

ОСОБЕННОСТЬ-ОРИЕНТИРОВАННАЯ СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ: ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ, НАНОМЕТРОЛОГИЯ, НАНОТЕХНОЛОГИИ "СНИЗУ-ВВЕРХ"

Р.Лапшин¹, к.т.н. rlapshin@yahoo.com

Особенность-ориентированная сканирующая зондовая микроскопия (ООСЗМ) – это совокупность зондовых методов исследования поверхности с высоким пространственным разрешением. ООСЗМ непосредственно оперирует особенностями (объектами) поверхности, линейные размеры которых лежат в диапазоне от десятков нанометров до нескольких ангстрем. Операции с особенностями включают в себя как измерения топографии и свойств поверхности, так и активные воздействия на поверхность. Возможности метода, связанные с активным воздействием на особенности поверхности, позволяют рассматривать ООСЗМ в качестве основы для построения нанопроизводства "снизу-вверх". Сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) в этом случае выступает в качестве прототипа наноассемблера. Работая в полностью автономном режиме, ООСЗМ обеспечивает при комнатной температуре высокую точность измерений, воздействий и манипуляций. В ООСЗМ могут согласованно использоваться специализированные зонды, образующие набор различных измерительных и технологических инструментов.

Особенность-ориентированная сканирующая зондовая микроскопия (ООСЗМ) – это новый подход в сканирующей зондовой микроскопии, при котором измеряемая или модифицируемая поверхность представлена не "мертвым" массивом точек скана, а совокупностью особенностей, каждая из которых характеризуется своим собственным набором признаков. Работа с особенностями поверхности позволяет при комнатной температуре не только существенно увеличить точность измерения топографии поверхности и заметно улучшить разрешение зондового микроскопа, но и в перспективе реализовать автономно работающее многозондовое нанопроизводство "снизу-вверх".

ООСЗМ базируется на методах особенность-ориентированного сканирования [1-5], встречного

сканирования [6-8], распределенной калибровки [1, 9-14] и особенность-ориентированного позиционирования [1, 2, 15, 16].

ОСОБЕННОСТЬ-ОРИЕНТИРОВАННОЕ СКАНИРОВАНИЕ

Особенность-ориентированное сканирование (ООС) – метод прецизионного измерения топографии поверхности, а также других ее свойств и характеристик на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ), при котором особенности (объекты) поверхности используются в качестве точек привязки зонда микроскопа (опорных точек). Сущность метода ООС состоит в том, что в ходе следующих друг за другом переходов от одной особенности поверхности к другой, расположенной по соседству, производится измерение относительного расстояния между особенностями, а также измерение их топографий, называемых сегментами поверхности. Такой подход позволяет просканировать

¹ ФГУП "НИИФП им. Ф.В.Лукина", Национальный исследовательский университет "МИЭТ"

заданную область на поверхности по частям, после чего восстановить целое изображение из полученных фрагментов.

Сегмент – это растровый скан особенности поверхности. Размеры сегментов устанавливаются таким образом, чтобы сегменты соседних особенностей частично перекрывали друг друга. Перекрытие позволяет реконструировать топографию измеряемой поверхности без разрывов. Сканирование в сегменте проводится методом встречного сканирования, благодаря чему искажения раstra в сегменте, вызываемые дрейфом зонда микроскопа относительно измеряемой поверхности, могут быть исправлены.

Выполняя в реальном масштабе времени программное распознавание особенности в сегменте, определяют вызываемое дрейфом смещение этой особенности относительно центра сегмента. Найденное смещение компенсируется соответствующим изменением позиции зонда. Периодически повторяя сканирование сегмента, его распознавание и коррекцию положения зонда, можно осуществить слежение зондом за особенностью, называемое также привязкой зонда микроскопа к особенности поверхности.

Под особенностями поверхности понимаются любые элементы ее рельефа, которые выглядят как выпуклость (холм) или углубление (яма). Примерами особенностей (объектов) поверхности являются: атомы, междоузлия, молекулы, кластеры, зерна, наночастицы, кристаллиты, квантовые точки, наноструктуры, столбики, поры, короткие нанопроводники, наностержни и нанотрубки, элементы цепочек, бактерии, вирусы, клетки, органеллы и т.п.

Единственным ограничением, накладываемым на используемую особенность, является требование сравнимости ее латеральных размеров. Другими словами, протяженности особенности в разных направлениях в латеральной плоскости должны быть соразмерны друг другу. В противном случае особенность не может быть локализована в сегменте небольшого размера. К "неудобным" поверхностям, например, относятся: не содержащая дефектов поверхность одномерной дифракционной решетки, поверхность интегральной схемы, где много длинных проводников. и т.п.

Поясним различия между особенностями и объектами рельефа. Под особенностями рельефа понимаются наноразмерные элементы рельефа, составляющие с последним одно целое, либо элементы, отличные по составу и/или свойствам от основного рельефа, но связанные с ним прочными химическими связями. Под объектами рельефа понимаются наноразмерные элементы рельефа, связанные с основным

рельефом (подложкой) слабыми силами физической адгезии. Основное отличие объектов от особенностей в используемой терминологии состоит в том, что объекты можно перемещать по поверхности при приложении к ним со стороны зонда незначительной силы.

В целом ООС поверхности представляет собой следующую последовательность действий:

- 1) обнаружение и захват ближайшей (текущей) особенности поверхности;
- 2) сканирование окрестности текущей особенности, называемой апертурой (апертура – растровый скан, включающий несколько соседних особенностей);
- 3) выбор по установленному правилу связывания среди соседних особенностей следующей особенности;
- 4) выполнение скиппинга текущей и следующей особенностей;
- 5) перемещение зонда микроскопа в позицию следующей особенности, которая теперь становится текущей особенностью.

Указанная последовательность действий повторяется далее до тех пор, пока не будет просканирована заданная область поверхности, размеры которой принципиально ничем не ограничены.

Упомянутый выше скиппинг – это элементарная измерительная операция в ООС, предназначенная для точного определения относительных координат соседних особенностей и получения сегментов рельефа.

Скиппинг особенностей включает в себя следующие действия:

- 1) перемещение зонда из позиции текущей особенности в позицию следующей особенности;
- 2) сканирование-распознавание сегмента следующей особенности;
- 3) вычисление разности координат текущей и следующей особенностей "вперед";
- 4) перемещение зонда обратно в позицию текущей особенности;
- 5) сканирование-распознавание сегмента текущей особенности;
- 6) вычисление разности координат текущей и следующей особенностей "назад".

Относительные координаты следующей особенности вычисляются как полусумма полученных разностей "вперед" и "назад", что позволяет исключить влияние дрейфа на измерение расстояния между особенностями. Таким образом, задавая большое количество циклов скиппинга, возможно посредством усреднения измерений существенно улучшить точность

измерений и разрешение микроскопа (предельное разрешение определяется радиусом кривизны зонда). Количество усреднений, выполняемых в ходе проведения ООС, может исчисляться сотнями тысяч и даже миллионами. Теоретически число усреднений не ограничено. На практике, однако, число усреднений ограничено главным образом долговременной стабильностью зонда. Долговременные стабильности исследуемой поверхности, зондового микроскопа и условий проведения эксперимента также накладывают ограничения на максимальное число выполняемых усреднений.

В основе ООС лежат следующие принципы: локализация измерений; оперирование отдельными особенностями поверхности; перемещение зонда на короткие расстояния от одной особенности к другой, расположенной по соседству; измерение относительных расстояний; многократное повторение измерений; непрерывающиеся привязки зонда к особенностям поверхности; постоянный мониторинг скорости дрейфа; иерархически организованные встречные перемещения.

Следует обратить внимание на то, что траектория перемещения зонда в методе ООС в отличие от обычного сканирования заранее не определена. Траектория строится динамически в процессе

выполнения ООС, заранее задается в общем виде только закон связывания особенностей друг с другом.

Преимущество метода ООС перед обычным сканированием заключается в том, что ООС непосредственно оперирует особенностями поверхности, которые, как правило, и являются предметом изучения или предметом технологии. Следует отметить, что ООС-метод измерения топографии окажется малоэффективным при сканировании поверхностей, где особенностей мало либо они вообще отсутствуют. Дело в том, что ООС на таких поверхностях будет пытаться обнаружить редко встречающиеся особенности путем последовательного увеличения числа точек в апертуре, а в случае неудачи попытается изменить масштаб измерений путем последовательного уменьшения/увеличения шага сканирования. Подбор размера апертуры требует дополнительных затрат времени. Легко видеть, что увеличение размера апертуры эквивалентно вырождению метода ООС в обычное сканирование.

Строго говоря, не существует абсолютно гладких поверхностей, поскольку даже атомарно-гладкая поверхность имеет конечную шероховатость. Обычно вопрос состоит лишь в том, отвечают ли имеющиеся на поверхности особенности тому масштабу

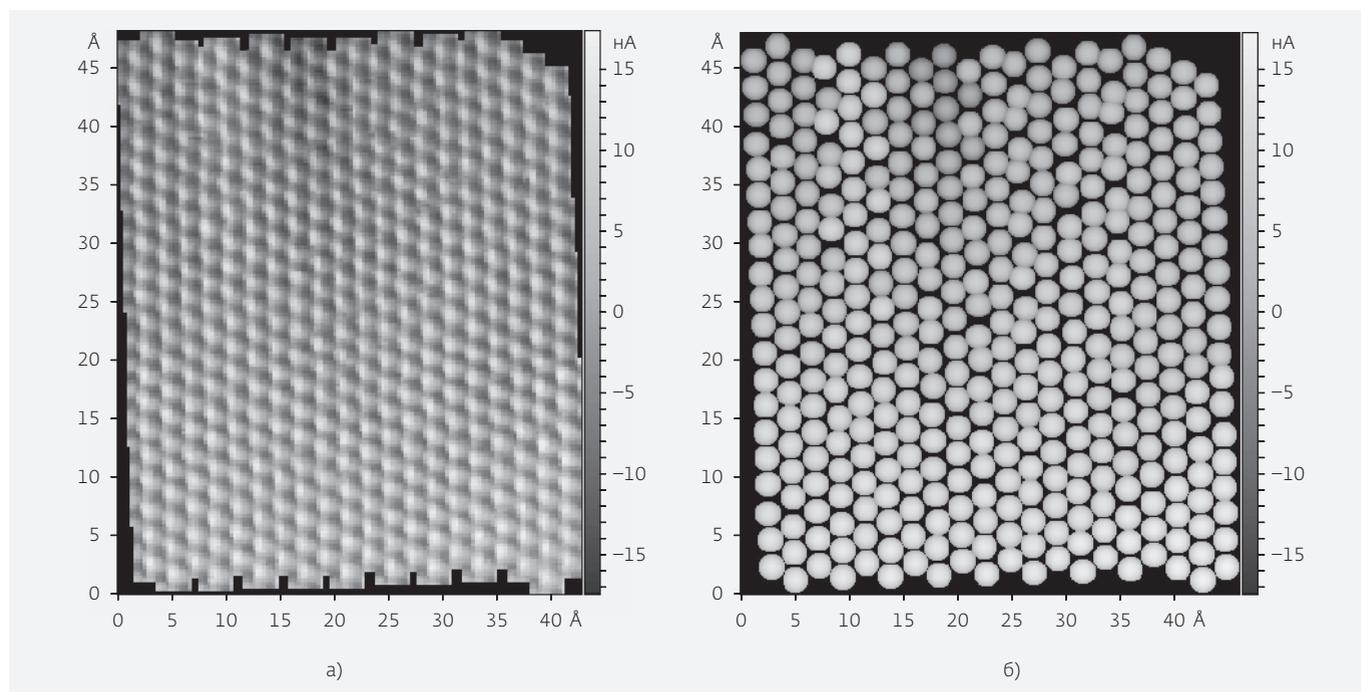


Рис.1. Атомная поверхность пиролитического графита (СТМ, режим постоянной высоты): а – поверхность, реконструированная из сегментов (число циклов скиппинга – 3, число усреднений сегментов – 6); б – шаровая модель полученной поверхности. Особенности поверхности – атомы углерода

измерений, который в данный момент представляет интерес для исследователя/технолога, а также насколько эти особенности контрастны и стабильны, чтобы служить надежными местами привязки зонда микроскопа.

Основной областью применения метода ООС является сканирующая зондовая микроскопия. Методу ООС безразлично является ли распознаваемое изображение поверхности обычным рельефом, распределением магнитного поля, распределением электрического заряда или чем-то иным. Поэтому метод ООС может использоваться на любом приборе из семейства СЗМ: на сканирующем туннельном микроскопе (СТМ), атомно-силовом микроскопе (АСМ), магнитно-силовом микроскопе (МСМ), электро-силовом микроскопе (ЭСМ), сканирующем оптическом микроскопе ближнего поля (СОМБП) и т.п. Возможно также применение ООС на растровом электронном микроскопе (РЭМ). Вообще говоря, ООС можно проводить на любом микроскопе, где есть зонд (механическое острие, сфокусированный луч света, сфокусированный электронный луч, сфокусированный ионный пучок и т.п.), устройство развертки (сканер) и устройство регистрации (детектор) результатов взаимодействия зонда с измеряемой поверхностью.

Помимо сканирующей зондовой микроскопии метод ООС может найти применение в нанопроизводстве "снизу-вверх", т.е. в поэлементной сборке наноустройств с помощью зонда. В качестве строительных блоков могут использоваться нанокластеры, наночастицы, молекулы и даже отдельные атомы. Аппарат, который производит сборку наноустройств, называется наноассемблером. В перспективе наноассемблер будет иметь набор специализированных зондов: одни – для выполнения технологических операций, а другие – для аналитических измерений и контроля. ООС в состоянии взять на себя управление наноассемблером, сделав нанопроизводство полностью автоматическим. Оператор должен будет только сформулировать задание в общих терминах, после чего действовать по принципу "запустил и забыл". В настоящее время роль наноассемблера выполняет СЗМ, на котором отрабатываются различные способы измерений, отдельные технологические приемы и операции.

На сегодняшний день на поверхности твердых тел с помощью метода ООС при комнатной температуре на СТМ (Solver™ Р4, изготовитель "НТ-МДТ", Россия) выполнен ряд уникальных измерений [1]:

- получено неискаженное действием тепловых дрейфов изображение (рис.1) кристаллической поверхности высокоориентированного

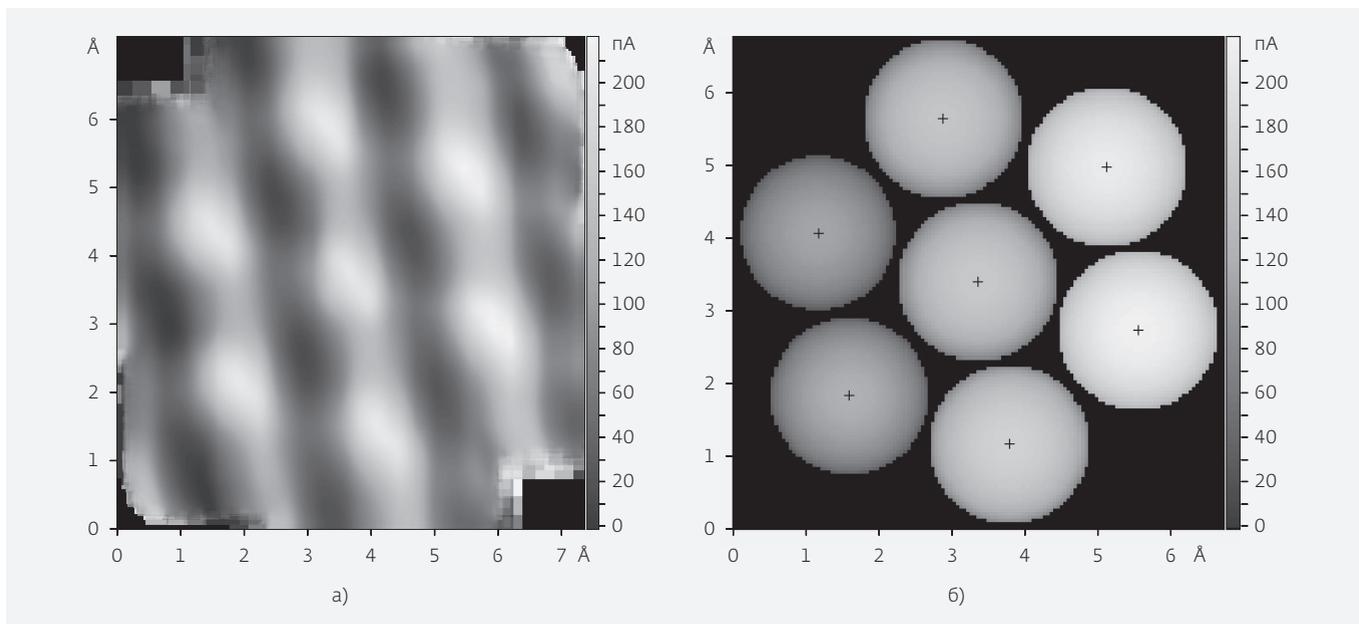


Рис.2. Атомная поверхность пиролитического графита, измеренная с высоким разрешением (СТМ, режим постоянной высоты): а – поверхность, реконструированная из сегментов (элементы, соответствующие минимальному шагу сканера, хорошо видны в верхнем левом и нижнем правом углах изображения; для каждого из семи атомов углерода были измерены 1000 сегментов и разностей координат); б – шаровая модель полученной поверхности. Особенности поверхности – атомы углерода

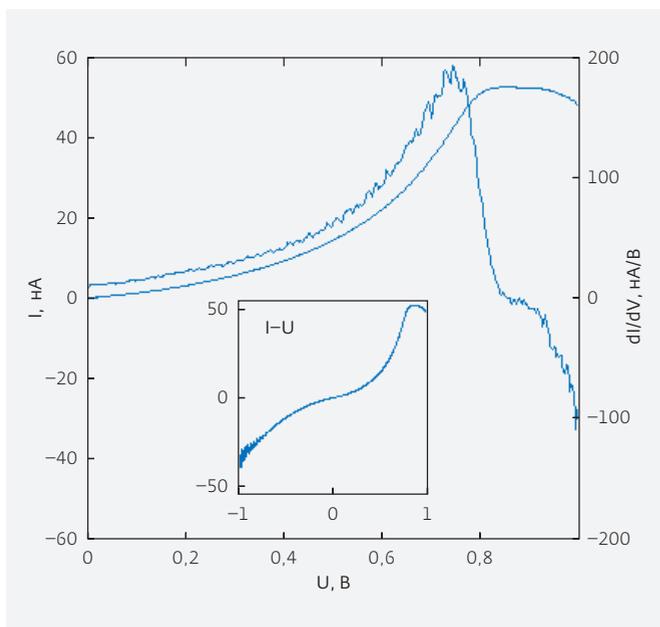


Рис.3. Усредненная ВАХ и ее производная. ВАХ измерена для туннельного зазора, локализованного непосредственно над вершиной атома углерода монокристалла пиролитического графита. Число усреднений – 10^4

пиролитического графита (ВОПГ) с атомарным разрешением;

- экспериментально доказана возможность улучшения в десятки раз предельного разрешения микроскопа (рис.2);
- с наивысшей когда-либо достигнутой на зондовом приборе точностью измерено расстояние между соседними атомами на поверхности монокристалла (погрешность измерения после выполнения 250 000 циклов скиппинга составила $\pm 0,0005 \text{ \AA}$);
- проведена локализованная точно над вершиной атома туннельная спектроскопия с высоким отношением сигнал/шум (рис.3).

Устойчивое ООС на квазиупорядоченной и разупорядоченной поверхностях, особенности которых имеют латеральные размеры десятки-сотни нанометров, было продемонстрировано на АСМ (Solver™ P4) [1]. Реконструированное изображение квазиупорядоченной поверхности электрохимически полированного алюминия представлено на рис.4, реконструированное изображение разупорядоченной поверхности осажденной из плазмы пленки углерода – на рис.5. Полученные изображения практически не имеют искажений, вызываемых тепловым дрейфом микроскопа, ползучестью и гистерезисом [17] пьезокерамики сканера. В ходе выполненных измерений автоматически собиралась неискаженная статистика

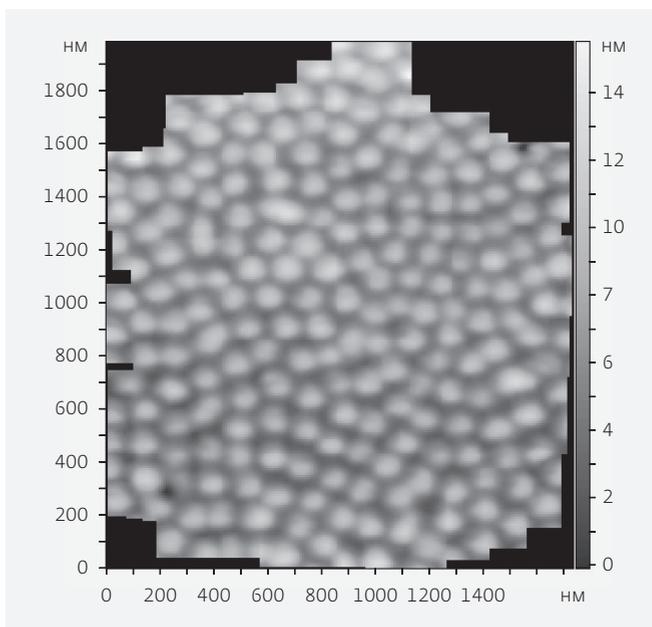


Рис.4. Реконструированная поверхность электрохимически полированного алюминия (АСМ, полуконтактный режим). Особенности поверхности – алюминиевые нанохолмики, число циклов скиппинга – 2, число усреднений сегментов – 4

особенностей, детально характеризующая исследуемые поверхности.

ВСТРЕЧНОЕ СКАНИРОВАНИЕ

Встречное сканирование (ВС) – способ измерения рельефа поверхности на сканирующем зондовом микроскопе, который позволяет исправлять искажения растра, возникающие в результате дрейфа зонда микроскопа относительно измеряемой поверхности. В ходе ВС получают два скана поверхности – прямой и встречный. Встречный скан начинается в точке, где заканчивается прямой скан. Данная точка называется точкой совмещения (ТС). Перемещение зонда по строке растра и перемещение зонда от строки к строке растра на встречном скане выполняются в направлениях, противоположных направлениям этих перемещений на прямом скане. Полученная пара изображений называется встречно-сканированными изображениями (ВСИ).

Для выполнения коррекции достаточно найти одну и ту же особенность на обоих ВСИ и определить ее латеральные координаты. Из-за дрейфа одни и те же точки рельефа на прямом и встречном сканах не совпадают друг с другом за исключением единственной точки – точки совмещения. Из простой системы линейных уравнений для каждого ВСИ находят коэффициенты линейных преобразований (КЛП).

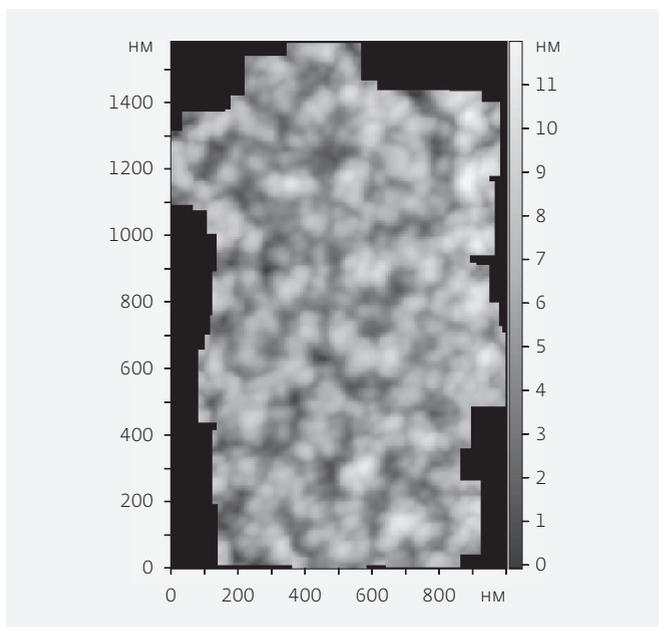


Рис.5. Реконструированная поверхность осажденной из плазмы углеродной пленки (АСМ, полуконтактный режим). Особенности поверхности – углеродные кластеры и межкластерные промежутки, число циклов скиппинга – 2, число усреднений сегментов – 4

С помощью найденных КЛП производят исправление дрейфа по x , y и z , после чего совмещают исправленные изображения в ТС и усредняют рельеф в области перекрытия этих изображений. При составлении системы уравнений предполагается, что скорость дрейфа постоянна в течение времени сканирования. Поэтому чем медленнее изменяется скорость дрейфа, тем выше будет точность его коррекции.

Если во время холостого обратного хода при сканировании прямого и встречного изображений производить считывание сигнала, то можно получить еще одну пару ВСИ. Коррекция по двум парам ВСИ позволяет повысить точность исправления дрейфа, а также уменьшить уровень шума в выходном изображении. В случае, когда скорость дрейфа за время получения ВСИ изменяется существенно, следует применять нелинейные методы коррекции, предложенные в работе [6].

Поскольку вероятность изменения скорости дрейфа за время встречного сканирования тем меньше, чем меньше размеры скана, то наибольший эффект от применения встречного сканирования достигается при его использовании в методе ООС, который оперирует сканами небольшого размера – сегментами и апертурами. Причем возможность коррекции дрейфа в апертурах позволяет ценой некоторого снижения точности измерений

увеличить производительность ООС, отказавшись от операции скиппинга и собирая поверхность не из сегментов, а из апертур.

Применение ВС позволяет:

- легко выявлять пары особенностей на ВСИ благодаря наличию ТС, в окрестности которой рельеф практически совпадает;
- увеличить точность коррекции дрейфа за счет получения большей разницы в координатах положения особенностей, составляющих пару;
- обеспечивать заранее заданную погрешность измерения в пределах определенной области изображения в соответствии с фактическим изменением скорости дрейфа во время ВС;
- уменьшить ползучесть, производимую пьезосканером в процессе ООС, путем возбуждения встречной ползучести при сканировании сегментов/апертур рельефа.

Эффективность метода ВС показана на примере сканов поверхности монокристалла пиролитического графита (упорядоченная поверхность, масштаб особенностей – атомный, малый дрейф – сотые доли $\text{\AA}/\text{с}$, незначительная компонента дрейфа, связанная с ползучестью, сканирующая туннельная микроскопия) и поверхности пористого оксида алюминия (квазиупорядоченная поверхность, масштаб особенностей – десятки нанометров, сильный дрейф – больше $10 \text{\AA}/\text{с}$, существенная компонента дрейфа, связанная с ползучестью, атомно-силовая микроскопия) [6].

На рис.6 приведены встречно-сканированные изображения атомной поверхности пиролитического графита, на которых хорошо видны искажения растра, вызванные тепловым дрейфом. Исправленная поверхность графита показана на рис.7. В качестве особенностей поверхности выступали атомы углерода и междуузлия. На рис.8 приведены встречно-сканированные изображения квазиупорядоченной пористой поверхности оксида алюминия. Изображения сильно искажены ползучестью. Исправленная поверхность оксида алюминия показана на рис.9. Особенности поверхности в данном случае служили холмики и поры.

В результате применения метода ВС максимальная погрешность измерений уменьшена: на графите с 8 до 0,6%, на оксиде алюминия – с 25 до 0,9%. Средняя погрешность по полю исправленного изображения составила для графита 0,1%, для оксида алюминия – 0,2%. Встречное сканирование проводилось на микроскопе Solver™ P4.

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ КАЛИБРОВКА

Выполняя на поверхности эталонного образца разновидность ООС, называемую распределенной

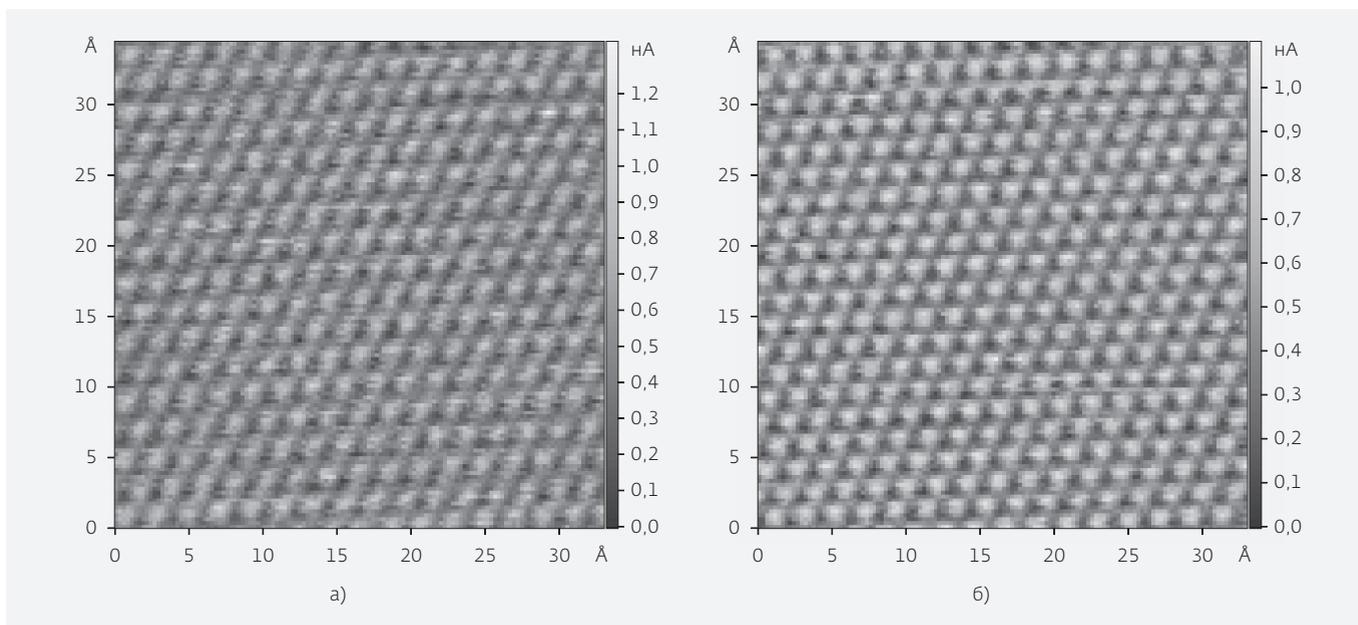


Рис.6. Искаженные дрейфом ВСИ атомной поверхности пиролитического графита: прямое изображение (а), встречное изображение (б). Режим измерений: СТМ, постоянная высота. Максимальная относительная погрешность измерений в латеральной плоскости, обусловленная дрейфом, составила 7,8%

калибровкой [1, 9-11], возможно для каждой точки пространства перемещений сканера определить локальные калибровочные коэффициенты (ЛКК) K_x , K_y , K_z . Применение ООС исключает *in situ* негативное влияние на получаемые результаты термодрейфа, ползучести и гистерезиса. Чувствительность ЛКК к погрешностям

в определении координат положения особенностей поверхности, образующих локальную калибровочную структуру (ЛКС), устраняется путем многократного повторения измерений с последующим построением регрессионных поверхностей. Количество повторных измерений ЛКС принципиально ничем не ограничено.

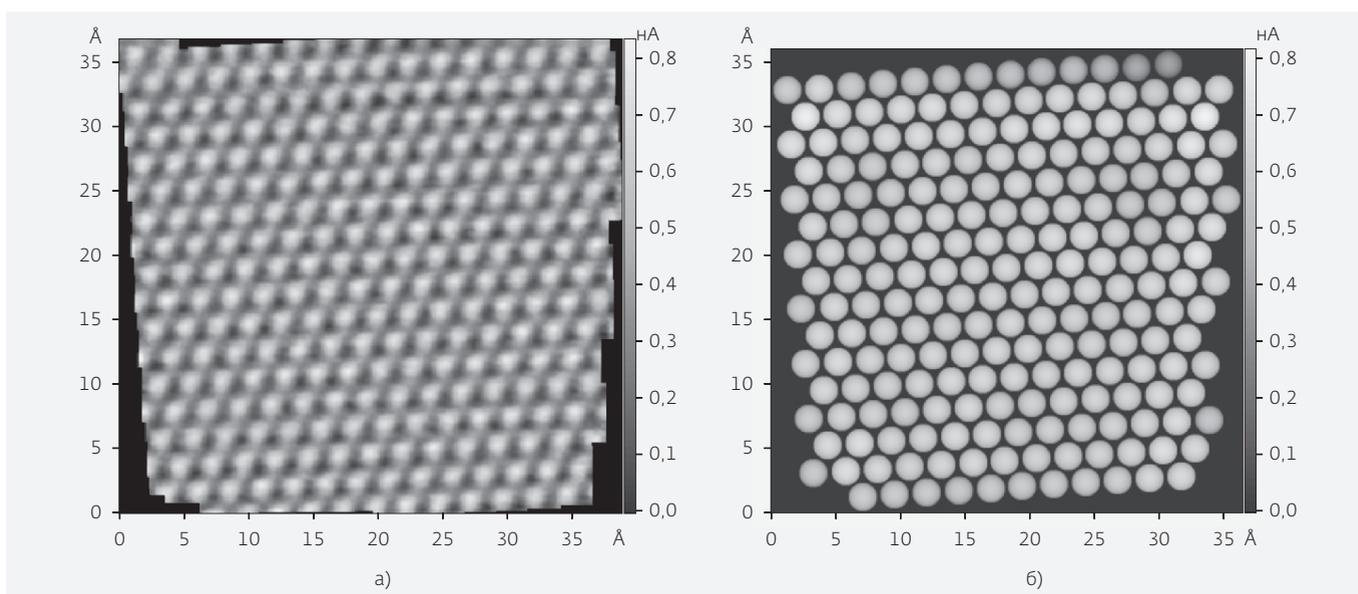


Рис.7. Исправленный рельеф поверхности пиролитического графита: реальное изображение (а), шаровая модель (б)

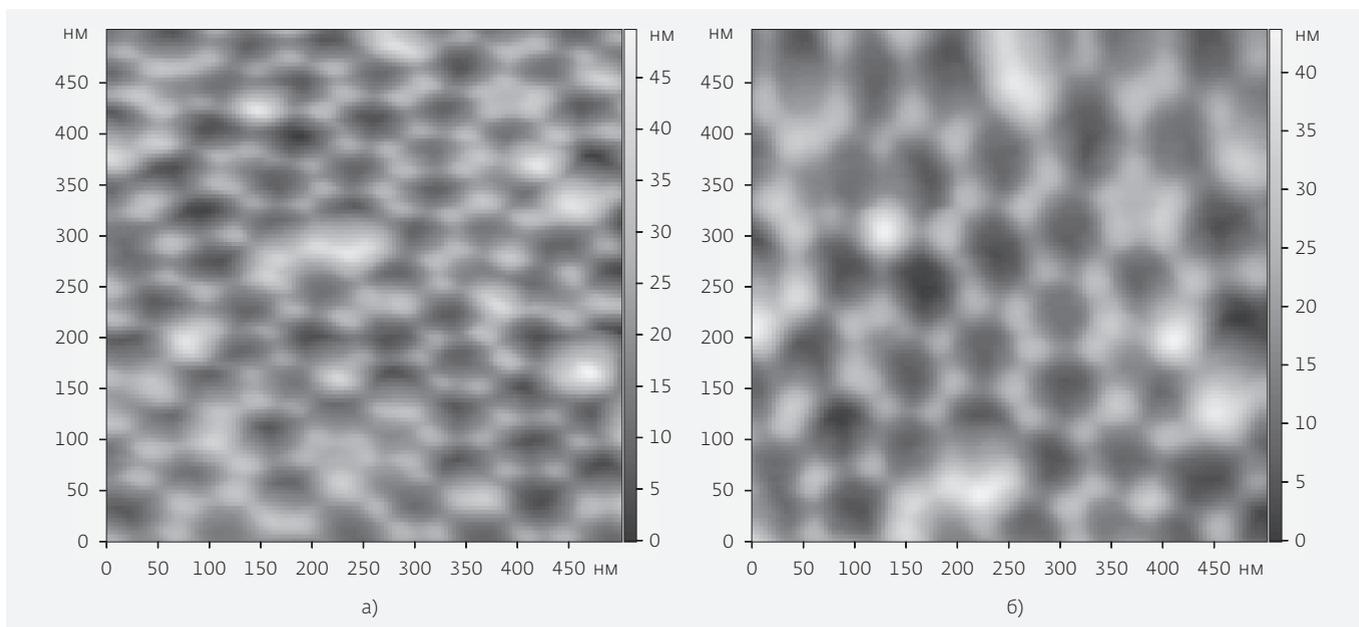


Рис.8. Искаженные дрейфом ВСИ пористой поверхности оксида алюминия: прямое изображение (а), встречное изображение (б). Режим измерений: АСМ, полуконтактный. Вызванная дрейфом максимальная относительная погрешность измерений в латеральной плоскости 24,6%

Используя полученную калибровочную базу данных (КБД), можно в один прием исправить все пространственные искажения, вызываемые нелинейностью, неортогональностью и взаимными паразитными связями X-, Y-, Z-манипуляторов сканера. Чтобы обеспечить высокую точность пространственных измерений в нанометровом диапазоне, калибровка выполняется с использованием природных эталонов – постоянных кристаллической решетки.

Используя постоянную кристаллической решетки высокоориентированного пиролитического графита

($a = 2,464 \pm 0,002 \text{ \AA}$ [18]) в качестве эталона длины, была проведена распределенная калибровка пьезосканера зондового микроскопа Solver™ P4. Распределенная калибровка осуществлялась по атомному рельефу базисной плоскости C(0001) ВОПГ. Топография поверхности графита определялась методом СТМ. В качестве локальной калибровочной структуры были выбраны три ближайших друг к другу атома углерода (или междоузлия), образующие равносторонний треугольник ABC с длиной стороны, равной a .

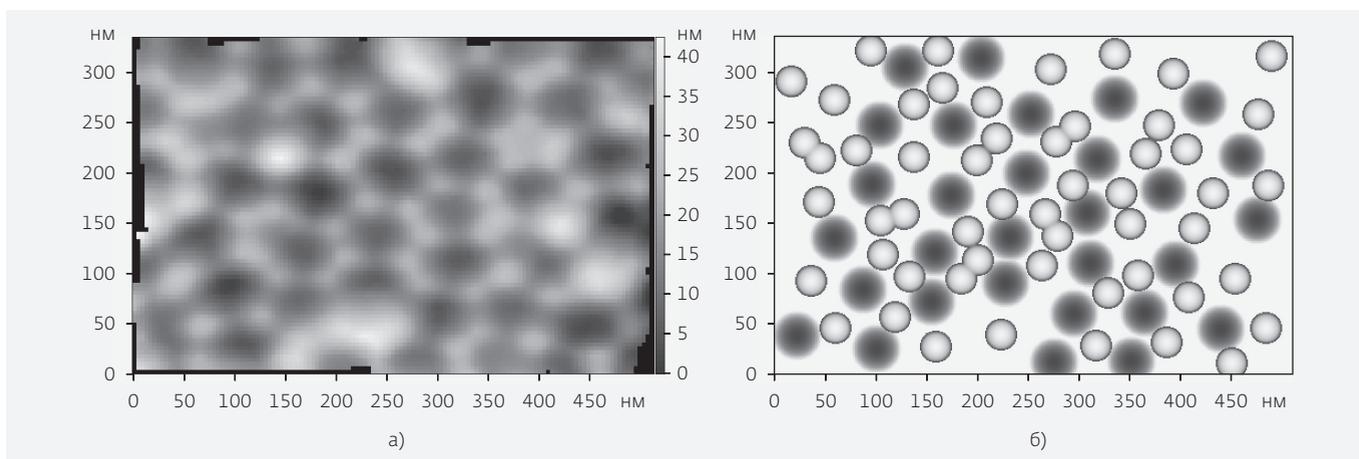


Рис.9. Исправленный рельеф поверхности пористого оксида алюминия: реальное изображение (а), стилизованное изображение (б)

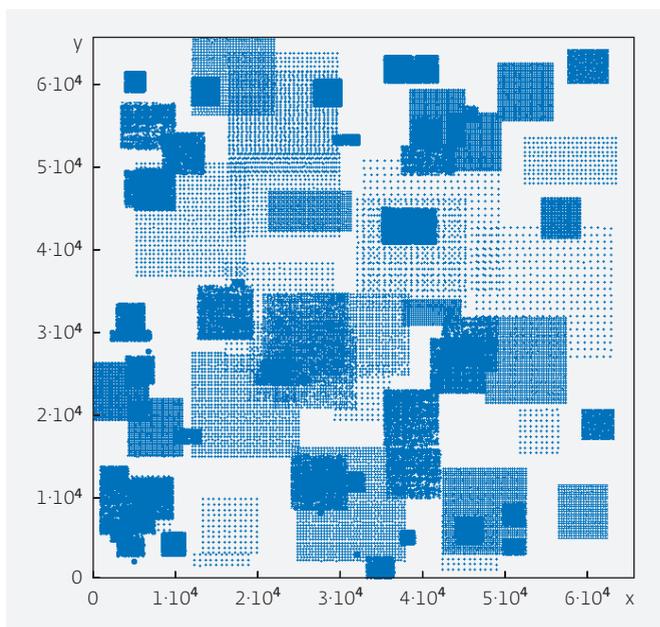


Рис.10. Область проведения распределенных калибровок (квадратные и прямоугольные массивы точек) на поле сканера. Каждой точке области соответствует позиция ЛКС, для которой были найдены ЛКК. По осям x , y отложены латеральные позиции сканера. Поле сканера приблизительно равно 2×2 мкм

Области на максимальном поле перемещения (около 2×2 мкм) пьезосканера, где осуществлялись распределенные калибровки, показаны на рис.10. Каждая точка области (помечена знаком "+") соответствует абсолютной латеральной позиции сканера, для которой были определены ЛКК. Найденные ЛКК сохраняются в КБД сканера. Используя КБД, можно построить искомую карту распределения нелинейных искажений сканера (рис.11). Располагая такой картой, можно исправить сканы поверхности, полученные как обычным сканированием, так и ООС. Информация, представленная на рис.10 и 11, соответствует положению Z-манипулятора сканера, выдвинутого на середину своего диапазона.

ОСОБЕННОСТЬ-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ

Особенность-ориентированное позиционирование (ООП) – метод прецизионного перемещения зонда сканирующего микроскопа по исследуемой поверхности, при котором особенности поверхности используются в качестве опорных точек (точек привязки зонда). Фактически ООП представляет собой упрощенную разновидность ООС, когда вместо получения топографического изображения некоторой области поверхности выполняется только перемещение зонда

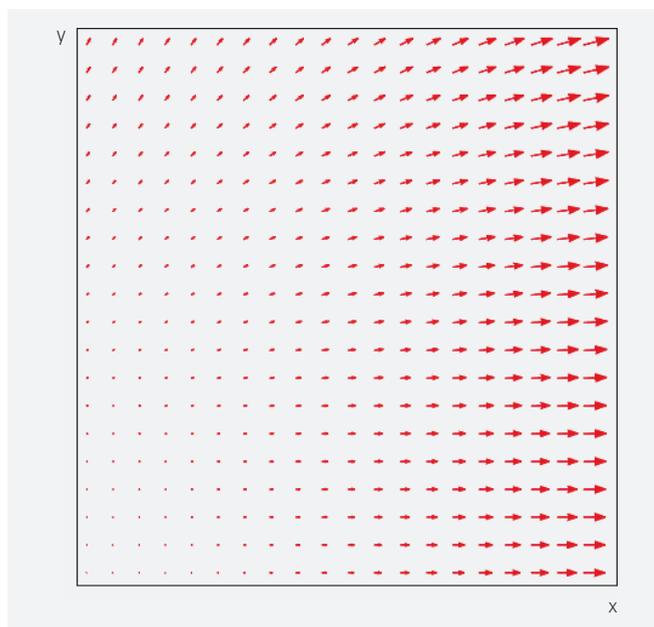


Рис.11. Статические нелинейные искажения пьезосканера зондового микроскопа в латеральной плоскости, определенные в ходе распределенной калибровки. Стрелки показывают величину и направление искажения. Длина вектора, расположенного в правом верхнем углу поля сканера, составляет 23 нм

по особенностям этой поверхности. Перемещение осуществляется из начальной точки А поверхности (окрестности начальной особенности) в конечную точку В (окрестность конечной особенности) вдоль некоторого маршрута, проходящего через промежуточные особенности поверхности.

Различают ООП "вслепую", когда координаты особенностей, по которым производится перемещение зонда, заранее неизвестны, и ООП по готовой "карте" особенностей, когда относительные координаты всех особенностей известны (например, были получены в ходе предварительного ООС). Разновидностью указанных способов является перемещение зонда по навигационной структуре (рис.12), когда а priori известна общая топология структуры, приблизительно (из-за технологического разброса и нестабильности поверхности) известны размеры элементов, форма элементов, расстояния между соседними элементами и направление движения. При этом может быть точно неизвестно текущее положение зонда в структуре, возможны попадания зонда на дефектные области структуры и т.п.

Помимо обеспечения прецизионного перемещения зонда микроскопа в поле точного позиционера применение ООП позволяет решить задачу прецизионного размещения поля точного позиционера

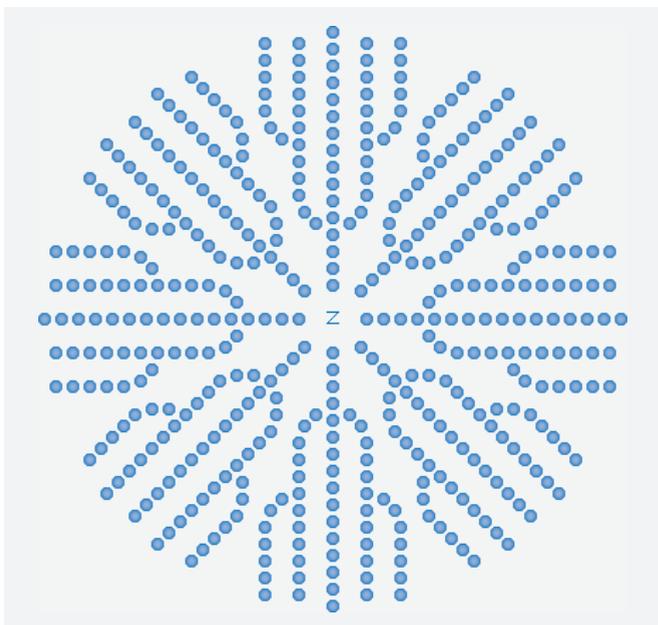


Рис.12. Навигационная структура в виде системы сходящихся к операционной зоне (обозначена буквой z) цепочек из особенностей. Структура предназначена для автоматического возврата зонда микроскопа в операционную зону после снятия-установки образца.

в сколь угодно большом поле грубого позиционера [16]. Так, при достижении точным позиционером края своего диапазона перемещений (рис.13, поз.2), им производится повторяющиеся друг за другом привязки зонда к текущей особенности В (показана в виде дужки). Одновременно грубый позиционер начинает медленно небольшими шагами двигать зонд относительно поверхности образца (поз.3). Точный позиционер "чувствует" это перемещение в циклах привязки по смещению текущей особенности. Направление перемещения грубого позиционера выбирается так, чтобы точный позиционер в ответ двигался бы вслед за текущей особенностью к противоположному краю своего диапазона. Движение грубого позиционера продолжается до тех пор, пока точный позиционер не достигнет противоположной границы своего диапазона, после чего точный позиционер в состоянии продолжить перемещение в прежнем направлении.

Указанный способ размещения поля точного позиционера в поле грубого позволяет с погрешностью точного позиционера как сканировать большие области поверхности, так и производить технологические операции на больших площадях. В обоих случаях протяженность перемещений ограничена только диапазоном грубого позиционера. Преимущество использования предложенной схемы состоит в том,

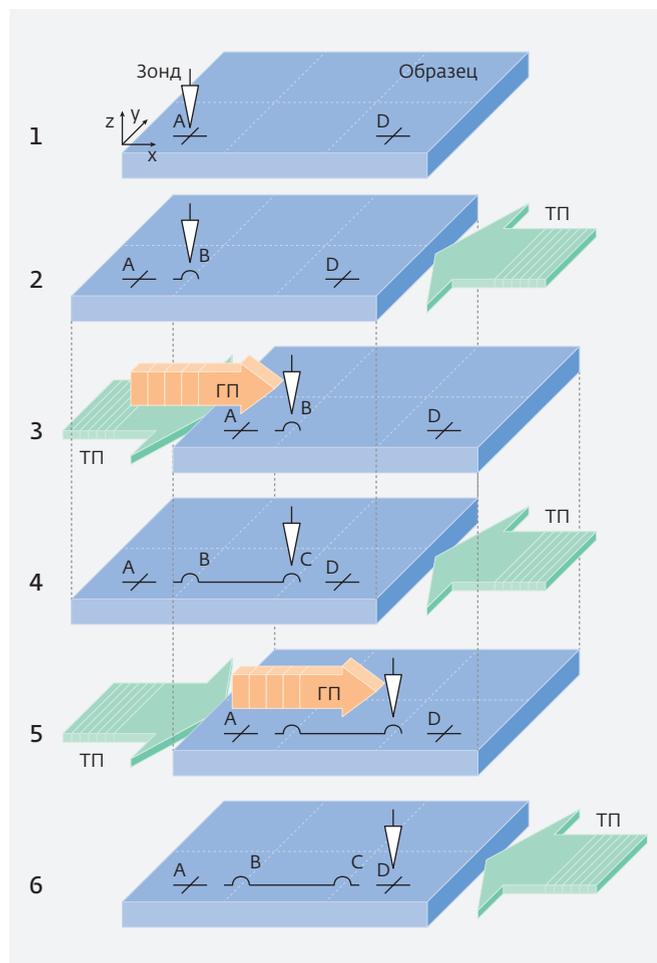


Рис.13. Прецизионное перемещение зонда микроскопа из точки А в точку D на расстояние более одного диапазона точного позиционера. Обозначения: ТП – точный позиционер, ГП – грубый позиционер. Пунктиром на поверхности образца показано разбиение поля грубого позиционера на смежные диапазоны точного. Дужки в положениях зонда В и С символизируют особенности поверхности

что фактически к грубому позиционеру не предъявляется жестких требований по точности и линейности перемещения.

Помимо применения в сканирующей зондовой микроскопии, туннельной и силовой спектроскопии поверхности метод ООП может использоваться в нанопроизводстве "снизу-вверх" для обеспечения прецизионного перемещения зонда нанолитографа/наноассемблера по поверхности подложки в ходе проведения нанотехнологических операций. Причем особенность-ориентированное позиционирование, однажды выполненное по некоторому маршруту, затем может быть точно воспроизведено необходимое число раз.

В многозондовых инструментах ООП-подход позволяет последовательно применить к любой особенности (объекту) поверхности или к любой точке ее окрестности любое число специализированных технологических и/или аналитических зондов, что дает возможность построить сложное нанопроизводство, состоящее из большого числа технологических, измерительных и контрольных операций.

Отправной точкой ООП следует считать работу Поля и Меллера [19], в которой был предложен аппаратный способ автоматического слежения за особенностью поверхности. Выполняя циклическую модуляцию положения зонда в латеральной плоскости, определяются локальные производные топографии поверхности по x и по y . Латеральные следящие системы формируют управляющие сигналы для сканера, в соответствии с которыми сканер движется в направлении уменьшения производной. В результате, зонд микроскопа поднимается на вершину холма либо опускается на дно ямы.

Впоследствии данный способ был успешно реализован Швартзентруббером [20] для непосредственного измерения поверхностной диффузии атомов кремния. Акетагава и другие [21] использовали метод Поля-Меллера для перемещения зонда по атомам углерода на поверхности ВОПГ вдоль кристаллографического направления. Недостатком метода Поля-Меллера при сравнении со следящей системой, реализованной программно, следует считать дополнительный шум, вносимый латеральными следящими системами в положение зонда при работе на пределе разрешения микроскопа.

Предельные возможности ООП иллюстрируют эксперименты по перемещению зонда СТМ по отдельным атомам поверхности монокристалла в заданном направлении. В частности, на поверхности ВОПГ на воздухе при комнатной температуре было продемонстрировано устойчивое перемещение зонда СТМ (Solver™ P4) от атома к атому вдоль кристаллографического направления (рис.14). Длина пройденного пути составила около 1 мкм (4060 атомов углерода), скорость перемещения – 1 атом/с [1]. Величина перемещения в этом эксперименте была ограничена только протяженностью атомарно-гладких участков на поверхности графита, определяемых размером кристаллита.

Помимо прецизионного перемещения зонда на большие расстояния и возможности измерения больших расстояний путем простого подсчета атомных периодов, данный метод позволяет выявлять и оценивать искривление кристаллографического направления, что может указывать на наличие макродефектов и/или упругих напряжений в теле кристалла.

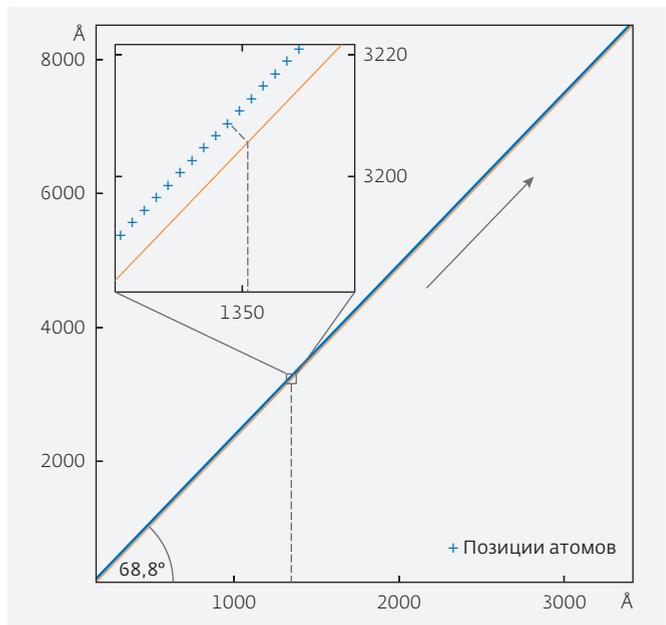


Рис.14. Перемещение зонда СТМ по атомам углерода в заданном направлении на поверхности ВОПГ (длина пути около 1 мкм, число атомов в цепочке – 4060, число циклов скиппинга – 3). Скорость перемещения 1 атом/с. Стрелкой показано направление движения зонда

С помощью специализированной разновидности ООП на воздухе при комнатной температуре была также продемонстрирована принципиальная возможность стабилизации положения зонда запоминающего устройства большой емкости на дорожке бит атомарных размеров [15]. В качестве прототипа зондового запоминающего устройства использовался СТМ (Solver™ P4). Атомы углерода на поверхности ВОПГ, расположенные вдоль кристаллографического направления, служили в качестве бит информации, образуя информационную дорожку. "Информационные" атомы располагались между "синхронизирующими" атомами, которые использовались для привязки зонда. Перемещение по информационной дорожке на расстояние чуть более одного микрона показано на рис.15. Скорость считывания составила 33 инфоатома/с. Особенность метода состоит в том, что считывание информации удается выполнить посредством только одного датчика и одной следящей системы в вертикальной плоскости.

Предложена новая методология, предназначенная для выполнения на поверхности твердых тел измерительных и технологических операций в наноскопическом масштабе. Методология состоит из четырех

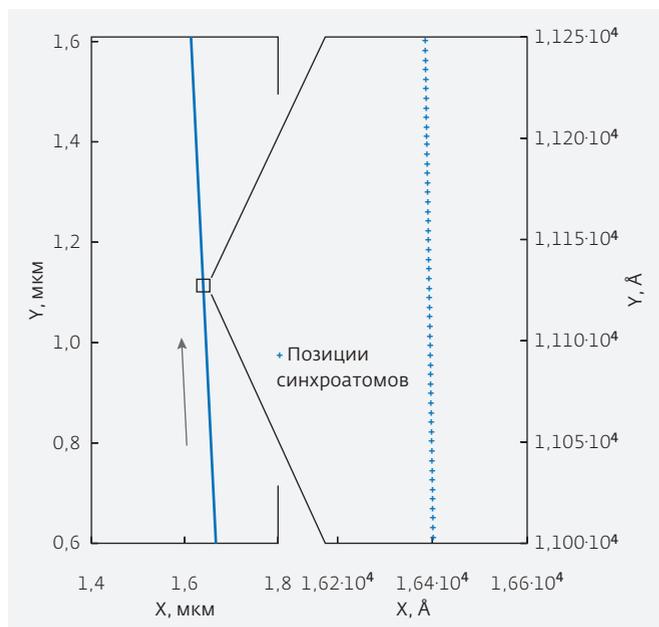


Рис.15. Удержание зонда СТМ на информационной дорожке, состоящей из атомов углерода монокристалла пиролитического графита. Нечетные атомы углерода – синхроэлементы дорожки, четные атомы углерода – информационные. Длина пройденной дорожки – 2048 синхроатомов (около 1 мкм). Скорость считывания – 33 инфоатома/с. Стрелкой показано направление движения зонда

ключевых компонентов: особенность-ориентированного сканирования, встречного сканирования, распределенной калибровки сканера, особенность-ориентированного позиционирования. К отличительным чертам и функциональным возможностям методологии относятся:

- слабая чувствительность выполняемых операций (сканирование рельефа, перемещение зонда, модификация/стимуляция поверхности, манипуляция объектами) к тепловым дрейфам, ползучестям и гистерезисам манипуляторов пьезосканера;
- высокая точность сканирования поверхности и более высокое (по сравнению с обычными методами сканирования) пространственное разрешение;
- автоматическая распределенная калибровка сканера микроскопа в нанометровом диапазоне, исключаяющая все статические нелинейные искажения. Применение в качестве эталона длины природных мер – кристаллических решеток;
- возможность проведения большей части измерений и технологических операций при комнатной температуре;
- неограниченное по времени удержание объекта измерения/воздействия в "поле зрения" прибора,

несмотря на непрекращающиеся действия внешних возмущающих факторов;

- точная локализация места и высокое отношение сигнал/шум при проведении туннельной/силовой спектроскопии поверхности;
- постоянная адаптация к непрерывно изменяющимся условиям работы, в частности к колебаниям температуры;
- автоматическая подстройка/оптимизация в процессе работы параметров сканирования и/или локального воздействия;
- прецизионное перемещение зонда по особенностям поверхности в поле точного позиционера;
- прецизионное размещение поля точного позиционера в поле грубого позиционера;
- обнаружение объекта измерения/воздействия в автоматическом режиме;
- выполнение в автоматическом режиме локальной модификации/стимуляции особенности поверхности или ее окрестности;
- различные манипуляции с объектами на поверхности в автоматическом режиме;
- при наличии "шагающего" позиционера грубых перемещений практически неограниченные размеры сканов поверхности и областей на поверхности, где возможно проведение технологических операций;
- точное определение в автоматическом режиме относительного положения аналитических и технологических зондов в многозондовых системах;
- прецизионное последовательное применение в автоматическом режиме любого количества технологических/аналитических зондов к одной и той же особенности (объекту) поверхности или ее окрестности;
- автоматический возврат зонда в операционную зону после снятия-установки образца, перемещение зонда между разными операционными зонами в автоматическом режиме. Для целей навигации можно использовать специальную навигационную структуру или элементы/топологию наноприбора, изготавливаемого на поверхности в ходе технологического процесса;
- возможность "залечивания" дефектов поверхности в автоматическом режиме;
- характеристика поверхности в автоматическом режиме. Автоматический поиск специфических особенностей, дефектов поверхности, накопление статистики дефектов, построение карты дефектов. Автоматическое выявление подповерхностных макродефектов и механических напряжений в кристаллических подложках;

- упрощенный обмен данными между СЗМ и автоматизированными системами молекулярного моделирования/проектирования.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 15-08-00001) и Министерства образования и науки Российской Федерации (контракты 14.429.11.0002, 14.430.12.0004). Автор выражает благодарность О.Э.Ляпину за критическое прочтение рукописи; проф. С.А.Гаврилову за предоставленные образцы электрохимически полированного алюминия и пористого оксида алюминия; к.ф.-м.н. С.А.Саунину за помощь, оказанную при встраивании алгоритма ООС в программу управления микроскопом; к.ф.-м.н. А.Л.Гудкову, проф. Э.А.Ильичёву и доц. Е.А.Фетисову за поддержку и стимулирование работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Lapshin R.V.** Feature-oriented scanning methodology for probe microscopy and nanotechnology. – *Nanotechnology*, 2004, v.15, №9, p.1135-1151 (www.niifp.ru/staff/lapshin/).
2. **Lapshin R.V.** Feature-oriented scanning probe microscopy. – *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology*, edited by H. S. Nalwa, v.14, p.105-115, American Scientific Publishers, 2011 (www.niifp.ru/staff/lapshin/).
3. **Lapshin R.V.** Availability of feature-oriented scanning probe microscopy for remote-controlled measurements on board a space laboratory or planet exploration rover. – *Astrobiology*, 2009, v.9, №5, p.437-442 (www.niifp.ru/staff/lapshin/).
4. **Лапшин Р.В.** Наблюдение гексагональной сверхструктуры на пиролитическом графите методом особенность-ориентированной сканирующей туннельной микроскопии. – XXV Российская конференция по электронной микроскопии (РКЭМ-2014), Черногоровка, 2014, т.1, с.316-317 (www.niifp.ru/staff/lapshin/).
5. **Лапшин Р.В.** Гексагональная сверхрешетка на пиролитическом графите – перспективная мера длины нанометрового диапазона. – 1-я Всероссийская научно-техническая конференция "Метрология в нанотехнологиях", Москва, 2014, с.33-36 (www.niifp.ru/staff/lapshin/).
6. **Lapshin R.V.** Automatic drift elimination in probe microscope images based on techniques of counter-scanning and topography feature recognition. – *Measurement Science and Technology*, 2007, v.18, №3, p.907-927 (www.niifp.ru/staff/lapshin/).
7. **Yurov V.Y., Klimov A.N.** Scanning tunneling microscope calibration and reconstruction of real image: Drift and slope elimination. – *Review of Scientific Instruments*, 1994, v.65, №5, p.1551-1557.
8. US Patent №5077473, 1991. Drift compensation for scanning probe microscopes using an enhanced probe positioning system. / Elings V.B., Gurley J. A., Rodgers M.R.
9. Патент РФ №2295783, 2005. Способ автоматической распределенной калибровки сканера зондового микроскопа. / Лапшин Р.В. (www.niifp.ru/staff/lapshin/).
10. **Лапшин Р.В.** Автоматическая распределенная калибровка сканера зондового микроскопа. – *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2006, №11, с.69-73 (www.niifp.ru/staff/lapshin/).
11. **Лапшин Р.В.** Распределенная калибровка сканера зондового микроскопа в нанометровом диапазоне. – XVII Российский симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел (РЭМ-2011), Черногоровка, 2011, с.94 (www.niifp.ru/staff/lapshin/).
12. US Patent №5825670, 1998. High precision calibration and feature measurement system for a scanning probe microscope. / Chernoff D.A., Lohr J.D.
13. US Patent №5196713, 1993. Optical position sensor with corner-cube and servo-feedback for scanning microscopes. / Marshall D.R.
14. US Patent №5557156, 1996. Scan control for scanning probe microscopes. / Elings V.
15. **Lapshin R. V.** Digital data readback for a probe storage device. – *Review of Scientific Instruments*, 2000, v.71, №12, p.4607-4610 (www.niifp.ru/staff/lapshin/).
16. Заявка на патент РФ №2010120927, 2010. Шагающий робот-нанопозиционер и способ передвижения. / Лапшин Р.В. (www.niifp.ru/staff/lapshin/).
17. **Lapshin R. V.** Analytical model for the approximation of hysteresis loop and its application to the scanning tunneling microscope. – *Review of Scientific Instruments*, 1995, v.66, №9, p.4718-4730 (www.niifp.ru/staff/lapshin/).
18. **Trucano P., Chen R.** Structure of graphite by neutron diffraction. – *Nature*, 1975, v.258, p.136-137.
19. **Pohl D. W., Möller R.** "Tracking" tunneling microscopy. – *Review of Scientific Instruments*, 1988, v.59, №6, p.840-842.
20. **Swartzentruber B. S.** Direct measurement of surface diffusion using atom-tracking scanning tunneling microscopy. – *Physical Review Letters*, 1996, v.76, №3, p.459-462.
21. **Aketagawa M., Takada K., Rerkkumsup P., Togawa Y., Honda H.** Real-time atomic encoder using scanning tunnelling microscope and regular crystalline surface. – *Measurement Science and Technology*, 2006, v.17, №3, p.513-518.