

УДК: 531.728; 53.088.7

СПОСОБ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ИСКАЖЕННЫХ ДРЕЙФОМ СЗМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2007 г. Р. В. Лапшин

НИИ физических проблем им. Ф.В. Лукина, лаборатория твердотельной нанотехнологии,
Москва, Зеленоград, Россия

Поступила в редакцию 25.09.2006 г.

Разработан способ автоматического исправления искаженных дрейфом изображений поверхности, полученных на сканирующем зондовом микроскопе. Для случая медленно изменяющихся дрейфов составлены простые линейные преобразования, описывающие возникающие искажения. В качестве исходных данных используется одна или две пары встречно-сканированных изображений (ВСИ). Находя координаты одной и той же особенности поверхности в каждом ВСИ, решается система линейных уравнений. Полученные решения – коэффициенты линейных преобразований – служат для исправления вызванных дрейфом искажений в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Предложено два нелинейных способа коррекции, обеспечивающих в сравнении с линейным способом коррекции большую точность исправления дрейфа. Разработанный метод может применяться при особенность-ориентированном сканировании поверхности.

ВВЕДЕНИЕ

Точность измерения рельефа поверхности, физические размеры элементов которого лежат в диапазоне от нескольких ангстрем до нескольких десятков нанометров, во многом определяется величиной дрейфа сканирующего зондового микроскопа (СЗМ). Как правило, дрейф инструмента включает в себя две основные компоненты: термокомпоненту, связанную с тепловой деформацией механических узлов прибора, и компоненту, вызванную крипом используемых пьезоманипуляторов [1]. Для борьбы с дрейфом можно использовать активную компенсацию в процессе измерения [2] и/или исправление результатов сканирования после измерения [3–6].

Привлекательность способов, исправляющих изображение, к которым относится и способ [7], предлагаемый в данной работе, в сравнении с компенсирующими состоит в том, что искажения можно скорректировать, не модернизируя сам микроскоп. Кроме того, в отличие от пассивных способов, активная компенсация дрейфа вносит дополнительные шумы, что не позволяет использовать ее для измерений на пределе разрешения микроскопа.

ОПИСАНИЕ СПОСОБА

Анализ искажений, вызываемых дрейфом зонда 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 друг относительно друга. То же самое, но в отношении высоты рельефа, происходит в вертикальной плоскости. Здесь неверно изображаются перепады высот, и появляется добавочный несуществующий наклон поверхности.

Полагая, что скорость дрейфа за время сканирования изображений небольшого размера изменяется медленно [7, 8], описанные искажения можно представить в виде следующих линейных преобразований:

$$\begin{aligned}\bar{x}(x, y) &= x + (K_x - 1)\{x + [(k + 1)m_x + 1]y\}, \\ \bar{y}(x, y) &= y + (K_y - 1)\{x + [(k + 1)m_x + 1]y\}, \\ \bar{z}(x, y) &= z(x, y) - (K_z - 1)\{x + [(k + 1)m_x + 1]y\},\end{aligned}\quad (1)$$

где \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} – координаты точек исправленного изображения; x , y , z – координаты точек искаженного дрейфом изображения; K_x , K_y , K_z – коэффициенты линейных преобразований (КЛП); k – отношение скорости v_x перемещения зонда в строке при прямом ходе к скорости перемещения при обратном ходе; m_x – число точек (без единицы) в строке искаженного изображения, которое определяет диапазон изменения переменной $x = 0 \dots m_x$.

С целью отыскания неизвестных КЛП K_x , K_y , K_z выполняется встречное сканирование поверхности. В результате получается одна или две пары изображений, строки которых прочерчиваются в противоположных направлениях, и перемещения от строки к строке в одном изображении

производятся в направлении, противоположном направлению перемещения в другом. Скорости сканирования изображений задаются одинаковыми. Подобные изображения будем называть далее встречно-сканированными изображениями (ВСИ).

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

Если на каждом изображении полученной пары имеется одна и та же особенность поверхности, то, определив ее латеральные координаты (x_1, y_1) и (x_2, y_2) , можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned}\bar{x}_1(m_x - x_1, m_y - y_1) &= \bar{x}_2(x_2, y_2), \\ \bar{y}_1(m_x - x_1, m_y - y_1) &= \bar{y}_2(x_2, y_2),\end{aligned}\quad (2)$$

где m_y – число точек (без единицы) в столбце искаженного изображения, которое определяет диапазон изменения переменной $y = 0 \dots m_y$.

В целом, для исправления вызываемых дрейфом искажений достаточно выявить на ВСИ только одну особенность и определить ее латеральные координаты. 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, за исключением тех, что расположены по краям изображения, где возможны сильные нелинейные искажения [9, 10].

Таким образом, представляя всю совокупность обнаруженных особенностей ее “центром масс” с координатами (x_1, y_1) и (x_2, y_2) в соответствующем ВСИ, с учетом преобразований (1) уравнения (2) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned}x(\bar{x}, \bar{y}) &= \frac{\{(K_y - 1)[(k + 1)m_x + 1] + 1\}\bar{x} - (K_x - 1)[(k + 1)m_x + 1]\bar{y}}{K_x + (K_y - 1)[(k + 1)m_x + 1]}, \\ y(\bar{x}, \bar{y}) &= \frac{(1 - K_y)\bar{x} + K_x\bar{y}}{K_x + (K_y - 1)[(k + 1)m_x + 1]}.\end{aligned}\quad (7)$$

Используя тождество $\bar{z}(x, y) \equiv \bar{z}(\bar{x}, \bar{y})$, в котором координаты \bar{x}, \bar{y} области перекрытия связаны с координатами x, y прямоугольного раstra соответствующего ВСИ преобразованиями (7), и выражение для \bar{z} из системы (1), уравнение (6) можно представить в развернутом виде как

$$\begin{aligned}m_x - x_1 + (K1_x - 1)\{m_x - x_1 + [(k + 1)m_x + 1] \times \\ \times (m_y - y_1)\} = x_2 + (K2_x - 1) \times \\ \times \{x_2 + [(k + 1)m_x + 1]y_2\}, \\ m_y - y_1 + (K1_y - 1)\{m_x - x_1 + [(k + 1)m_x + 1] \times \\ \times (m_y - y_1)\} = y_2 + (K2_y - 1) \times \\ \times \{x_2 + [(k + 1)m_x + 1]y_2\}.\end{aligned}\quad (3)$$

Связь между коэффициентами $K1$ и $K2$ во встречно-сканированных изображениях очень простая:

$$\begin{aligned}K2_x &= 2 - K1_x, \\ K2_y &= 2 - K1_y, \\ K2_z &= 2 - K1_z.\end{aligned}\quad (4)$$

Подставляя коэффициенты $K2_x$ и $K2_y$ из (4) в уравнения (3), находим искомые КЛП $K1_x$ и $K1_y$ первого изображения:

$$\begin{aligned}K1_x &= \\ &= \frac{x_1 + x_2 - m_x}{x_2 - x_1 + m_x + [(k + 1)m_x + 1](y_2 - y_1 + m_y)} + 1, \\ K1_y &= \\ &= \frac{y_1 + y_2 - m_y}{x_2 - x_1 + m_x + [(k + 1)m_x + 1](y_2 - y_1 + m_y)} + 1,\end{aligned}\quad (5)$$

зная которые, через соотношения (4) определяем КЛП $K2_x$ и $K2_y$ второго изображения. После этого, используя полученные коэффициенты, посредством преобразований (1) исправляем ВСИ 1 и 2 в латеральной плоскости.

Для точек области перекрытия ВСИ, исправленных в латеральной плоскости, можно составить следующее уравнение:

$$\bar{z}_1(\bar{x}, \bar{y}) = \bar{z}_2(\bar{x}, \bar{y}).\quad (6)$$

Преобразования в латеральной плоскости, обратные преобразованиям (1), выглядят так:

$$\begin{aligned}z_1(m_x - x_1, m_y - y_1) - (K1_z - 1)\{m_x - x_1 + \\ + [(k + 1)m_x + 1](m_y - y_1)\} = \\ = z_2(x_2, y_2) + (K2_z - 1)\{x_2 + [(k + 1)m_x + 1]y_2\} - \\ - (K1_z - 1)\{m_x + [(k + 1)m_x + 1]m_y\}.\end{aligned}\quad (8)$$

Из уравнения (8), используя связь (4) между коэффициентами KI_z и $K2_z$, легко выразить коэффициент KI_z в виде:

$$KI_z = \frac{z_2(x_2, y_2) - z_1(m_x - x_1, m_y - y_1)}{x_1 + x_2 + [(k + 1)m_x + 1](y_1 + y_2)} + 1, \quad (9)$$

который вычисляется для всех точек (\bar{x}, \bar{y}) области перекрытия, а затем усредняется. Зная коэффициент K_z , исправляем каждое изображение в вертикальной плоскости согласно выражению для \bar{z} преобразований (1).

Наконец, совмещаем полученные изображения в точке совмещения и усредняем рельеф в области перекрытия. Таким образом, на выходе имеем исправленное изображение поверхности, в котором устранены искажения, вызываемые x , y и z дрейфами, а также уменьшен уровень зашумленности.

Совмещение исправленных изображений первой и второй пар ВСИ выполняется путем совмещения исправленных положений центров тяжести множеств особенностей, общих для всех четырех изображений, с последующим усреднением рельефа в области перекрытия.

Поиск особенностей в ВСИ и определение их латеральных координат можно выполнить вручную, однако использование для этих целей процедуры распознавания [8, 11] позволяет полностью автоматизировать процесс получения неискаженных дрейфом СЗМ-изображений. В качестве особенностей в применяемой процедуре распознавания используются элементы рельефа типа “холм” или “яма”. Поскольку особенности поверхности определены в самом общем виде, то в большинстве встречающихся на практике случаев на изображении удается обнаружить подходящую особенность.

Из-за искажений, вызываемых дрейфом, позиции одних и тех же особенностей на ВСИ не совпадают, причем степень несовпадения увеличивается по мере удаления от ТС. Неодинаково также количество особенностей в ВСИ. Кроме того, в результате сбоя сканирования некоторые особенности, распознанные на одном из изображений, могут оказаться нераспознанными на другом. Таким образом, после распознавания особенностей в ВСИ необходимо выполнить следующий итеративный процесс, в ходе которого устанавливается, что некоторая особенность с координатами (x_1, y_1) на изображении 1 и некоторая особенность с координатами (x_2, y_2) на изображении 2 являются одной и той же особенностью с координатами (\bar{x}, \bar{y}) на исправленном изображении.

Итеративный процесс начинается в ТС и распространяется далее вдоль траектории сканирования встречного изображения. В ходе итеративного процесса парные особенности обнаружива-

ются исключительно по близости их положения в промежуточном изображении, исправленном с помощью промежуточных КЛП.

Наибольший эффект от применения описанного способа коррекции дрейфа достигается при его использовании в методе особенность-ориентированного сканирования (ООС) [8], поскольку в этом случае появляется возможность исправления дрейфа в изображениях практически любого размера. Дело в том, что начиная с определенного размера скана обязательно нарушается основное предположение о неизменности скорости дрейфа в течение времени сканирования. Хотя точно такое же предположение должно выполняться и для сканов, получаемых по методу ООС, но там возникающее противоречие устраняется благодаря тому, что большая площадь сканируется по частям – малыми сегментами (квадратными окрестностями особенностей поверхности), а все перемещения происходят на короткие расстояния от одной особенности к другой, расположенной по соседству.

При переходе от атомного масштаба к поверхностям с характерными размерами особенностей и расстояниями между ними в десятки и сотни нанометров внешнее проявление на изображении термосоставляющей дрейфа ослабевает, а нелинейной составляющей от крипа, напротив, усиливается. Несмотря на это, измеряя рельеф по частям небольшими сегментами, а также используя взаимно-встречные перемещения зонда в апертурах, в сегментах, между соседними особенностями (скиппинг) и при движении по строкам из особенностей, которые образуют целую иерархию встречных перемещений, возможно значительно ослабить негативное действие крипа [8].

Кроме того, в случае заметного изменения скорости дрейфа, мониторинг которой при ООС производится непрерывно, процесс измерения автоматически приостанавливается, испорченные локальные данные отбрасываются, и микроскоп, выполняя периодическую привязку зонда к текущей особенности поверхности или вводя холостые циклы скиппинга, ждет, пока скорость дрейфа не стабилизируется. Как только скорость дрейфа стабилизировалась, работа возобновляется с того, что заново выполняется прерванное забракованное локальное измерение. Таким образом, в результате применения указанной совокупности приемов суммарный дрейф снова оказывается медленно изменяющимся процессом и, следовательно, также поддается линеаризации.

Необходимо обратить внимание на то, как просто при ООС происходит обнаружение одной и той же особенности в ВСИ. Дело в том, что сегмент, как правило, вмещает только одну особенность. В тех случаях, когда сегмент содержит несколько особенностей (обычно две-три), особен-

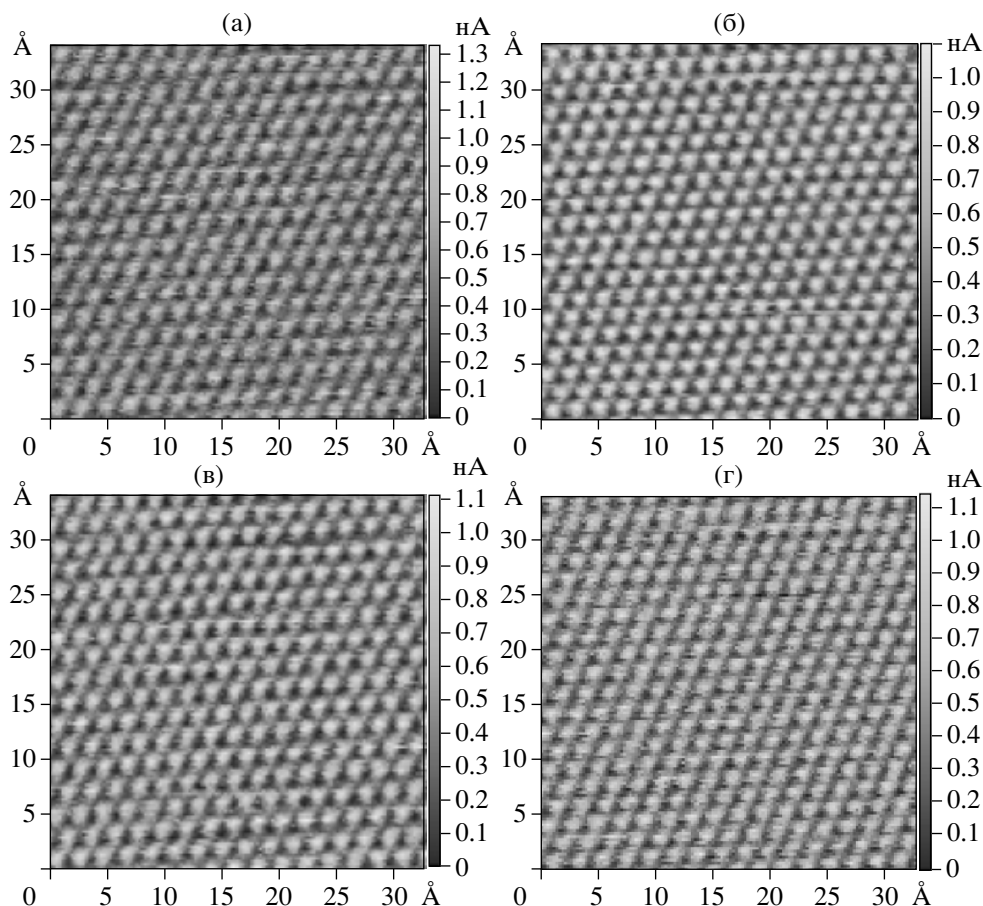


Рис. 1. Искаженные дрейфом ВСИ атомной поверхности пиролизического графита: первая пара ВСИ (а, б); вторая пара ВСИ (в, г). Режим измерений: СТМ, постоянная высота, $U_{\text{ТВН}} = 85$ мВ, $I_{\text{ТВН}} = 750$ пА. Число точек в растре $m_x = m_y = 127$. Размер шага при сканировании: $\Delta_x = 0.257$ Å, $\Delta_y = 0.269$ Å. Число усреднений в точке растра 15. Скорость сканирования $v_x = 187.6$ Å/с ($k = 1$). Время сканирования 1 мин 29 с. Средняя по модулю скорость дрейфа в латеральной плоскости 0.1 Å/с. Вызванная дрейфом максимальная относительная погрешность измерений в латеральной плоскости: 7.8% (а, б); 8.0% (в, г).

ности, расположенные ближе остальных к центрам ВСИ, будут соответствовать одной и той же текущей особенности в исправленном сегменте, поскольку основным признаком текущей особенности в сегменте является ее близость к центру квадратного растра [8].

Следует отметить, что при непосредственном применении описанной методики исправления дрейфа число усреднений изображения ограничено и не может быть больше четырех, а вот при ее использовании в методе ООС, напротив, нет никаких ограничений на количество усреднений изображений (сегментов).

Для сканов поверхности, характеризующихся большим числом достаточно равномерно распределенных по площади изображения особенностей, можно предложить следующий способ нелинейной коррекции. Вначале, используя изложенный линейный подход, определяют пары особенностей ВСИ; затем по каждой паре вычисляют локаль-

ные КЛП K_x , K_y . В результате получается распределение, в котором каждой особенности с координатами x , y сопоставлены свои латеральные КЛП $K_x(x, y)$, $K_y(x, y)$.

Используя преобразования (1), для каждой особенности изображения с действительными координатами x , y находят локальные смещения $D_x(x, y) = \bar{x}(x, y) - x$, $D_y(x, y) = \bar{y}(x, y) - y$ в латеральной плоскости. Проводя через полученные смещения регрессионные поверхности, определяют смещения, соответствующие целочисленным координатам точек искаженного изображения. Наконец, прикладывая к точкам искаженного СЗМ-изображения соответствующие им локальные смещения, получают изображение, исправленное в латеральной плоскости.

Для того чтобы выполнить коррекцию дрейфа в вертикальной плоскости, необходимо совместить ВСИ, исправленные в латеральной плоскости, путем совмещения центров тяжести исполь-

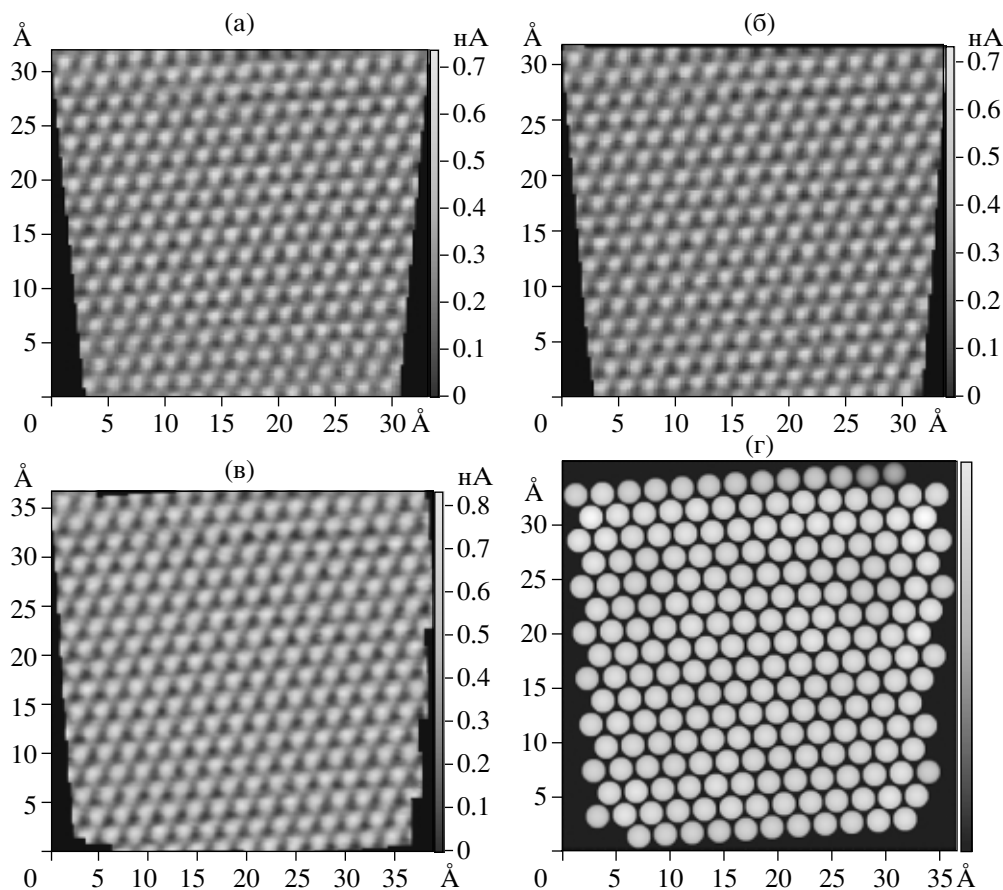


Рис. 2. Исправленный атомный рельеф поверхности пиролитического графита: а – линейная коррекция, средняя погрешность по полю изображения 0.3%; б – нелинейная коррекция, выполненная с применением регрессионных поверхностей, средняя погрешность по полю изображения 0.09%; в – нелинейная коррекция посредством сборки рельефа из отдельных, частично перекрывающихся сегментов поверхности. Усредненная постоянная решетки равна 2.4638 Å, что соответствует относительной погрешности измерения 0.01 %; г – шаровая модель поверхности (в).

зуемых наборов особенностей. Вычисляя локальный коэффициент K_z , а затем разность между исправленной высотой рельефа и искаженной в каждой точке (\bar{x}, \bar{y}) области перекрытия ВСИ, находим распределение локальных смещений по полю изображения в вертикальной плоскости $D_z(\bar{x}, \bar{y}) = \bar{z}(\bar{x}, \bar{y}) - z(\bar{x}, \bar{y})$. Проводя через найденные локальные смещения регрессионную поверхность, определяют рабочее распределение, с помощью которого выполняется нелинейная коррекция изображения в вертикальной плоскости.

Другая схема нелинейной коррекции заключается в следующем. Вокруг особенности на каждом исправленном изображении вырезается некоторая квадратная окрестность (сегмент); после чего вырезанные фрагменты рельефа помещаются в позицию, являющуюся средним исправленных позиций этой особенности в соответствующем ВСИ. Коррекция изображений и позиций особенностей может проводиться как линейным, так и нелинейным способами, описанными выше.

В местах наложения сегментов рельеф усредняется.

Обоснованием изложенных методов нелинейной коррекции является то, что истинное положение особенности находится где-то на отрезке между исправленными положениями особенности и, скорее всего, тяготеет к середине.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проверки работоспособности предложенного метода, было выполнено встречное сканирование небольшого участка упорядоченной поверхности высокоориентированного пиролитического графита. Сканирование рельефа осуществлялось на микроскопе Solver™ P4 производства НТ-МДТ в режиме постоянной высоты на воздухе после многочасового прогрева прибора. В результате получено две пары ВСИ (рис. 1).

На представленных рисунках хорошо видны вызванные дрейфом искажения атомного рельефа. На рис. 2 показан токовый рельеф поверхно-

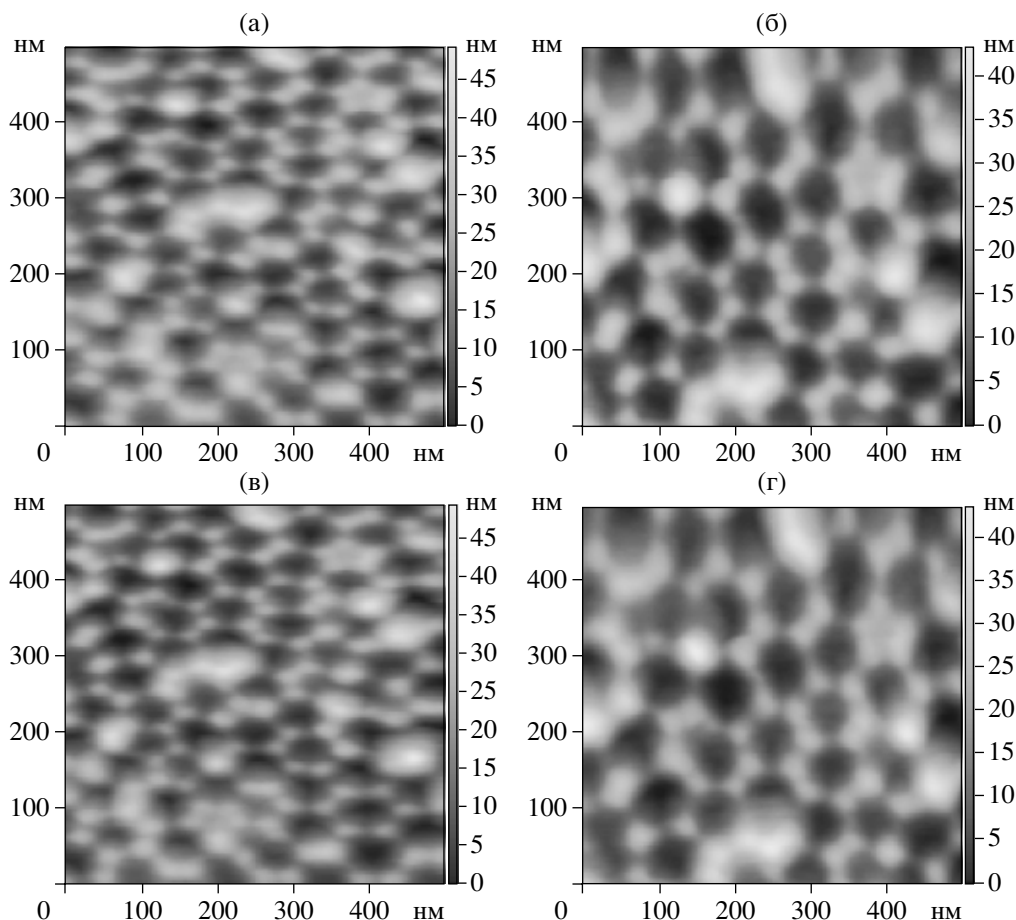


Рис. 3. Искаженные дрейфом ВСИ квазиупорядоченной пористой поверхности оксида алюминия: первая пара ВСИ (а, б); вторая пара ВСИ (в, г). Режим измерений: АСМ, тэппинг-мода, упругость кантилевера ≈ 12 Н/м, резонансная частота 290.295 кГц. Число точек в растре $m_x = m_y = 127$. Размер шага при сканировании: $\Delta_x = 3.913$ нм, $\Delta_y = 3.935$ нм. Число усреднений в точке растра 5. Скорость сканирования $v_x = 1109.7$ нм/с ($k = 1$). Время сканирования 3 мин 50 с. Средние скорости дрейфа в латеральной и вертикальной плоскостях 16.9 $\text{\AA}/\text{с}$ и 3.3 $\text{\AA}/\text{с}$ соответственно. Вызванная дрейфом максимальная относительная погрешность измерений в латеральной плоскости: 24.6% (а, б); 24.4% (в, г).

сти графита, исправленный линейным и двумя нелинейными способами коррекции; там же приведено стилизованное изображение поверхности графита.

Изображения на рис. 2а, б все еще содержат систематические погрешности калибровки сканера микроскопа (около 14%), выполненной ранее без учета вызываемых дрейфом искажений. С помощью методики автоматической калибровки, описанной в работе [11], были определены корректирующие коэффициенты $\bar{K}_x = 1.1896$, $\bar{K}_y = 1.1429$ и угол неортогональности между X- и Y-пьезоманипуляторами $\alpha = 0.4^\circ$. На рис. 2в, г указанные погрешности масштабирования устранены. Усредненная постоянная решетки на этих изображениях равна 2.4638 \AA (номинальное значение 2.464 \AA), что соответствует относительной погрешности измерения около 0.01%.

На рис. 3 показаны ВСИ квазиупорядоченной пористой поверхности оксида алюминия. Поры в

оксиде алюминия получены путем анодирования алюминиевой фольги в водном растворе щавелевой кислоты [12]. Чтобы лучше рассмотреть детали морфологии, из приведенных изображений были предварительно вычтены средние наклоны поверхности. В отсутствие дефектов каждая пора имеет шесть соседних пор, образующих правильный шестиугольник. По периметру отверстия каждой поры расположены шесть небольших холмиков, также образующих правильный шестиугольник.

В ходе экспериментов, проводимых на воздухе, было замечено, что пористая поверхность оксида алюминия хорошо адсорбирует атмосферную влагу, т.е. является гидрофильной. Присутствие слоя воды на поверхности делает разрешение пор практически невозможным. Попытка, увеличив силу прижатия зонда кантилевера к поверхности (в экспериментах использовался кантилевер фирмы НТ-МДТ), проколоть этот слой и измерить “твер-

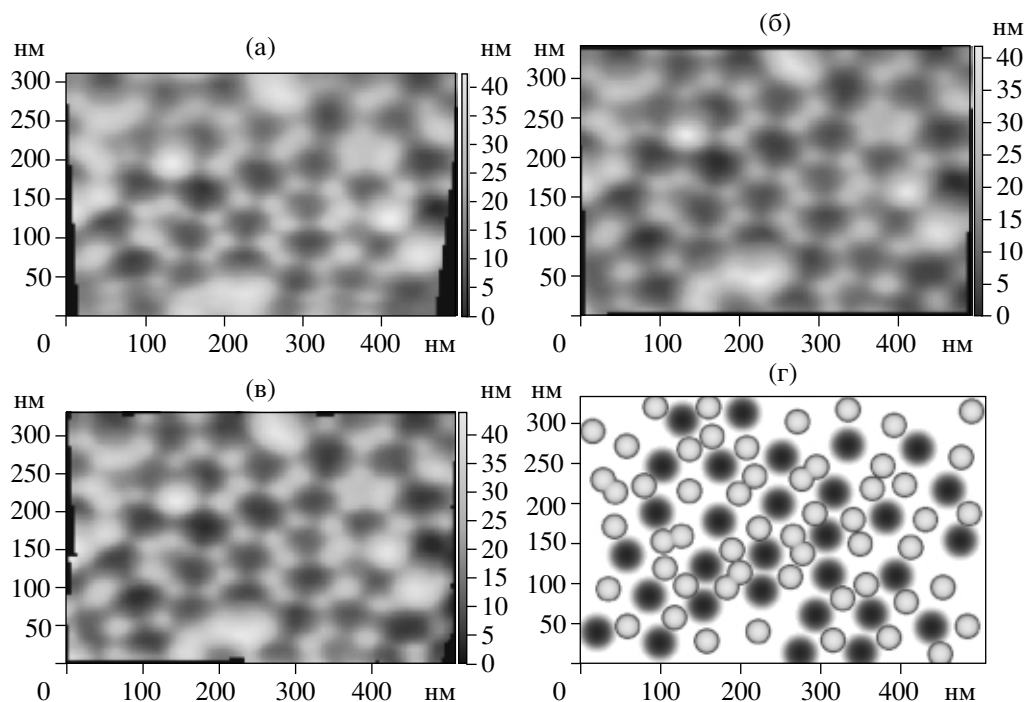


Рис. 4. Исправленный рельеф пористой поверхности оксида алюминия: а – линейная коррекция, средняя погрешность по полю изображения 1.5%; б – нелинейная коррекция, выполненная с применением регрессионных поверхностей, средняя погрешность по полю изображения 0.16%; в – нелинейная коррекция посредством сборки рельефа из отдельных частично перекрывающихся сегментов поверхности. Среднее расстояние между порами 69.9 нм; г – стилизованное изображение.

дый” рельеф не дала хороших результатов. Также не удалось получить четкого сигнала и после увеличения амплитуды свободных колебаний кантилевера.

Увидеть сами поры, а также более тонкую структуру – ободок из шести холмиков – оказалось возможным только после удаления адсорбированного слоя воды посредством прогрева образца при температуре 70–80°C в течение нескольких минут. Время “жизни” поверхности после выключения нагревателя составляет при комнатной температуре и относительной влажности 50–70% около 10–15 минут, спустя которое поверхность снова “зарастает” и становится непригодной для сканирования с высоким разрешением. Было обнаружено также, что процесс сканирования стимулирует процессы перераспределения/адсорбции влаги на пористой поверхности, поскольку повторное сканирование уже однажды просканированных участков давало худший контраст по сравнению с расположенными по соседству участками, где впоследствии сканирование производилось впервые.

Так как используемый микроскоп не имел нагревателя, встроенного в держатель образца, то нагрев производился вне микроскопа. Горячий образец устанавливался в микроскоп, после чего в течение 5–10 минут производилось сканирование. Вследствие указанных ограничений по време-

ни встречное сканирование осуществлялось практически сразу после подвода зонда и обнаружения подходящего участка пористой поверхности.

Таким образом, из-за невозможности длительной релаксации микроскопа помимо крипа, возникающего в процессе сканирования, и типичного для используемого микроскопа термодрейфа во время измерения топографии оксида алюминия действовали следующие дополнительные дрейфы: крип Z-манипулятора после подвода, крипы X-, Y-манипуляторов в результате смещения зонда к положению начала скана, а также та часть теплового дрейфа, которая образуется вследствие неравномерного охлаждения держателя и образца после нагрева их до указанной температуры. Затвердевание двухстороннего скотча, на котором был закреплен образец, вероятно, также приводило к дополнительному движению.

В сумме действие приведенных негативных факторов настолько сильно искажает изображение, что встречный скан содержит только половину (!) участка поверхности, полученного на прямом скане. Несмотря на столь значительные искажения, даже применение линейной модели позволяет исправить данные изображения с вполне приемлемой погрешностью (рис. 4а). На рис. 4б, в показан рельеф пористого оксида алюминия, ис-

правленный нелинейными методами коррекции; на рис. 4г дано его стилизованное изображение.

Материалы, представленные в статье, докладывались на симпозиуме “Нанофизика и наноэлектроника” в Нижнем Новгороде в 2005 г.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 05-01-00407, № 05-03-32394, № 08-07-00003) и Правительства Москвы (грант 1.1.213). Автор выражает благодарность С. Ю. Васильеву за критические замечания, высказанные при прочтении рукописи, С.А. Саунину за помощь, оказанную при встраивании встречного сканирования в программу управления СЗМ, и С. А. Гаврилову за предоставленный образец пористого оксида алюминия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Griffith J.E., Grigg D.A.* // J. Appl. Phys. 1993. V. 74. P. R83.
2. *Griffith J.E., Miller G.L., Green C.A. et al.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 1990. V. 8. P. 2023.
3. Patent 5077473 (USA). Drift compensation for scanning probe microscopes using an enhanced probe positioning system/Digital Instruments, Inc. Elings V. B., Gurley J. A., Rodgers M. R. // 1991.
4. Patent 5107113 (USA). Method and apparatus for correcting distortions in scanning tunneling microscope images/Bell Communications Research, Inc. Robinson R. // 1992.
5. *Yurov V.Y., Klimov A.N.* // Rev. Sci. Instrum. 1994. V. 65. P. 1551.
6. *Jorgensen J.F., Madsen L.L., Garnaes J. et al.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 1994. V. 12. P. 1698.
7. Заявка 2006127131 на патент (РФ). Способ коррекции искаженных дрейфом изображений поверхности, полученных на сканирующем зондовом микроскопе/Лапшин Р.В. 2006 (www.nanoworld.org/homepages/lapshin/patents.htm).
8. *Lapshin R.V.* // Nanotechnology. 2004. V. 15. P. 1135. (www.nanoworld.org/homepages/lapshin/publications.htm).
9. *Stoll E.P.* // Rev. Sci. Instrum. 1994. V. 65. P. 2864.
10. *Lapshin R.V.* // Rev. Sci. Instrum. 1995. V. 66. P. 4718 (www.nanoworld.org/homepages/lapshin/publications.htm).
11. *Lapshin R.V.* // Rev. Sci. Instrum. 1998. V. 69. P. 3268 (www.nanoworld.org/homepages/lapshin/publications.htm).
12. *Li A.P., Müller F., Birner A. et al.* // J. Appl. Phys. 1998. V. 84. P. 6023.

Method for Automatic Correction of Drift-Distorted SPM-Images

R. V. Lapshin

A method intended for automatic correction of drift-distorted topography images measured with a scanning probe microscope is developed. In case of slowly changing drifts, simple linear transformations are composed that describe the observed distortions. One or two pairs of counter-scanned images (CSI) are used as initial data. By searching for coordinates of the same surface feature within each CSI, a system of linear equations is solved. The obtained solutions – linear transformation coefficients are used for correction of the drift-produced distortions in the lateral and vertical planes. Two nonlinear approaches providing a greater precision of drift correction as compared with the linear approach are suggested. The developed method may be built in the feature-oriented scanning.