3).

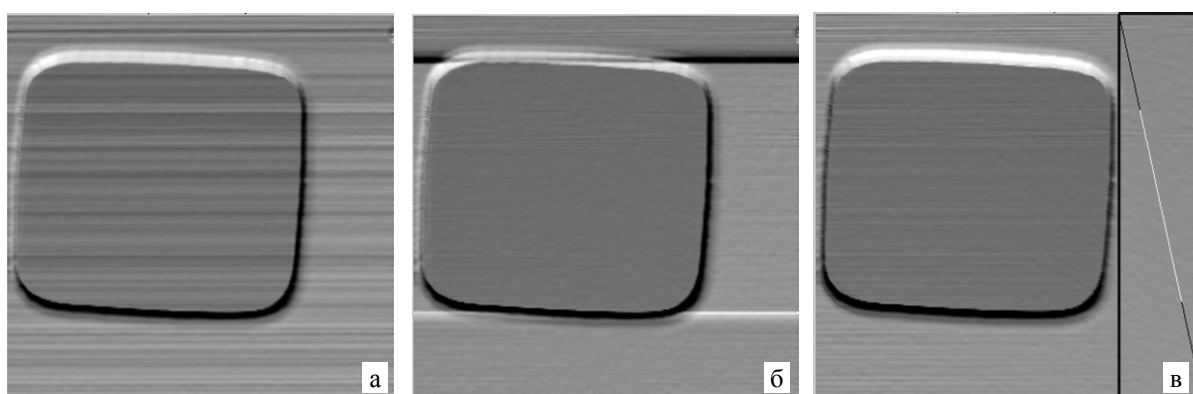


Рис. 3. Медианная коррекция линий двухуровневого изображения (а) по всей площади (б) и по выделенному участку изображения (с)

Устранение дрейфа в линиях на АСМ изображении с помощью Фурье-фильтрации

Основная идея состоит в удалении из каждой линии низкочастотной части спектра [8]. Наиболее эффективна реализация этой идеи в случае перестраиваемого высокочастотного фильтра. Частоту фильтра увеличивают до разумных пределов, когда на изображении еще остаются интересующие объекты. Основное преимущество применения Фурье-фильтрации для данной задачи, кроме того, что она позволяет легко изменять частоту среза, состоит в том, что одновременно анализируется спектральный состав сигнала для выбора оптимальных параметров фильтра [8].

Для примера на рис. 4 представлены изображения поверхности кремния с 12 сформированными структурами высотой порядка 1–2 нм, полученными методом локального анодного оксидирования на микроскопе Nanotop–Nanomanipulator [10], и его Фурье-образ. Вертикальная светлая полоса на Фурье-образе соответствует низкочастотным составляющим сигнала каждой линии (рис. 5.), которые проявляются в виде “полосатости” на изображении.

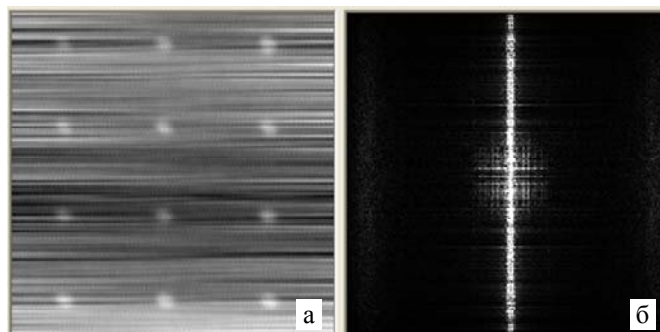


Рис. 4. Поверхность кремния (3.5 мкм x 3.5 мкм) (а) и ее Фурье-образ (б)

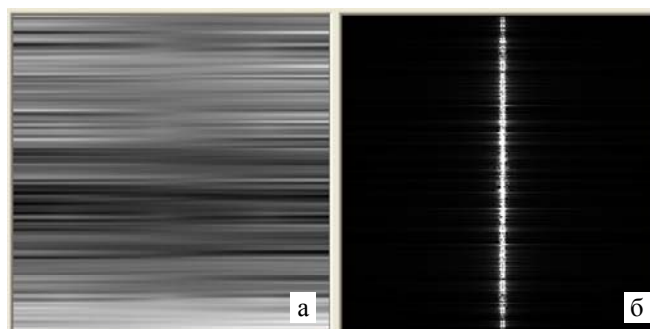


Рис. 5. Шум изображения (а) и его Фурье-образ (б)

Для эффективного применения Фурье-фильтрации к изображению, приведенному на рис. 4, а, необходима возможность интерактивной подстройки частоты фильтра. Такая возможность Фурье-фильтрации, в частности, реализована в программе *Callisto* [7]. В этой программе с помощью курсора мышки на Фурье-изображении меняется частота среза фильтра с одновременным отображением результатов фильтрации в реальном масштабе времени (рис. 6). Кроме того, для

Фурье-фильтрации используется алгоритм не просто заполнения нулями областей частот, которые необходимо удалить, а плавный переход от 1 до 0 в матрице фильтра, что позволяет избежать появления на изображении после фильтрации дополнительных артефактов [8].

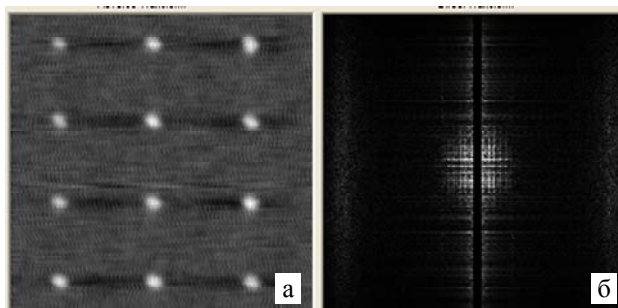


Рис. 6. АСМ-изображение (3.5×3.5 мкм) (а) с удаленными низкочастотными составляющими из каждой горизонтальной линии и его Фурье-образ (б)

Дополнительно улучшить вид изображения возможно с помощью низкочастотного фильтра (рис. 7), отсекающего высокочастотную часть спектра Фурье-образа. Для сравнения на рис. 8 представлены 3D-изображения поверхности до и после Фурье-фильтрации по описанной технологии.

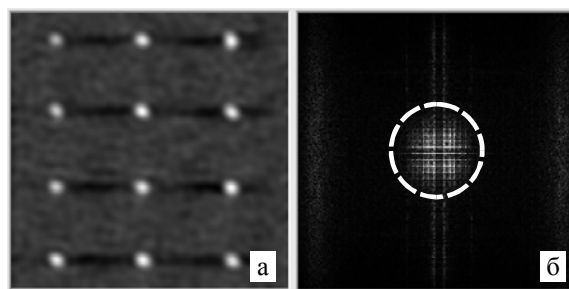


Рис. 7. Применение низкочастотного фильтра (полезный сигнал – внутренняя область круга на Фурье-образе) к изображению (3.5×3.5 мкм) (а) и Фурье-образ (б) изображения до фильтрации

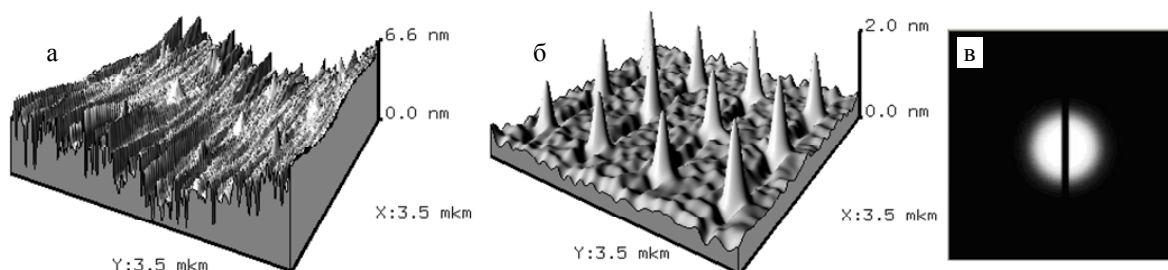


Рис. 8. АСМ-изображения до (а) и после (б) Фурье-фильтрации и матрица Фурье-фильтра (в)

Выводы

Таким образом, медианная коррекция линий при большей эффективности конечного результата, может заменять как коррекцию линий по значению средне-

арифметической высоты всех точек линии, так и выравнивание средней линии изображения в случае использования сканера на основе пьезостеков [10]. Авторами статьи эта коррекция применяется в первую очередь, что позволяет избежать дополнительных операций с изображениями. Применение Фурье-фильтрации в некоторых случаях дает быстрый и эффективный результат, который невозможно или довольно затруднительно получить любым другим способом обработки изображений.

Литература

1. Филонов А. С., Яминский И. В. Зондовая микроскопия. Построение и обработка изображений. http://www.nanoscopy.org/ebook/pag19_24.html
2. Филонов А. С., Гаврилко Д. Ю., Яминский И. В. Руководство пользователя пакета программного обеспечения для управления сканирующим зондовым микроскопом и обработки изображений FemtoScan (Версия 4.8) <http://www.nanoscopy.org/Femtoscanner-F.shtml>
3. Справочное руководство по программному модулю обработки изображений "Image Analysis" NT-MDT <http://ru.ntmdt.ru/Techsupport/index.html>
4. Список функций, реализованных в модуле обработки СЗМ-данных программы SurfaceXplorer (<http://microtm.com/sx/sxr.htm>)
5. Nova 1.0.26.RC1 – программа по обработке изображений компании NT-MDT. <http://ru.ntmdt.ru/Techsupport/index.html>
6. Gwyddion – свободно распространяемая программа по обработке АСМ-изображений. <http://gwyddion.net/>
7. n-Surf – свободно распространяемая программа по обработке АСМ-изображений. <http://www.n-surf.com/>
8. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing 2nd Edition.
9. Callisto – свободно распространяемая программа по обработке АСМ-изображений. <http://Callistosoft.narod.ru/>
10. Development of nano movement system / N. K. Myshkin, A. Ya. Grigoriev, O. Yu. Komkov, A. M. Dubravin, E.-S. Yoon // 1st International Sympos. for Nanoscale Mechanics & Manufacturing: Proc. Seoul, Korea, 2004. February 5-6. Pp.183–190.