

# Автоматическая распределённая калибровка сканера зондового микроскопа

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/)

В настоящее время сканер зондового микроскопа принято характеризовать четырьмя фиксированными параметрами, из которых три параметра это коэффициенты чувствительности  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  пьезоманипуляторов, а четвёртый параметр это угол косоности, учитывающий неортогональность  $XU$  пьезоманипуляторов [1]. Из-за нелинейности и гистерезиса пьезоманипуляторов [2], а также наличия между ними паразитных связей сканер зондового микроскопа может быть описан четырьмя указанными параметрами только вблизи начала координат, где влияние искажающих факторов незначительно. По мере удаления от начала координат, погрешность измерения рельефа заметно возрастает, достигая наибольшего значения на краю поля сканера.

Решить проблему позволяет распределённая калибровка сканера зондового микроскопа, в результате которой для каждой точки пространства перемещения сканера определяются три локальных калибровочных коэффициента (ЛКК)  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$ . Используемая при калибровке эталонная поверхность должна содержать элементы, называемые далее особенностями, расстояния между которыми и высота которых известны с высокой точностью. Для того чтобы исправить искажённое изображение рельефа неизвестной поверхно-

сти, координаты каждой его точки умножаются на соответствующий ЛКК.

При проведении распределённой калибровки [3, 4] поле сканера “покрывается” сеткой с квадратными ячейками, узлы которой соответствуют абсолютным координатам сканера  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$  (см. Рис. 1). В ходе калибровки в окрестности каждого узла сетки производится поиск локальных калибровочных коэффициентов.

Зонд микроскопа перемещается по узлам сети как по растру: движется по строке в прямом направлении, переходит на следующую строку, движется по строке в обратном направлении, переходит на следующую строку и т. д. Задание положения  $\bar{z}$  точного  $Z$  манипулятора производится посредством грубого  $Z$  манипулятора. После каждого перемещения из одного узла сети (точнее окрестности этого узла) в другой узел сети выдерживается некоторая пауза необходимая для того, чтобы дождаться прекращения вызванного этим перемещением крипа пьезоманипуляторов сканера.

После окончания паузы, используя процедуру привязки [3], “захватывается” ближайшая к этому узлу особенность эталонной поверхности (особенность  $A$ , см. Рис. 1а), которая удерживается затем некоторое время в “поле зрения” прибора путём повторных привязок. В качестве особенностей эталонной поверхности могут использоваться определённые в самом общем виде элементы рельефа типа “холм” или “яма” [3].

Выполнив привязку к особенности  $A$ , ближайшей к текущему узлу сетки, производится сканирование апертуры [3] – окрестности захваченной особенности, вмещающей её ближайших соседей. В ходе распознавания апертуры определяются (приблизительно) относительные координаты особенностей-соседей, образующие локальную калибровочную структуру (ЛКС) [3, 4].

После обнаружения ЛКС выполняется скиппинг [3, 4] между особенностью  $A$  и её соседями, целью которого является точное измерение относительных координат соседей. В простей-

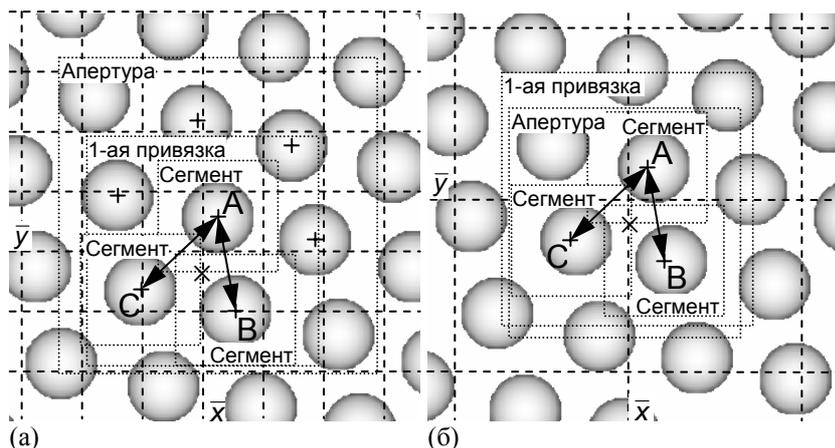


Рис. 1 Распределённая калибровка сканера зондового микроскопа. Сетка, разбивающая поле сканера на квадратные ячейки, показана пунктирными линиями. Точка  $(\bar{x}, \bar{y})$  является текущим узлом сети, вблизи которого ищутся ЛКК. Привязка зонда к (а) отдельной особенности, (б) ЛКС. В роли ЛКС эталонной поверхности выступает группа из трёх особенностей  $A$ ,  $B$  и  $C$ , расстояния между которыми *a priori* известны с высокой точностью. Позиции обнаруженных в процессе калибровки особенностей обозначены знаком “+”. Определение ЛКК производится для “центра тяжести” ЛКС  $ABC$ , обозначенного как “x”. Стрелки между особенностями  $A$  и  $B$ ,  $A$  и  $C$  символизируют скиппинг.

шем случае, когда в качестве ЛКС используются три особенности А, В, С, расстояния между которыми *a priori* точно известны, например, три соседних атома углерода на поверхности высокоориентированного монокристалла пиролютического графита [1], достаточно выполнить два скиппинга:  $A \leftrightarrow B$  и  $A \leftrightarrow C$ . Определив точные координаты особенностей, составляющих ЛКС, вычисляются ЛКК  $K_x, K_y, K_z$ .

Напомним, что, благодаря скиппингу, результаты измерения относительного расстояния между двумя особенностями практически не искажены дрейфом, поэтому получаемая сеть ЛКК не зависит ни от скорости сканирования, ни от его направления. Кроме того, результаты распределённой калибровки не искажены гистерезисом, поскольку все перемещения в активной фазе выполняются точно от одной особенности поверхности к другой.

В качестве абсолютных координат  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  ЛКС, которым сопоставлены ЛКК  $K_x, K_y, K_z$ , удобно выбрать координаты “центра тяжести” калибровочной структуры. Если вблизи текущего узла сетки имеется несколько калибровочных структур, то среди них после распознавания апертуры выбирается та, чьи координаты расположены ближе остальных к текущему узлу сетки.

Абсолютная величина скорости дрейфа во время привязки зонда к особенности или в процессе выполнения скиппинга может быть большой, важно только, чтобы текущая особенность за время сканирования сегмента не “уплывала” за пределы сегмента.

Другим условием, накладываемым на дрейф, является условие неизменности скорости дрейфа в течение времени выполнения одного цикла скиппинга [3-5]. Чем лучше выполняется последнее условие, тем с меньшей погрешностью будет исправлен дрейф микроскопа, и тем точнее будут определены ЛКК. Как показывают измерения, скорость дрейфа может считаться практически неизменной на протяжении десятков секунд [3, 5], при этом продолжительность одного цикла скиппинга соседних атомов углерода на поверхности графита приблизительно равна 300 мс [3].

Чувствительность ЛКК к погрешностям в определении координат положения особенностей поверхности [1], образующих ЛКС, устраняется путём многократного повторения измерений. Количество повторных локальных измерений ЛКС принципиально ничем не ограничено. Полученные в процессе распределённой калибровки ЛКК вместе с абсолютными действительными координатами ЛКС, которым они соответствуют, помещаются в калибровочную базу данных. Проводя через искажённые шумами ЛКК регрессионные поверхности, определяются искомые ЛКК, соответствующие целочисленным координатам точек исправляемого изображения.

На Рис. 16 показана разновидность распределённой калибровки, при которой в процессе

привязки зонда микроскопа и сканирования апертуры оперируют не отдельной особенностью, а целой ЛКС. Данный способ калибровки использует апертуру меньшего размера, что позволяет увеличить производительность распределённой калибровки. Способ следует применять в случаях, когда шаг исходной сетки больше характерного размера ЛКС.

Используя в качестве эталонной поверхности атомарную поверхность кристалла, можно получить распределение ЛКК с очень высокой плотностью. Однако в настоящее время покрыть столь частой сеткой весь диапазон перемещений сканера, да ещё и на нескольких уровнях невозможно из-за недостаточно высокого быстродействия современных микроскопов.

Тем не менее, в ряде случаев бывает достаточно точно откалибровать лишь небольшую область пространства сканера, расположенную в окрестности точки начала координат, где остаточные погрешности наименьшие. Для выполнения необходимых измерений исследуемый участок поверхности может быть просто перенесён с помощью грубых X, Y манипуляторов, грубого Z манипулятора и процедуры привязки зонда к особенности в эту часть пространства точного сканера [3, 4].

Отметим в заключение, что успешное решение задачи нахождения ЛКК, распределённых в пространстве перемещений сканера, в большой степени зависит от свойств используемой эталонной поверхности, которая должна обладать неизменной структурой в каждой точке поля сканера. К сожалению, на практике дефекты и остаточные напряжения искажают поверхностную структуру эталона, что несколько усложняет распределённую калибровку на больших полях.

В этом случае приходится, используя грубые X, Y манипуляторы, грубый Z манипулятор и процедуру привязки зонда микроскопа к особенности, перемещать предварительно выбранный “совершенный” участок поверхности эталона в пространстве точного сканера для того, чтобы калибровать всё пространство сканера только этой небольшой областью поверхности эталона [3, 4].

[1] R. V. Lapshin, Rev. Sci. Instrum., **69**, 3268 (1998).

[2] R. V. Lapshin, Rev. Sci. Instrum., **66**, 4718 (1995).

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

[4] Р. В. Лапшин, Способ автоматической распределённой калибровки сканера зондового микроскопа, заявка на патент РФ, № 2005101495 (2005).

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