

Способ автоматической коррекции искажённых дрейфом СЗМ-изображений

Р. В. Лапшин

НИИ Физических проблем им. Ф. В. Лукина, Лаборатория твердотельной нанотехнологии

Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, проезд 4806, дом 6

e-mail: rlapshin@yahoo.com, web: www.nanoworld.org/homepages/lapshin/

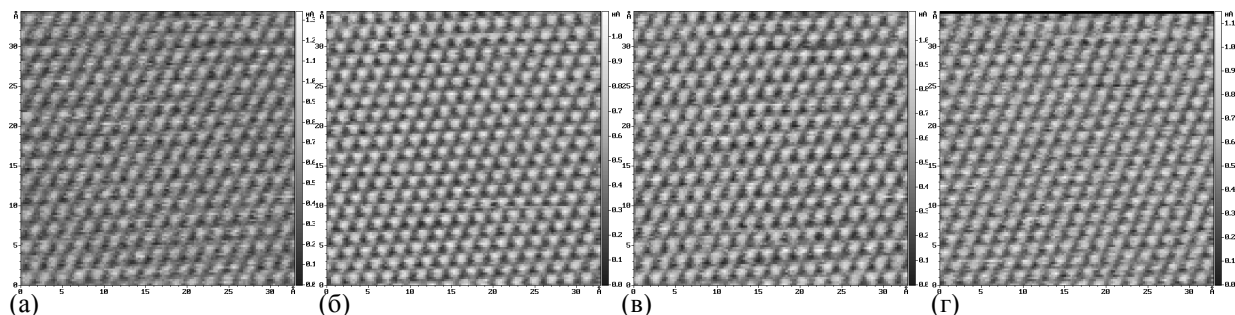


Рис. 1 Искажённые дрейфом ВСИ атомной поверхности пиролитического графита. (а), (б) Первая пара ВСИ. (в), (г) Вторая пара ВСИ. Режим измерений: СТМ, постоянная высота, $U_{\text{тун}}=85$ мВ, $I_{\text{тун}}=750$ пА. Число точек в растре 128×128 . Размер шага при сканировании: $\Delta_x=0.257$ Å, $\Delta_y=0.269$ Å. Число усреднений в точке растра 15. Измеренная скорость сканирования 187.6 Å/с. Время сканирования 1 мин 29 с. Средняя скорость дрейфа в латеральной плоскости 0.1 Å/с.

Анализ искажений, вызываемых дрейфом зонда сканирующего микроскопа относительно поверхности образца, показывает, что в латеральной плоскости дрейф приводит к растяжению/сжатию изображения вдоль осей x и y растра, а также к перекосу картинки вследствие сдвига строк/столбцов изображения относительно друг друга. То же самое, но в отношении высоты рельефа, происходит в вертикальной плоскости. Здесь неверно изображаются перепады высот, и появляется добавочный несуществующий наклон поверхности [1, 2].

Поскольку скорость дрейфа за время сканирования изображений небольшого размера изменяется медленно [1-3], описанные искажения можно представить в виде линейного преобразования [1, 2].

С целью отыскания неизвестных коэффициентов линейного преобразования выполняется встречное сканирование поверхности. В результа-

те получается одна или две пары изображений, строки которых прочерчиваются в противоположенных направлениях, и перемещения от строки к строке в одном изображении происходят в направлении противоположенном направлению перемещения в другом [1-3]. Скорости сканирования в обоих изображениях задаются одинаковыми. Подобные изображения будем называть встречно-сканированными изображениями (ВСИ).

Для ВСИ характерно наличие точки, называемой точкой совмещения (ТС), общей для обоих изображений. В точке совмещения траектория развёртки первого прямого изображения заканчивается, а траектория развёртки второго встречного ему изображения начинается.

Распознав в каждом ВСИ одну и ту же особенность поверхности и определив её латеральные координаты, можно, решив систему нелинейных уравнений, найти коэффициенты линейного преобразования и исправить вызванные дрейфом искажения в горизонтальной плоскости [2].

Поскольку реальные СЗМ-изображения имеют конечное разрешение, зашумлены и содержат сбойные участки, то для более точного определения параметров коррекции желательно использовать все имеющиеся на поверхности особенности. В качестве особенностей в применяемой процедуре распознавания используются определённые в самом общем виде элементы

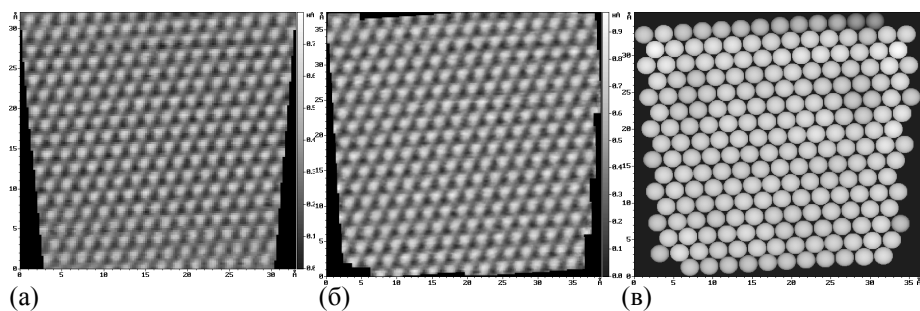


Рис. 2 Исправленный атомный рельеф поверхности пиролитического графита. (а) Линейная коррекция дрейфа. Средняя величина рассовмещения положений особенностей 0.260 Å. (б) Нелинейная коррекция дрейфа. Рельеф собран из отдельных частично перекрывающихся сегментов. Систематические погрешности масштабирования исправлены. Усреднённая постоянная решётки равна 2.4626 Å (относительная погрешность измерения 0.06 %). (в) Стилизованное изображение (шаровая модель).

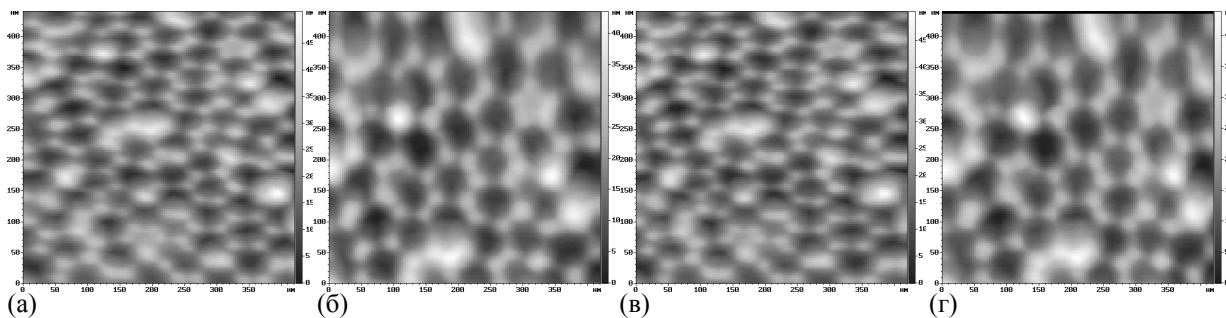


Рис. 3 Искажённые дрейфом ВСИ квазиупорядоченной пористой поверхности оксида алюминия. (а), (б) Первая пара ВСИ. (в), (г) Вторая пара ВСИ. Режим измерений: АСМ, тэппинг мода, $k \approx 20$ Н/м, $f = 290.295$ кГц. Число точек в растре 128×128 . Размер шага при сканировании: $\Delta_x = 3.283$ нм, $\Delta_y = 3.443$ нм. Число усреднений в точке растра 5. Измеренная скорость сканирования 933.5 нм/с. Время сканирования 3 мин 50 с. Средние скорости дрейфа в латеральной и вертикальной плоскостях $15.4 \text{ \AA}/\text{с}$ и $3.3 \text{ \AA}/\text{с}$.

рельефа типа “холм” или “яма” [3].

Искажения в вертикальной плоскости корректируются посредством совмещения пары полученных изображений в ТС с последующим усреднением рельефа в области перекрытия этих изображений. Совмещение исправленных изображений первой и второй пар ВСИ выполняется путём совмещения исправленных положений центров тяжести множеств особенностей общих для всех четырёх изображений с последующим усреднением рельефа в области перекрытия [2]. Помимо коррекции дрейфа в вертикальной плоскости усреднение рельефа приводит к уменьшению уровня шума в исправленном изображении.

Предложенный метод коррекции дрейфа позволяет не только оценивать погрешность исправления дрейфа, но и получать исправленные изображения, в которых предельная погрешность не превышает некоторого наперёд заданного значения.

Наименьшую погрешность обеспечивает нелинейная коррекция дрейфа: после исправления ВСИ в латеральной плоскости вокруг особенности вырезается небольшая квадратная окрестность – сегмент, которая помещается в позицию, являющуюся средним исправленных латеральных позиций этой особенности в соответствующем ВСИ; указанная операция выполняется для каждой особенности, после чего в местах наложения сегментов рельеф усредняется [2].

Другой способ нелинейной коррекции заключается в определении при помощи упомянутого выше линейного преобразования локальных коэффициентов/смещений особенностей с последующим построением регрессионных поверхностей. Используя регрессионные поверхности, можно определить локальные коэффициенты/смещения, соответствующие целочисленным координатам точек искажённого изображения, и исправить дрейф в латеральной плоскости

[2]. Последующее исправление дрейфа в вертикальной плоскости выполняется аналогично тому, как это делается при линейном подходе.

Сканирование рельефа выполнено на микроскопе Solver™ P4 производства НТ-МДТ. На Рис. 1 изображены две пары ВСИ поверхности высокоориентированного пиролитического графита. На представленных рисунках хорошо видны вызванные дрейфом искажения атомного рельефа. На Рис. 2 показан исправленный рельеф поверхности графита.

На Рис. 3 даны ВСИ квазиупорядоченной поверхности пористого оксида алюминия (образец изготовлен С. А. Гавриловым, МИЭТ). Сильный дрейф вызван нагревом образца, выполненным непосредственно перед началом сканирования с целью удаления влаги с гидрофильной поверхности пористого оксида. На Рис. 4 представлен исправленный рельеф поверхности оксида алюминия.

Разработанный метод можно применять при особенность-ориентированном сканировании поверхности [3] для исправления искажённых дрейфом сегментов рельефа.

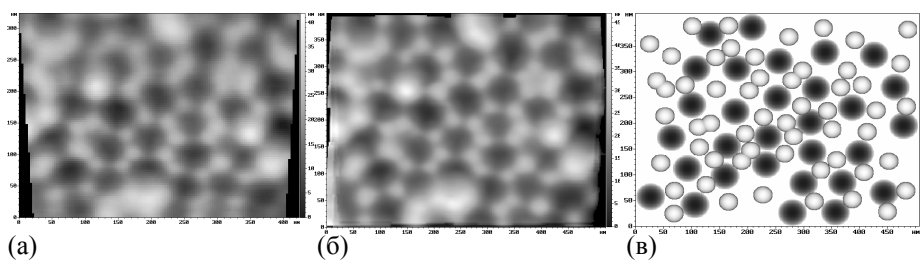


Рис. 4 Исправленный рельеф поверхности пористого оксида алюминия. (а) Линейная коррекция дрейфа. Средняя величина рассовмещения особенностей 15.9 нм. (б) Нелинейная коррекция дрейфа. Рельеф собран из отдельных частично перекрывающихся сегментов. Систематические погрешности масштабирования исправлены. Среднее расстояния между холмиками 53.6 нм, между порами 76.8 нм. (в) Стилизованное изображение.