

# 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](mailto:rlapshin@yahoo.com), web: [www.nanoworld.org/homepages/lapshin/](http://www.nanoworld.org/homepages/lapshin/)

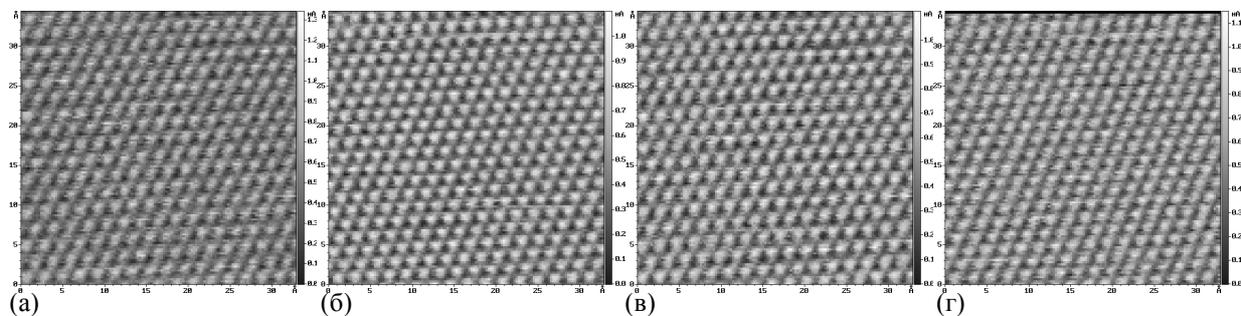


Рис. 1 Искажённые дрейфом ВСИ атомной поверхности пиролитического графита. (а), (б) Первая пара ВСИ. (в), (г) Вторая пара ВСИ. Режим измерений: СТМ, постоянная высота,  $U_{\text{тун}}=85$  мВ,  $I_{\text{тун}}=750$  пА. Число точек в растре  $128 \times 128$ . Размер шага при сканировании:  $\Delta_x=0.257$  Å,  $\Delta_y=0.269$  Å. Число усреднений в точке раstra 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  $y$  раstra, 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

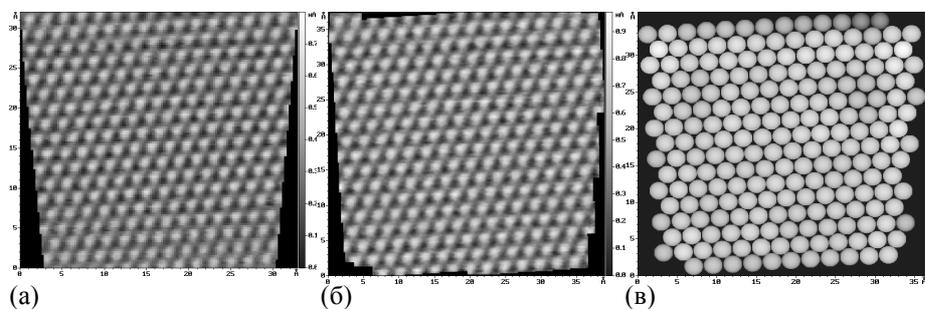


Рис. 2 Исправленный атомный рельеф поверхности пиролитического графита. (а) Линейная коррекция дрейфа. Средняя величина рассовмещения положений особенностей  $0.260$  Å. (б) Нелинейная коррекция дрейфа. Рельеф собран из отдельных частично перекрывающихся сегментов. Систематические погрешности масштабирования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

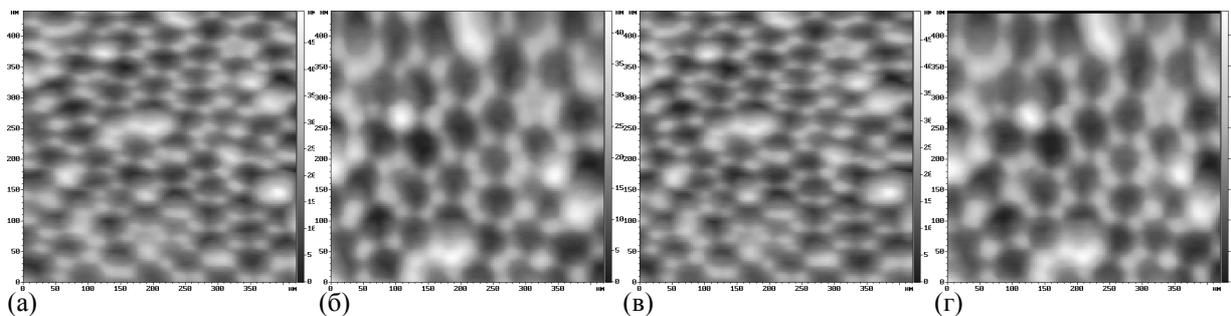


Рис. 3 Искажённые дрейфом ВСИ квазиупорядоченной пористой поверхности оксида алюминия. (а), (б) Первая пара ВСИ. (в), (г) Вторая пара ВСИ. Режим измерений: АСМ, тэппинг мода,  $k \approx 20$  Н/м,  $f = 290.295$  кГц. Число точек в растре  $128 \times 128$ . Размер шага при сканировании:  $\Delta_x = 3.283$  нм,  $\Delta_y = 3.443$  нм. Число усреднений в точке раstra 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.

[1] V. Y. Yurov, A. N. Klimov, Rev. Sci. Instrum., **65**, 1551 (1994).

[2] Р. В. Лапшин, Способ коррекции искажённых дрейфом изображений поверхности, полученных на сканирующем зондовом микроскопе, заявка на патент РФ, № 2004135449 (2004).

[3] R. V. Lapshin, Nanotechnology, **15**, 1135 (2004).

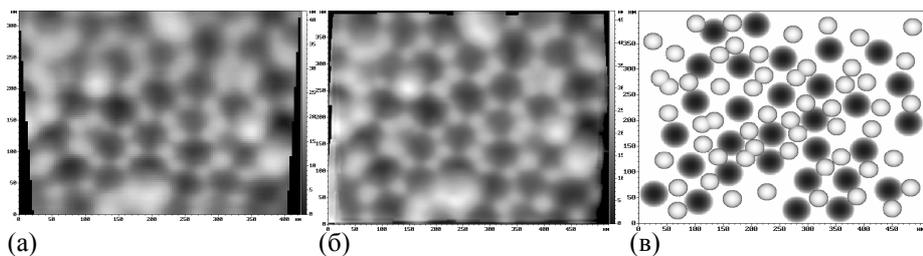


Рис. 4 Исправленный рельеф поверхности пористого оксида алюминия. (а) Линейная коррекция дрейфа. Средняя величина рассовмещения особенностей  $15.9$  нм. (б) Нелинейная коррекция дрейфа. Рельеф собран из отдельных частично перекрывающихся сегментов. Систематические погрешности масштабирования исправлены.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