

Федеральное государственное унитарное предприятие  
Научно-исследовательский институт физических проблем им. Ф. В. Лукина

На правах рукописи

Экз. № 1

ЛАПШИН Ростислав Владимирович

**ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ СКАНИРОВАНИЕ ДЛЯ  
ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ И НАНОТЕХНОЛОГИИ**

(05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,  
микро и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах)

Диссертация

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научные руководители:

доктор технических наук Быков В. А.

доктор физико-математических наук Медведев Б. К.

Москва – 2002



## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. МЕТОД ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО СКАНИРОВАНИЯ .....	13
1.1. Сравнительный анализ систем и методов точного позиционирования.....	13
1.2. Ключевая идея метода .....	16
1.3. Базовые понятия и определения .....	17
1.4. Способы распознавания. Итеративное распознавание особенностей .....	18
1.5. Алгоритм сканирования: принцип работы и основные процедуры .....	23
1.5.1. Процедура привязки зонда к атому поверхности .....	25
1.5.2. Процедура сканирования апертуры и распознавания ближайших соседей .....	26
1.5.3. Локальное связывание: процедура определения следующего атома цепочки ..	28
1.5.4. Скиппинг: процедура измерения разностей и сегментов.....	32
1.6. Распределённая калибровка сканера микроскопа .....	36
1.7. Визуализация результатов: стилизёр и сборщик поверхности .....	42
1.8. Специфика сканирования разупорядоченной поверхности. Прямое распознавание особенностей.....	43
2. ТЕХНИКА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЗОНДА ПО ЛОКАЛЬНЫМ ОСОБЕННОСТЯМ ПОВЕРХНОСТИ .....	52
2.1. Перемещение зонда по сетке особенностей в поле точного манипулятора. Маршрутизатор .....	52
2.2. Перемещение зонда в поле грубого манипулятора .....	53
2.2.1. Связанное движение точного и грубого манипуляторов.....	55
2.2.2. Возможные погрешности и способы их устранения.....	58
2.3. Автоматический возврат зонда микроскопа в операционную зону .....	59
2.4. Автоматическое определение взаимного положения зондов в многозондовых микроскопах.....	60
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.....	62
3.1. Объектно-ориентированное сканирование атомного рельефа поверхности графита.....	64
3.2. Объектно-ориентированное сканирование атомного рельефа поверхности графита с высоким разрешением.....	65
3.3. Высокоточные измерения постоянных решётки и кристаллографических направлений на поверхности графита .....	66
3.4. Оперативное позиционирование на атомной поверхности графита. Оценка нелинейности сканера .....	67
3.5. Точно локализованная туннельная спектроскопия с малым уровнем шума .....	68
3.6. Определение дрейфа микроскопа.....	69

3.7. Объектно-ориентированное сканирование разупорядоченных поверхностей электрохимически полированного алюминия и осаждённой из плазмы плёнки углерода .....	70
3.8. Оценка накопленной погрешности .....	79
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	82
ЛИТЕРАТУРА .....	91

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность работы

Сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) способен как измерять рельеф с атомарным разрешением, так и поatomно модифицировать его, что позволяет рассматривать данный прибор как один из базовых инструментов нанотехнологии. Однако, существующие микроскопы и применяемые в них методы управления всё ещё недостаточно совершенны. В частности, критическим узлом современных СЗМ является система позиционирования зонда, на работу которой оказывают влияние многочисленные негативные факторы: внешние вибрации, шумы, термодрейфы, нелинейность, гистерезис, ползучесть (крип) и паразитные взаимные связи (кауплинг) используемых пьезоманипуляторов. В результате ухудшается точность измерений, уменьшается их достоверность, снижается предельное разрешение прибора. Искажения ведут к неправильной интерпретации экспериментальных данных, ограничивают область применения микроскопа.

На сегодняшний день задача получения адекватного изображения рельефа поверхности решается посредством использования компенсирующих/исправляющих моделей, описывающих соответствующее искажение, и/или следящих измерительных систем, оснащённых линейным датчиком положения. Для построения модели и определения её параметров необходимо чёткое разделение искажающих факторов друг от друга. Однако, разделение искажающих факторов не всегда осуществимо по причине того, что разные источники часто ведут к схожим искажениям.

Применение следящих измерительных систем натолкнулось на ограничения, связанные с погрешностью косинуса, ошибкой смещения Аббе и с шумами датчиков положения. Из-за более сложной конструкции, юстировки и эксплуатации СЗМ, оборудованных следящими системами, необходимости использования высокоточных технологий обработки деталей этих приборов, применения материалов с исключительными механическими свойствами стоимость данных микроскопов оказалась достаточно большой. В этой связи при разработке высокопрецизионных устройств всегда следует помнить об экономической составляющей, поскольку трудно ожидать быстрого и широкого внедрения в промышленность дорогих уникальных приборов.

В настоящее время СЗМ из разряда приборов, обеспечивающих получение в большей степени качественных результатов, переходит в разряд приборов, способных производить точные количественные измерения. Соответственно возрастает значение задачи калибровки сканера микроскопа, решение которой должно настолько поддаваться формализации, чтобы обеспечить полную автоматизацию этого процесса. Причём, как показывает практика измерений, предпочтение при выборе эталона длины необходимо отдавать природным мерам – высокоупорядоченным кристаллическим решёткам веществ со ста-

бильной поверхностью, а для полной компенсации нелинейностей сканера следует искать распределение локальных калибровочных коэффициентов в пространстве сканирования.

Фактически нереализованной функцией СЗМ-нанолиитографа, лежащей в основе технологии манипулирования и избирательного воздействия на отдельные атомы, молекулы и кластеры из них, остаётся позиционирование рабочего органа микроскопа – зонда как непосредственно в месте операции, так и по большому полю грубого манипулятора. На сегодняшний день практически отсутствуют такие важные функции СЗМ-нанолиитографа как: автоматическое удержание места измерения/воздействия в поле зрения прибора, автоматический возврат в технологическую зону после отвода зонда от поверхности или снятия образца, автоматическое перемещение между разными технологическими зонами на поверхности образца.

На современном этапе развития нанотехнология располагает целым набором специализированных аналитических и технологических инструментов – зондов. Однако, поочерёдное их применение к одному и тому же нанообъекту на поверхности невозможно, если взаимное положение зондов точно не известно, и СЗМ-нанолиитограф не обладает способностью в автоматическом режиме находить среди других объектов заданный объект. Чтобы увеличить производительность СЗМ-нанолиитографа, следует использовать линейки или массивы зондов, функционирующих параллельно. Однако, не имея точной информации о том, как расположены зонды относительно друг друга, невозможно правильно собрать целое изображение из фрагментов, полученных каждым из зондов. Таким образом, задача организации измерений/воздействий в многозондовых системах является на сегодняшний день весьма актуальной.

**Цель работы** состояла в создании и экспериментальной апробации способа объектно-ориентированного сканирования (ООС) поверхности. Применяя процедуру распознавания и ряд специальных приёмов, производится поочерёдное многократное сканирование небольших расположенных по соседству друг с другом окрестностей топографических объектов (особенностей) поверхности. После чего из полученных фрагментов собирается искомое изображение рельефа свободное от шумов и от искажений, связанных с дрейфом зонда микроскопа относительно исследуемой поверхности. Для достижения поставленной цели были разработаны:

- методы итеративного и прямого распознавания особенностей поверхности в реальном масштабе времени;
- способ связывания особенностей путём обхода контура с присоединением новых элементов цепи и способ связывания с использованием вспомогательных квазистрок особенностей;

- функции компенсации, учёта и мониторинга дрейфа микроскопа посредством периодической “привязки” зонда к особенности поверхности;
- процедура многократного скиппинга между текущей и следующей особенностями цепочки с усреднением полученных данных;
- методика автоматической распределённой калибровки сканера микроскопа;
- алгоритм сборки сегментного изображения рельефа поверхности;
- способы прецизионного позиционирования зонда по локальным особенностям поверхности в поле точного манипулятора;
- способ прецизионного переноса поля точного манипулятора в поле грубого;
- методика повышения чувствительности спектроскопических измерений и точности их локализации на поверхности;
- функции сбора и накопления статистической информации, характеризующей особенности исследуемой поверхности.

Совокупность предложенных методов должна обеспечить широкое внедрение СЗМ в практику особоточных измерений, метрологию, нанолитографию, кристаллографию, молекулярную биологию и в другие области науки и техники.

### **Научная новизна**

Предложен метод активного сканирования рельефа, основанный на использовании особенностей исследуемой поверхности в качестве опорных точек при выполнении относительных перемещений. Применяя распознавание особенностей поверхности в реальном масштабе времени и встречные перемещения зонда, компенсируется негативное влияние термодрейфа головки микроскопа и ползучести пьезоманипуляторов, что позволяет повысить точность СЗМ-измерений, а также снять ограничения на размеры получаемых сканов. Осуществляя периодическую привязку зонда микроскопа-нанолитографа к объекту поверхности, возможно произвольно долго удерживать зонд в некоторой области на поверхности, где проводятся измерения и технологические воздействия, а также прецизионно размещать поле точного позиционера в поле грубого.

Посредством выполнения больших усреднений данных продемонстрированы: возможность получения рельефа поверхности с предельным для используемого типа прибора латеральным и вертикальным разрешением; способность измерять постоянные решётки и кристаллографические направления на 2-3 порядка точнее, чем при обычном сканировании; возможность осуществления точно локализованной туннельной и атомно-силовой спектроскопии с низким уровнем шумов.

Распределённая автоматическая калибровка, при которой в каждой точке пространства сканирования, используя высокоупорядоченные поверхностные структуры природных эталонов, ищется тройка локальных калибровочных коэффициентов, открывает перспек-

тиву почти полного исправления искажений, вносимых нелинейностью, неортогональностью и паразитными связями пьезоманипуляторов микроскопа. Причём, калибровка всего поля точного манипулятора производится лишь небольшой заранее выбранной лишённой дефектов областью поверхности эталона.

### **Практическая ценность**

Создан полный комплект программ, реализующих предложенный метод. Комплект включает: модуль реального/виртуального сканирования поверхности, маршрутизатор, стилизёр, сборщик поверхности, калибровщик, экстрактор подцепочек, конвертер. Модуль сканирования интегрирован в управляющую программу микроскопа Solver™ P4, изготавливаемого серийно. Модуль обеспечивает построение “затравки”, сканирование поверхности с использованием нескольких методов распознавания и нескольких способов связывания, позиционирование зонда по локальным особенностям поверхности, измерение постоянных решётки и кристаллографических направлений, получение точно локализованных спектрограмм с малым уровнем шума, автоматическую калибровку микроскопа, непрерывный мониторинг дрейфа прибора. Для хранения и эффективного использования данных предложен специальный цепочечный формат.

Разработанный метод может использоваться в различных областях науки и техники для решения широкого круга экспериментальных и производственных задач нанотехнологии, часть из которых (автоматический поиск и “залечивание” дефектов, непосредственное слежение за движением отдельных объектов по поверхности, автоматический возврат зонда в операционную зону после снятия образца, автоматическое определение взаимного положения аналитических и технологических зондов, удержание заданного направления при перемещении по поверхности кристалла или упорядоченной структуры, манипуляция нанообъектами при комнатной температуре в автоматическом режиме, модификация поверхности в автоматическом режиме и др.) была ранее трудно осуществима, а в некоторых случаях и принципиально невыполнима в рамках общепринятого подхода к сканированию и позиционированию. Предлагаемая методика обеспечивает высокую точность СЗМ-измерений и высокий уровень их автоматизации при сохранении обычных требований к оборудованию. Универсальность развиваемого подхода позволяет применять метод на любом сканирующем зондовом приборе.

### **На защиту выносятся следующие положения и результаты:**

- методология объектно-ориентированного сканирования, заключающаяся в том, что рельеф поверхности измеряется по частям – небольшими расположенными по соседству сегментами в относительной системе координат, а основная доля перемещений в апертурах, в сегментах, между текущей и следующей особенностями, при движении по квази-строкам особенностей содержит встречную комплементарную составляющую так, что ис-

кажения от дрейфа, рассматриваемые как линейные, могут быть учтены и скомпенсированы в процессе сканирования;

- способы локального связывания особенностей поверхности в цепочку посредством обхода затравки с присоединением новых элементов цепи, а также с использованием вспомогательных квазиотрезков из особенностей; в обоих способах траектория перемещения зонда заранее неизвестна и определяется динамически в процессе ООС, изначально в общем виде задаётся только характер поведения системы при выборе следующей особенности цепи;
- способы позиционирования зонда микроскопа-нанолиитографа по локальным особенностям поверхности, обеспечивающие прецизионное перемещение в поле точного манипулятора, а также способ прецизионного размещения поля точного манипулятора в поле грубого, при котором удаётся резко снизить требования, предъявляемые к грубому манипулятору, по точности; прецизионность достигается за счёт перемещения от одной особенности к другой соседней и использования следящей системы в горизонтальной плоскости на основе процедуры привязки зонда к особенности;
- эксперименты, подтверждающие базовые принципы, преимущества и потенциальные возможности ООС, по измерению рельефа высокоупорядоченной, квазиупорядоченной и полностью разупорядоченной поверхности; по измерению рельефа атомной поверхности с высоким вертикальным и латеральным разрешением; по высокоточному измерению постоянных решётки и направлений на поверхности кристалла; по перемещению на большие расстояния от атома к атому на упорядоченной поверхности кристалла и по выявлению нелинейности сканера или крупномасштабных искажений решётки кристалла; по измерению точно локализованных на поверхности вольтамперных характеристик туннельного зазора с низким уровнем шума; по определению величины дрейфа и характера его проявления в СЗМ; по определению статистических параметров особенностей исследуемой поверхности;
- пакет прикладных программ, функционирующих по принципам ООС.

### **Структура работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели диссертационной работы, показана научная новизна и практическая ценность полученных результатов, перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведены краткие аннотации глав.

**Первая глава** посвящена описанию метода ООС. В первом параграфе дана классификация, выполнен анализ и указаны принципиальные недостатки существующих на сегодняшний день способов борьбы с погрешностями СЗМ-измерений.

Во втором параграфе кратко изложена главная идея предлагаемого метода. После

чего очерчен класс поверхностей, объектно-ориентированное сканирование которых при данном развитии зондовой микроскопии и средств вычислений может быть в принципе осуществлено. В третьем параграфе введены базовые понятия и определения: локальность, связность, особенность, цепочка особенностей, область сканирования, распознавание особенностей.

В четвёртом параграфе, главным образом на примере упорядоченной поверхности графита, описан способ итеративного распознавания, основу которого составляют операция сегментации изображения поверхности и итеративный поиск положения горизонтальной плоскости разреза рельефа поверхности. Здесь же введена численная характеристика основания особенности – компактность.

Пятый параграф содержит описание того, как производится измерение рельефа поверхности в процессе ООС. На нескольких показательных примерах демонстрируется связывание посредством обхода затравки с присоединением новых элементов цепи к растущему контуру. Детальное описание алгоритма сканирования, состоящего из четырёх основных процедур: привязки зонда к особенности поверхности, сканирования и распознавания апертуры, локального связывания, измерения разностей и сегментов, дано в виде отдельных пунктов. Описание сопровождается блок-схемами используемых процедур. В частности показано, каким образом можно исключить негативное влияние термодрейфа и ползучести на работу зондового микроскопа, а также реконструировать рельеф, предельные латеральные и вертикальные подробности в котором мельче чем те, что способен обнаружить микроскоп при обычном сканировании. По ходу изложения раскрываются нюансы метода, возможные ограничения и источники погрешностей.

В шестом параграфе приведён способ автоматического определения распределённых в пространстве сканирования калибровочных коэффициентов, используемых для коррекции нелинейности, остаточной неортогональности, а также паразитных связей между манипуляторами. В описании даны конкретные рекомендации по увеличению производительности и точности процедуры распределённой калибровки, обсуждаются “подводные камни” методики.

В седьмом параграфе показано, каким образом из полученных в процессе ООС данных сборщик и стилизёр строят изображение реальной поверхности и стилизованной, соответственно. Подробно изложена методика сборки изображения с одновременной его коррекцией по интерполированным калибровочным параметрам.

В заключительном восьмом параграфе главы описан предназначенный для сканирования произвольной поверхности способ прямого распознавания особенностей. Показано, что прямое распознавание может быть осуществлено через поиск обобщённых седловых точек рельефа либо путём “травления” локальных экстремумов рельефа. По ходу описания приводятся примеры виртуального сканирования разупорядоченных поверхно-

стей с использованием различных способов локального связывания особенностей. В конце параграфа обсуждаются вопросы повышения надёжности распознавания на разупорядоченной поверхности в реальном режиме ООС: правильный выбор порогового значения используемого признака, применение дополнительных признаков особенностей и другие приёмы.

**Вторая глава** посвящена описанию различных способов позиционирования зонда сканирующего микроскопа по локальным особенностям рельефа поверхности. В первом параграфе представлен метод перемещения зонда по сетке особенностей вдоль задаваемой оператором трассы. Реализацию этой важнейшей функции обеспечивает процедура маршрутизации. Относительные координаты для выполнения перемещений берутся из данных, предварительно полученных в процессе ООС того участка поверхности, на котором требуется произвести точное позиционирование.

Во втором параграфе показано, как через “привязку” зонда микроскопа к особенности поверхности можно осуществить совместное передвижение в латеральной плоскости точного и грубого позиционеров, обеспечивающее прецизионное размещение поля точного позиционера в поле грубого. Здесь же приведён краткий обзор трёх основных типов грубых манипуляторов, используемых в современных СЗМ: “шагающих”, “ползущих” и инерционных. Сделан выбор наиболее подходящего для решаемой задачи манипулятора, а также указаны характерные погрешности предлагаемого позиционирования и способы борьбы с ними.

В третьем параграфе дано описание возможного решения часто возникающей на практике задачи возврата зонда СЗМ-нанолиитографа в операционную зону. Возврат осуществляется в полностью автоматическом режиме. Подход обобщается на случай перемещения между несколькими технологическими зонами, расположенными в разных местах поля грубого позиционера. В четвёртом параграфе приведён способ, с помощью которого можно точно определить относительные координаты зондов многозондового микроскопа-нанолиитографа, что позволяет собирать целое изображение из отдельных фрагментов, полученных каждым из зондов, а также применять по очереди разные типы зондов к одному и тому же нанобъекту на поверхности.

**В третьей главе** представлены результаты проведения целого ряда экспериментов, подтверждающих возможности, заложенные в метод ООС. Проверка работы алгоритма в реальном режиме сканирования осуществлена в достаточно широком классе поверхностей, куда вошли: высокоупорядоченная поверхность пиролитического графита, разупорядоченная, а местами и квазиупорядоченная поверхность электрохимически полированного алюминия, полностью разупорядоченная поверхность осаждённой из плазмы плёнки углерода. Демонстрация работы метода выполнена на разных типах зондовых приборов: сканирующем туннельном микроскопе (СТМ) и сканирующем атомно-силовом микроскопе

(АСМ). Размеры особенностей и расстояния между особенностями на используемых поверхностях охватывают диапазон от отдельных атомов до нескольких сотен нанометров, причём разупорядоченные поверхности имеют ещё и разные дисперсии этих величин.

**В заключение** диссертации обсуждаются основные результаты, делаются общие выводы, а также перечисляются направления, в которых предложенный метод может быть усовершенствован и развит в ближайшей перспективе.

## 1. МЕТОД ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО СКАНИРОВАНИЯ

### 1.1. Сравнительный анализ систем и методов точного позиционирования

Несмотря на высокое пространственное разрешение, сканирующие зондовые микроскопы не могут без существенной модернизации использоваться ни в качестве метрологического средства, ни как нанолитограф, поскольку результаты измерений искажаются термодрейфом, паразитными взаимосвязями между манипуляторами (cross-coupling), шумами, а также нелинейностью, гистерезисом и ползучестью (creep) используемой пьезокерамики.<sup>1,2,3,4,5</sup>

К настоящему моменту разработано множество методов, позволяющих в определённой мере избавиться от перечисленных выше искажающих факторов. Предлагаемые методы можно разбить на две основные группы. В первой группе компенсация таких факторов как нелинейность, гистерезис, крип, кауплинг осуществляется программно с использованием аппроксимирующих или физических моделей, описывающих соответствующее искажение.<sup>6,7,8,9,10</sup>

Во второй группе борьба с искажениями ведётся аппаратными средствами путём активной динамической коррекции работы пьезоманипуляторов.<sup>11,12,13,14,15,16,17</sup> Коррекция выполняется введением в контур управления прибора трёх замкнутых следящих систем – по одной на каждый манипулятор. Во время работы следящая система стремится компенсировать возникающую при движении манипулятора разность между заданной величиной перемещения и фактической, измеряемой с помощью линейного датчика положения.

Сравнение результатов показывает, что измерения, выполненные на микроскопах, относящихся ко второй группе, менее искажены и более достоверны. Причина заключается в том, что применяемые модели описывают явление с конечной степенью приближения, а используемые в них параметры всегда определены с некоторой погрешностью. Причём, динамическая коррекция манипуляторов компенсирует сразу все искажения, тогда как для извлечения параметров модели, как правило, необходимо чёткое разделение факторов друг от друга. Последнее условие не всегда удаётся выполнить, поскольку разные источники часто приводят к схожим искажениям.

Анализ показывает, что способы, применяемые в работах Гриффита,<sup>11</sup> Баррета,<sup>12</sup> Лина,<sup>13</sup> Кавакатсу,<sup>14,15</sup> принципиально не отличаются друг от друга. Использование разных типов датчиков и обрамляющей их электроники определяет чувствительность измерительной системы, её линейность и ограниченный шумами минимальный размер шага манипулятора. Так в системе Гриффита используется миниатюрный ёмкостной датчик положения, в системе Баррета – оптический, в системе Лина – рентгеновский интерферен-

ционный, а в системе Кавакатсу – сочетание датчика туннельного тока<sup>18</sup> и программного распознавания элементов эталонной поверхности.

Оптический датчик положения представляет собой пару: светоизлучающий диод – двухсекционное фотоприёмное устройство, установленную на основании прибора и разделённую экраном с узкой щелью. Экран закреплён на пьезоманипуляторе. Рентгеновский интерференционный датчик построен из источника излучения – рентгеновской трубки, высококачественного монокристалла Si(111) и детектора. Туннельный датчик состоит из проводящей поверхности, острой иглы, пьезоманипулятора и замкнутой системы стабилизации туннельного тока. Среднеквадратическое значение шума, измеренное в полосе частот в несколько кГц, составляет для системы 11 – 10 нм, для системы 12 – 0.6 нм, для системы 13 – 0.3 нм и для 14 – 0.01 нм.

Рассмотрим подробнее способ сканирования и позиционирования, применяемый в зондовом микроскопе Кавакатсу. В данном способе каждый манипулятор прибора механически связан с манипулятором датчика туннельного тока. В качестве проводящей поверхности датчика используется поверхность высокоориентированного пиролиитического графита (ВОПГ). Рабочая поверхность ВОПГ легко приготавливается путём скалывания и, благодаря инертным свойствам графита, остаётся долгое время чистой даже на воздухе. Поверхность ВОПГ имеет протяжённые атомарно-гладкие участки (см. параграф 3.4) и стабильную высокоупорядоченную кристаллическую решётку.<sup>19</sup>

В обсуждаемом способе любое перемещение какого-либо из манипуляторов микроскопа приводит к перемещению иглы соответствующего туннельного датчика вдоль поверхности графита. При этом система обратной связи датчика, используя свой собственный манипулятор, поддерживает величину туннельного зазора в нём на постоянном уровне. Одновременно со сканированием неизвестной поверхности образца получается СТМ-скан известной поверхности графита. Выполняя программное распознавание атомов графита полученного изображения, можно сформировать управляющий сигнал коррекции для манипулятора микроскопа.

Несмотря на высокие результаты, системы регулирования с замкнутой обратной связью (closed feedback loop systems) обладают рядом недостатков. Во-первых, они сложны и дороги, так как содержат корпус (reference frame), обеспечивающий с высокой точностью ортогональность и прямолинейность базовых поверхностей, а также три дополнительных следящих контура, каждый из которых оснащён высокочувствительным малошумящим датчиком положения. При изготовлении корпуса используются уникальные материалы, имеющие малый коэффициент теплового расширения, а также применяется высокопрецизионная механическая обработка. Несовершенство корпуса приводит к погрешности косинуса (cosine error).<sup>5</sup>

Во-вторых, в данных системах невозможно определять перемещения кончика зонда *in*

*situ*, так как измерительная система датчика фиксирует смещение манипулятора относительно корпуса прибора. В результате, из-за изгиба манипулятора во время работы и небольшой собственной длины иглы (толщины образца) возникает погрешность смещения Аббе (Abbé offset error).<sup>5,17</sup>

В-третьих, указанные системы не позволяют выполнять точные измерения рельефа на пределе разрешения микроскопа. В-четвёртых, системы не обладают критической для нанолитографии способностью произвольно долго удерживать зонд микроскопа в выбранном месте поверхности, поскольку в процессе сканирования устраняется только термодрейф зонда относительно корпуса прибора, но всегда остаётся нескомпенсированная часть термодрейфа зонда относительно поверхности образца.

Наконец, микроскоп Кавакатсу трудно применять в тех случаях, когда характерный масштаб рельефа исследуемой поверхности сильно отличается от атомного масштаба эталонной поверхности графита, поскольку время сканирования из-за необходимости использования малого шага может оказаться неоправданно большим. Замена графита на эталоны с более крупными структурными элементами и, соответственно, более крупными отрезками длины не всегда годится, поскольку в таком случае мы вынуждены использовать, как правило, уже не природный эталон, а искусственную неидеальную структуру, которая сама оказывается изготовленной с некоторыми погрешностями.<sup>16,17</sup> Последнее замечание справедливо также и для микроскопа Лина, в котором осуществляется подсчёт интерференционных полос, образованных в результате дифракции рентгеновских лучей на узлах кристаллической решётки кремния.

Ещё одной проблемой в системах подобных микроскопу Кавакатсу является то, что на практике не существует бездефектных, ненапряжённых механически, одинаково упорядоченных по всей поверхности кристаллических решёток. Следовательно, та часть изображения, которая исправлялась по искривлённой области поверхности эталона, окажется искажённой. В связи с тем что похожие проблемы также возникают при распределённой калибровке прибора (см. параграф 1.6), был предложен способ позиционирования (см. параграф 2.2), с помощью которого калибровка всего поля микроскопа осуществляется только небольшой заранее выбранной лишённой дефектов областью поверхности эталона.

Из проведённого анализа следует, что существующие на данный момент системы, работая на пределе своего разрешения с такими объектами как атомы, молекулы, кластеры из атомов и т. п., неспособны в полной мере обеспечить высокоточные измерения рельефа поверхности, а также выполнить прецизионное позиционирование зонда в месте воздействия при наноманипуляциях/нанолитографии. Что же касается предлагаемого метода сканирования, то он, напротив, свободен от указанных погрешностей и недостатков, а для его реализации не требуется переделки микроскопа и каких-либо дополнительных

механических узлов или электроники. Следует подчеркнуть, что обсуждаемые подходы к измерению поверхности не нужно воспринимать как противопоставление методов друг другу, в ряде случаев совместное их применение должно привести к существенно лучшим результатам, чем при использовании по отдельности.

## 1.2. Ключевая идея метода

Техника сканирующей зондовой микроскопии имеет ограничения на предельную точность, с которой выполняются измерения элементов поверхности. Ограничения вызваны величиной шума,<sup>4,20,21</sup> свойственного измерительному прибору. Одним из широко используемых способов борьбы с шумами является многократное усреднение получаемых данных. Из-за того что сканирующий зондовый микроскоп подвержен влиянию термодрейфа<sup>1,5,6,15,21,22,23</sup> и ползучести пьезоманипуляторов,<sup>10</sup> эффективность применения усреднения резко падает и практически сводится на нет.

Для подавления перечисленных выше искажающих факторов предлагается способ активного сканирования и позиционирования,<sup>24,25</sup> основная идея которого заключается в использовании особенностей исследуемой поверхности в качестве опорных точек при выполнении перемещений. Перемещения осуществляются от одной особенности к другой, расположенной по соседству. В результате образуется связанная последовательность (цепочка), в которой особенности размещены относительно друг друга. Поиск, обнаружение и вычисление координат положения особенности выполняет программа распознавания.<sup>24,25,26,27</sup> Сканируя небольшую область (сегмент) вокруг каждой особенности, а затем, раскладывая полученные фрагменты по соответствующим позициям найденной цепочки, можно реконструировать реальный рельеф поверхности.

Допустимый класс поверхностей включает все поверхности с атомным рельефом, поверхности, состоящие из молекул, различного рода цепочек, кластеров,<sup>28,29,30</sup> зёрен, частиц,<sup>31,32</sup> кристаллитов, квантовых точек,<sup>30,33</sup> столбиков,<sup>34</sup> пор,<sup>35</sup> 2D-паттернов,<sup>30,34,36</sup> 2D-текстур и т. п., словом, всего того, что подпадает под определение холма или ямы вообще. Причём, перечисленные типы поверхностей могут быть упорядоченными,<sup>37</sup> частично упорядоченными, а также разупорядоченными. Основным ограничением, накладываемым на класс поверхностей, является следующее: протяжённости объектов в разных направлениях в плоскости сканирования должны быть сравнимы, с тем чтобы особенность могла быть полностью локализована в сегменте. К “неудобным” поверхностям, например, относятся: несодержащая дефектов поверхность одномерной дифракционной решётки, поверхность интегральной схемы, где много длинных проводников и т. п.

Поскольку в разработанном методе производится распознавание сосканированного изображения, то особенности рельефа следует понимать в широком смысле. Физически они могут представлять собой области намагничённости, места локализации электриче-

ского заряда и т. п. Поэтому описываемый в работе алгоритм в общем случае применим для целого семейства сканирующих зондовых приборов. Например, он может использоваться как в сканирующем туннельном и атомно-силовом микроскопах, так и в оптическом микроскопе ближнего поля,<sup>38</sup> сканирующем ёмкостном микроскопе,<sup>39</sup> сканирующем электронном микроскопе и др. Безусловно, при реализации алгоритма в конкретном приборе (предпочтение следует отдавать быстродействующим работающим в вакууме устройствам) должна быть учтена та или иная его специфика, и в этом смысле метод может потребовать соответствующей доработки. Ниже описание в основном будет строиться на примере СТМ,<sup>40,41</sup> поскольку, в настоящее время именно он обладает самым высоким пространственным разрешением, и, следовательно, на нём могут быть проверены предельные возможности предлагаемого алгоритма сканирования.

### 1.3. Базовые понятия и определения

В основу работы алгоритма положены два понятия: локальность и связность, объектами, с которыми он оперирует, являются особенности поверхности, а сам метод может быть назван объектно- или особенность-ориентированным сканированием. В методе фактически осуществляется переход от абсолютной системы координат, связанной с манипулятором, к относительной системе координат, связанной с особенностями поверхности.

В роли особенностей могут выступать элементы рельефа типа “холм” или “яма”. Примечательно, что особенности, как правило, это и есть предмет исследования или технологии, а также то, что данный метод окажется малоэффективным при сканировании поверхности, где особенностей мало либо они вообще отсутствуют. Строго говоря, не существует абсолютно гладких поверхностей, обычно вопрос состоит лишь в том, отвечают ли имеющиеся на поверхности особенности тому масштабу измерений, который в данный момент интересен исследователю, а также насколько они контрастны и стабильны, чтобы служить надёжными местами привязки.

Следует обратить внимание на то, что особенности поверхности в настоящем методе определены достаточно широко, как холмы или ямы вообще. Сделано это неслучайно. Дело в том, что предлагаемый метод сканирования-позиционирования может тогда активно применяться на практике, когда он в большей степени универсален, а не предназначен для решения узкого круга специальных редко возникающих задач. Соответственно способы, используемые для распознавания, должны быть такими, чтобы обеспечить с высокой степенью надёжности получение правильных результатов в как можно более широком классе поверхностей. Отсюда другим общим требованием должна быть инвариантность применяемых способов распознавания к типу поверхности: упорядоченная, квазиупорядоченная либо разупорядоченная.

Далее для более ясного и простого изложения метода ООС будем считать поверхность атомарно-гладкой, а под особенностями будем понимать те выпуклости на ней (изменения электронной плотности), которые обычно принимаются за атомы. Рассматриваемая поверхность будет упорядоченной, однако, это обстоятельство не следует считать принципиальным. Слова “объект”, “особенность” и “атом” в контексте распознавания будут использоваться ниже как синонимы.

Итак, под локальностью будем понимать пространственную характеристику, выражающую меру близости особенностей поверхности, или другими словами размер некоторой области на поверхности достаточный, чтобы охватить в зависимости от степени локализации: заданный атом (вырожденный случай близости к самому себе), заданный атом и соседний атом из его окружения, заданный атом и несколько ближайших к нему соседних атомов.

Связность будем рассматривать, как способность переходить от одного атома к любому другому, двигаясь по некоторой в общем случае произвольной траектории, и используя при движении в качестве опорных промежуточные атомы из числа локальных.

Совокупность атомов (включая первый и последний), каждый из которых локально связан с предыдущим и последующим атомами, будем называть цепочкой атомов.

Используя введённые понятия, область сканирования можно определить как покрытие (без пропусков) поверхности траекториями связности по заданному закону.

Распознавание атомов – вычислительный процесс, позволяющий находить атомы на изображении поверхности и определять их пространственные координаты.

#### **1.4. Способы распознавания. Итеративное распознавание особенностей**

В зависимости от степени разброса особенностей по высоте/глубине будут использоваться итеративные способы и способы прямого распознавания (см. параграф 1.8). Их основное различие заключается в том, каким образом производится поиск положения горизонтальной плоскости разреза особенности. Базовой функцией и тех и других является функция обнаружения контура особенности.

Разрежем задаваемый в некотором окне атомный рельеф поверхности горизонтальной плоскостью на высоте  $z$ , тем самым выполнив операцию сегментации изображения, в которой разделение интересующих нас компонентов изображения – атомов от фона производится по порогу  $z$ .<sup>42</sup> В результате сегментации образуется множество *a priori* непересекающихся плоских областей (оснований особенностей), часть из которых имеет локальные нарушения выпуклости и отличную от круговой форму.

Указанные дефекты вызваны шумами в системе стабилизации туннельного тока и в каналах развёртки, дающими “рваные” края, наличием термодрейфа, ползучести, а также искажениями, связанными с геометрическими размерами и формой кончика иглы. Числе-

но эти отличия можно оценить, вычисляя “компактность” плоской области:<sup>43</sup>

$$C = 4\pi S/L^2, \quad (1)$$

где  $S$  это площадь плоской области, а  $L$  – длина её границы. Легко проверить, что для круга эта величина “совершенна” – равна единице.

Координаты центров тяжести полученных оснований особенностей будем использовать далее в качестве координат атомов поверхности. Для нахождения центров тяжести необходимо знать координаты точек, лежащих на границе области, т. е. уметь обнаруживать контур области и его замыкание, необходимо также уметь различать области друг от друга.<sup>44</sup>

Разработанный алгоритм<sup>26,27</sup> использует приёмы подобные тем, что описаны в работах Сидху,<sup>43</sup> Фримана<sup>45</sup> и Розенфельда,<sup>46</sup> и представляет собой следующую последовательность действий:

1. Изображение, заданное в некотором окне, просматривается до тех пор, пока не будет встречена точка, имеющая высоту большую  $z$ , т. е. первая точка, принадлежащая контуру очередной области. Найденная точка становится текущей;
2. Просматривается восемь соседних к текущей точек, образующих цепной код,<sup>42,45</sup> до тех пор, пока не будет обнаружена точка, имеющая высоту большую  $z$ . Найденная таким образом точка становится текущей;
3. Повторяется пункт 2, пока не будет встречена первая точка границы области, т. е. не произойдёт замыкания контура области;
4. Зная координаты контура области, вычисляются (с точностью до долей пиксела) координаты центра тяжести области;
5. Точкам изображения, принадлежащим распознанной области, присваиваются нулевые значения высоты, и если счётчики строки и столбца просматриваемого окна не достигли максимального значения, то выполняется переход к пункту 1.

Отметим, что при выполнении пункта 2 алгоритма обход соседей следует производить, во-первых, всё время в одном направлении, во-вторых, так чтобы начальная точка обхода всегда являлась внешней.

Предлагаемая процедура распознавания позволяет непосредственно вычислять среднее значение постоянной решётки, помимо собственно атомов обнаруживает и ведёт статистику других объектов, встречающихся в изображении, таких как: изолированные шумовые пики (одиночные пикселы), изолированные шумовые островки и нити (цепочки пикселов), слившиеся атомные области. Атомы, расположенные вблизи края изображения, скорее всего “обрезаны” по краю либо искажены краевыми эффектами. Указанные атомы в процессе распознавания автоматически отбрасываются, поскольку их координаты могут содержать большие погрешности. Отметим, что появление длинных нитей па-

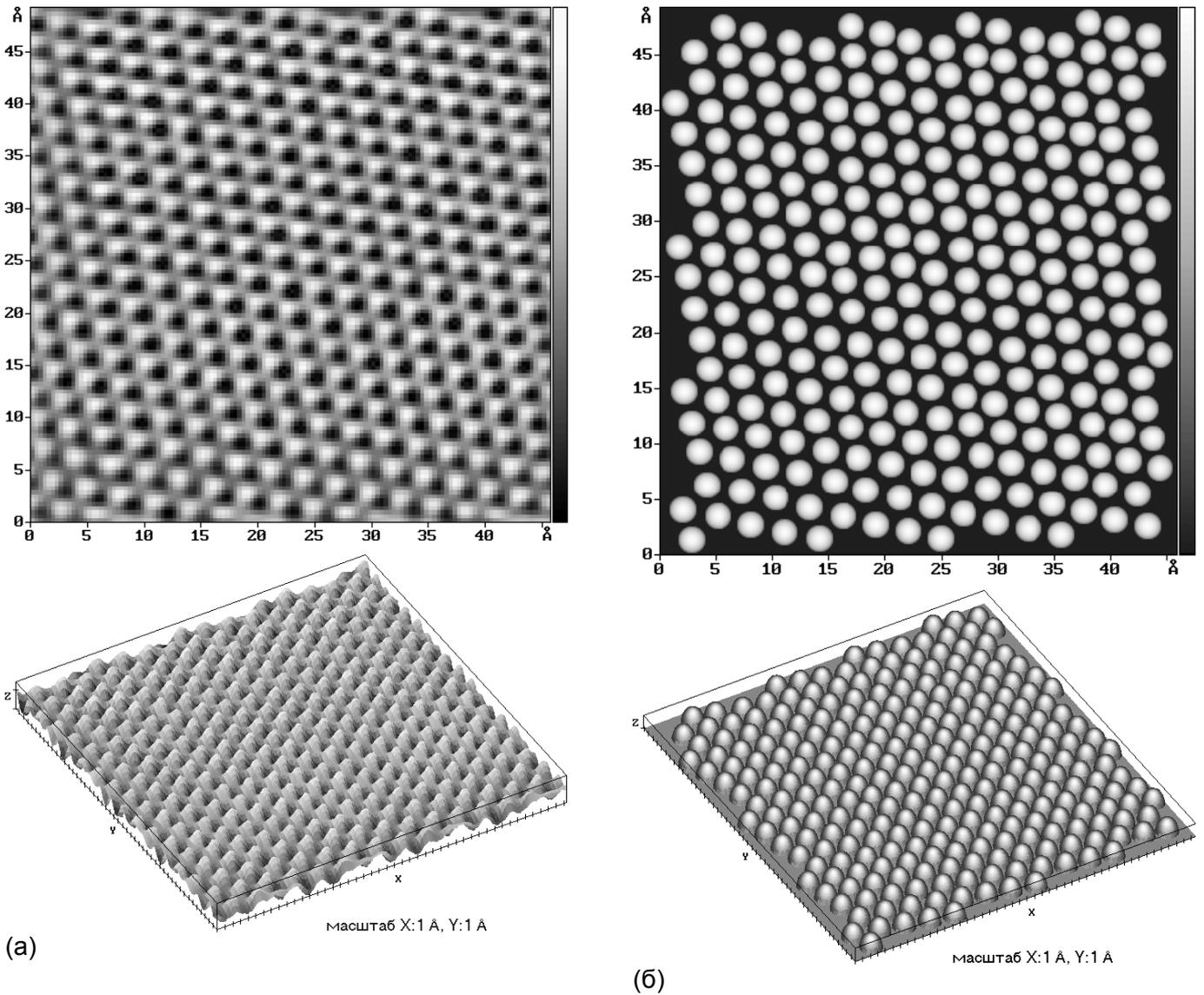


Рис. 1 Атомный рельеф поверхности графита. (а) Реальная поверхность ( $128 \times 128$ ) пикселов<sup>2</sup> после удаления тренда и сглаживания Фурье-фильтрацией.<sup>47</sup> Измерения выполнены на СТМ в режиме постоянной высоты при  $U_{\text{тун}} = -100$  мВ,  $I_{\text{тун}} = 300$  пА. (б) Стилизованная поверхность. Распознанные атомы углерода изображены условно в виде полусфер.

раллельных “быстрому” направлению сканирования, как правило, говорит о присутствии загрязнений на поверхности.

Очевидно, что точность определения положений атомов будет тем выше, чем больше площади атомных областей, над которыми производится распознавание. Размеры области зависят от высоты разреза  $z$ . Поэтому, проводя “сканирование” рельефа поверхности по  $z$  и выполняя итерации распознаваний (25...35 итераций для изображения с  $2^{16}$  градациями “серого”), можно найти такую высоту, после уменьшения которой на минимальный шаг основания атомов начнут сливаться. Полученная таким образом высота может быть принята за оптимальную высоту разреза.

Скорость распознавания атомов, контур которых состоит из 10...12 пикселов, на компьютере *i486DX4* 100 МГц с одновременной классификацией указанных выше объектов и накоплением статистики<sup>48,49</sup> составляет около 2000 атомов/с. Приведённое значение не

учитывает времени выполнения итеративной процедуры поиска оптимальной высоты разреза поверхности, скорость распознавания с учётом этого времени примерно в 6...7 раз меньше указанной. Перед распознаванием рекомендуется произвести сглаживание изображения, а также удалить тренд поверхности.

В качестве иллюстрации работы процедуры распознавания на Рис. 1а представлено полученное на СТМ исходное изображение атомного рельефа поверхности ВОПГ, а на Рис. 1б показано стилизованное полушарами изображение, построенное в результате распознавания. Стилизованное изображение состоит из 272 атомов углерода, среднее значение постоянной решётки составляет  $2.717 \text{ \AA}$  (микроскоп раскалиброван), z-координаты атомов приведены к монослою (положены равными). На Рис. 2 изображены основания атомов углерода после проведения горизонтальной плоскости разреза на оптимальной высоте.

На Рис. 3 показана наноструктурированная разупорядоченная поверхность алюминия,<sup>\*</sup> сканирование выполнено на АСМ в тэппинг моде (tapping mode). Данная поверхность получена в результате электрохимической полировки текстурированной алюминиевой фольги.<sup>34</sup> Используя итеративную процедуру распознавания, можно определить количество элементов рельефа (129 алюминиевых столбиков), среднее расстояние между особенностями (203.4 нм), их средний диаметр (88.4 нм, диаметр особенности определён как диаметр окружности, описанной вокруг основания особенности), среднюю высоту (4.1 нм) и другие параметры, а также найти дисперсии и построить гистограммы распределения этих величин.

На Рис. 4 изображены основания алюминиевых столбиков после разреза рельефа горизонтальной плоскостью на оптимальной высоте. Поскольку особенности на поверхности алюминия в отличие от плоской поверхности графита располагаются на разных высо-

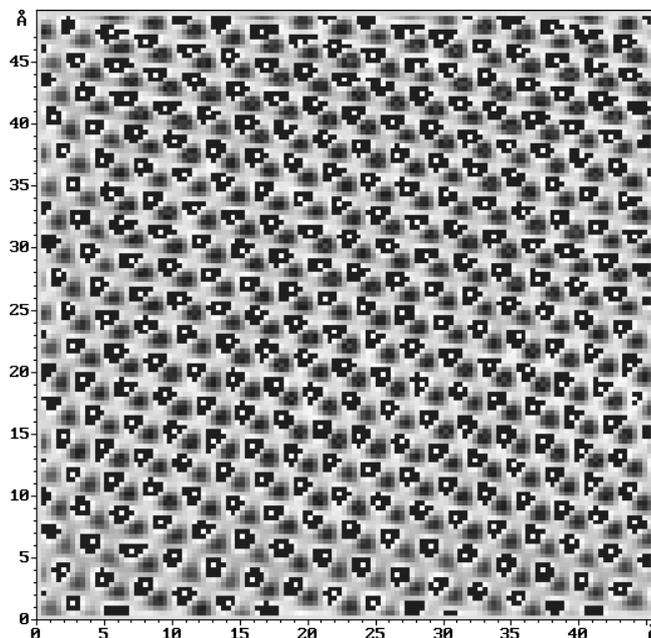


Рис. 2 Основания атомов углерода (тёмные области) после проведения горизонтальной плоскости разреза на оптимальной высоте. “Сканирование” рельефа поверхности по z выполняется до момента слияния соседних атомных областей в каком-либо месте изображения. Белыми точками обозначены найденные положения атомов. Тёмные области без точек – отброшенные особенности (расположены, как правило, по краям изображения). Усреднённая компактность оснований атомов  $C=70.2 \%$ .

\* Образец изготовлен С. А. Гавриловым (МИЭТ).

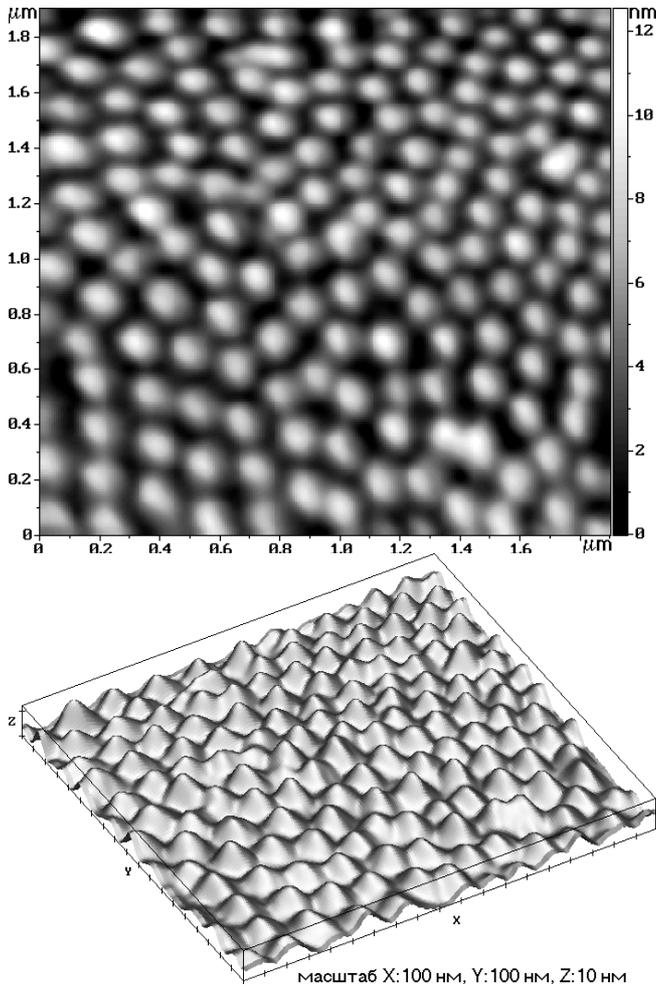


Рис. 3 Разупорядоченная поверхность алюминия. Измерения выполнены на АСМ в тэппинг-режиме. Размер изображения:  $(244 \times 228)$  пикселей<sup>2</sup>. Тренд удалён, рельеф сглажен.

соседних плоских областей (см. Рис. 4). Поскольку слияние не только искажает получаемую статистику, но и приводит к ошибкам связывания в описываемом ниже алгоритме ООС, то итеративный способ распознавания применяется только на тех поверхностях, где все особенности расположены приблизительно на одном уровне.

Приведённые примеры продемонстрировали применение процедуры распознавания к картинками, полученным обычным сканированием. Основная выгода от использования процедуры заключается здесь в том, что удаётся исключить субъективный фактор из процесса измерения координат атомов, а также выполнить статистический анализ особенностей поверхности, определить калибровочные коэффициенты и величину неортогональности XY-манипуляторов.<sup>27</sup> Однако получить точные численные значения данных величин невозможно, если искажающие факторы такие, как термодрейф и крип, при выполнении скана никак не были скомпенсированы. Анализируя Рис. 2 и Рис. 4, можно сделать вывод о том, что чем меньше размер исходного скана и, следовательно, количество особенностей в нём, тем более точно можно провести итеративным способом горизонталь-

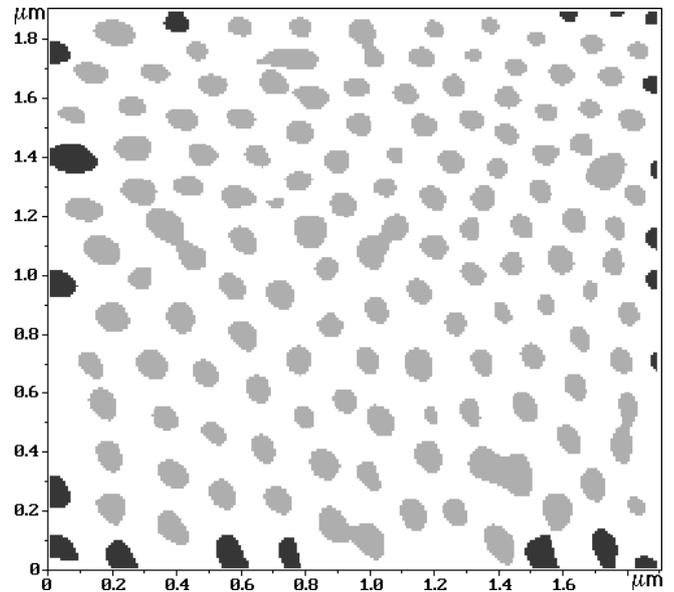


Рис. 4 Основания особенностей после разреза поверхности алюминия на оптимальной высоте. Светлые плоские области принадлежат распознанным особенностям поверхности, а тёмные – отброшенным краевым. Основания нескольких особенностей слились друг с другом.

тах, то за оптимальное положение плоскости разреза принималась та плоскость, которая давала максимальное число оснований особенностей. Недостатком используемого критерия является то, что происходит слияние

ную плоскость разреза и, соответственно, точнее определить координаты особенностей.

В заключение отметим, что описанную процедуру распознавания можно рассматривать как своего рода фильтр-компрессор, поскольку, с одной стороны, она “сглаживает” исходное изображение, порождая стилизованную поверхность, а с другой – “сжимает” исходные данные, выделяя из картинки наиболее ценную информацию.

### **1.5. Алгоритм сканирования: принцип работы и основные процедуры**

В предлагаемом методе получение скана поверхности складывается из двух этапов. На первом этапе производится построение “затравки” – квазипрямолинейной цепочки атомов заданной длины, ориентированной в заданном направлении (отсчитывается от оси X-манипулятора против часовой стрелки). На втором этапе на сформированную затравку “наращивается” весь остальной скан, используя для этого один из следующих двух способов локального связывания.

В первом способе (см. Рис. 5) выполняется обход затравки с присоединением новых элементов цепи (контур обхода остаётся всё время, например, слева). Причём, перемещение зонда во время сканирования происходит исключительно по узлам растущей цепочки. Процесс похож на прокладку рельс путеукладчиком: передвигается по пути, который сам строит.

Во втором способе зонд перемещается по квазистрокам, играющим здесь вспомогательную роль. Первой квазистрокой служит затравка, остальные формируются динамически в процессе сканирования. Тело цепочки образуется из элементов первой квазистроки и атомов-соседей, выбираемых из окружения атомов текущей квазистроки по мере перемещения зонда от её последнего атома к первому. Возможная аналогия здесь может быть следующей: путеукладчик движется по готовой колее, создавая параллельно ей новую. После достижения зондом первого атома текущей квазистроки происходит “переключение” на последний атом следующей квазистроки.

Таким образом, в предлагаемом методе сканирования траектория перемещения зонда заранее не определена, изначально задан лишь в общем виде характер поведения системы при выборе следующего атома цепи.

Если за элементарную затравку принять произвольный атом, то его обход даст изображение поверхности, развёрнутое по спирали, форма которого будет определяться формой ячейки, образуемой соседними атомами (см. Рис. 5а). Данный способ является самым простым способом сканирования, применяемым в описываемом алгоритме.

Если в роли затравки используется одномерная прямолинейная (в некоторых случаях прямолинейная условно см., например, Рис. 5г, д) цепочка атомов, то её обход приведёт к построению изображения в виде вытянутой спирали (см. Рис. 5б, г). Причём, если направление обхода в конце каждой “строки” (подцепочки атомов, сориентированной в про-

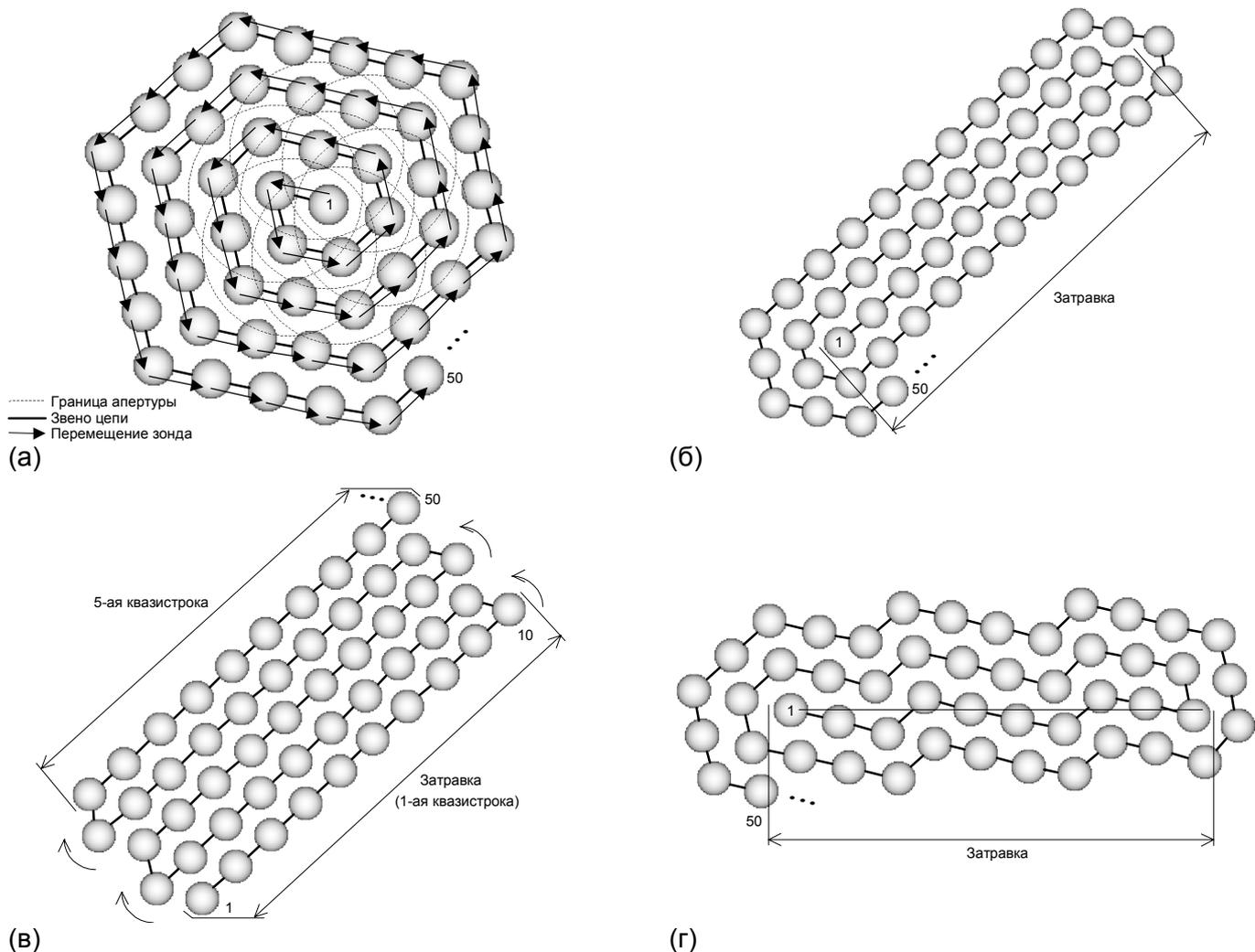


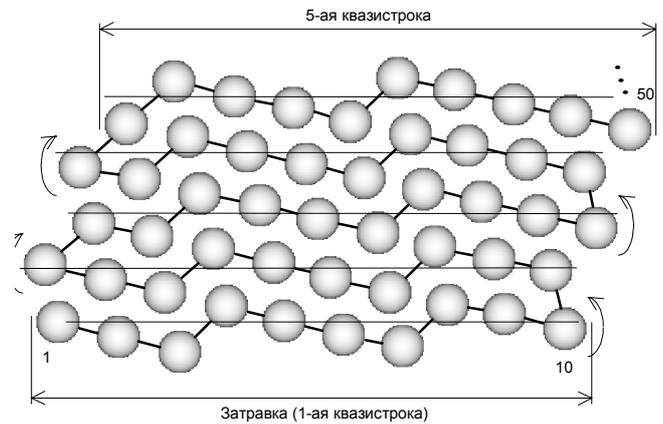
Рис. 5 Стилизованные изображения атомов углерода поверхности графита, иллюстрирующие простейшие способы локального связывания посредством обхода контура с присоединением. Картинки получены в режиме виртуального сканирования. Затравка: (а) одиночный атом; (б), (в), (г), (д) одномерная прямолинейная цепочка из 10 атомов. Затравка ориентирована вдоль: (б), (в) кристаллографического направления; (г), (д) направления, составляющего с X-манипулятором угол  $0^\circ$ . Направление обхода контура: (а), (б), (г) фиксированное (против часовой стрелки); (в), (д) переменное (с переключением в конце каждой квазистроки). Сканы, получаемые связыванием с использованием вспомогательных квазиistroк, внешне ничем не отличаются от изображений (в), (д). Скорость распознавания  $\sim 5$  атомов/с.

цессе обхода по затравке) изменять на противоположное, то получим изображение поверхности, “развёрнутое” по квазиistroкам (см. Рис. 5в, д) и расположенное в общем случае произвольно по отношению к осям манипулятора. Во всех способах после отыскания “следующего” атома цепочки, “текущий” атом добавляется к цепочке и становится частью контура обхода.

Хотя сканы, получаемые связыванием по второму способу, внешне выглядят так же как и на Рис. 5в, д, второй способ в сравнении с первым имеет одно важное преимущество, смысл которого станет ясен позже при подробном описании механизмов связывания.

Отметим, что независимо от способа связывания затравка играет роль исходного за-

дающего элемента. Её длина фактически определяет размер скана, а ориентация – его положение относительно системы координат манипулятора (см. Рис. 5б-д). В качестве направления ориентации затравки может быть выбрано как произвольное направление на упорядоченной или разупорядоченной поверхности, так и одно из кристаллографических направлений на упорядоченной поверхности.



(д) (продолжение Рис. 5)

Помимо реального предлагаемый алгоритм имеет режим виртуального сканирования. Виртуальный режим используется для сбора статистических данных об особенностях на изображениях поверхности, полученных обычным сканированием.<sup>24,50</sup> Виртуальное сканирование позволяет выполнять распознавание атомов на больших сканах и находить более точные значения их координат чем в примерах, приведённых в параграфе 1.4, так как поиск оптимального положения горизонтальной плоскости разреза поверхности производится локально (сравни Рис. 2 с Рис. 9, Рис. 4 с Рис. 14). Виртуальный режим также даёт возможность провести моделирование процесса объектно-ориентированного сканирования, задавая шумы и составляющие скорости дрейфа по трём координатным осям, подставляя поверхности-заглушки, имеющие те или иные особенности и т. п.

Используя введённые понятия, опишем алгоритм работы. Вначале выбираем способ локального связывания, задаём количество атомов затравки, количество атомов  $n$  в цепочке, а также число усреднений  $l$  сегментов и разностей координат.

Затем, подбирая параметры микроскопа (напряжение на туннельном зазоре, величину туннельного тока, ширину полосы пропускания петли обратной связи, скорость сканирования и т. п.) и сканируя с предельным разрешением обычным способом поверхность площадью примерно  $(15 \times 15) \text{ \AA}^2$ , добиваемся изображения атомов наилучшего качества.

Используя полученное изображение, выбираем тип особенности, задаём ориентацию затравки, радиус круглой апертуры  $R$  и вводим подходящий размер сегмента  $m$ . Наконец, повторив сканирование, указываем первый атом цепочки, присваивая ему ярлык “текущий”, и разблокируем процедуру привязки. Начиная с этого момента, алгоритм последовательно выполняет процедуры (см. Рис. 6), описание которых даётся ниже.

### 1.5.1. Процедура привязки зонда к атому поверхности

Процедура привязки способна удерживать зонд микроскопа над выбранным атомом поверхности в течение практически неограниченного отрезка времени. Она устраняет



Рис. 6 Упрощённая блок-схема алгоритма. Процедура привязки зонда работает в фоновом режиме. Сканирование считается законченным, если длина цепочки достигла заданного значения  $n$ .

(на блок-схеме не показано) по результатам измерения полного мгновенного дрейфа, который меняется во времени и зависит как от конкретной конструкции микроскопа, так и от условий проведения эксперимента. Под полным дрейфом микроскопа или просто под дрейфом будем понимать далее итог совместного действия термодрейфа и ползучести.

Сравнивая абсолютные координаты текущего атома цепочки с полученными в предыдущем цикле привязки, процедура, используя заданные пороги, либо увеличивает интервал  $T$  на дискрету, если дрейф мал, либо уменьшает, если он велик, либо оставляет без изменения (зона нечувствительности характеристики управления), если его величина находится в пределах допуска. Поэтому, чем меньше скорость дрейфа, тем реже будет производиться включение процедуры привязки, тем быстрее в целом будет происходить сканирование.

Таким образом, алгоритм автоматически подстраивается к изменяющейся величине дрейфа, учитывая временные колебания последнего. При разности координат более 45 % от длины усреднённой постоянной решётки процедура привязки фиксирует состояние PAF (Probe Attachment Failure) и пытается захватить ближайший атом.

### 1.5.2. Процедура сканирования апертуры и распознавания ближайших соседей

Вначале данная процедура (см. Рис. 8) осуществляет обычную строчную развёртку поверхности в пределах заданного квадратного окна  $2R \times 2R$ , охватывающего с некоторым

влияние латерального термодрейфа микроскопа и ползучести XY-пъезоманипуляторов, и фактически представляет собой цифровую следящую систему в латеральной плоскости, реализованную программно.

Процедура привязки зонда микроскопа производит (см. Рис. 7) строчное сканирование квадрата окрестности “текущего” атома цепочки, затем удаляет тренд и сглаживает полученное изображение, определяет оптимальную высоту разреза, после чего выполняет распознавание текущего атома и вычисляет его абсолютные координаты.

Процедура функционирует в фоновом режиме и активизируется, используя показания системного таймера компьютера, по прошествию заданного промежутка времени  $T$ . Интервал  $T$  определяется автоматически

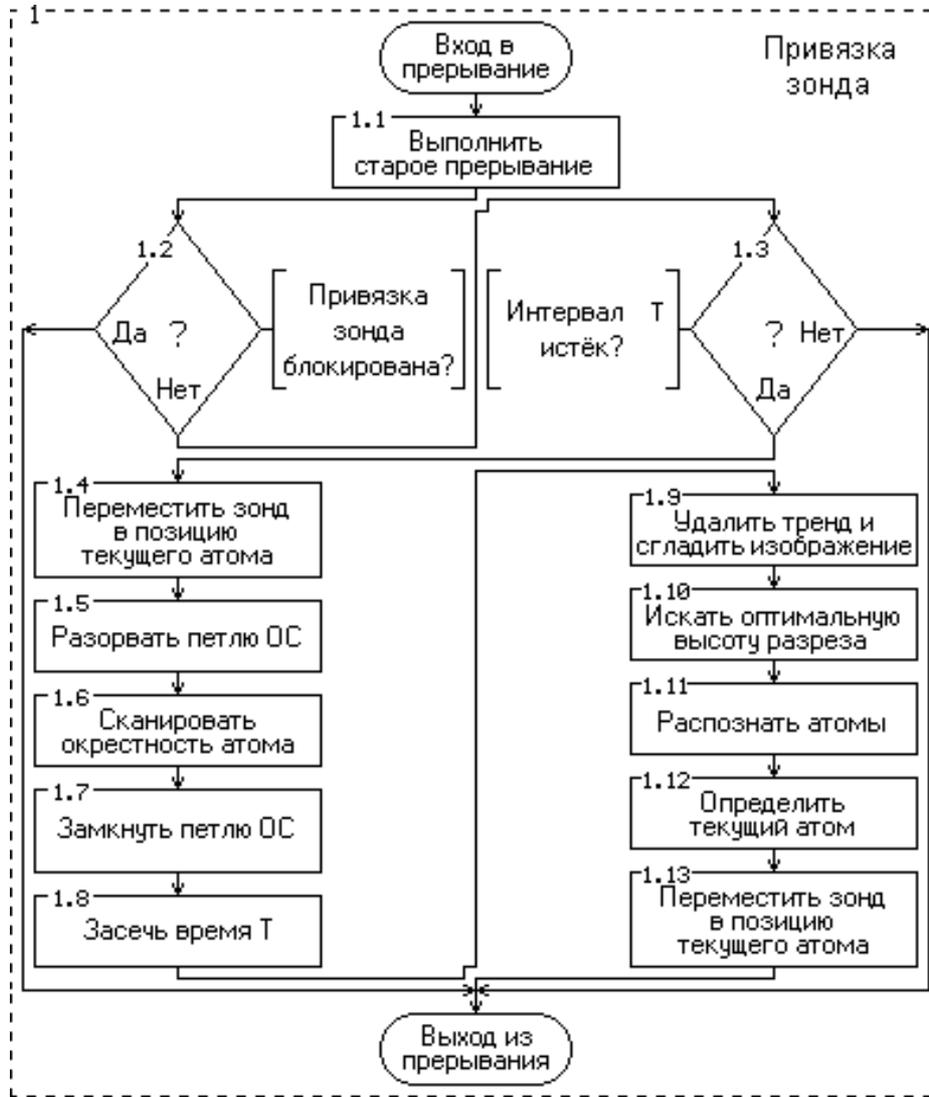


Рис. 7 Блок-схема процедуры привязки зонда.

запасом ближайших к текущему атому соседей (см. Рис. 9а). Последующая работа с изображением поверхности производится либо внутри данного квадратного окна, либо внутри вписанного в него круга радиуса  $R$ , и то и другое в дальнейшем будем называть апертурой.

Затем процедура удаляет тренд, выполняет сглаживание и производит поиск оптимальной высоты разреза. Далее осуществляется распознавание атомов, среди которых находится текущий (расположенный ближе всех к центру раstra). Координаты атомов-соседей определяются относительно абсолютного положения текущего атома. Фактически, данная процедура также выполняет и привязку зонда, но только менее точно из-за того, что размеры апертуры в несколько раз больше размеров сегмента.

К сервисным возможностям алгоритма следует отнести его способность сгенерировать для любого атома цепочки пару изображений апертура-сегмент, типичный вид которых показан на Рис. 9. По этим изображениям, представляющим собой результаты распознавания апертуры и сегмента, удобно судить о правильности функционирования алгоритма, точнее подбирать параметры сканирования и режимы работы микроскопа. Если

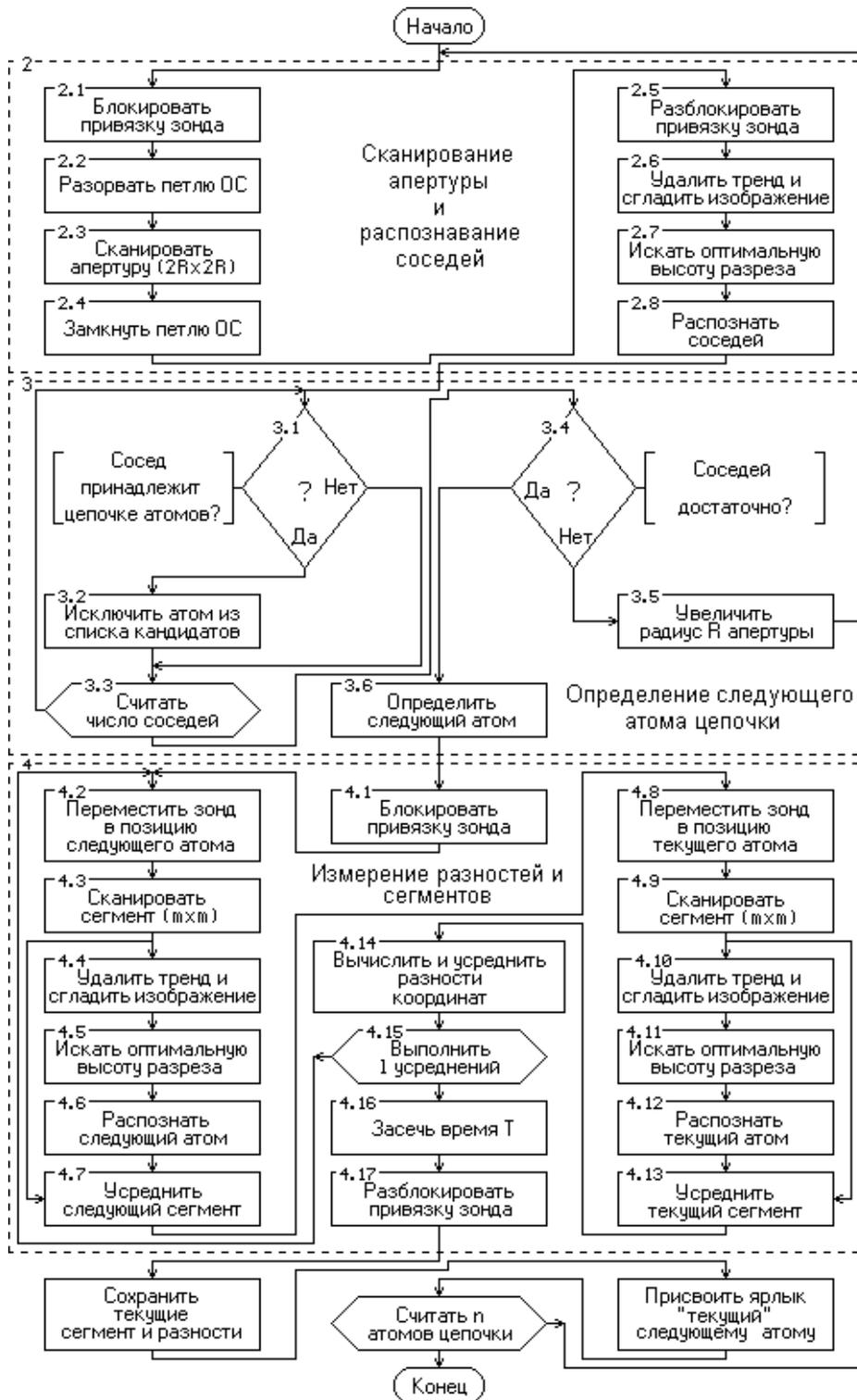


Рис. 8 Блок-схема алгоритма сканирования.

для подобных картинок чётко сформулировать критерии оценки качества скана и научиться выделять признаки, соответствующие этим критериям, то подбор многих параметров можно выполнять в автоматическом режиме.

**1.5.3. Локальное связывание: процедура определения следующего атома цепочки**

Процедура определения следующего атома цепочки работает по-разному в зависимости от этапа сканирования или используемого способа локального связывания. Напри-

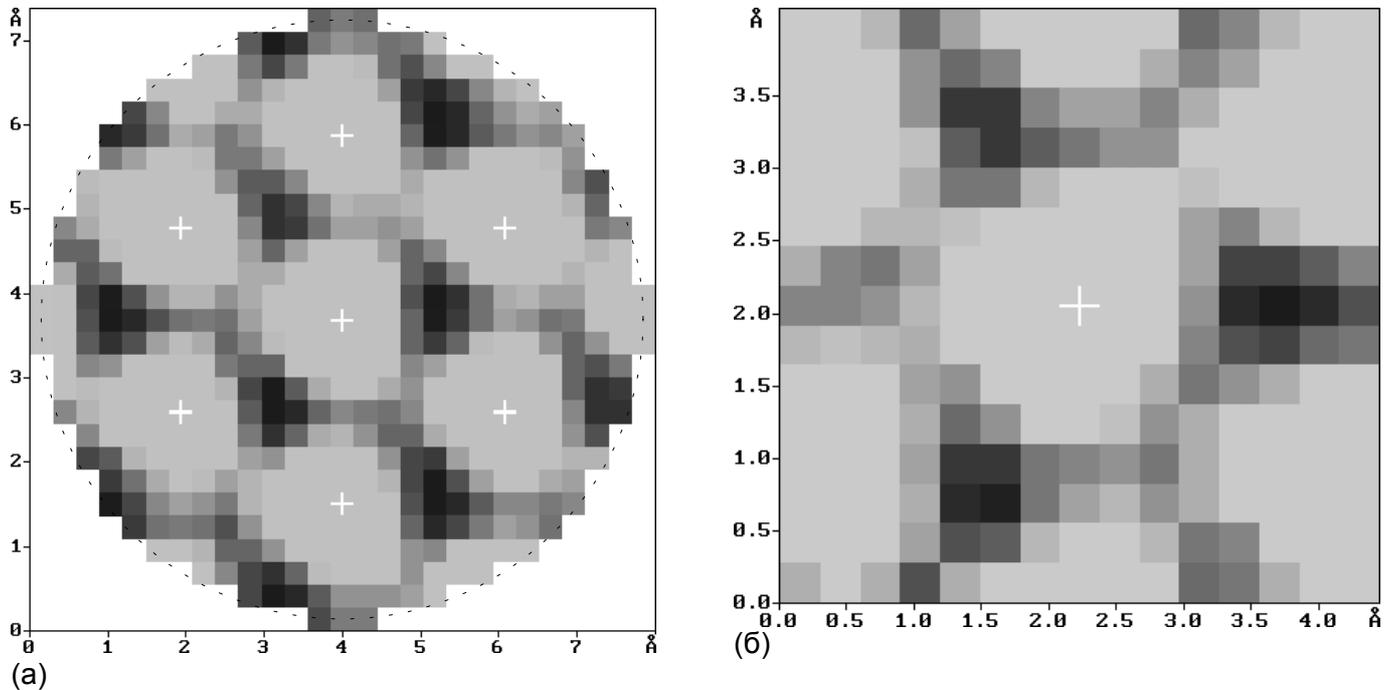


Рис. 9 Наглядное представление результатов распознавания (а) апертуры ( $27 \times 27$ ) пикселов<sup>2</sup> и (б) сегмента ( $15 \times 15$ ) пикселов<sup>2</sup>. Перед выполнением распознавания из изображения сначала вычитается локальный тренд, а затем производится сглаживание. Знаком “+” помечены найденные позиции атомов. Положение горизонтальной плоскости разреза одно и тоже для всех особенностей. Среднее число пикселов в основании особенности: 29. Данные изображения обычно используются для качественной визуальной оценки работы алгоритма сканирования. Размер квадратиков на изображениях соответствует минимальному шагу микроскопа в латеральной плоскости ( $\Delta_x=0.296 \text{ \AA}$ ,  $\Delta_y=0.273 \text{ \AA}$ ). Картинки получены в реальном режиме сканирования.

мер, при создании затравки производится поиск такого атома, который расположен под наименьшим углом к прямой, задающей направление движения. Найденный атом получает ярлык “следующий”. Причём, при перемещении вдоль кристаллографического направления положение следующего атома цепочки используется для уточнения направления движения, если изменение локальной кривизны цепочки лежит в заданных пределах. Таким образом, указанный приём позволяет удерживать выбранное направление, легко миную те места на поверхности кристалла, где расположены точечные дефекты решётки.

В случае, когда выполняется обход затравки с присоединением (см. Рис. 5 и Рис. 8), вначале выполняется сортировка: среди атомов выбираются те, что не принадлежат к уже пройденной цепочке. После чего среди отобранных ищется тот, что расположен под наибольшим (наименьшим) углом (отсчёт угла в обоих случаях производится вокруг “текущего” атома в направлении против часовой стрелки) к отрезку, соединяющему “текущий” и “предыдущий” атомы при обходе контура цепочки против часовой стрелки (по часовой стрелке). Найденный таким образом атом принимается за “следующий” атом цепочки.

Объём вычислений при выполнении сортировки атомов-соседей на те, которые уже

были просканированы и, следовательно, включены в состав цепочки, и те, которые не были, можно значительно сократить, если при анализе проверять не всю цепочку, а ограничиться лишь только теми атомами, что принадлежат внешнему витку спирали (последней квазистроке при сканировании с переключением). Определить текущую “глубину” просмотра цепочки можно путём подсчёта числа атомов цепочки между моментами углового замыкания внешнего витка спирали, используя для этого уже измеренные разности.

Сканирование с фиксированным направлением обхода контура в отличие от сканирования, когда направление обхода в конце каждой “строки” переключается на противоположное, обладает одним недостатком, который проявляется при попытке получения больших сканов. Дело в том, что по мере работы длина внешнего витка спирали постоянно растёт, соответственно, возрастает время, затрачиваемое на проверку принадлежности распознанных в пределах круглой апертуры атомов к уже существующей цепи.

Полезной модификацией сканирования посредством обхода контура является режим “заполнения” заданного окна (центр окна совпадает с положением первого атома цепочки). В этом режиме окончание работы наступает не тогда, когда цепочка “выросла” до указанного числа атомов, а тогда, когда все атомы из самого внешнего витка оказались лежащими вне заданного окна. Основное достоинство этого способа – простота его использования, поскольку со стороны, для пользователя, он ни чем не отличается от обычного сканирования. Недостаток же заключается в том, что часть поверхности, к которой относятся атомы внешних витков, сканируется впустую, так как в окно для визуализации никогда не попадает.

Вообще, что касается формы изображения, то она определяется типом затравки и видом элементарной ячейки (для упорядоченных поверхностей), но может быть сделана произвольной. Для этого алгоритм следует дополнить процедурой анализа формы, которая бы указывала на те места, где направление обхода контура следует периодически изменять так, чтобы “нарастить” атомы в данном месте изображения до полного заполнения заданной формы.

Принципиальным и наиболее существенным недостатком способа образования скана поверхности путём обхода затравки с присоединением является то, что, начиная с некоторой длины цепочки, невозможно правильно выполнить сортировку атомов-соседей. Причина заключается в погрешности, накапливаемой в цепочке, величина которой не должна превышать половины характерного расстояния между особенностями.

В режиме виртуального сканирования данная погрешность ничтожно мала, а вот в режиме реального сканирования может проявиться довольно быстро. Причём, чем больше шумы и изменения в скорости дрейфа, тем при некотором заданном числе усреднений быстрее наступает указанное ограничение, а, следовательно, и ограничение на максимальный размер скана, который можно получить на данном микроскопе.

Для иллюстрации сказанного на Рис. 10 представлено стилизованное изображение поверхности графита, измеренное в реальном режиме сканирования. На картинке хорошо видны искажения: изменение шага спирали и “провал”, усиливающиеся по мере роста цепи. Для того чтобы подавить аккумуляцию погрешности, следует при добавлении новых звеньев цепочки выполнять коррекцию путём “растворения” невязки на участке цепи от текущего атома до одного из обнаруженных атомов-соседей, включённых в цепь на предыдущем витке.

В качестве альтернативного метода, позволяющего избежать ошибок, вызываемых накоплением погрешностей в цепочке, может быть предложено упомянутое ранее связывание с использованием вспомогательных квазистрок (см. Рис. 11). Основная идея, лежащая в его основе, заключается в том, чтобы в операции сортировки соседей потенциально принимало бы участие как можно меньшее число элементов цепочки, т. е. чтобы просмотр цепочки осуществлялся бы на минимально возможную глубину.

С этой целью из соседей текущего атома текущей квазистроки образуется группа, куда входят атомы, лежащие по одну определённую до начала сканирования сторону от квазистроки и не принадлежащие квазистроке. По сути, здесь мы опять имеем дело с обходом, но уже существенно малой не имеющей роста структуры – текущим атомом текущей квазистроки. Для связывания смежных групп атомов-соседей, относящихся к смежным атомам в квазистроке, используется атом “квитирования” – текущий атом растущей цепочки.

Одной из причин, вызывающих ошибки связывания в реальном режиме сканирования, является случайное появление в апертуре таких артефактов как нити. Однако простейший анализ контура особенности позволяет выявить нить и исключить её из списка особенностей либо избавиться от данного артефакта посредством специального сглаживания. В заключение отметим, что если в процессе связывания среди соседей не найдено атомов, подходящих на роль “следующего”, то радиус апертуры увеличивается и заново выполняется её сканирование и анализ.

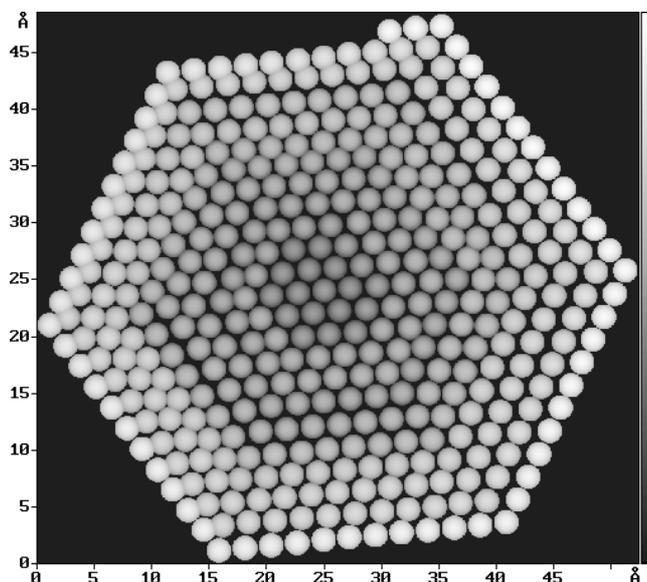


Рис. 10 Типичные искажения скана: изменение шага спирали и несуществующий “провал” изображения, вызванные эффектом накопления погрешности в цепочке. Длина цепочки 400 атомов. Интервал накопления погрешности 67 атомов. Число усреднений звеньев цепочки – 25.

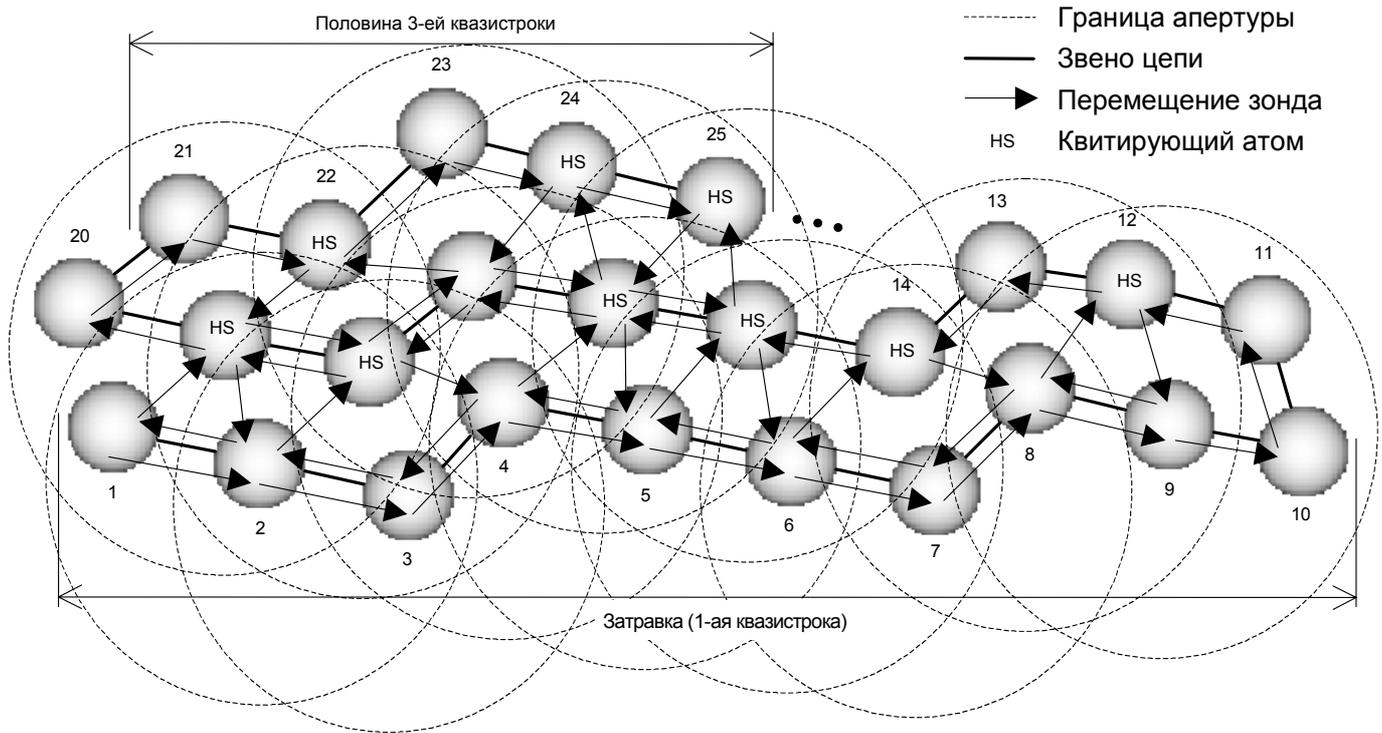


Рис. 11 Локальное связывание особенностей с использованием вспомогательных квазистрок. Первой квазистрокой служит затравка (число атомов в затравке – 10, затравка ориентирована параллельно оси X-манипулятора). Атом квитирования (сокращённо HS от слова HandShake) предназначен для связывания смежных групп атомов-соседей, принадлежащих смежным атомам квазистроки.

#### 1.5.4. Скиппинг: процедура измерения разностей и сегментов

Данная процедура осуществляет высокоточные измерения  $x$ ,  $y$ ,  $z$ -координат атомов поверхности. Так как из-за наличия дестабилизирующих факторов точное измерение абсолютных координат атомов посредством усреднения невозможно, независимо от того работает механизм привязки или нет, то рассматриваемая процедура производит измерение координат “следующего” атома цепочки относительно координат “текущего”.

Итак, вначале (см. Рис. 8) блокируется работа процедуры привязки, поскольку теперь основная часть функций последней будет выполняться самой процедурой измерения разностей. Затем зонд микроскопа перемещается в позицию следующего атома, где выполняется обычное строчное сканирование квадрата ( $m \times m$ ) его окрестности, называемого сегментом поверхности.

После этого процедура определяет средний наклон поверхности в сегменте и удаляет его простым вычитанием (при большом тренде значение компактности оказывается искажённым и должно использоваться осторожно), выполняет сглаживание, осуществляет поиск оптимальной высоты разреза и, найдя её – распознавание (см. Рис. 9б) следующего атома. Определив его абсолютные координаты, процедура вычисляет разности, а затем перемещает иглу СТМ обратно в позицию текущего атома, после чего производит там

действия аналогичные тем, которые она проделала только что со следующим атомом. Находя абсолютные координаты текущего атома, процедура снова вычисляет разности координат между атомами.

Далее описанная выше последовательность действий, называемая скиппингом (от слова *skipping* – перепрыгивание), повторяется столько раз, сколько усреднений  $I$  (число усреднений принципиально ничем не ограничено) было задано. В конце цикла “следующему” атому присваивается тэг “текущий”, процедура привязки разблокируется, а счётчик числа атомов цепочки увеличивается на единицу. Напомним, что относительные координаты для первого перемещения зонда в позицию следующего атома определяются процедурой сканирования и распознавания апертуры.

Если в течение одного цикла скиппинга ( $\sim 300$  мс для поверхностей с атомным рельефом) изменение скорости дрейфа невелико (см. параграф 3.6), то наступает практически полная его компенсация. Пусть, например, составляющая дрейфа по  $x$  сонаправлена с составляющей перемещения по  $x$  зонда при переходе его от текущей особенности к следующей, тогда измеренная разность будет больше истинной, при движении в обратном направлении она окажется на ту же величину меньше. Следовательно, среднее значение этих разностей будет равно истинному расстоянию между данными особенностями (относительно коррекции искажений в сегменте см. работы 15, 22, 23, 51, 52).

Что касается абсолютной величины дрейфа, то она может быть достаточно большой – лишь бы за время перемещения зонда от одной особенности к другой, последняя оказывалась бы каждый раз лежащей в пределах границ сегмента. Вообще, сказанное представляет собой критерии, гарантирующие возможность применения алгоритма на практике. Как правило, большинство из существующих микроскопов данным критериям удовлетворяет. Безусловно, удовлетворение приведённым критериям должно выполняться с определённым запасом.

Отметим, что при перемещениях зонда между текущим и следующим атомами петля обратной связи всегда замкнута, а при сканировании сегмента в зависимости от установленного режима может быть, как замкнута (режим “постоянного тока”), так и разомкнута (режим “постоянной высоты”).

При сканировании поверхностей со всё более крупными чем атомы особенностями крип всё сильнее доминирует над термодрейфом. Однако, благодаря тому, что рельеф поверхности в настоящем методе измеряется по частям – небольшими расположенными по соседству сегментами, а также широкому применению встречных перемещений в апертурах, сегментах, при скиппинге, при движении по квазистрокам, результирующий эффект от самогенерации крипа оказывается незначительным. Поскольку не все перемещения в предлагаемом методе имеют встречную комплементарную составляющую, то для ослабления крипа, вызываемого такого рода перемещениями, вводится пауза – по-

следовательность циклов привязки зонда.

Хотя встречные перемещения не компенсируют крип полностью, но в целом дрейф, ими вызываемый, изменяется медленно и, следовательно, может быть устранён с использованием указанной выше линейной схемы. Применяя ООС, следует помнить, что погрешность измерений будет тем больше, чем больше будут по размеру используемые особенности, и чем дальше они будут отстоять друг от друга.

В этой связи одновременное использование холмов и ям предпочтительно, если, конечно, и те и другие присутствуют на поверхности. Хотя на компьютерах с одним процессором время распознавания возрастает, на компьютерах с двумя процессорами оно не изменяется, так как задача распознавания легко распараллеливается: на одном и том же изображении одновременно один процессор распознаёт холмы, а другой – ямы. Поскольку минимальными по размеру и наиболее плотно упакованными особенностями являются атомы и междоузлия на поверхности кристаллических тел, то такие поверхности для предлагаемого метода следует считать наиболее подходящими.

Помимо точного определения относительных координат следующего атома цепочки процедура скиппинга выполняет усреднение сегментов поверхности, что позволяет эффективно бороться с шумами и достигать высокого разрешения в вертикальной плоскости. Следует обратить внимание на то, что размер сегмента должен выбираться таким образом, чтобы сегменты соседних атомов немного перекрывали бы друг друга. Это требуется для того, чтобы после выполнения “сборки” (см. параграф 1.7) полученная поверхность не имела бы разрывов. Заметим также, что операции над сегментами типа вычитание тренда, сглаживание и т. п. выполняются не над оригиналами изображений, а над их дубликатами, оригиналы никак не модифицируются и служат только для усреднения.

Кроме областей отводимых под перекрытие, по периметру сегмента имеется два поля, одно из которых служит для компенсации смещения особенности относительно центра сегмента, а второе самое внешнее (размер этого поля в направлении “быстрого” сканирования больше, чем в направлении “медленного”) резервируется как место, где наиболее сильно проявляются нелинейные динамические искажения пьезопозиционера при строчной развертке, данное поле по окончании сканирования сразу же отбрасывается.

Если область сканирования невелика и/или дрейф во время сканирования не очень сильный, и/или требования к точности измерений не слишком высоки, то для последующей сборки поверхности сохраняются усреднённые кусочки поверхности – сегменты и усреднённые значения разностей, иначе в каждом цикле скиппинга сохраняются однократные измерения абсолютных координат “текущего” и “следующего” атомов вместе с соответствующими однократно измеренными сегментами.

Дело в том, что зонд “привязан” к поверхности и, следовательно, дрейфует вместе с ней, перемещаясь по полю сканирования, в каждой точке которого действуют разные ка-

калибровочные коэффициенты (см. параграф 1.6). Поэтому, чтобы избежать ошибок при усреднении, вначале следует, используя калибровочную сетку, исправить абсолютные координаты и сегменты. Сделать это во время сканирования невозможно из-за того, что доступ к калибровочной базе данных, интерполяция коэффициентов и, наконец, коррекция сегментов требуют значительных вычислительных ресурсов.

Поскольку, определяемое в процессе выполнения скиппинга относительное расстояние между особенностями является действительным числом, изменяющимся по случайному закону, то, выполняя большое количество измерений разностей и сегментов и, вводя в изображение на этапе сборки реальной поверхности больше пикселей и градаций высоты, возможно реконструировать рельеф (см. параграф 3.2), предельные латеральные и вертикальные подробности в котором будут мельче (здесь предполагается, что игла острая) чем те, что способен обнаружить используемый микроскоп при обычном сканировании.

Усреднённые либо однократно измеренные разности и сегменты записываются в специальном цепочечном формате, обеспечивающем построение как стилизованного изображения, так и состоящего из сегментов за один просмотр цепочки. Следует обратить внимание на то, что абсолютные координаты атомов (текущего и следующего) в вертикальной плоскости, скорее всего, слабо отражают их действительные положения, но вполне пригодны для получения относительных координат, используемых как при построении стилизованной поверхности, так и реальной, складываемой из сегментов.

Если в процессе скиппинга происходит резкое изменение скорости дрейфа такое, что заявленная точность становится недостижимой из-за погрешности линеаризации, то текущий цикл объявляется холостым, полученные данные отбрасываются, и скиппинг повторяется. Цикл скиппинга повторяется до того момента, пока изменение скорости дрейфа не станет меньше некоторого заданного номинального значения.

Процедура поиска оптимальной высоты разреза, используемая при распознавании, как в апертуре, так и в сегменте, имеет итеративный характер и, следовательно, отнимает большую часть времени работы процессора. Если особенности являются одинаковыми (например, атомы на атомарно-гладкой поверхности) или обладают небольшим разбросом по высоте, то распознавание можно выполнять с фиксированным порогом. Точность определения координат при однократном измерении в этом случае будет немного ниже, но сканирование существенно быстрее.

Величина фиксированного порога определяется по результатам работы процедуры поиска оптимальной высоты, выполненной для нескольких первых элементов цепочки. Если далее оказывается, что выбранный порог при выполнении распознавания в каком-либо месте поверхности приводит к ошибке, то автоматически активизируется процедура поиска, выполняется распознавание с использованием оптимальной высоты разреза, по-

сле чего сканирование опять продолжается с фиксированным, но уже уточнённым порогом.

В используемом микроскопе из-за ограничений на величину минимального шага в горизонтальной и вертикальной плоскостях число точек и число уровней по высоте в изображении атомного рельефа поверхности – небольшое (см. Рис. 9). Поэтому точность определения координат положения особенности вследствие сильного влияния шумов и нестабильностей оказывается недостаточно высокой, чтобы осуществлять связывание без ошибок, особенно, при использовании метода связывания посредством обхода контура с присоединением.

Для того чтобы избежать ошибок связывания при сканировании атомной поверхности, относительные положения соседей в апертуре требуется уточнить. Делается это посредством разновидности скиппинга, называемого лучевым: последовательно, заданное число циклов выполняется скиппинг между текущим атомом (расположен в центре апертуры) и всеми соседями вокруг него.

Отметим, что в моделях современных микроскопов за счёт использования последних разработок малошумящих усилителей туннельного тока и малошумящих высоковольтных усилителей, аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей с более высокой разрядностью, а также применения совершенных материалов и новых конструкторских решений минимальный шаг пьезоманипуляторов в горизонтальной и вертикальной плоскостях на порядок меньше, чем соответствующие величины в используемом приборе. Поэтому издержки на лучевой скиппинг в таких аппаратах будут меньше, а производительность сканирования – выше.

Отметим, во-первых, что в описываемом методе сканирования сегмент это область предельной локализации измерений рельефа. Во-вторых, в каждый момент времени существует не более двух атомов, имеющих абсолютные координаты (два атома при скиппинге и один во всех других состояниях). Координаты остальных атомов цепочки – относительные. В-третьих, предлагаемый алгоритм не содержит тупиков, и что самое важное результаты его работы не зависят ни от типа элементарной ячейки, ни от её размеров, ни от наличия дефектов или какой-либо разупорядоченности атомов на поверхности. Здесь, чрезмерно крупные объекты, не помещающиеся в сегменте, обходятся, а слишком мелкие, плохо воспроизводимые от скана к скану, игнорируются. В-четвёртых, алгоритм может быть отнесён к классу адаптивных, поскольку содержит элементы, обеспечивающие самонастройку программы к текущим окружающим условиям, особенностям поверхности и конкретному оборудованию.

## **1.6. Распределённая калибровка сканера микроскопа**

Хорошо известно, что со временем коэффициенты чувствительности пьезоманипуля-

торов СЗМ изменяются, так как пьезокерамика, из которой они изготовлены, деполяризуется и “стареет”. Поэтому необходимо периодически проводить перекалибровку сканера микроскопа. Одним из важных аспектов задачи калибровки является её автоматизация.<sup>23,27</sup> Выполнение калибровки вручную<sup>2,53</sup> – процесс достаточно трудоёмкий даже тогда, когда манипулятор характеризуется четырьмя фиксированными параметрами (тремя коэффициентами по трём осям микроскопа и неортогональностью осей в плоскости сканирования), получение же распределённых коэффициентов в полной мере возможно только в автоматическом режиме.

В работе 27 задача калибровки рассматривается с общих позиций, а полученные решения могут применяться, правда, с определёнными оговорками для калибровки СЗМ по изображениям эталона, сосканированным обычным способом. Напомним, что идея метода заключается в использовании *a priori* известной информации о структуре и размерах элементов эталонной поверхности для поиска параметров линейной трансформации, преобразующей искажённое изображение эталонной поверхности в неискажённое. Используя затем найденные параметры, производятся те же манипуляции, но уже над изображениями, структура которых заранее неизвестна.<sup>15,21,22,23,54,55,56</sup>

В данном параграфе решения, полученные в статье 27, переносятся на метод сканирования с локальным распознаванием и связыванием особенностей поверхности. Калибровка приобретает распределённый характер: вместо четвёрки фиксированных усреднённых калибровочных параметров, характеризующих весь сканер, в процессе измерения эталонной поверхности ищется сетка локальных коэффициентов, покрывающая поле сканера. В результате, при проведении сборки изображения появляется возможность в один приём откорректировать все пространственные искажения, вносимые пьезоманипуляторами микроскопа, а именно: нелинейность,<sup>57</sup> неортогональность и паразитное воздействие друг на друга.

Итак, калибровочная процедура заключается в сканировании по алгоритму, описанному выше, эталонной поверхности, в роли которой может выступать, например, ВОПГ, монокристаллический Киш (Kish) графит,<sup>58</sup> кристаллы  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{NbSe}_2$ ,<sup>59</sup> и определении локальных калибровочных коэффициентов путём выполнения скиппинга между каждой особенностью цепочки и всеми её ближайшими соседями. В результате получаем распределение (сетку) калибровочных коэффициентов в пространстве сканирования. Поскольку влияние термодрейфа и крипа устраняется в процессе измерения, то калибровочная сетка оказывается независимой от скорости сканирования и его направления.

Рассмотрим калибровку сканера в латеральной плоскости, она осуществляется либо по треугольникам (коэффициент кратности  $k=1$ ) либо по звёздам ( $k=2$ ),<sup>27</sup> образуемым в апертуре текущим атомом и его ближайшими соседями. Для решётки графита после выполнения скиппинга имеем шесть равнобедренных треугольников либо одну звезду. По

шести треугольникам можно найти шесть пар калибровочных коэффициентов для шести абсолютных позиций в центрах тяжести этих треугольников. По звезде можно определить одну пару коэффициентов, соответствующую абсолютному положению центрального (текущего) атома.

Если эталонная поверхность имеет небольшой тренд, то для некоторого фиксированного положения Z-манипулятора получаем распределение калибровочных коэффициентов в плоском поле. Кроме нелинейности и неортогональности сканера в найденном распределении также происходит учёт паразитных связей типа  $X \leftrightarrow Y$ . Если эталонная поверхность близка к плоскости, то изменение положения Z-манипулятора при перемещении от одной локальной калибровочной структуры к другой покажет величину погрешности от паразитных связей типа  $X \rightarrow Z$ ,  $Y \rightarrow Z$  (в случае, когда эталонная поверхность имеет в окрестности центра координат сканера некоторый тренд, то из полученной погрешности нужно вычесть вызываемое этим трендом смещение).

Для выполнения калибровки Z-манипулятора микроскопа требуется калибровочная структура, имеющая на поверхности не только систему особенностей с известным латеральным периодом, но и с известной высотой. Графит для этих целей не совсем годится, поскольку величина гофрировки поверхности в нём может сильно отличаться от опыта к опыту.<sup>60,61,62</sup> Высота особенности определяется как разность максимума особенности и положения горизонтальной секущей плоскости. Выполняя сканирование эталонной поверхности для разных положений Z-манипулятора, устанавливаемых грубой ступенью сканера, получаем распределение калибровочных коэффициентов в пространстве. Помимо нелинейности в вертикальной плоскости в найденной сетке будет учтён кауплинг типа  $Z \rightarrow X$ ,  $Z \rightarrow Y$ .

Погрешность смещения Аббе происходит из-за изгиба Z-пъезоманипулятора в процессе сканирования и некоторой, в зависимости от того, чем производят сканирование образцом или иглой, толщины образца или длины иглы. Например, абсолютная погрешность смещения Аббе для иглы длиной, скажем, 5 мм при перемещении от одного края к другому на поле  $(7 \times 7)$  мкм<sup>2</sup> точного манипулятора с длиной трубки 32 мм составляет около 1.1 мкм. Ни толщина образца, ни длина иглы заранее, как правило, точно неизвестны.

Поскольку среднюю толщину образца обычно измерить проще чем длину иглы, то схема сканирования образцом выглядит предпочтительнее (см. также параграф 2.2.2). Причём, в схеме со сканированием образцом можно предложить такое устройство держателя образца, которое обеспечивало бы для некоторого диапазона толщин образцов фиксированное смещение плоскости сканирования от края манипулятора, что позволяет вообще отказаться от измерения толщины образца при его установке в микроскоп. Однако и в этом случае из-за вариаций рельефа на поверхности, погрешностей установки и

т. п. возможно небольшое отклонение в несколько микрон от номинального положения плоскости сканирования. Сравнимая точность получается при изготовлении игл кантилеверов (cantilever), где эквивалентная длина иглы также известна с точностью в несколько микрометров.

Таким образом, абсолютная погрешность смещения Аббе из-за погрешности измерения толщины образца (длины иглы), скажем, в  $\pm 1.5$  мкм на краю поля приблизительно равна  $\pm 1.6$  Å. Если бы толщина образца (длина иглы) была бы точно известна, а свободный конец манипулятора изгибался бы строго по окружности, что на практике не наблюдается,<sup>5</sup> то погрешность смещения Аббе можно было бы легко скорректировать, вводя для каждой точки в растре соответствующие поправки в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Обсуждаемый тип погрешности устраняется в процессе распределённой калибровки. Если сканирование производится образцом, то при смене образца необходимо посредством держателя фиксировать одно и то же смещение поверхности образца от края манипулятора. Если сканирование производится иглой, то в случае её замены возможны три варианта: перекалибровка сканера, изготовление игл с одинаковой длиной, использование держателя иглы, обеспечивающего одно и то же смещение кончика иглы от края манипулятора. В последних двух вариантах отклонение от номинального положения плоскости сканирования, как и при установке нового образца, также может составлять несколько микрон.

Для примера, вблизи границы сканирования абсолютная погрешность смещения, связанная с ошибкой в фиксации положения иглы/образца в  $\pm 1.5$  мкм, составляет в радиальном направлении при измерении расстояния между атомами углерода на поверхности графита всего лишь около  $\pm 1.16 \cdot 10^{-4}$  Å, а при измерении характерного (среднего) расстояния между столбиками на поверхности алюминия (см. параграф 1.4, Рис. 3) –  $\pm 0.095$  Å. Если в качестве сканирующего микроскопа выступает АСМ, то можно посоветовать калибровать прибор и заменять зонды, используя кантилеверы, изготовленные на одной пластине, так как разброс игл по длине у таких кантилеверов, как правило, минимален.

Поскольку погрешность смещения Аббе возрастает при перемещении к краю поля сканера, то другим способом уменьшения её влияния может быть перенос посредством грубого позиционера и привязки зонда к особенности (см. параграф 2.2) измеряемого места с периферии в центр поля точного сканера (здесь предполагается двуполярное управление сканером). Для получения наибольшего эффекта указанный приём рекомендуется использовать наряду с распределённой калибровкой.

Обычно деталь микроскопа, выполняющая функции метрологического бокса (см. па-

раграф 1.1), получается достаточно большой по габаритам, соответственно, на её работу в сильной степени влияет деформация вследствие нагрева/охлаждения. Поэтому метрологический бокс изготавливается из материалов с малым коэффициентом теплового расширения  $\alpha^5$

$$\alpha = \partial l / \partial T / l, \quad (2)$$

где  $l$  – линейный размер,  $T$  – температура, таких как инвар ( $\alpha=0.1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), плавный кварц ( $\alpha=0.6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), Зеродур (Zerodur,  $\alpha=0.05 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ). Погрешности изготовления метрологического бокса и остаточные термодформации вызывают погрешность косинуса.

В предлагаемом методе сканирования-позиционирования погрешность косинуса отсутствует, поскольку отсутствует в явном виде метрологический бокс. Роль бокса частично выполняет сам XYZ-пъезосканер, определяя только начало координат, которое совпадает с положением манипулятора при подаче на него нулевой разности потенциалов. Такие атрибуты бокса как ортогональность осей и прямолинейность направляющих воспроизводятся посредством выполнения распределённой калибровки.

Следует отметить, что пьезосканер микроскопа также разогревается. Однако тепловое равновесие в нём наступает быстро, благодаря небольшим размерам и тому, что нагрев из-за потерь на гистерезис<sup>6</sup> происходит равномерно в объёме всего тела сканера. В итоге термодформация сканера выражается главным образом в небольшом по величине медленно изменяющемся дрейфе, который компенсируется при скиппинге в процессе выполнения ООС.

Для тел с малыми линейными размерами ( $l \leq 1 \text{ мкм}$ ) термофлуктуации  $\Delta l_{rms}$  (средне-квадратическое значение) начинают доминировать над тепловым расширением<sup>5</sup>

$$\Delta l_{rms} = \sqrt{kT/3Bl}, \quad (3)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $B$  – модуль объёмной упругости. Погрешности, связанные с термофлуктуациями, также устраняются при выполнении ООС путём усреднения измеренных данных.

Рассмотрим способ, в котором удаётся ускорить и упростить процесс калибровки (за счёт отказа от связывания особенностей), а также получать менее плотные распределения коэффициентов. Поле сканера “покрывается” сеткой с квадратными ячейками. Размер стороны квадрата приблизительно определяет то, как плавно будут изменяться в найденном распределении калибровочные коэффициенты. Зонд микроскопа перемещается по узлам сетки как по растру. В каждом узле, используя процедуру привязки, “захватывается” ближайший атом и производится скиппинг его соседей. Определив координаты атомов, образующих локальную калибровочную структуру, вычисляются искомые локальные коэффициенты.

Отметим, во-первых, что шаг исходной сетки не может быть меньше некоторого ми-

нимального шага, обусловленного размерами и геометрией калибровочной структуры. Во-вторых, из-за дрейфа и отличий в структуре и ориентации между исходной сеткой и эталонной поверхностью полученная сетка не является больше квадратной с целым шагом, и должна быть преобразована к таковой для дальнейшего использования.

В обоих способах калибровки скиппинг рекомендуется производить с небольшим числом усреднений, поскольку по причине дрейфа абсолютное положение зонда в месте привязки изменяется и, следовательно, определяемые коэффициенты искажаются. Для того чтобы получить более точные значения чувствительных к шуму<sup>27</sup> калибровочных коэффициентов, правильнее многократно повторить калибровку, добавляя каждый раз в базу данных новое распределение.

Требование выбора больших коэффициентов кратности<sup>27</sup>  $k$  вступает в противоречие с локальным характером измерений предлагаемого метода сканирования, где этот коэффициент должен выбираться равным либо 1, либо 2. Небольшое значение коэффициента опять таки должно компенсироваться увеличением числа повторных калибровок.

При поиске распределённых коэффициентов большое значение приобретает неизменность структуры эталонной поверхности в каждой точке поля сканера, что на практике не всегда осуществимо из-за дефектов.<sup>63</sup> Однако это обстоятельство не является непреодолимым. Так, если микроскоп имеет в своём составе грубый XY-манипулятор, то с его помощью предварительно выбранный “правильный” участок поверхности кристалла можно, используя процедуру привязки зонда к особенности, двигать в поле точного манипулятора (см. параграф 2.2) и, таким образом, калибровать всё поле сканера малой областью эталона.

Поскольку не существует эталонов с совершенно плоской поверхностью, то только данный вид калибровки позволяет выявить кауплинг типа  $X \rightarrow Z \rightarrow X$ ,  $Y \rightarrow Z \rightarrow Y$  (связи, обозначенные здесь как  $Z \rightarrow X$ ,  $Z \rightarrow Y$ , обусловлены действием обратной связи), который обычно проявляется на СЗМ-изображении наиболее сильно. Вносимую паразитной связью погрешность можно обнаружить по изменению наклона плоскости, проведённой через измеренные положения особенностей локальной калибровочной структуры, в процессе перемещения этой области эталона по полю точного манипулятора.

Для того чтобы после измерения рельефа поверхности методом ООС можно было воспользоваться калибровочной сеткой, полученный скан нужно привязать к максимальному, обеспечиваемому сканером. В случае малого дрейфа для этого достаточно располагать только абсолютными координатами первого атома цепочки, в случае большого – привязка происходит автоматически по сохранённым абсолютным координатам атомов (см. параграф 1.5.4).

Так как калибровка может выполняться по атомам некоторой эталонной поверхности,

то дискретность определения калибровочных коэффициентов оказывается высокой, хотя на практике покрыть столь частой сеткой весь диапазон сканера, да ещё и на нескольких уровнях пока, по-видимому, нереально из-за недостаточно высокого быстродействия существующих микроскопов. В ряде случаев бывает достаточно откалибровать точно только небольшую часть поля сканера, расположенную в окрестности точки начала координат, где остаточные погрешности наименьшие. После чего посредством грубого манипулятора, используя процедуру привязки зонда к особенности, перенести (см. параграф 2.2) интересующее место на поверхности в эту часть поля точного манипулятора, где и выполнить необходимые измерения рельефа поверхности.

### **1.7. Визуализация результатов: стилизёр и сборщик поверхности**

Для визуализации полученных в процессе ООС данных используются процедуры: “сборщик” поверхности, который из сегментов строит реальную поверхность, и “стилизёр” (stylizer), создающий гипотетическую поверхность, на которой атомы изображаются схематично в виде полусфер.

При изучении поверхности тела в атомном масштабе часто достаточно иметь информацию только о координатах атомов. В подобных случаях подмена реальной поверхности стилизованной вполне оправдана так как, во-первых, приводит к существенной экономии (в 50 и более раз) памяти компьютера, а, во-вторых, значительно сокращает время графических построений.

Процедура сборки реальной поверхности работает достаточно просто. Располагая минимальными и максимальными  $x$ ,  $y$ -координатами особенностей цепочки, сборщик предлагает указать ту часть (окно) отсканированной поверхности (всё изображение может оказаться слишком большим, что вызовет определённые неудобства в работе), которую следует построить. После этого он просматривает цепочку в поисках особенностей, латеральные координаты которых лежат в пределах указанного окна. Находя очередную подходящую особенность, сборщик помещает её сегмент в соответствующую позицию строящегося изображения.

В процессе сборки, используя интерполированные калибровочные коэффициенты, вычисляемые по значениям в сетке ближайшим к текущему положению сегмента, производится коррекция этого положения, а также исправление диспропорции и косости<sup>27</sup> изображения в самом сегменте. В случае, когда особенности поверхности настолько велики, что сегменты оказываются заметно искажены нелинейностью и кауплингом манипуляторов, исправление изображения выполняется в каждой точке сегмента с использованием интерполированных калибровочных коэффициентов, вычисляемых по значениям в сетке ближайшим к данной точке. Заметим, что подобным образом может быть скорректировано любое изображение, сосканированное обычным путём.

В тех местах, где сегменты соседних особенностей укладываются с перехлёстом, рельеф усредняется. Однако встречаются случаи, когда из-за погрешностей разница высот на границе смежных сегментов может оказаться большой, что вызовет появление на изображении характерного паттерна. Для того чтобы избавиться от подобного артефакта перед усреднением необходимо попытаться исправить дрейф в сегменте. Если же после коррекции паттерн всё ещё присутствует в изображении, то следует, используя критерий наименьших квадратов, выполнить более сложную подгонку сегментов, обеспечивающую плавный переход между ними. Наипростейшим способом удаления небольшого паттерна является усреднение реконструированного рельефа в тех точках изображения, среди ближайших соседей которых есть точки с отличным числом усреднений сегмента.

### **1.8. Специфика сканирования разупорядоченной поверхности. Прямое распознавание особенностей**

Процедура распознавания, использовавшаяся ранее, хорошо “справляется” с разупорядоченными поверхностями, в которых разброс особенностей по высоте невелик. В тех случаях, а их на практике большинство, когда данное условие не выполняется, применяется безитеративная процедура распознавания, когда для обнаружения основания особенности не требуется проводить вертикальное “сканирование” рельефа. Прямое распознавание поверхности осуществляется за два прохода, путём поиска обобщённых седловых точек рельефа с последующей их отбраковкой, при этом положение горизонтальной плоскости разреза определяется индивидуально для каждой особенности в локальном скане.

Седловая точка рельефа это точка на поверхности, проведя через которую горизонтальную секущую плоскость, можно образовать основание особенности. В качестве координат положения особенности используются координаты центра тяжести тела, ограниченного измеряемой поверхностью и секущей плоскостью. Седловая точка рельефа имеет две пары “отводов”, составляющие каркас седла: основную и дополнительную. Точки, принадлежащие основной паре, лежат на склонах смежных особенностей, а точки, принадлежащие дополнительной, – в промежутке между ними. Для холмов основные отводы расположены выше дополнительных, для ям – наоборот. Основные и дополнительные отводы чередуются между собой, если посмотреть на седловую точку сверху.

Расширяя определение седловой точки, можно перейти к понятию обобщённой седловой точки, у которой хотя бы один из основных отводов расположен выше дополнительных, а другой – не ниже уровня седловой точки. К обобщённой будем относить также и вырожденную седловую точку, у которой один или оба дополнительных отвода расположены на уровне седловой точки. Таким образом, обобщённые седловые точки позволяют обнаружить одиночно стоящие объекты, в непосредственной близости от которых

нет других объектов сходного с ними типа, а также различать объекты, расположенные на других объектах одного с ними типа.

Горизонтальный размер отводов задаёт окрестность седловой точки, он принимается одинаковым для основной и дополнительной пар. Геометрия отводов на отрезке между его кончиком и седловой точкой – безразлична. Совокупность определённых выше седловых точек, получаемая всевозможными поворотами вокруг проходящей через седловую точку вертикальной оси, образует полное множество седловых точек.

Таким образом, просматривая построчно изображение поверхности, и, анализируя окрестность каждой его точки на предмет отыскания какой-либо седловой точки из полного множества, создаётся список всех седловых точек изображения. Каждая седловая точка представлена в списке латеральными координатами.

Далее в полученном списке находится седловая точка, имеющая наибольшую координату  $z$  в случае, когда под особенностями понимаются холмы, и наименьшую, если особенностями являются ямы. После этого данная седловая точка удаляется из списка.

Каждый отвод основной пары обнаруженной седловой точки определяет точку, лежащую на, либо внутри контура некоторой особенности, а координата  $z$  седла – положение плоскости разреза. На следующем шаге выявляется контур основания особенности так, как это было описано в параграфе 1.4.

Если основание найденной особенности имеет площадь, превышающую установленное пороговое значение, и латеральные координаты ни одной из ранее распознанных особенностей не принадлежат данному основанию, то вычисляются координаты центра тяжести особенности, которые затем добавляются к списку распознанных особенностей. После этого найденная особенность удаляется из изображения.

На последнем шаге выполняется фильтрация оставшихся седловых точек: из списка убираются те седловые точки, координаты отводов которых оказались лежащими внутри либо на границе найденного основания особенности.

При ООС разупорядоченной поверхности характерным моментом является переход от фиксированного размера сегмента к переменному (размер сегмента для каждой особенности определяется индивидуально при распознавании апертуры), а также уменьшение шага сканирования в случае, когда после достижения апертурой максимального размера среди соседей отсутствует подходящий кандидат на роль следующей особенности цепочки.

На Рис. 12 представлен результат виртуального сканирования разупорядоченной наноструктурированной поверхности алюминия. Виртуальное сканирование выполнено в режиме заполнения окна  $(1.5 \times 1.5)$  мкм<sup>2</sup>, способ связывания – обход затравки с присоединением. Исходное изображение было получено на АСМ в тэппинг моде. Изображение на Рис. 12 и исходное изображение – тождественны. Поскольку разброс размеров особенно-

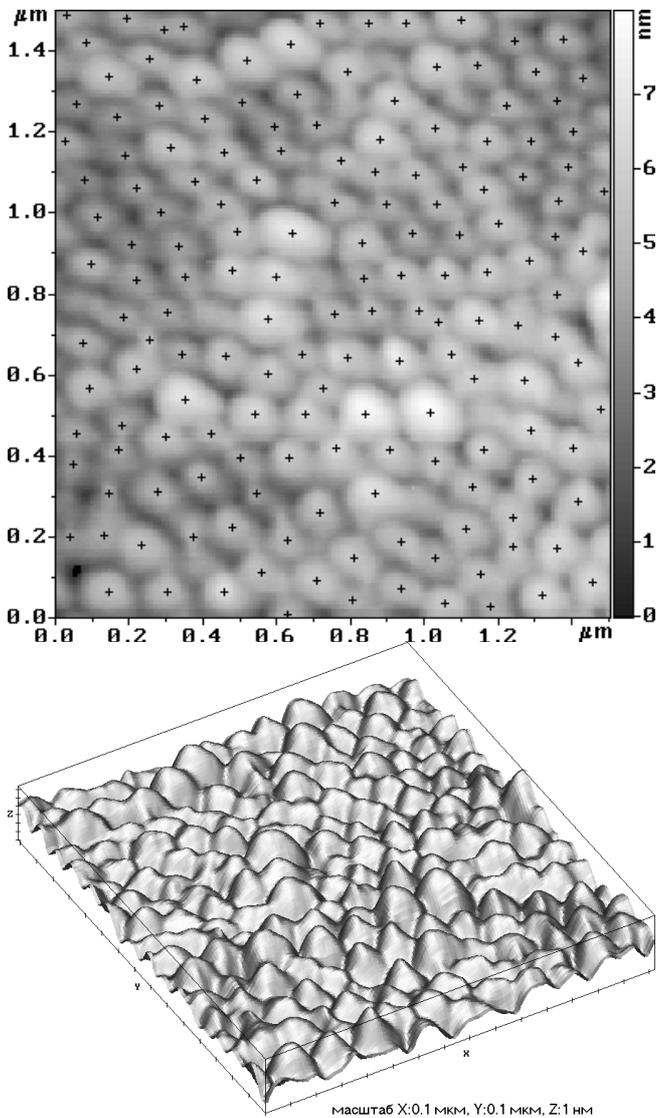


Рис. 12 Реконструкция разупорядоченной наноструктурированной поверхности алюминия. Способ связывания: обход затравки с присоединением. Знаком “+” обозначены позиции распознанных особенностей (холмов). Число подстроек апертуры: 52. Исходный, средний и максимальный размеры стороны апертуры составили 69, 69 и 79 пикселей, соответственно (1 пиксел приблизительно равен  $72 \text{ \AA}$ ). Размер сегмента фиксированный ( $45 \times 45$ ) пикселей<sup>2</sup>. Скорость распознавания: 1.9 особенностей/с.

“Рваные” края на приведённом изображении указывают на то, что изображение состоит из сегментов. Объём полученных данных равен 4.05 Мбайт, что приблизительно в 13 раз превосходит объём, занимаемый исходным изображением. Рис. 16 отражает связи в полученной цепочке и её структуру: ориентацию, длину, общее



Рис. 13 “Паутина” – траектория “перемещения зонда” от одной особенности к другой в процессе построения цепи. Наличие петель в цепочке указывает на то, что одна и та же особенность на разупорядоченной поверхности не всегда “видна” в смежных апертурах. Пунктирной линией показаны границы заполняемого окна.

стей в латеральной плоскости оказался не слишком велик, при сканировании использовался фиксированный размер сегмента. Наличие в исходном изображении нитей (видны при увеличении) никак не повлияло на результаты распознавания. На Рис. 13 показано, как связаны отдельные особенности в полученной цепи (сравни с Рис. 5а). Характерные для разупорядоченной поверхности апертура и сегмент приводятся на Рис. 14.

Рис. 15 иллюстрирует связывание особенностей на том же участке разупорядоченной поверхности алюминия посредством

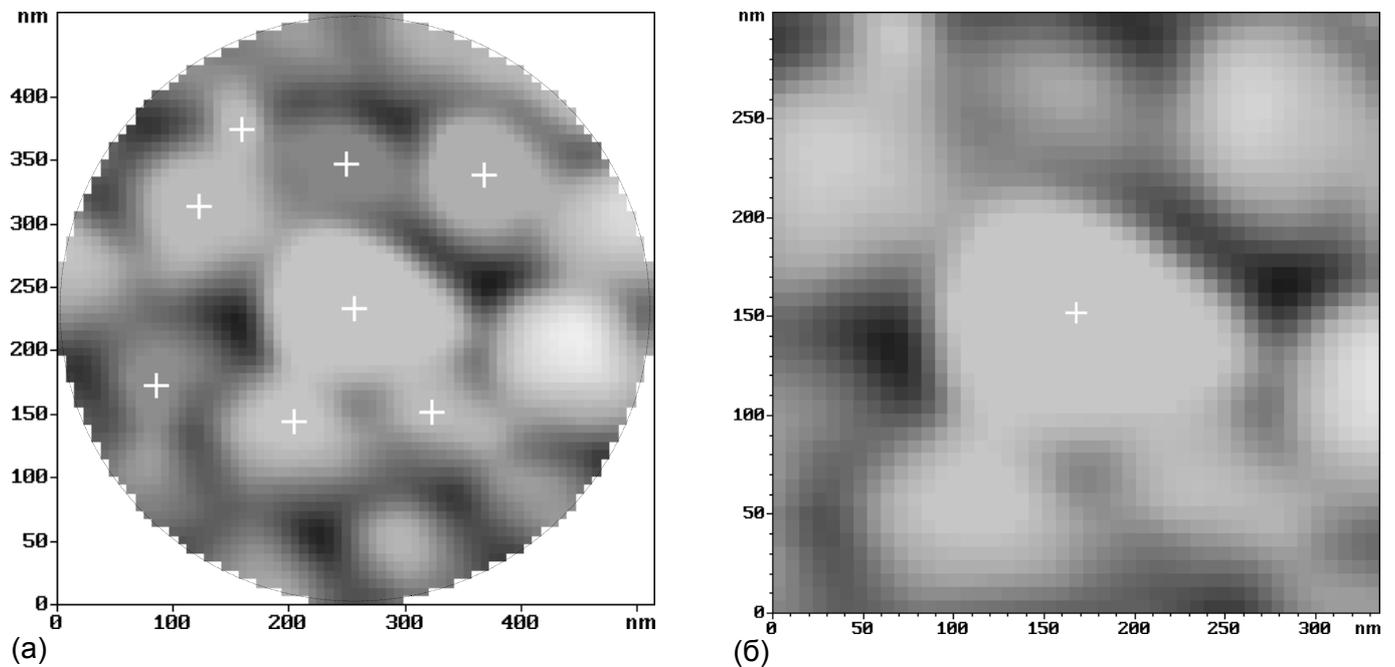


Рис. 14 Типичный вид (а) апертуры и (б) сегмента разупорядоченной поверхности. Для каждой особенности положение горизонтальной плоскости разреза определяется индивидуально. Минимальное основание особенности составляет 5 пикселей. Среднее число пикселей в основании особенности: 73.

количество и места переключения квазиistroк. Однако фактическая траектория, по которой перемещался зонд от одной особенности к другой так, чтобы обеспечить правильное связывание, выглядит значительно сложнее (см. Рис. 17, сравни с Рис. 11).

На Рис. 18 приведены результаты виртуального сканирования полностью разупорядоченной поверхности углеродной плёнки, осаждённой из плазмы.<sup>†</sup> Связывание особенностей выполнено посредством использования вспомогательных квазиistroк, окончание сканирования наступило после того, как было полностью заполнено задаваемое в начале работы окно размером  $(2.7 \times 2.7)$  мкм<sup>2</sup>.

В отличие от поверхности алюминия поверхность углеродной плёнки значительно более развитая, помимо холмов (углеродных кластеров) содержит и ямы (межкластерные пространства), имеет большую дисперсию как размеров самих особенностей, так и расстояний между ними, что нашло отражение в более сложном строении цепи (см. Рис. 19) и сети перемещений (см. Рис. 20). Объём памяти, занимаемый полученной цепочкой, составляет 2.29 Мбайт, что приблизительно в 13 раз больше объёма исходного изображения.

Следует обратить внимание на то, что непосредственное использование в качестве координат привязки зонда относительно просто выявляемых на изображении локальных максимумов (минимумов) рельефа чревато возникновением ошибок. Причина заключает-

<sup>†</sup>Образец изготовлен А. Е. Бочкановым и А. Г. Кириленко (НИИФП).

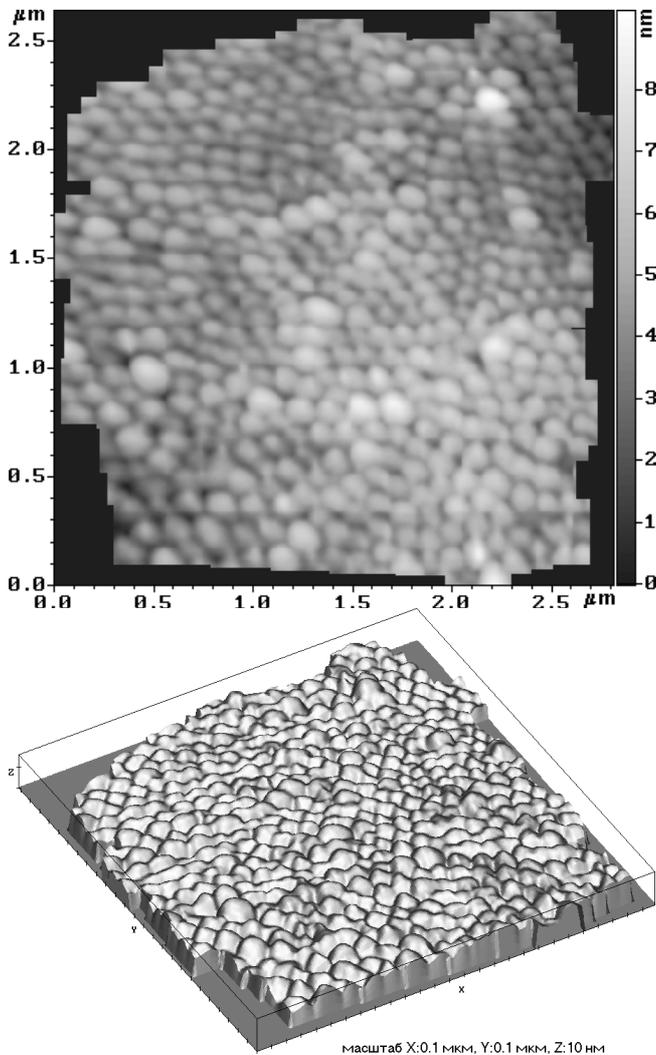


Рис. 15 Реконструкция разупорядоченной поверхности алюминия. Связывание выполнено с использованием вспомогательных квазиistroк. Число подстроек апертуры: 57. Исходный, средний и максимальный размеры стороны апертуры составили 69, 73 и 111 пикселей, соответственно. Размер сегмента фиксированный (45×45) пикселей<sup>2</sup>. Скорость распознавания: 1.7 особенностей/с.

менее, путём “травления” рельефа можно перейти от координат экстремума особенности к координатам её центра тяжести.

Предположим, что в качестве особенностей будут выступать холмы, соответственно, экстремумом будет являться локальный максимум рельефа. Для выполнения упомянутого выше перехода строится контур: среди соседних точек контура каждый раз выбирается та, что имеем максимальную высоту. После чего найденная точка удаляется (“вытравливается”) из изображения. В качестве первой точки контура берётся текущий локальный максимум изображения. Процесс продолжается до того момента, пока в качестве следующей точки растущего контура не попадёт какой-либо другой локальный максимум

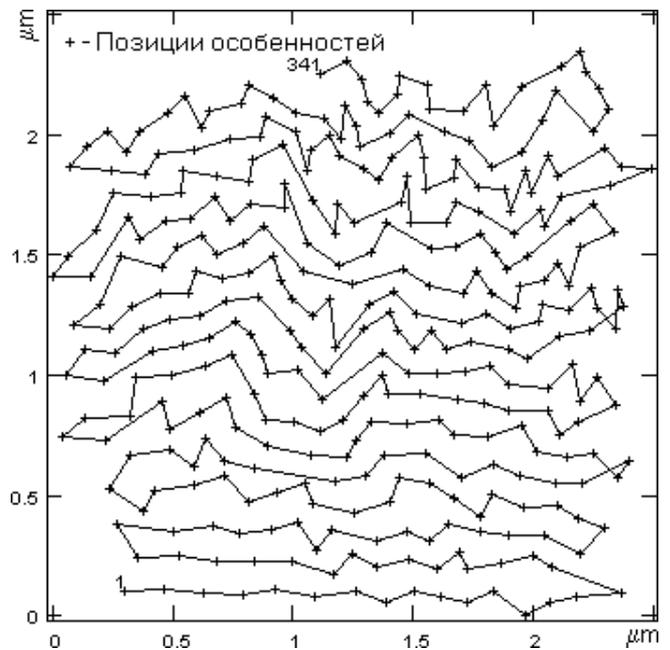


Рис. 16 Структура цепи или “скелет” разупорядоченной поверхности. Можно видеть последовательность связывания особенностей, длину и ориентацию квазиistroк, места переключения квазиistroк.

ся в том, что загрязнения и небольшая модификация поверхности образца и иглы в процессе сканирования приводят к зашумлённости изображения и к нестабильному его воспроизведению. В результате положение максимума оказывается плохо определённым от скана к скану, что вызывает скорое появление ошибок связывания и характерный паттерн на сегментном изображении. Повторное сканирование в подобных случаях, как правило, мало эффективно. Тем не

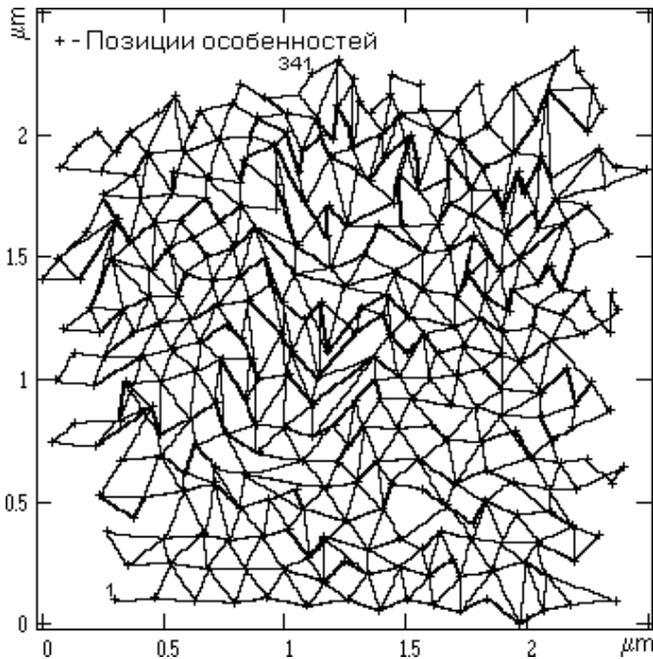


Рис. 17 “Сеть” – траектория “перемещений зонда” при связывании. Из-за наложения линий друг на друга часть перемещений не видна.

Определённые трудности при сканировании разупорядоченной поверхности связаны с вычислением локального тренда. Вообще, данная задача требует нетривиального решения. Дело в том, что положение средней плоскости наклона поверхности в апертуре и в сегменте – разные, в силу того, что апертура и сегмент охватывают участки рельефа разных размеров. Причём апертура, строго говоря, может и не содержать полностью всего того рельефа, который вмещает в себя сегмент (здесь имеется в виду расположенная на периферии апертуры часть внешней окрестности особенности).

Разность в определении средней плоскости приводит к ошибкам в определении координат особенностей, которые подчас могут быть настолько значительными, что вызывают ошибки связывания. Указанные трудности в основном проявляются на сильно развитых поверхностях, где резкие изменения рельефа происходят на очень малых площадях, а большая часть достаточно мелких по отношению к этим перепадам особенностей лежит на крутых склонах.<sup>50</sup>

Данный класс поверхностей не характерен ни для нанотехнологии, ни для СЗМ высокого разрешения, объектами рассмотрения которых главным образом являются плоские атомарно-гладкие поверхности. Вообще говоря, метод СЗМ, как таковой, даёт неадекватные результаты на поверхности с большими резкими перепадами рельефа, поскольку в процесс измерения вовлекается боковая поверхность зонда, а размеры кончика не всегда позволяют достичь зондом дна глубоких расщелин.

изображения.

Таким образом, в полученном контуре положению точки с минимальной высотой соответствует позиция седловой точки, а сама высота будет являться высотой горизонтального разреза особенности. Локальные максимумы в начале и в конце контура, это ничто иное как основная пара отводов седловой точки.

Далее распознавание продолжается по такому же алгоритму, как и в случае непосредственного поиска седловых точек. Способ травления экстремумов рельефа имеет приблизительно ту же производительность и надёжность распознавания при тех же вычислительных затратах, что и способ прямого поиска седловых точек.

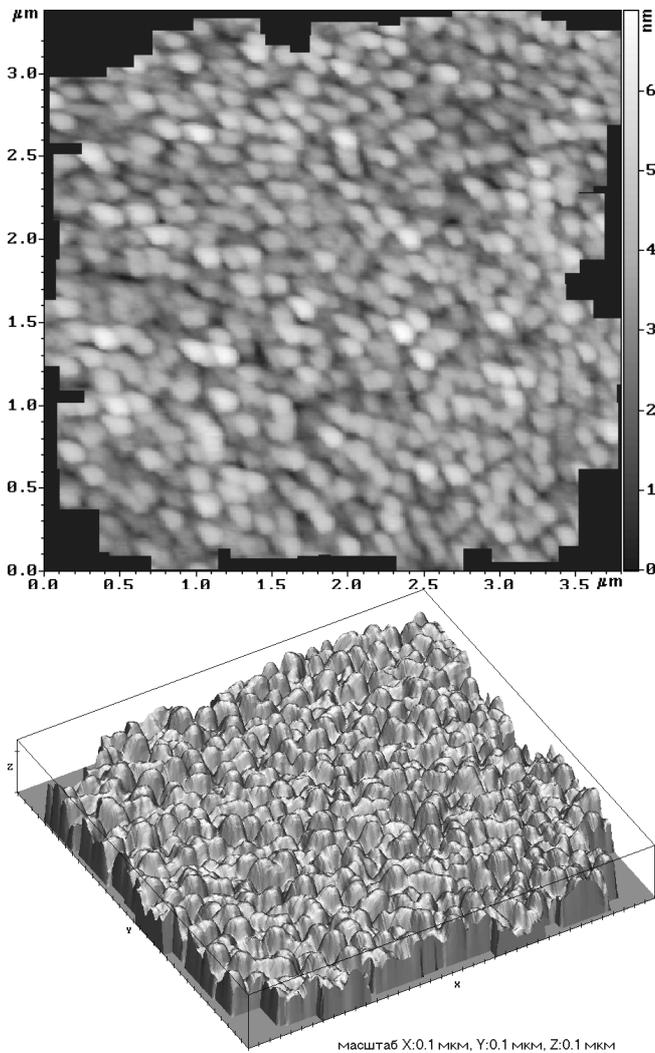


Рис. 18 Реконструкция полностью разупорядоченной поверхности углеродной плёнки. Используемые особенности – холмы (кластеры углерода). Связывание выполнено посредством применения вспомогательных квазистрок. Число подстроек апертуры: 67. Исходный, средний и максимальный размеры стороны апертуры составили 55, 61 и 101 пиксел, соответственно (1 пиксел приблизительно равен  $126 \text{ \AA}$ ). Размер сегмента фиксированный ( $35 \times 35$ ) пикселов<sup>2</sup>. Скорость распознавания: 2 особенности/с.

кой к ней поверхности позволяет в процессе работы обходиться без компенсирующего средний наклон поверхности постоянного движения точного Z-манипулятора, ровно, как и без периодического возвращения точного Z-манипулятора в середину его диапазона посредством ещё более медленного грубого Z-манипулятора. Использование аппаратных средств для устранения глобального тренда должно привести к увеличению производи-

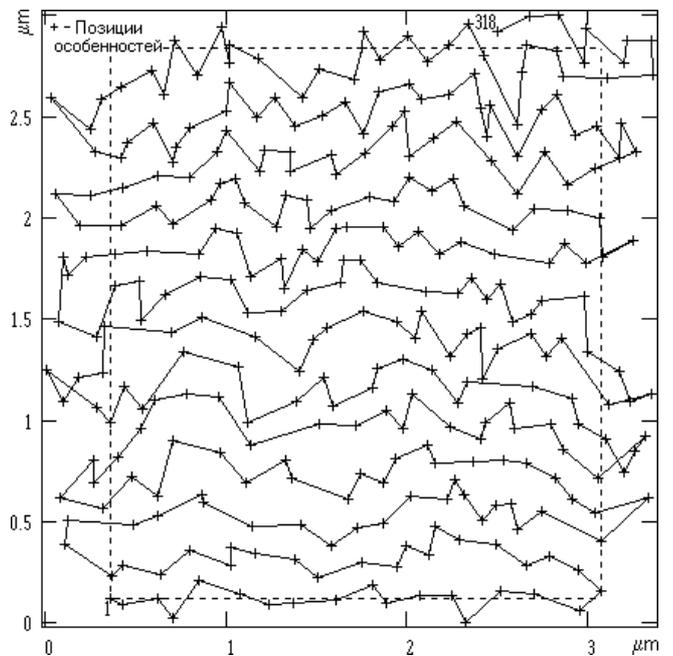


Рис. 19 Структура цепи полностью разупорядоченной поверхности углеродной плёнки. Пунктирной линией показана граница заполняемого окна ( $2.7 \times 2.7$ ) мкм<sup>2</sup>.

Помимо локального тренда существует ещё и тренд глобальный. Глобальный тренд также невозможно определить точно, поскольку с ростом сканируемой обычным способом площади возрастает доля погрешности, вносимая дрейфом (здесь предполагается, что нелинейность и взаимовлияния манипуляторов скорректированы). Причём вычитание глобального тренда лучше всего производить аппаратно, предусмотрев в конструкции СЗМ-наноитографа пару пьезоэлементов, обеспечивающих вращение плоскости образца вокруг некоторого шарнира. Аппаратное устранение тренда перед сканированием атомарно-гладкой или близ-

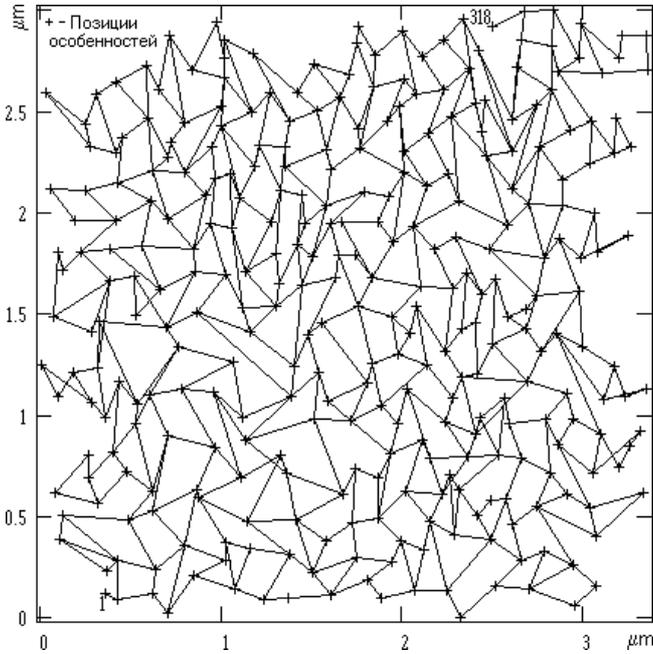


Рис. 20 Сеть перемещений на полностью разупорядоченной поверхности углеродной плёнки.

режиме из-за наличия шумов и нестабильностей существует вероятность того, что подобная “плавающая” особенность, обнаруженная в апертуре, может оказаться пропущенной в сегменте (пропуск особенности в апертуре опасности для связывания не представляет). Чтобы не допустить этого, порог при распознавании соседей текущей особенности в апертуре следует поднять на величину имеющей место неопределённости.

Дальнейшее повышение надёжности обнаружения обеспечивается введением дополнительных признаков, самым простым из которых является высота особенности. На первый взгляд из признаков – высота и площадь основания особенности можно образовать новый признак – объём особенности, однако, этот признак – не надёжен, поскольку, для одного и того же порогового значения объёма возможно появление особенности с большой площадью основания и малой высотой/глубиной либо с большой высотой/глубиной и малой площадью. Таким образом, использование признака объём уменьшает эффективность и надёжность метода сканирования, так как в первом случае особенность требует больших сегментов, а во втором приближается к шумовому пику или сбою сканирования типа нить.

В реальном режиме для повышения надёжности распознавания области с недостаточно совершенной компактностью отбрасываются. Дело в том, что ошибки в определении локального тренда поверхности могут вызывать большие погрешности в координатах тех особенностей, которые имеют малую величину компактности.

Описанные выше методики прямого выявления особенностей поверхности через поиск седловых точек рельефа и травления экстремумов рельефа являются двухпроход-

тельности микроскопа-нанолитографа.

При сканировании упорядоченной поверхности основным признаком, по которому выполнялась селекция особенностей годных для привязки зонда, являлась площадь основания особенности. Причём в реальном режиме пороговый уровень брался с запасом, гарантируя надёжность селекции. При сканировании разупорядоченной поверхности для любого заданного порога всегда найдутся особенности, площадь основания которых окажется лежащей вблизи этого порога.

В виртуальном режиме данное обстоятельство не приведёт ни к каким “катастрофическим” последствиям. В реальном же

ными, что продиктовано необходимостью получения достоверного распознавания в реальном режиме. При первом проходе выявляются и отбрасываются те особенности, которые в присутствии шумов, дрейфов и/или сбоя сканирования могут быть пропущены либо могут содержать большие погрешности в координатах. На втором проходе выполняется распознавание и определение координат оставшихся “надёжных” особенностей.

При использовании в качестве особенностей одновременно и холмов и ям дополнительным признаком может быть совпадение типа особенности – холм или яма. Идентифицирующим особенность признаком может служить её объём, структура ближайших соседей, возможны и более сложные в вычислительном отношении приёмы, основанные на корреляционном анализе, выделении признаков, характеризующих форму контура особенности (здесь, как пример, можно указать упомянутую ранее компактность) и т. п. Если вместе с измерением рельефа поверхности получать в условиях высокого вакуума спектроскопические данные,<sup>64</sup> несущие информацию о локальном химическом составе поверхности или её локальных механических свойствах, то найденные сведения также могут служить отличительными признаками особенностей при распознавании. К перспективным для использования в ООС методам распознавания особенностей следует отнести нейросетевые алгоритмы,<sup>65,66</sup> получившие новое развитие в последние годы.

## 2. ТЕХНИКА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЗОНДА ПО ЛОКАЛЬНЫМ ОСОБЕННОСТЯМ

### ПОВЕРХНОСТИ

Рассматриваемые ниже приёмы прецизионного позиционирования могут найти применение в нанолитографии при формировании небольших кластеров,<sup>28,67</sup> при манипуляциях с отдельными молекулами,<sup>68</sup> атомами<sup>69,70</sup> и наночастицами,<sup>31</sup> при различного рода модификациях поверхности,<sup>71</sup> а также могут быть востребованы в кристаллографии, в нанометрологии, в молекулярной биологии и в других областях науки и техники. На базе предложенных решений возможно осуществить автоматизированный СЗМ-контроль элементов нанoeлектроники, таких как одноэлектронный транзистор,<sup>30,72</sup> транзистор с высокой подвижностью электронов, биполярный транзистор с гетеропереходом, лазеры на гетероструктурах,<sup>73</sup> в которых критические отклонения размеров от номинальных значений при изготовлении составляют несколько нанометров.

#### 2.1. Перемещение зонда по сетке особенностей в поле точного манипулятора.

##### Маршрутизатор

В зависимости от решаемой экспериментальной или технологической задачи позиционирование зонда микроскопа-нанолитографа может быть выполнено двумя способами. В первом из них необходимо предварительное сканирование поверхности, а во втором – нет. Соответственно позиционирование по второму способу требует существенно меньших затрат времени, фактически, оно представляет собой процесс образования заправки, описание которого уже было дано в параграфе 1.5.3.

В первом способе позиционирование осуществляется только в пределах отсканированного участка поверхности. Для выполнения перемещения специальная процедура “маршрутизатор” из всей цепочки выделяет такую подцепочку (прокладывает маршрут), которая соединяет текущую позицию зонда с конечной желаемой любой задаваемой экспериментатором траекторией. Далее, производя на каждом шаге пути сканирование апертуры и распознавание ближайших соседей, маршрутизатор перемещает зонд в ту позицию, которая наилучшим образом соответствует данным выбранного маршрута. Процесс выполняется до тех пор, пока зонд не достигнет конечной особенности траектории. Таким образом, реальный путь, проходимый зондом, представляет собой аппроксимацию заданной траектории ломаной линией, пролегающей через центры тяжести особенностей, а сами особенности в процессе перемещения играют роль реперных точек.

Если затем потребуются выполнить более точное позиционирование в пределах окрестности конечной особенности, то оно осуществляется перемещением зонда относительно положения этой особенности. Промежуток времени, в течение которого зонд может находиться в стороне от особенности, соответствует интервалу  $T$  между привязками.

## 2.2. Перемещение зонда в поле грубого манипулятора

В существующих СЗМ грубый XY-манипулятор,<sup>74,75,76,77,78,79,80</sup> обеспечивая в пределах собственного максимального поля (область на поверхности доступная для исследования после установки образца) исходное размещение точного, выполняет перемещение с некоторым достаточно крупным шагом, по величине обычно не превышающим рабочего диапазона точного. Направление, величина, скорость и шаг перемещения грубого манипулятора задаются оператором вручную.

Из-за ошибок, связанных в первую очередь с неравномерностью шага грубого позиционера, действием гистерезиса, термодрейфа, крипа и кауплинга, а также с субъективным фактором, привнесённым установками оператора, невозможно точно переместиться из одной точки доступного поля на поверхности образца в любую другую, лежащую вне текущего диапазона точного сканера (здесь предполагается, что нелинейности точного сканера скорректированы, а негативное действие дрейфа и крипа устранено). Таким образом, в большинстве имеющихся на сегодняшний день приборов нельзя точно определить взаимное положение сканов, выполненных точным манипулятором микроскопа в разных местах поля грубого и, следовательно, правильно составить из них целое изображение.

Необходимость в таком способе позиционирования зонда, где бы указанные выше недостатки были бы устранены, возникает в нанолитографии с характерными размерами элементов от нескольких ангстрем до нескольких десятков нанометров. В настоящее время для исследования и проведения технологических процессов доступны поверхности площадью в сотни квадратных миллиметров, где возможны атомарно-гладкие участки микронных размеров. Поэтому для получения больших интеграций элементов на одной подложке необходимо уметь точно перемещать зонд в пределах поля грубого позиционера, правильно связывать отдельные сканы, выполненные в разных местах доступной поверхности, иметь возможность многократного возвращения в любое место на поверхности для выполнения следующей технологической операции.

Для решения указанных проблем грубый манипулятор требуется снабдить линейными XY-датчиками положения и образовать замкнутую следящую систему наподобие измерительной системы точного манипулятора.<sup>11-17</sup> Основное отличие этих систем будет состоять в типе используемых датчиков. Датчики положения точного манипулятора обладают высокой чувствительностью и малым диапазоном. Датчики положения грубого манипулятора, напротив, имеют невысокое разрешение, но зато большой диапазон измеряемых перемещений. Как правило, датчики грубого манипулятора строятся на базе интерферометра, способного работать в долях полосы.

На практике, использование двух следящих систем: одной для грубого позиционера,

другой для точного приводит к резкому удорожанию оборудования, а также к другим проблемам (калибровка, юстировка, взаимовлияние). Поэтому, жертвуя разрешением, строят систему, в которой один и тот же интерференционный датчик обслуживает как точный, так и грубый позиционеры. Примером данного подхода может служить широкопольный микроскоп Molecular Measuring Machine<sup>5,79</sup> или сокращенно М<sup>3</sup>, разработанный в Институте эталонов и технологии США (NIST).<sup>81</sup>

Необходимо отметить, что данный микроскоп является уникальным, очень дорогим измерительным устройством, позволяющим производить позиционирование зонда на длине 50 мм с погрешностью  $\pm 1$  нм. Для обеспечения высоких точностных характеристик элементы прибора смонтированы в корпусе, изготовленном из Зеродура. Микроскоп помещён внутрь охватывающих друг друга оболочек, выполняющих функции: пассивной сейсмической виброизоляции, акустической изоляции, вакуумной камеры (остаточное давление  $10^{-7}$  Па), активной сейсмической виброизоляции, камеры термостабилизации (точность поддержания температуры  $\pm 1$  мК).

Измерительная часть прибора представляет собой метрологический короб из Зеродура с укрепленным в нём образцом. В корпус встроены зеркала дифференциальных интерферометров. Относительно образца по направляющим движутся XY-каретки, на которых смонтирован трубчатый манипулятор с зондом и остальные части интерферометров: лазеры, зеркала, призмы и приёмники излучения. Каретки приводятся в движение шаговыми двигателями.

Перечислим недостатки системы М<sup>3</sup>:

1. Высокая стоимость и сложность изготовления метрологического короба (жёсткие требования к прямолинейности и ортогональности направляющих, а также к используемым материалам);
2. Дорогой и сложный в изготовлении грубый позиционер (направляющие, каретки, шаговый двигатель);
3. Большие затраты и технические сложности в обеспечении термо и виброизоляции;
4. Недостаточно высокое для СЗМ максимальное разрешение прибора (в сильной степени ограничено вибрациями по причине низкочастотных механических резонансов грубого позиционера, а также шумами интерферометрических датчиков положения);
5. Высокая стоимость и сложность интерференционных датчиков, большая трудоёмкость юстировки оптической системы.

Принимая во внимание сказанное, можно сделать вывод о том, что на сегодняшний день не создано достаточно простых и доступных широкому кругу исследователей измерительных систем, способных выполнять точные перемещения зонда на большом поле.

### 2.2.1. Связанное движение точного и грубого манипуляторов

Вначале следует отметить, что предлагаемый здесь способ позиционирования<sup>24,82</sup> главным образом предназначается для совместного использования с изложенным в первой главе способом ООС, базирующемся на локальном распознавании и связывании особенностей поверхности. Однако может применяться и самостоятельно, для чего обычную программу управления микроскопом следует дополнить процедурой привязки (см. параграф 1.5.1).

Вместо программной привязки возможна аппаратная. Впервые идея привязки зонда сканирующего микроскопа к особенности поверхности была высказана в работе Поля и Моллера<sup>83</sup> более 10 лет назад. Авторы предлагали возбудить в горизонтальной плоскости круговое движение зонда и снабдить микроскоп специальной схемой, которая по изменению туннельного тока вырабатывала бы управляющие напряжения для точного XY-позиционера так, чтобы зонд самостоятельно “находил” и “прикреплялся” к локальному экстремуму поверхности. Микроскоп, названный “следящим”, помимо привязки к локальному минимуму или максимуму был способен обнаруживать профили максимального наклона и равной высоты, а после доработки до потенциометра – эквипотенциали и силовые линии электрического поля.

Преимущество программной привязки состоит в возможности применить сложные алгоритмы обработки, а также использовать в качестве особенностей отдельные молекулы и атомы, что сделать в системе Поля-Моллера трудно из-за шумов и ограничений по разрешению (радиус круга развёртки должен быть мал по сравнению с размерами исследуемых структур). Недостатком описанной аппаратной привязки является также то, что в процессе её работы не происходит измерения рельефа в окрестности особенности, т. е. данный вид привязки может использоваться только для позиционирования. В целом, для правильного позиционирования не принципиально то, как фактически производится привязка, важно только, чтобы зонд микроскопа был надёжно “прикреплен” к особенности поверхности во время выполнения перемещения грубым манипулятором.

Далее ради определённости положим, что исследуемый образец закреплён на точном манипуляторе, а зонд микроскопа – на грубом. Для простоты рассмотрим одномерный случай (см. Рис. 21): пусть требуется переместить зонд из точки А в точку D.

Итак, в исходном состоянии (поз. 1, Рис. 21) зонд микроскопа расположен в точке А поверхности. Посредством точного манипулятора будем двигать его относительно поверхности в направлении точки D до тех пор, пока не дойдём до края диапазона (см. поз. 2 точка В). Если применяется обычное позиционирование, то выполняется поиск и захват особенности ближайшей к точке В; если же производится позиционирование по особенностям, то используется текущая особенность цепочки. Затем в направлении точки

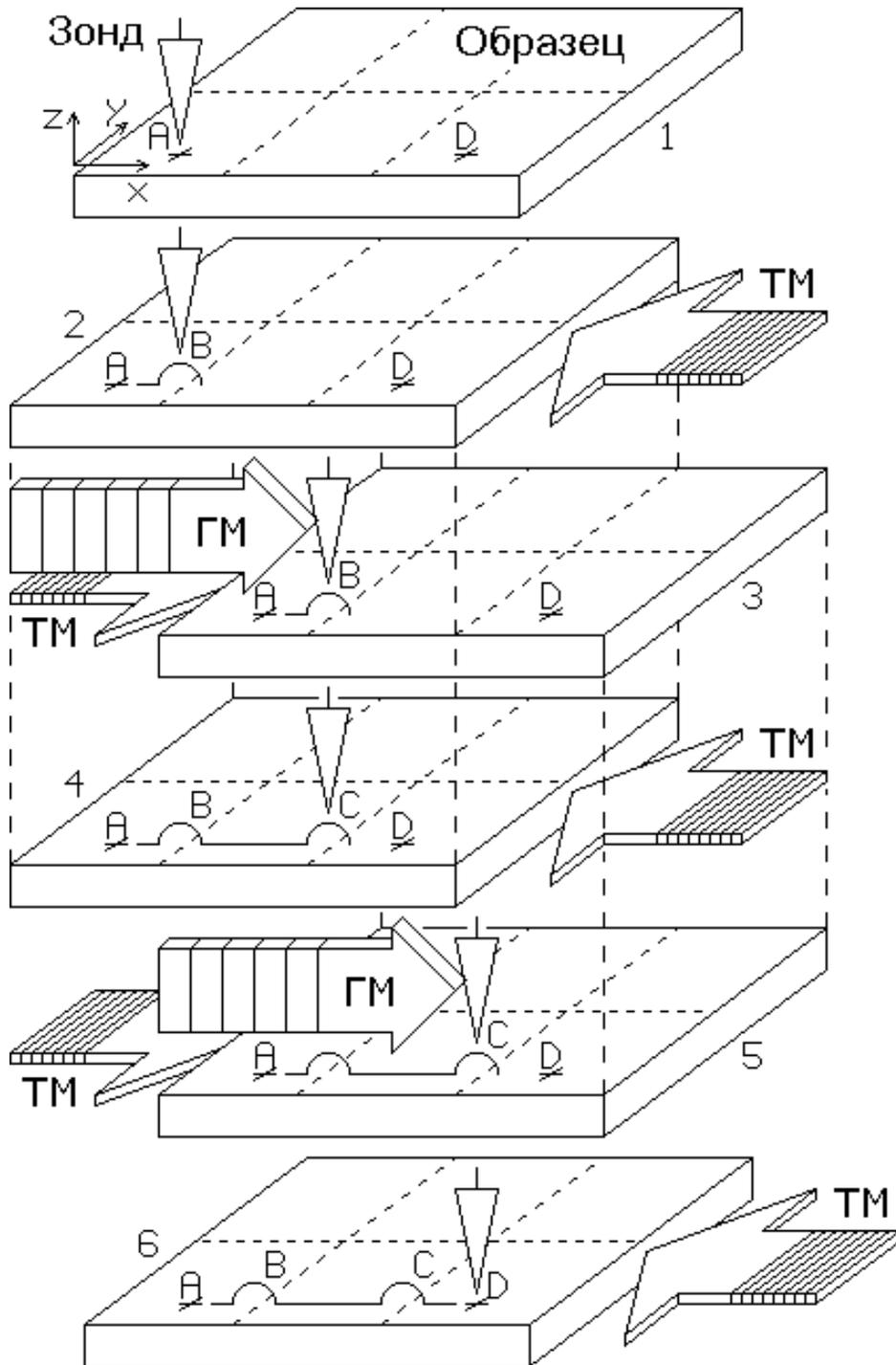


Рис. 21 Прецизионное перемещение зонда микроскопа из точки А в точку D на расстояние более одного диапазона точного манипулятора. Обозначения: ТМ – точный манипулятор, ГМ – грубый манипулятор. Пунктиром на поверхности образца показано разбиение поля грубого манипулятора на смежные диапазоны точного. Дужки в положениях зонда В и С символизируют особенности поверхности.

D делает шаг грубый манипулятор (поз. 3). Одновременно с этим движением происходит непрерывное циклическое выполнение процедуры привязки, которая посредством точного манипулятора стремится компенсировать возникшее рассогласование.

Далее перемещение грубого манипулятора, а вместе с ним и точного, продолжается до момента исчерпания диапазона точного манипулятора. Таким образом, совместное

передвижение позиционеров возвращает точному манипулятору возможность дальнейшего перемещения зонда вправо (относительно поверхности). После этого следует повторение выше перечисленных действий (см. поз. 4, 5), в результате которых зонд перемещается вправо по поверхности на один диапазон точного манипулятора и достигает точки С. Наконец, посредством точного манипулятора (поз. 6) зонд перемещается в заданную точку D.

Таким образом, всякий раз, когда зонд СЗМ достигает края диапазона точного манипулятора, в работу вступает грубый манипулятор. Его задача – переместить поле сканирования точного манипулятора в новое место на поверхности образца. Причём, при выполнении шага грубым манипулятором нельзя допустить потери зондом текущей особенности (смещение грубого позиционера является для процедуры привязки возмущающим воздействием), поскольку, в противном случае две смежные области на образце не могут быть корректно связаны.

Правильный выбор размера сегмента, величины шага и скорости перемещения грубого манипулятора исключает вероятность того, что в очередном цикле привязки зонд захватит вместо текущей особенности одну из её соседей. Величина шага грубого позиционера должна определяться размерами захваченной особенности, характерным расстоянием до ближайших особенностей, расположенных по направлению перемещения, а также скоростью дрейфа зонда микроскопа относительно поверхности. Скорость перемещения грубого позиционера должна быть ограничена настолько, чтобы процедура привязки успевала обнаруживать и компенсировать возникающие рассогласования. После выполнения шага грубым манипулятором необходимо дождаться окончания переходного процесса, моменту завершения которого соответствует установление величины рассогласования сравнимой с обычным дрейфом данного прибора.

Поскольку, направление движения и средний шаг грубого манипулятора известны заранее, то “связку” позиционеров можно двигать с большей скоростью, если перемещать точный манипулятор синхронно и с тем же шагом что и грубый. После каждого шага следует выполнить последовательность привязок, уточняющую положение зонда относительно особенности. Отметим, что среднеквадратическая погрешность перемещения грубого позиционера определяет минимальную по размеру особенность, которую можно использовать для привязки зонда.

Среди известных конструкций грубых позиционеров следует выделить три типа устройств: “шагающие”<sup>74,75,76</sup> (walker, louse), “ползущие”<sup>76,77</sup> (inchworm) и инерционные<sup>78</sup> (slider). Главным преимуществом всех трёх типов позиционеров по отношению к другим конструкциям является принципиально неограниченный диапазон перемещений. Анализ показывает, что наиболее подходящими для использования в описываемом способе следует считать шагающие позиционеры.

Ползущие позиционеры имеют приблизительно те же характеристики, но, будучи изначально одномерными устройствами, оказываются более громоздкими при создании двухмерных XY-конструкций. Грубые позиционеры инерционного типа, как правило, имеют невысокое разрешение и развивают большие ускорения. Из-за большей чувствительности к качеству и чистоте трущихся поверхностей они обладают существенно более неравномерным, плохо регулируемым шагом, а незначительный наклон позиционера может нарушить нормальную работу устройства. Как и ползущие, инерционные позиционеры часто способны перемещаться только в одном направлении.

### **2.2.2. Возможные погрешности и способы их устранения**

Любому типу грубого манипулятора в той или иной мере свойственны погрешности и нелинейности перемещения, обычно их абсолютные величины на порядки превосходят аналогичные параметры точных манипуляторов. Отличительной чертой предлагаемого способа является то, что на результаты размещения поля точного манипулятора в поле грубого погрешности и нелинейности последнего не влияют.

В процессе движения связки из-за непараллельности латеральной плоскости грубого шагающего манипулятора плоскости точного, z-составляющих термодрейфа и крипа, паразитных связей типа  $X \rightarrow Z$ ,  $Y \rightarrow Z$  обоих манипуляторов, а также нестабильностей в вертикальной плоскости грубого манипулятора происходит изменение координаты z зонда. Нестабильности в вертикальной плоскости, а также нежелательное вращение в плоскости образца могут возникать в моменты электростатической фиксации или освобождения опор. Причина заключается в микронеровностях и загрязнениях, приводящих к проскальзыванию.

Следует отметить, что при размещении поля точного манипулятора в поле грубого манипулятора изображение, получаемое методом ООС, не может быть искажено в принципе указанным изменением вертикальной координаты. Изображения, получаемые посредством обычного сканирования, напротив, в процессе сборки целого изображения нуждаются в коррекции. Поскольку, изменение вертикальной координаты может быть измерено, то коррекция выполняется простым введением поправки по высоте.

Вращение в плоскости образца приводит к неправильному взаимному положению связанных областей только в микроскопах, где сканирование производится иглой. В этом случае процедура привязки вместо сегмента должна выполнять сканирование апертуры, для того чтобы по изменению положений соседних особенностей в последовательности циклов привязок суметь выявить угол поворота.

Если угол поворота известен, то не составляет большого труда собрать из отдельных областей целое изображение путём поворота скана вокруг соответствующей особенности, игравшей роль привязки в процессе перемещения. Заметим, что привязка зонда к

особенности по апертуре занимает в несколько раз больше времени, чем по сегменту, поэтому ей имеет смысл пользоваться только тогда, когда к результатам сканирования действительно предъявляются высокие точностные требования.

Недостатком предложенного способа является увеличение времени позиционирования, рост которого происходит из-за необходимости выполнения локального сканирования и распознавания, а также из-за ограничений, накладываемых на величину шага и скорость перемещения грубого манипулятора.

В рассуждениях приведённых выше предполагалось, что скорость дрейфа зонда относительно поверхности много меньше скорости движения грубого манипулятора, и что за характерное время регулирования в цикле привязки дрейф не вызывает существенного смещения особенности. Однако при работе с предельными элементами поверхности – атомами, термодрейф становится значительно более заметным, и, поэтому, должен учитываться при выборе шага и скорости перемещения грубого манипулятора.

Определённые трудности при использовании шагающего грубого позиционера на атомарно-гладкой поверхности должны возникнуть в моменты фиксации и отпускания опор. Здесь, влияние нежелательных случайных подвижек может быть сведено на нет, если напряжение на электростатические зажимы подавать не скачком, а плавно, так чтобы следящие системы успевали компенсировать возникающие рассогласования.

В настоящее время не существует грубых шагающих манипуляторов способных выполнить позиционирование предложенным способом, используя атомы в качестве объектов для привязки зонда. Не существует также и быстродействующих точных манипуляторов способных успеть скомпенсировать погрешности, вносимые грубой ступенью. Однако сама задача является достаточно актуальной, особенно в сверхвысоковакуумных СЗМ и в СЗМ, охлаждаемых до низких температур, где точные манипуляторы имеют, как правило, очень маленькие поля сканирования. Возможно, что прогресс в области микроэлектромеханических систем позволит создать подобного рода устройства в ближайшем будущем.

### **2.3. Автоматический возврат зонда микроскопа в операционную зону**

Рассмотрим одно из полезных применений разработанного метода – автоматический возврат зонда микроскопа в операционную зону.<sup>24,25</sup> Данная функция необходима в СЗМ-экспериментах, в которых после какого-либо локального воздействия зондом на поверхность (механическое вдавливание, процарапывание, окисление, нагрев, испарение электрическим полем и т. п.) образец извлекается из микроскопа, подвергается обработке (нанесение плёнки, травление, отжиг и т. п.), а затем устанавливается обратно для того, чтобы увидеть какие изменения произошли с поверхностью в месте воздействия.

В указанных случаях для осуществления автоматического перемещения к месту воз-

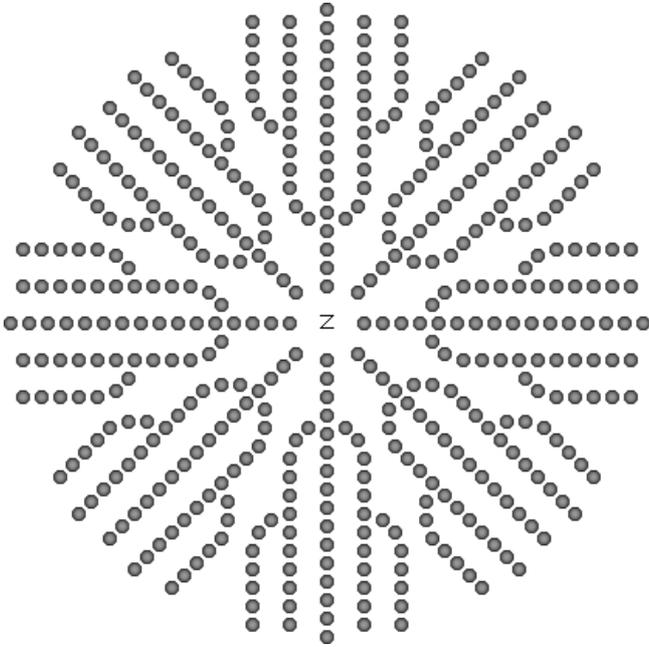


Рис. 22 Навигационная структура в виде системы сходящихся к зоне (обозначена буквой z) цепочек из особенностей.

действия необходимо на исходной поверхности образца изготовить разветвлённую систему сходящихся к операционной зоне цепочек из особенностей. На Рис. 22 представлен возможный вид такого рода структуры. Теперь достаточно после подвода захватить любую особенность структуры, задать (приблизительно) направление движения к зоне и дождаться момента, когда зонд самостоятельно “дойдёт” до последнего элемента цепи. Моменту прихода в зону соответствует отсутствие среди соседей следующей особенности (в данном режиме размер апертуры фиксирован).

Обобщая сказанное, можно предложить некоторую искусственно изготовленную на поверхности подложки структуру, связывающую между собой несколько технологических зон. Причём, если структура обладает иерархией размеров особенностей, то позиционирование можно сделать более точным и более оперативным, что важно, когда в качестве объектов технологии выступают отдельные атомы или молекулы. Дополнив описанный подход способностью выполнять точные перемещения зонда на большом поле грубого манипулятора, получаем вполне надёжный способ позиционирования рабочего органа нанолитографа.

#### **2.4. Автоматическое определение взаимного положения зондов в многозондовых микроскопах**

В реальном нанотехнологическом процессе применение СЗМ-литографа целесообразно проводить с использованием двух типов зондов: аналитических и технологических.<sup>84</sup> Аналитические зонды предназначены для выполнения измерений и контроля, а технологические для проведения воздействий на поверхность. Подобное разделение необходимо, поскольку в нанолитографическом процессе, как правило, происходит модификация кончика зонда: изменяется его радиус, форма и физико-химические свойства.<sup>85</sup>

В каждой группе также возможна специализация, например, аналитический зонд для измерения рельефа и аналитический зонд для выполнения спектроскопии; технологический зонд для локального воздействия электрическим полем и технологический зонд для механического вдавливания и т. п. Предлагаемая особенность-ориентированная методика позволяет осуществить связывание зондов, т. е. точное определение их взаимного по-

ложения. Последнее гарантирует возможность использования всей совокупности зондов над одними и теми же объектами, обеспечивая выполнение последовательности разных технологических операций разным инструментом.

Пусть необходимо связать один аналитический зонд и один технологический зонд. Сканируя аналитическим зондом и технологическим зондом некоторую область на поверхности, которая находится в пределах досягаемости и того и другого, получаем изображения поверхности, которые затем подвергаем распознаванию. Выявив на изображении, полученном с помощью технологического зонда, особенность поверхности, и найдя её на изображении, полученном с помощью аналитического зонда, определяем (грубо) величину рассовмещения систем координат данных зондов. Наконец, для того чтобы увеличить точность измерения, исключив влияние дрейфа и шума, выполняем / циклов скиппинга зондов (здесь вместо одного зонда и двух особенностей имеем одну особенность и два зонда).

Автоматическое связывание зондов необходимо также в высокопроизводительных многозондовых микроскопах<sup>86</sup> для правильной сборки целого изображения из фрагментов, получаемых при одновременном сканировании поверхности массивом зондов. Зонды можно связать в цепочку, переходя от одного к другому смежному с ним, используя каждый раз новую особенность в области перекрытия их полей сканирования, а можно, используя одну и ту же особенность, путём “передачи” её от одной пары смежных зондов к другой посредством грубого манипулятора и непрерывно повторяемой привязки зонда (см. параграф 2.2). Помимо связывания последний приём позволяет последовательно применять к любой особенности поверхности, а также к любой точке её окрестности любое количество аналитических и технологических зондов.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Одна из проблем, с которой пришлось столкнуться при реализации реального режима работы ООС, была связана с возникновением нестабильностей во время сканирования апертуры или сегмента. Нестабильности имели случайный характер и приводили к резкому ухудшению качества изображения, а иногда даже и к полному исчезновению картинки, появлению тренда несвойственного данному участку поверхности, мгновенному сдвигу всего изображения, инверсии рельефа и к некоторым другим искажениям. Поскольку эксперименты проводились на воздухе, то причина большинства наблюдавшихся нестабильностей связана в основном с наличием на поверхности некоторого адсорбционного слоя, главным образом воды.<sup>87</sup> Другими причинами являются: неопределённость структуры кончика механически срезанной иглы,<sup>85,88,89,90</sup> а также проникновение в систему внешних сейсмических<sup>1,18,40,91</sup> и акустических возмущений случайного характера.

Предложенный алгоритм способен автоматически выявить факт появления нестабильности и нейтрализовать её влияние путём повторного сканирования. Если нестабильность возникает в процессе скиппинга, то текущий цикл объявляется холостым, а результаты его измерений отбрасываются. Повторное сканирование выполняется до тех пор, пока не будет получено изображение приемлемого качества и/или изменение скорости дрейфа не окажется меньше наперёд заданной величины.

Понятно, что число последовательных перескано в случае полной потери изображения ограничено величиной дрейфа. На упорядоченной поверхности восстановление работоспособности может произойти где-нибудь неподалеку от фактического места сбоя, хотя поверхность в этом случае и будет выглядеть достоверно, разумеется, считать такие данные правильными нельзя. Настораживающим сигналом в подобных ситуациях являются значительные изменения содержимого счётчиков числа перескано апертуры и сегмента, а также возникновение PAF состояний. Часто, состояние PAF и/или чрезмерно большое число перескано приводят к “рассыпанию” цепочки.

При проведении длительных экспериментов, измерений, технологических процессов и/или при перемещении по поверхности образца на большие расстояния возможен выход точного Z-манипулятора из своего диапазона. Причина выхода заключается в дрейфе головки микроскопа и/или в наличии наклона поверхности образца. В предлагаемом способе позиционирования при приближении точного Z-манипулятора к краю диапазона автоматически инициируется состояние “Пауза” и на грубый Z-манипулятор в промежутки между повторяющимися привязками зонда микроскопа к текущей особенности поверхности подаются команды, возвращающие точный Z-манипулятор к середине его диапазона.<sup>92</sup>

Собственная погрешность распознавания алгоритма оценивается по статическим данным в режиме виртуального сканирования. Используя связывание особенностей по-

средством обходы контура, можно определить накопленную погрешность, которая для цепочки длиной в 1000 атомов составляет приблизительно  $0.6 \cdot 10^{-19}$  Å (интервал накопления 107 атомов). Найденная погрешность определяется точностью представления результатов вычислений.

Тестирование выявило другую составляющую погрешности накопления, достаточно резко зависящую от того, в какой степени локализована работа итеративной процедуры распознавания. Так, например, погрешность в определении относительной координаты следующего атома в апертуре в  $3.7 \cdot 10^{18}$  раз больше погрешности, возникающей при однократном применении процедуры скиппинга, хотя размер апертуры всего лишь в два с небольшим раза больше размера сегмента.

Перед проведением реального сканирования с целью увеличения производительности и повышения надёжности рекомендуется обычным сканированием получить изображение исследуемой поверхности, а затем выполнить над ним виртуальное сканирование. В результате можно определить оптимальные размеры апертуры и сегмента, правильно подобрать пороги и т. п.

Все измерения, представленные ниже, выполнены на сканирующем зондовом микроскопе Solver™ P4 фирмы NT-MDT Co.<sup>93</sup> Используемый микроскоп был установлен на тяжёлое основание с пассивной виброизоляцией и накрыт пассивным теплоизолирующим коробом для лучшей термостабилизации. В качестве управляющего применялся IBM-совместимый компьютер i486DX4 100 МГц.

Перед проведением экспериментов микроскоп “отстаивался” в течение 30 мин после установки образца для начального прогрева прибора в целом. Затем в течение 1-2 часов для минимизации термодрейфа головки производилась “тренировка” аппарата – циклическое сканирование апертуры в подведённом состоянии в месте начала скана. Часть измерений проводилась в ночное время суток, так как днём наблюдался высокий уровень внешних вибраций и сетевых электрических помех.

Число точек в апертуре и в сегменте при сканировании атомной поверхности графита  $27 \times 27$  и  $13 \times 13$ , соответственно. Иглой служила механически срезанная NiCr проволока  $\varnothing 0.3$  мм, а размеры свежесколотого образца ВОПГ С(0001) составляли  $(2 \times 2 \times 0.3)$  мм<sup>3</sup>. Поскольку образец графита имеет малые размеры, то основной вклад в термодрейф вносится головкой СТМ.

Ниже приведены результаты практического использования метода сканирования. При сборке реальных поверхностей вызываемые дрейфом искажения сегмента не корректировались, исправление нелинейности, неортогональности и кауплинга манипуляторов не производилось, в местах перекрытия сегментов выполнялось только усреднение, для вычисления среднего по модулю дрейфа использовались мгновенные значения, получае-

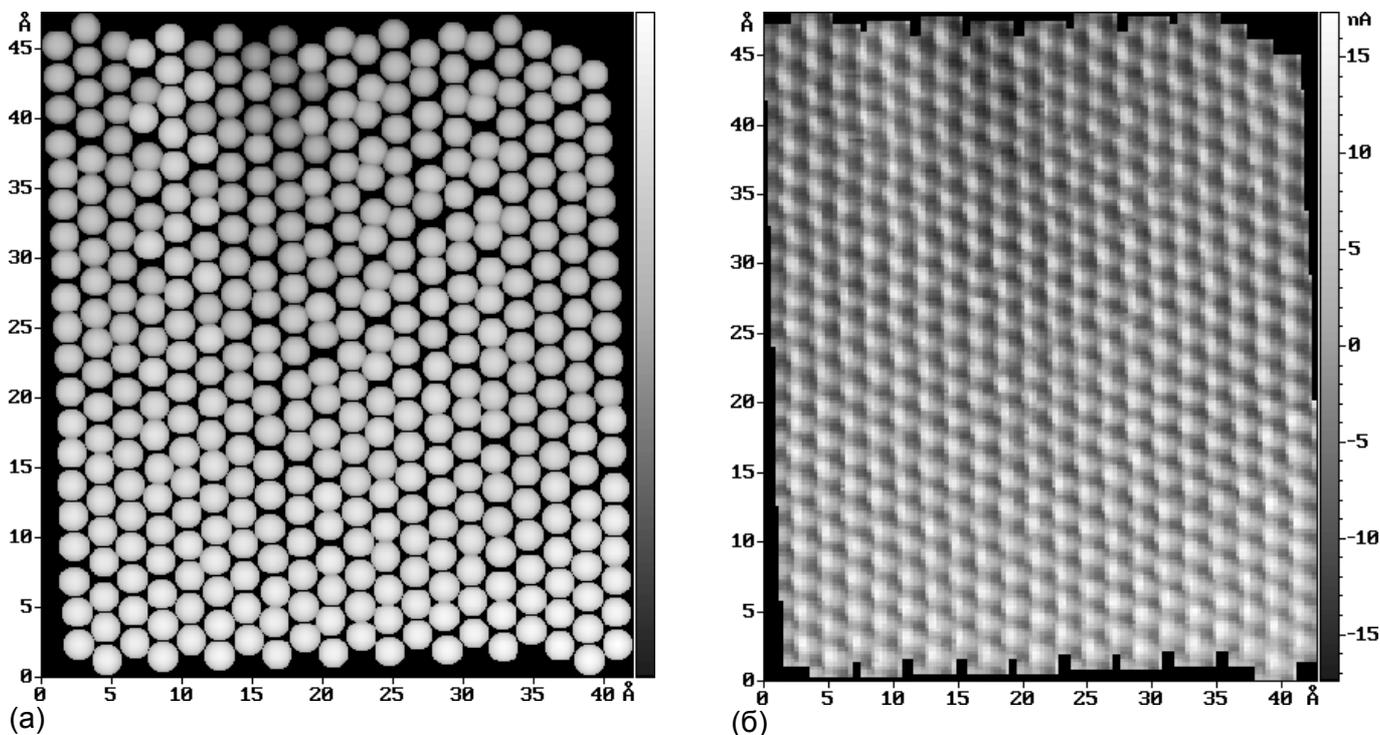


Рис. 23 Атомная поверхность ВОПГ. (а) Стилизованное изображение. Атомы углерода изображены условно в виде полусфер. (б) Реальная поверхность, реконструированная из сегментов (режим постоянной высоты,  $U_{\text{тун}} = -10$  мВ,  $I_{\text{тун}} = 998$  пА). Длина цепочки 400 атомов. Число усреднений в точке: 2. Число циклов скиппинга: 3. Количество усреднений сегмента: 6. Усреднённая постоянная решётки  $a=b=2.299$  Å. Усреднённая компактность: 71 %. Скорость сканирования в апертуре:  $1637$  Å/с. Скорость сканирования в сегменте:  $860$  Å/с. Скорость перемещения при скиппинге:  $2.4$  мкм/с. Средняя скорость латерального дрейфа около  $0.5$  Å/с. Интервал привязки зонда не более  $500$  мс. Время измерения: 23 мин.

мые в процессе измерения разностей.

### 3.1. Объектно-ориентированное сканирование атомного рельефа поверхности графита

На Рис. 23 показано изображение атомной поверхности ВОПГ, полученное в результате применения предлагаемого алгоритма. Локальное связывание особенностей выполнено с использованием вспомогательных квазистрок. Затравка содержит 20 атомов углерода, затравка ориентирована вдоль оси X-пьезоманипулятора. Объём данных, основную долю которого занимают сегменты особенностей, составил 291 Кбайт, для сравнения, данные, полученные с тем же разрешением обычным сканированием, занимают 38 Кбайт.

Из-за больших временных нестабильностей и малого числа усреднений звеньев цепи положения некоторых атомов в скане заметно смещены (см. стилизованное изображение). Усреднённое значение постоянной решётки отличается от номинального значения  $2.464$  Å, указывая на то, что микроскоп раскалиброван. Артефакты, связанные с сегментной структурой изображения (см. Рис. 23б), практически отсутствуют. Следует обратить внимание на низкий уровень шума в сегментном изображении, хотя никакого сглаживания

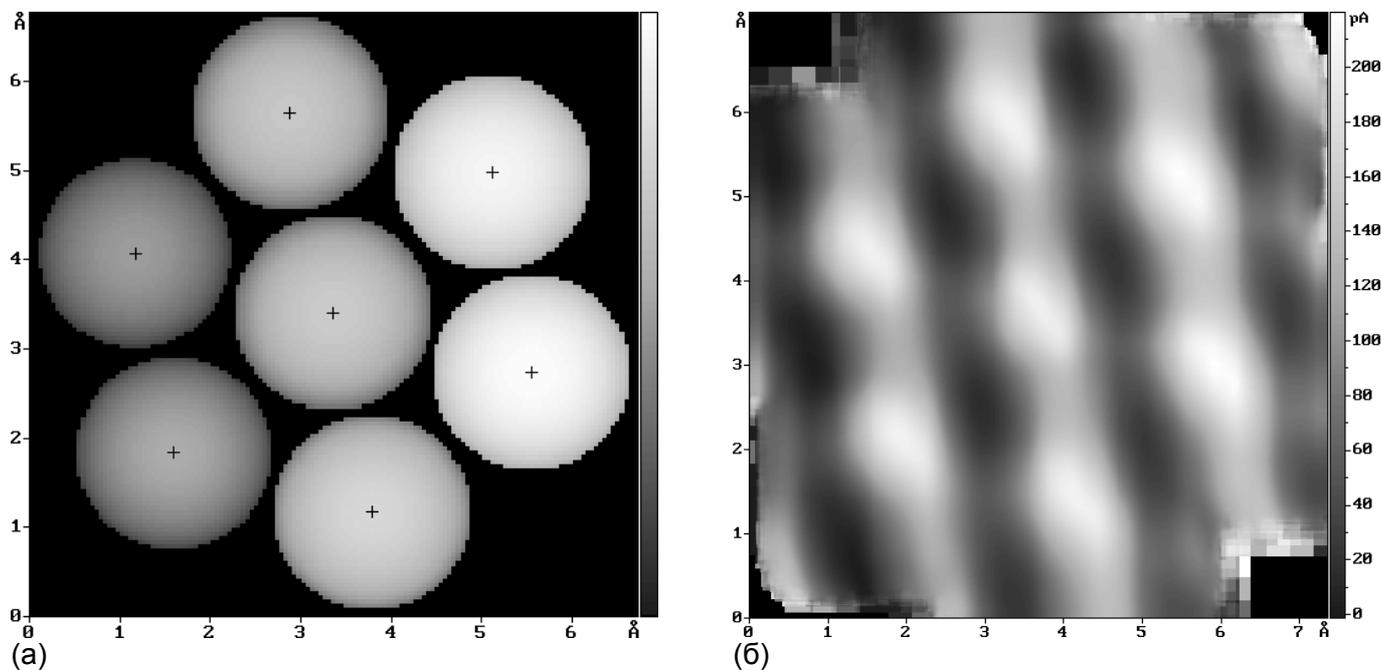


Рис. 24 Атомная поверхность ВОПГ, полученная в режиме высокого разрешения. (а) Стилизованное изображение. (б) “Сырое” сегментное изображение (режим постоянной высоты,  $U_{\text{тун}}=15$  мВ,  $I_{\text{тун}}=401$  пА). Число усреднений в точке: 3. Количество усреднений сегмента: 1000. Усреднённая постоянная решётки  $a=b=2.299$  Å. Скорость сканирования в апертуре:  $1285$  Å/с. Скорость сканирования в сегменте:  $665$  Å/с. Скорость перемещения при скиппинге:  $61$  Å/с. Средняя скорость латерального дрейфа около  $0.2$  Å/с. Интервал привязки зонда не более 500 мс. Время сканирования: 39 мин.

данных не выполнялось.

### 3.2. Объектно-ориентированное сканирование атомного рельефа поверхности графита с высоким разрешением

В режиме высокого разрешения выполнено сканирование небольшого участка на поверхности графита (см. Рис. 24). В ходе эксперимента для каждого из 7 атомов углерода было произведено по 1000 измерений сегмента и разностей. Объём данных достиг 4.36 Мбайт, для сравнения, объём информации полученный на этом же участке, обычным сканированием с предельным разрешением составил всего 1.6 Кбайт. Связывание особенностей выполнено путём обхода контура с присоединением. Тип затравки – одиночный атом. После выполнения сборки латеральное и вертикальное разрешение микроскопа улучшено в 20 раз. В верхнем левом и нижнем правом углах хорошо видны исходные размеры элементов изображения, соответствующие минимальному шагу микроскопа (сравни также с Рис. 9а).

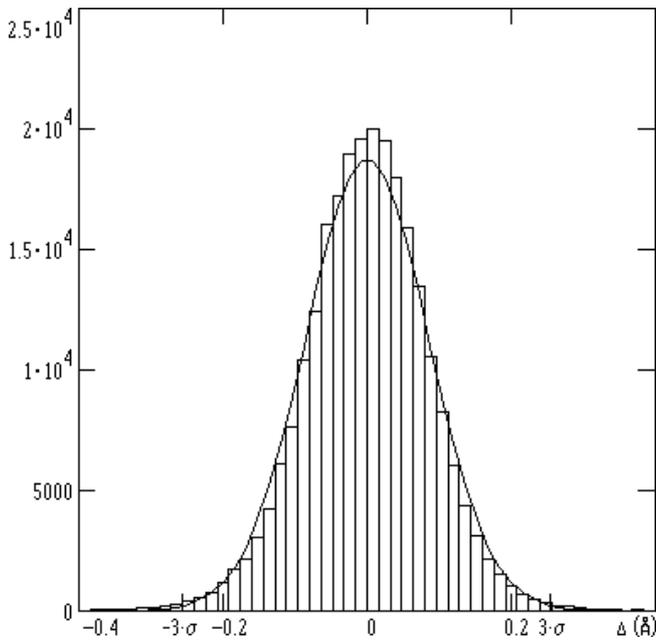


Рис. 25 Гистограмма распределения погрешности измерения постоянной решётки ВОПГ. Количество измерений  $I=2.5 \cdot 10^5$ . Погрешность однократного измерения ( $3\sigma$ ):  $\pm 0.255 \text{ \AA}$ . Коэффициент асимметрии  $k_s=-0.09$ . Эксцесс  $k_k=1.27$ . Время измерения: 7 часов 30 мин.

### 3.3. Высокоточные измерения

#### постоянных решётки и кристаллографических направлений на поверхности графита

Фактически измерение постоянных решётки представляет собой скиппинг с большим числом усреднений ( $I=10^4 \dots 10^6$ ). Поскольку при выполнении скиппинга ориентация отрезка, соединяющего две особенности, измеряется относительно оси X-манипулятора, то в общем случае для определения угла между кристаллографическими направлениями на поверхности необходимо произвести скиппинг ещё для одной пары особенностей, а затем вычислить разность полученных ориентаций.

В данном эксперименте было осуществлено 250000 измерений постоянной решётки ВОПГ, на что потребовалось 7.5 часов непрерывной работы СТМ. В результате постоянная решётки графита определена с погрешностью  $\pm 0.00051 \text{ \AA}$  (погрешность однократного измерения с вероятностью  $P=0.9973$  равнялась  $\pm 0.255 \text{ \AA}$ ). На Рис. 25 показана функция распределения погрешности измерения  $\Delta$  постоянной решётки графита, там же для сравнения дана функция нормального распределения. Объем полученных данных составил 18.8 Мбайт.

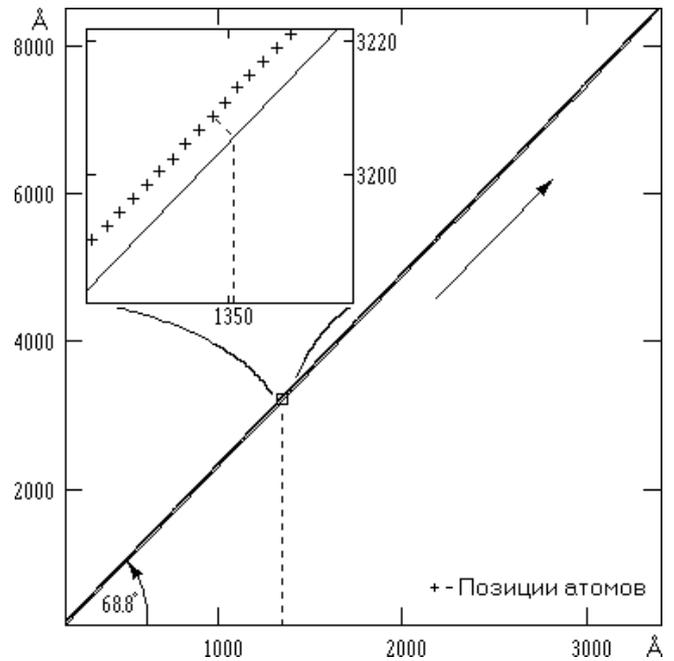


Рис. 26 Перемещение зонда СТМ по атомам углерода в заданном направлении (показано стрелкой) на поверхности ВОПГ. Подрезим удержания направления включен. Длина пройденного пути  $L \approx 1 \text{ мкм}$ . Число атомов в цепочке: 4060. Число циклов скиппинга: 3. Скорость перемещения:  $\sim 1 \text{ атом/с}$ .

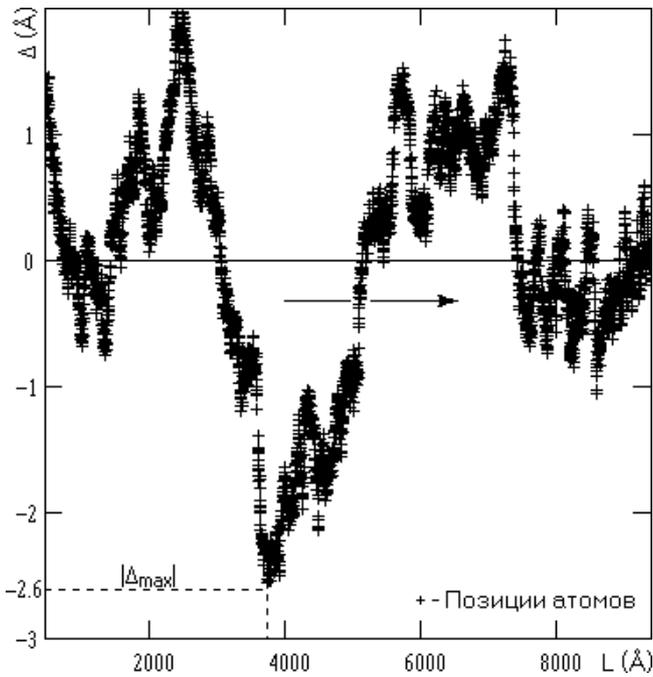


Рис. 27 График отклонения  $\Delta$  положений атомов цепи от осредняющей прямой. Поперечная нелинейность: 0.03 %.

### 3.4. Оперативное позиционирование

#### на атомной поверхности графита.

#### Оценка нелинейности сканера

В качестве экспериментального подтверждения возможности прецизионного позиционирования на атомарно-гладкой поверхности, а также для демонстрации способности точно отмерять расстояния в несколько микрон, подсчитывая атомные периоды, на поверхности ВОПГ было выполнено перемещение иглы СТМ вдоль кристаллографического направления (см. Рис. 26). Длина пройденного пути  $L$  составила  $\sim 1$  мкм (длина цепочки: 4060 атомов углерода). Полученные результаты непосредственно доказывают факт существования на поверхности графита атомарно-гладких участков микронных размеров.

Если предположить, что собственное искривление решётки графита в мезоскопическом масштабе незначительно, то по полученным данным можно судить о величине нелинейности, вносимой сканером микроскопа. Через измеренные положения атомов методом наименьших квадратов проведена осредняющая прямая (см. Рис. 26), которая при определении нелинейности была принята за “эталонную структуру”. Максимальное поперечное отклонение от линейности  $|\Delta_{\max}|$  (см. Рис. 27) составило около 2.6  $\text{\AA}$  или  $|\Delta_{\max}|/L \cdot 100 \% = 0.03 \%$ .

Если пренебречь незначительным искривлением цепочки, то продольную нелинейность можно определить по изменению атомного периода (см. Рис. 28) как

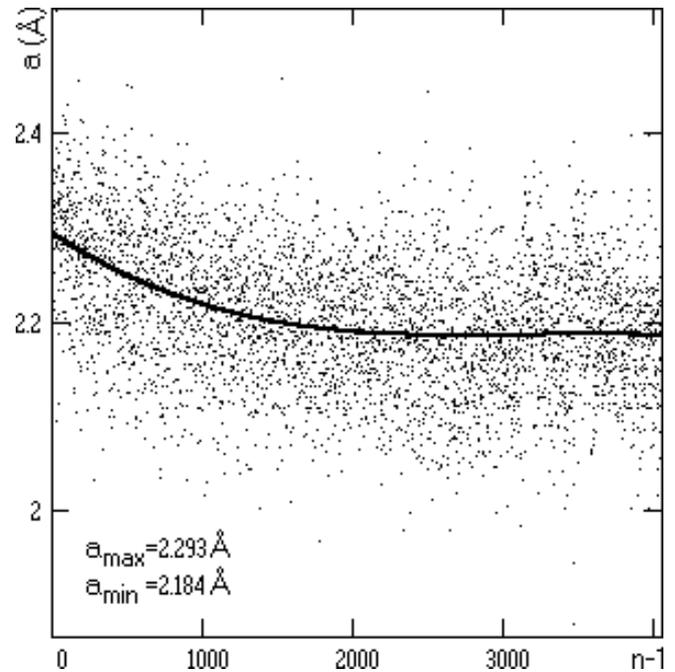


Рис. 28 Изменение атомного периода  $a$  по мере продвижения по цепочке. Среднее значение  $\bar{a} = 2.205 \text{\AA}$ . Регрессия выполнена с использованием полинома третьего порядка. Продольная нелинейность: 4.94 %.

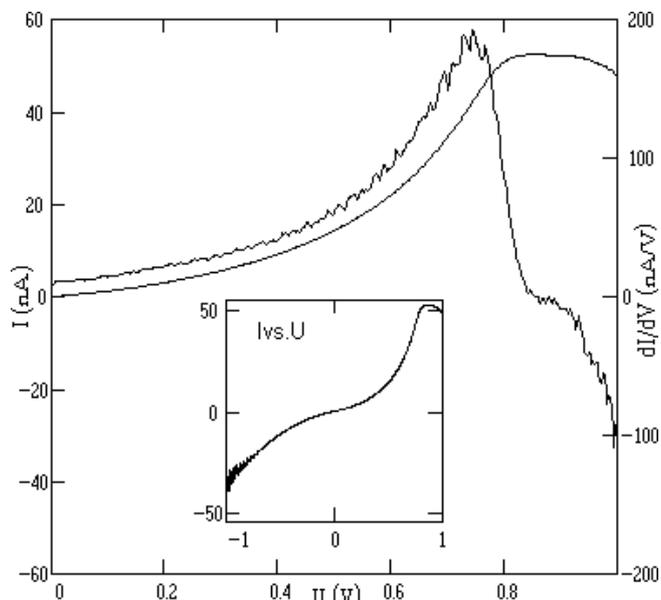


Рис. 29 Усреднённая ВАХ туннельного зазора, локализованного непосредственно на вершине атома углерода. Число усреднений:  $10^4$ . Количество точек в однократно измеренной характеристике: 800. Время преобразования АЦП 25 мкс. Средний модуль скорости латерального дрейфа около  $0.29 \text{ \AA}/\text{с}$ . Время измерения: 57 мин. Производная кривой получена дифференцированием по трёхточечной симметричной схеме.

Высоты атомов пройденной цепочки по калибровочной базе данных, можно по остаточной кривизне цепочки выявить дефекты и/или механические напряжения в кристалле.

### 3.5. Точно локализованная туннельная спектроскопия с малым уровнем шума

Для демонстрации возможностей метода, связанных с получением спектроскопической информации,<sup>40,59,64</sup> было выполнено  $10^4$  измерений вольтамперной характеристики (ВАХ) туннельного зазора. Измерения ВАХ чередовались с привязками зонда микроскопа к выбранному атому углерода на поверхности графита. На Рис. 29 показана найденная после усреднения ВАХ перехода и её производная. Данная ВАХ измерена непосредственно на вершине атома углерода. Поскольку получение достоверной спектроскопической информации возможно только в высоком вакууме, то приведённые результаты следует рассматривать исключительно как демонстрацию потенциальных возможностей метода.

Отметим, во-первых, что число усреднений в данной методике ограничено главным образом долговременной стабильностью задатчика зондирующего напряжения; во-вторых, низкий уровень шума, достигнутый при измерениях, позволяет применять не-

$(a_{\max} - a_{\min}) / \bar{a} \cdot 100 \%$ , где  $a_{\max}$ ,  $a_{\min}$ ,  $\bar{a}$  – максимальный, минимальный и средний периоды в цепочке, соответственно. Большой разброс соседних значений на рисунке объясняется малым числом циклов скиппинга во время перемещения. Для извлечения из полученных данных численных значений, характеризующих  $a_{\max}$  и  $a_{\min}$ , проведена регрессионная кривая. Продольная нелинейность составила 4.94 %.

Необходимо отметить, что малая поперечная нелинейность это результат случайной взаимной компенсации искривления решётки кристалла и нелинейности сканера. Таким образом, предположение о несущественном искривлении решётки графита является в нашем случае не совсем верным. Строго говоря, оценку нелинейности сканера следует проводить по распределённым в пространстве сканирования калибровочным коэффициентам. Скорректировав координа-

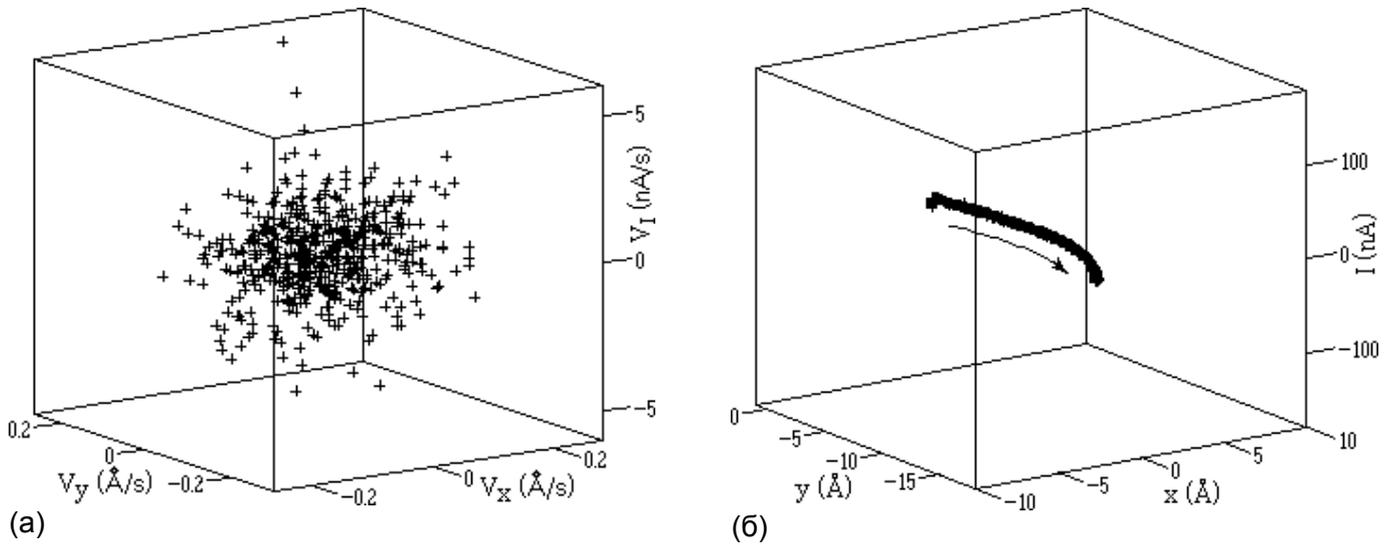


Рис. 30 Дрейф микроскопа. (а) Распределение векторов дрейфа в пространстве скоростей. Средняя и максимальная скорости дрейфа в латеральной плоскости:  $0.12 \text{ \AA/s}$  и  $0.33 \text{ \AA/s}$ , соответственно. (б) Эволюция атома привязки в пространстве (направление перемещения обозначено стрелкой). Вероятное направление дрейфа в латеральной плоскости:  $265^\circ$ . Вектора и положения зонда обозначены значком “+”. Количество привязок зонда микроскопа: 500. Интервал времени между привязками  $T=700 \text{ мс}$ .

посредственное дифференцирование экспериментальной кривой; в-третьих, ВАХ перехода можно получать в любой точке окрестности атома.

### 3.6. Определение дрейфа микроскопа

Измерение дрейфа микроскопа заключается в выполнении последовательности привязок зонда к выбранной особенности на поверхности. В процессе слежения за особенностью по её перемещению определяется вектор дрейфа, т. е. направление дрейфа и его скорость (величина смещения, отнесённая к интервалу привязки  $T$ ).

На Рис. 30а показано распределение полученных векторов дрейфа в пространстве скоростей. На Рис. 30б представлена пространственная траектория движения атома привязки в процессе измерения. Средняя скорость дрейфа микроскопа в латеральной плоскости составила около  $0.12 \text{ \AA/s}$ . Вероятное латеральное направление дрейфа:  $265^\circ$ . Близость вероятного направления дрейфа к направлению “медленного” сканирования, по-видимому, указывает на присутствие значительной составляющей крипа Y-манипулятора. Из Рис. 30б можно заключить, что скорость дрейфа микроскопа на протяжении десятков секунд остаётся приблизительно постоянной.

На Рис. 31 дана гистограмма распределения модулей латеральных скоростей, ориентированных вдоль вероятного направления дрейфа. Из графика следует, что на случайный процесс, скорее всего, накладываются периодические процессы,<sup>48</sup> вызванные в том числе периодическими тепловыделениями<sup>6</sup> и крипами пьезоманипуляторов во время

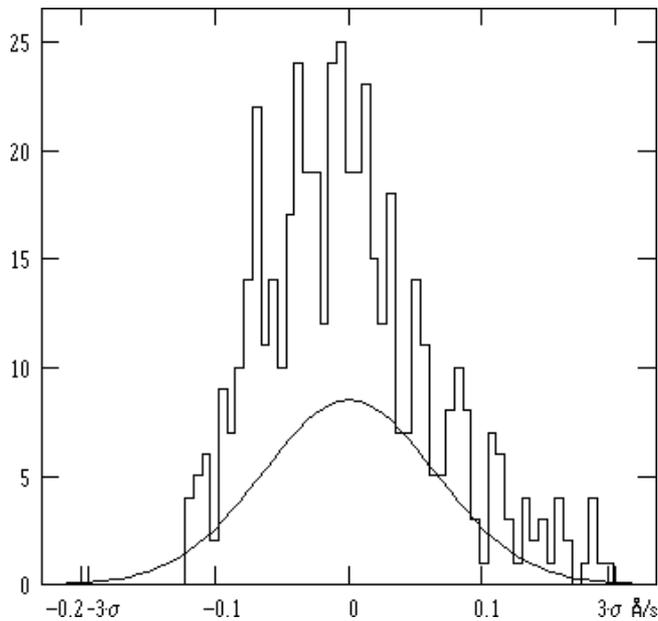


Рис. 31 Гистограмма распределения модулей латеральных скоростей дрейфа, лежащих в секторе  $\pm 45^\circ$  от направления вероятного дрейфа. Хотя число векторов составило 46 % от исходного, средняя скорость дрейфа осталась приблизительно той же  $0.12 \text{ \AA/s}$ . Средне-квадратическое отклонение  $\sigma = \pm 0.06 \text{ \AA/s}$ . Коэффициент асимметрии  $k_s = 0.88$ . Эксцесс  $k_k = 0.49$ .

завязано через поиск седловых точек рельефа, сканирование апертур и фиксированного размера сегментов выполнено на АСМ в тэппинг моде<sup>94</sup> с постоянным шагом, коэффициент упругости кантилевера производства фирмы NT-MDT равен  $\sim 20 \text{ Н/м}$ , резонансная частота равна  $153.403 \text{ кГц}$ , радиус кончика зонда составляет менее  $10 \text{ нм}$ , после сборки из реконструированных изображений был вычтен глобальный тренд, никакого сглаживания изображений не производилось.

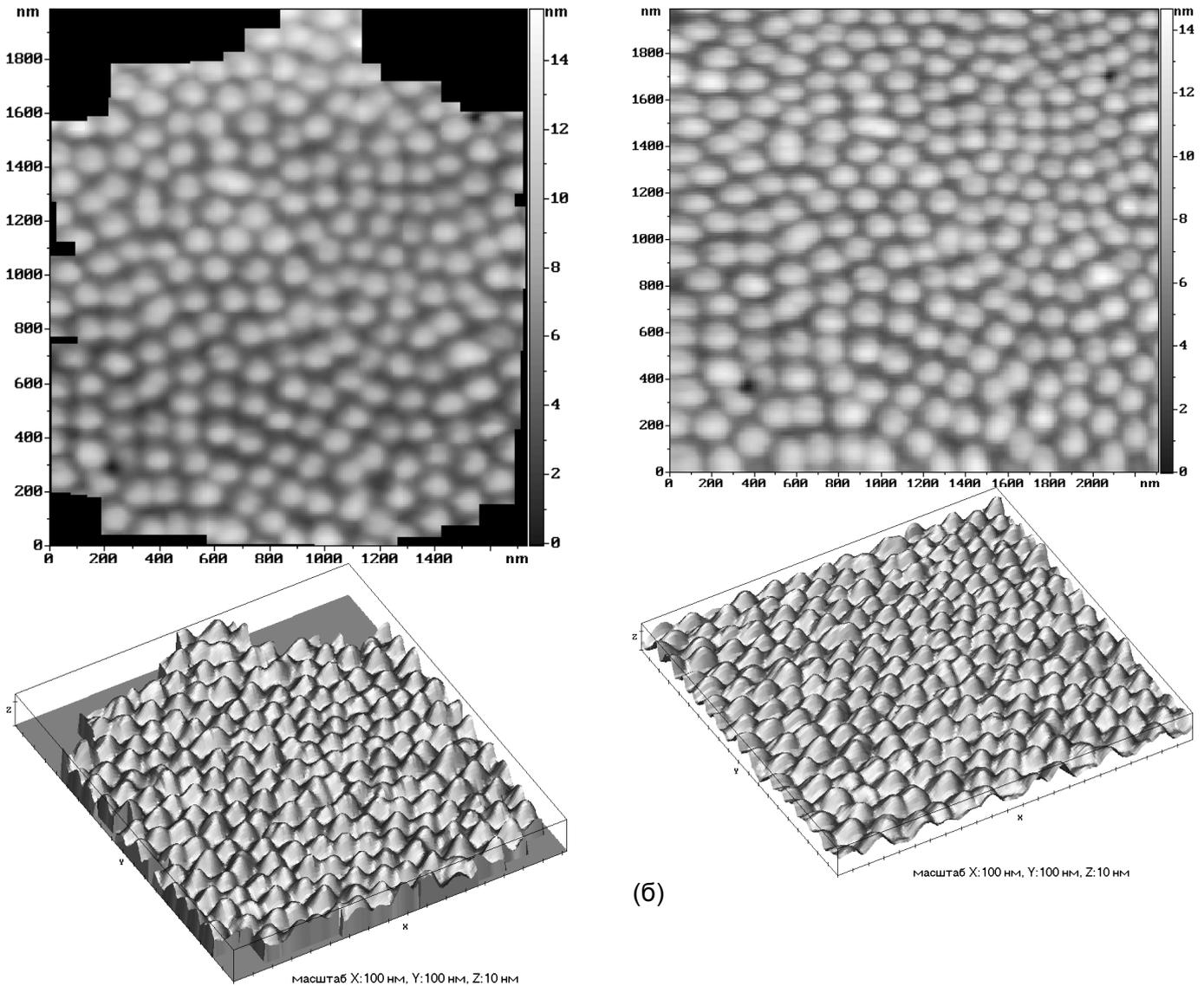
Сравнение с тем же участком поверхности, полученным обычным сканированием (см. Рис. 32б), показывает полную адекватность изображений друг другу. На Рис. 32б хорошо видны вызываемые крипом искажения рельефа, которых нет на Рис. 32а. Отсутствие характерного паттерна (см. конец параграфа 1.7) на сегментном изображении свидетельствует о практически полной компенсации дрейфа.

Цепочка, визуализированная на Рис. 32а, занимает  $1.08 \text{ Мбайт}$ , для сравнения, объём данных, полученных обычным сканированием (см. Рис. 32б), составляет около  $74 \text{ Кбайт}$ . Структура цепочки особенностей показана на Рис. 33. В Таблице 1 приводятся найденные в процессе измерений статистические данные, характеризующие особенности разупорядоченной поверхности. При необходимости для указанных параметров могут быть

привязки. Однако для большей уверенности здесь требуется дополнительное исследование. В целом дрейф выглядит как квазислучайный процесс.

### **3.7. Объектно-ориентированное сканирование разупорядоченных поверхностей электрохимически полированного алюминия и осаждённой из плазмы плёнки углерода**

В качестве первого примера, иллюстрирующего способность алгоритма сканировать разупорядоченные поверхности, на Рис. 32а представлена наноструктурированная поверхность алюминия. Здесь и ниже по тексту применяется способ связывания, использующий вспомогательные квазистроки, прямое распознавание особенностей реали-



(а)

Рис. 32 Разупорядоченная поверхность электрохимически полированного алюминия. Шаги микроскопа в латеральной плоскости:  $\Delta_x=8.53$  нм,  $\Delta_y=8.58$  нм. Изображение (а) получено по методу ООС. Средний размер апертуры (59×59) пикселов<sup>2</sup>. Размер сегмента (35×35) пикселов<sup>2</sup>. Число усреднений в точке: 1. Число циклов скиппинга: 2. Число усреднений сегмента: 4. Скорость сканирования в апертуре/сегменте: 3485 нм/с. Скорость перемещения при скиппинге: 697 нм/с. Средний модуль скорости латерального дрейфа: 0.40 Å/с. Средний модуль скорости вертикального дрейфа: 0.08 Å/с. Время сканирования: 8.5 часов. Изображение (б) (198×190) пикселов<sup>2</sup> получено обычным сканированием. Число усреднений в точке: 4. Скорость сканирования 3485 нм/с. Время сканирования: 2 мин.

построены их функции распределения.

Всего за время сканирования было получено 142 апертуры и 600 сегментов, что говорит о высокой избыточности метода ООС, а также выполнено 420 привязок, 364 цикла прескиппинга (см. ниже), 97 пересканоов апертуры, 178 пересканоов сегмента, что указывает на присутствие сильного вызываемого крипом движения, подстройка апертуры производилась 14 раз.

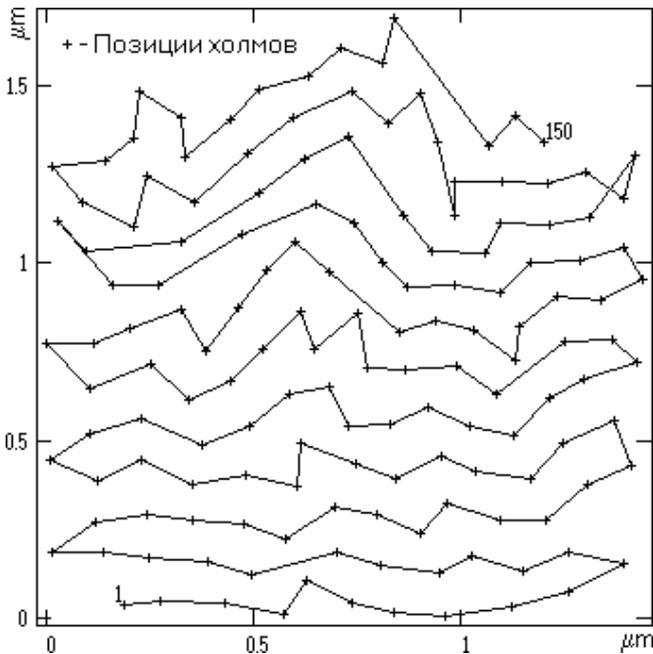


Рис. 33 Структура цепочки особенностей.

Вычитание тренда перед распознаванием особенности осуществлялось локально, т. е. в каждом сегменте и в каждой апертуре из рельефа удалялся уникальный свойственный только данному участку средний наклон поверхности. Рис. 34 даёт наглядное представление о степени тех искажений, к которым приводит дрейф микроскопа: здесь абсолютные и относительные координаты особенностей наложены друг на друга путём совмещения позиций первых особенностей (сравни с Рис. 17).

На Рис. 35 показан тот же участок поверхности алюминия, что и на Рис. 32а, полученный в тех же условиях и с теми же параметрами сканирования (стартовая особенность, количество элементов в затравке, ориентация затравки, длина цепочки, способ связыва-

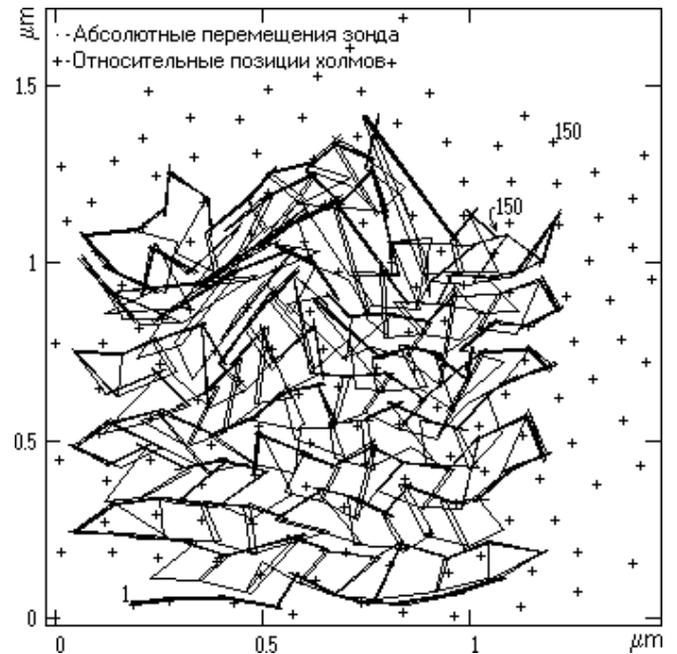


Рис. 34 Реальная сеть из абсолютных положений особенностей, на которую наложены относительные положения особенностей. Большая разница в позициях одних и тех же особенностей свидетельствует о сильных искажениях, возникающих в процессе измерений на СЗМ.

Таблица 1 Статистика (средние значения) особенностей разупорядоченной поверхности.

Поверхность	Тип	Длина цепочки	Расстояние, нм	Площадь основания, нм <sup>2</sup>	Диаметр, нм	Высота/глубина, нм	Объём, нм <sup>3</sup>	Компактность, %	Плотность, мкм <sup>-2</sup>
Алюминиевая фольга	Холм	150	132.42	6890.1	93.7	3.46	11933.7	78.5	51.4
		150	129.39	7328.1	96.6	4.04	14595.7	78.3	52.8
Плётка углерода	Холм и яма	150	86.82	1821.3	48.2	1.31	1309.2	71.6	118.7

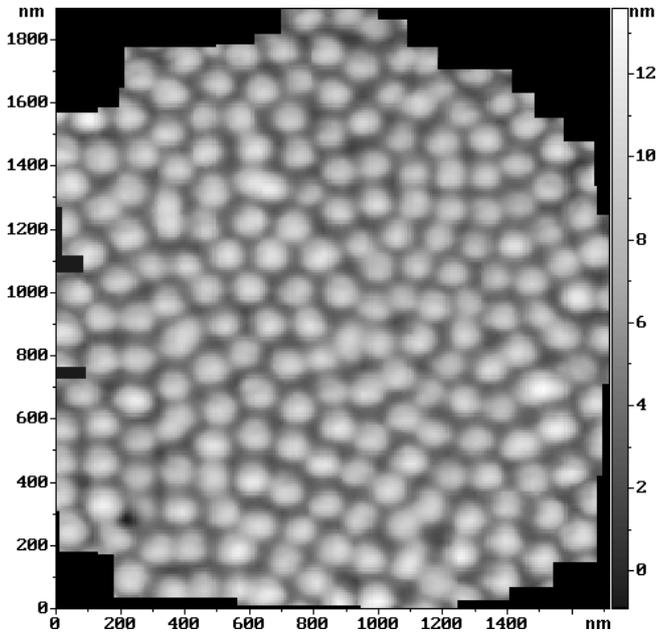


Рис. 35 Тот же участок поверхности алюминия, те же условия, режимы и параметры, что и при измерении рельефа на Рис. 32а, за исключением скорости сканирования, которая в апертуре, в сегменте и при скиппинге составляла половину от соответствующего первоначального значения.

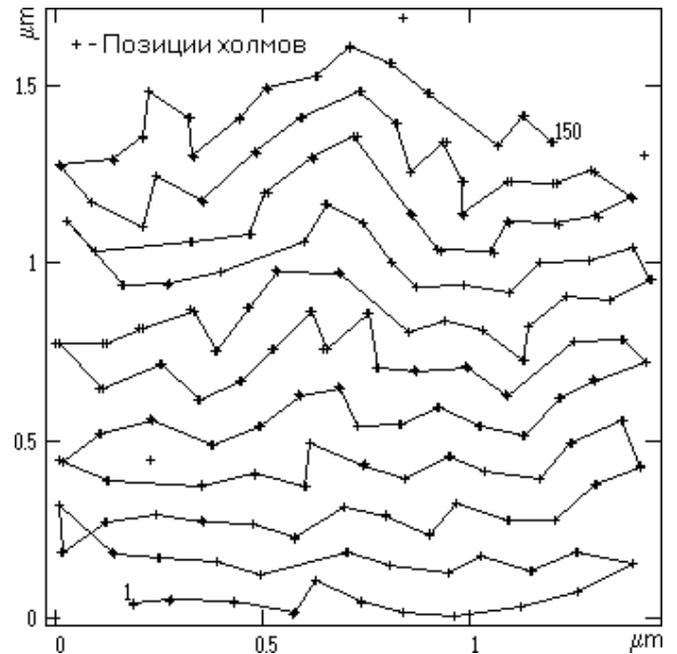


Рис. 36 Структура цепочки особенностей, соответствующая скану на Рис. 35. Для сравнения даны координаты особенностей рельефа Рис. 32а. Среднее рассовмещение координат составляет 3.79 нм.

ния, число усреднений, размеры апертур, сегментов, пороги, допуски и т. п.). Отличия состоят в скорости сканирования в апертуре и в сегменте, а также в скорости перемещения при скиппинге, которые были вдвое меньше первоначальных. Непосредственное сравнение рельефа Рис. 35 с рельефом Рис. 32а подтверждает слабую зависимость реконструированных изображений от скорости сканирования. Для большей наглядности совпадения измеренных координат особенностей на Рис. 36 дана цепочка, соответствующая рельефу Рис. 35, и позиции особенностей рельефа на Рис. 32а (совмещение особенностей выполнено по методу наименьших квадратов). В среднем взаимное отклонение составило 3.79 нм, что чуть меньше половины от используемого шага сканирования.

Следует отметить, что небольшое рассовмещение цепочек связано в основном не с дрейфом, а с изменением настроек микроскопа в течение столь продолжительного времени сканирования. Другой обративший на себя внимание источник погрешности – неконтролируемая незначительная модификация мягкой поверхности алюминия.

Прямое сравнение цепочек на Рис. 33 и на Рис. 36 позволяет выявить небольшие различия в их структуре, что указывает на отсутствие точно воспроизводимой траектории перемещения от особенности к особенности в реальном режиме. Хотя макроусловия проведения измерений остаются неизменными, микроусловия в данном конкретном месте образца и в данном частном состоянии прибора при сканировании одной и той же осо-

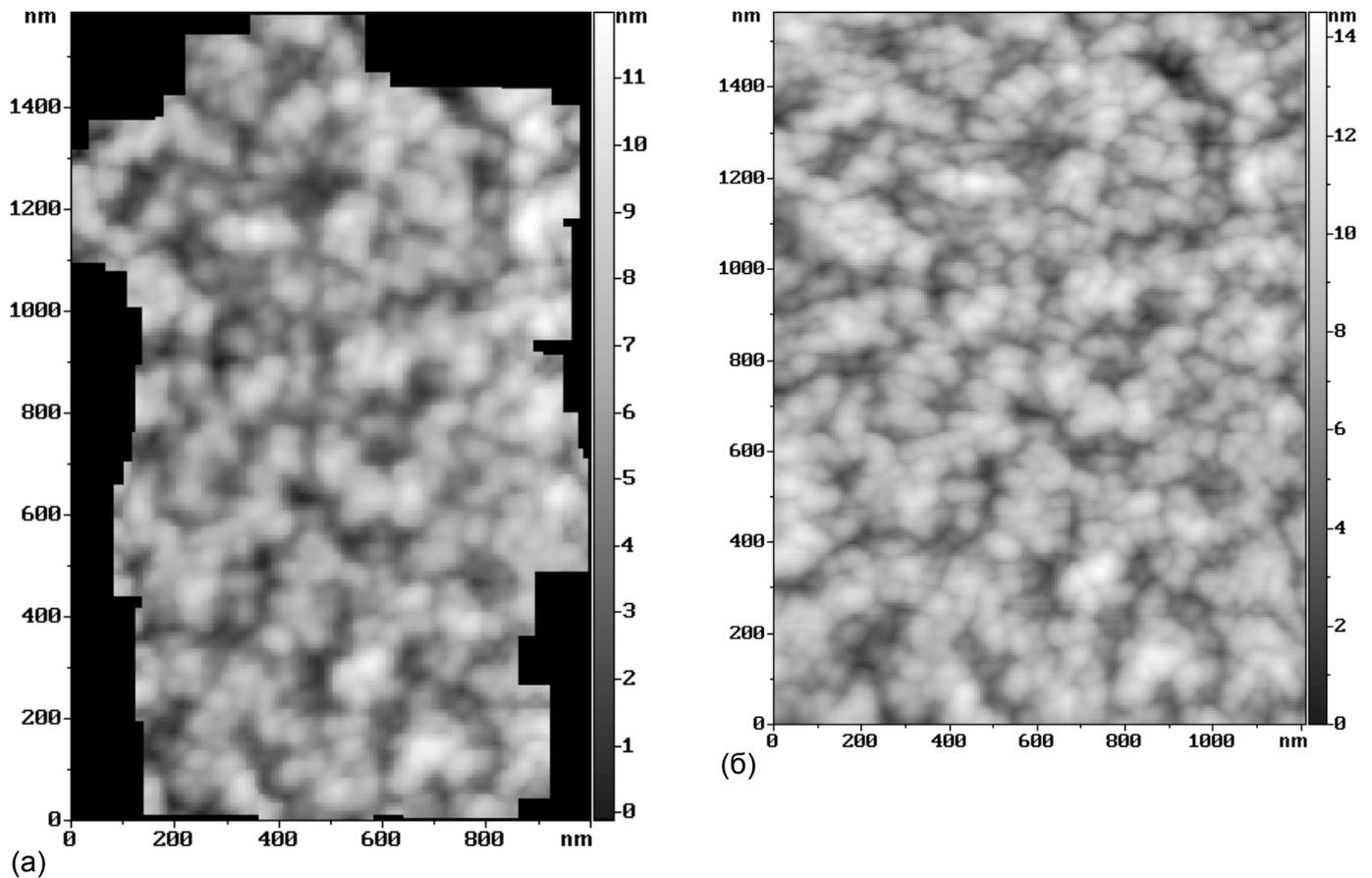
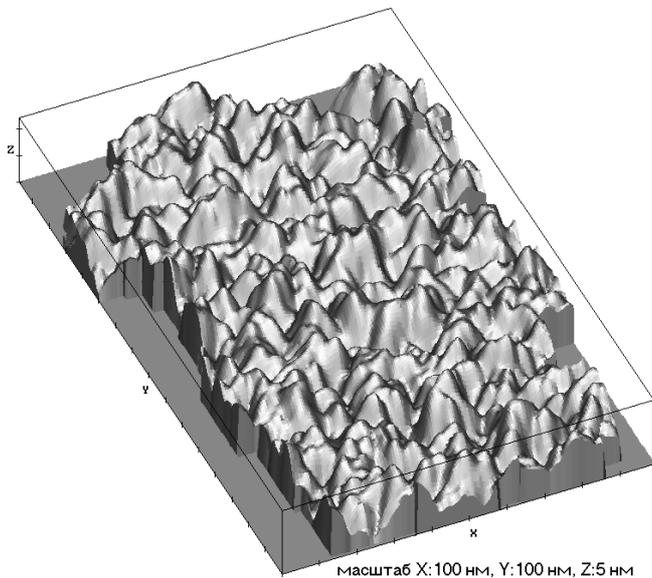


Рис. 37 Полностью разупорядоченная поверхность осаждённой из плазмы плёнки углерода. Шаги микроскопа в латеральной плоскости:  $\Delta_x=5.39$  нм,  $\Delta_y=5.42$  нм. Изображение (а) получено по методу ООС. В качестве особенностей использовались и холмы и ямы (95 и 55, соответственно). Средний размер апертуры (61×61) пиксел<sup>2</sup>. Размер сегмента (41×41) пиксел<sup>2</sup>. Число усреднений в точке: 1. Число циклов скиппинга: 2. Число усреднений сегмента: 4. Скорость сканирования в апертуре: 1542 нм/с. Скорость сканирования в сегменте: 1927 нм/с. Скорость перемещения при скиппинге: 385 нм/с. Средний модуль скорости латерального дрейфа: 0.146 Å/с. Средний модуль скорости вертикального дрейфа: 0.018 Å/с. Время сканирования: 10 часов 10 мин. Изображение (б) (180×245) пикселов<sup>2</sup> получено обычным сканированием. Число усреднений в точке: 4. Скорость сканирования 1927 нм/с. Время сканирования: 3 мин 40 сек.

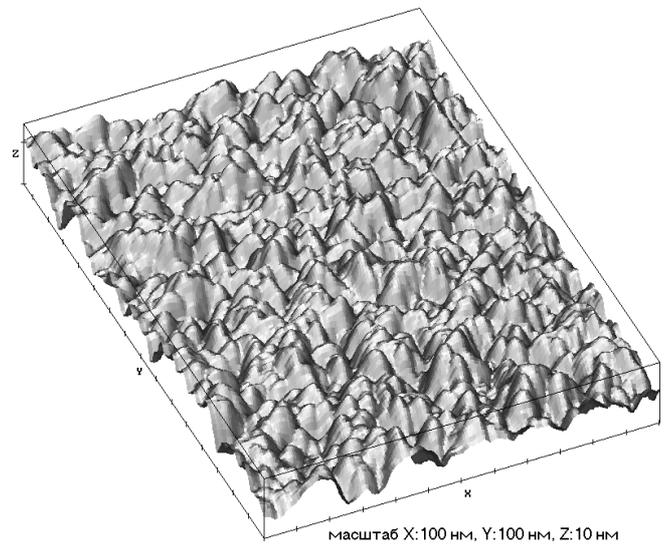
бенности цепочки каждый раз разные.

При внимательном рассмотрении на поверхности алюминия можно обнаружить квазиупорядоченные участки. Представленная поверхность используется как основа для последующего изготовления упорядоченных массивов из квантовых нитей,<sup>95</sup> применяемых в новейших оптоэлектронных структурах.

Анализ полученных результатов показывает, что крип является основным возмущающим фактором. Для его сдерживания в процессе сканирования автоматически инициировались дополнительные привязки, а также использовался прескиппинг. Прескиппинг или холстой скиппинг вводится перед основным циклом скиппинга, из-за сильных искажений результаты его работы для усреднения относительного расстояния между особенностями



(a) (продолжение Рис. 37а)



(б) (продолжение Рис. 37б)

не используются, а служат только как исходные данные для старта основного цикла. Прескиппинг, составляющий обычно 1-3 цикла, обеспечивает более плавный переход к скиппингу от сканирования апертуры или предыдущего скиппинга. В процессе прескиппинга происходит перераспределение погрешности измерения позиции текущей и следующей особенностей.

Сканирование других образцов алюминия с особенностями как более крупными по размеру, так и расположенными на больших расстояниях друг от друга чем те, что представлены на Рис. 32, показало, что если не принять специальных мер, то на данном микроскопе предельное расстояние, на которое может быть перемещён зонд без возникновения вызываемой крипом фатальной ошибки связывания, ограничено 300...500 нм. Обычно таким перемещением является переход от текущей особенности к следующей в первом цикле прескиппинга (скиппинга, если прескиппинг запрещён) либо переход от текущей особенности в текущей квазистроке к квитирующей особенности. Причём, вероятность ошибки при последнем переходе возрастает тогда, когда скиппинг, уточняющий позицию квитирующей особенности относительно квазистроки, был запрещён оператором, например, из соображений повышения производительности сканирования.

Предельное расстояние зависит также от скорости сканирования в апертуре и в сегменте, скорости перемещения между особенностями и от предыстории перемещений. Чтобы преодолеть указанный барьер процедура распознавания должна определять особенность по другим характерным для данной особенности признакам (см. конец параграфа 1.8), а не только по её близости к центру апертуры или сегмента.

Другой способ обхода обнаруженного ограничения основывается на возможности пролонгировать (приблизительно) развитие крипа в процессе реального сканирования (рассматриваемые переходы между особенностями настолько велики, что термосоставляющая дрейфа оказывается неизмеримо малой по сравнению с составляющей от кри-

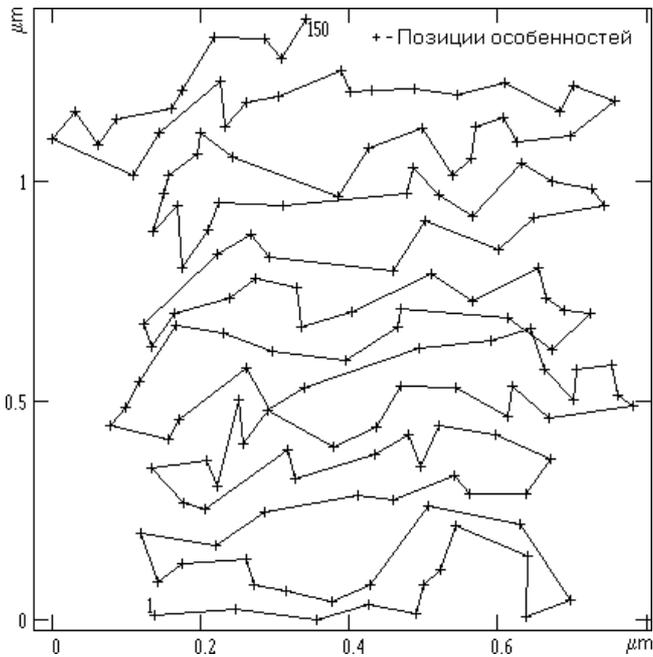


Рис. 38 Структура цепочки особенностей, полученная в процессе ООС поверхности плёнки углерода.

па). Из многочисленных наблюдений и анализа производимых перемещений было определено, что указанная ошибка связывания

происходит из-за вклада двух основных погрешностей.

Первая погрешность это погрешность в определении координат соседних особенностей в апертуре. Она возникает вследствие искажения изображения крипом, самовозбуждённым главным образом в процессе самого сканирования апертуры. Данная погрешность может быть исправлена так же, как исправляется дрейф в сегментах.<sup>51,52</sup> Однако, этот способ требует получения как минимум одной пары встречно-сканированных изображений апертуры, что дополнительно снижает и без того невысокую производительность метода. Вторая погрешность возникает также из-за самовозбуждённого крипа при первом перемещении от текущей особенности к следующей в цикле прескиппинга, а также при любых перемещениях по текущей квазистроке от одной особенности к другой.

Хотя суммарная погрешность обычно не превышает 10-15 % от величины перехода, но и она может оказаться критической для связывания при перемещениях на большие расстояния, поскольку на разупорядоченной поверхности возможно тесное соседство (в смысле близости центров тяжести) небольших особенностей друг с другом, небольшой особенности и большой “продолговатой”, небольшой особенности и большой “серповидной”, охватывающей небольшую.

Таким образом, располагая информацией об отклонениях особенностей от центров апертур и сегментов на предыдущих шагах ООС, можно приблизительно оценить величину погрешности в текущем шаге. Исключение составляют места переключения квазист-

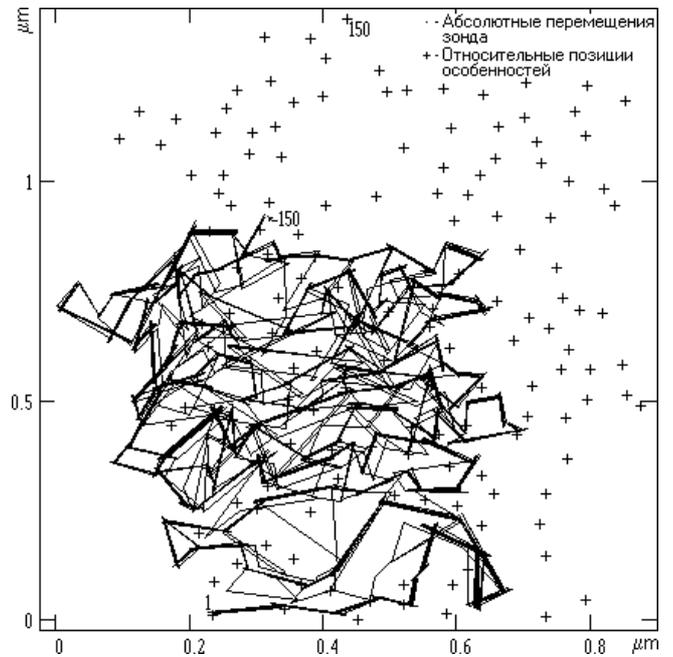


Рис. 39 Реальная сеть из абсолютных положений особенностей углеродной плёнки, на которую наложены относительные положения особенностей.

рок, где крипы взаимно компенсируются, но здесь пролонгация и не требуется, поскольку результирующий крип оказывается незначительным по величине. Следовательно, места переключения квазистрок ограничивают глубину пролонгации одной квазистрокой. Зная приблизительную величину погрешности в текущем шаге, критические перемещения могут быть соответствующим образом скорректированы: укорочены или удлинены. Хотя степень изменения длины перехода определена только приближённо, найденное значение может позволить в ряде случаев избежать ошибок связывания. В последующих циклах прескиппинга и скиппинга происходит быстрое перераспределение и уменьшение величины погрешности за счёт встречных перемещений.

В качестве ещё одного примера сканирования разупорядоченной поверхности на Рис. 37 приведена поверхность осаждённой из плазмы (установка: УВНИПА-1 дуговая импульсно-плазменная) плёнки углерода.<sup>96</sup> В роли подложки использовался электронный резист (метилметакрилат-метилметаоксид 98:2), который с целью сглаживания рельефа был предварительно облучён ультрафиолетом (источник: ртутно-ксеноновая лампа ДРКС 500,  $\lambda=180\dots260$  нм). В отличие от предыдущих сканов здесь в качестве особенностей использовались и холмы и ямы. Структура цепочки особенностей показана на Рис. 38, по Рис. 39 можно судить об искажениях, возникающих в процессе сканирования плёнки углерода (сопоставь с Рис. 20). Полученная цепочка занимает 1.48 Мбайт памяти, для сравнения, объём данных при обычном сканировании (см. Рис. 37б) составляет около 87 Кбайт. Представленная поверхность полностью разупорядочена, её характеристики даны в Таблице 1.

Если при сканировании алюминиевой поверхности источником дополнительной погрешности и даже ошибки связывания могла служить неконтролируемая модификация мягкой поверхности, то в случае достаточно прочной плёнки углерода таким источником может быть пластичная основа – электронный резист.

Всего в процессе сканирования плёнки углерода было получено 154 апертуры и 600 сегментов, выполнено 353 привязки, 312 циклов прескиппинга, 95 пересканов апертуры, 162 перескана сегмента, 33 подстройки апертуры. Вычитание тренда перед распознаванием особенности осуществлялось глобально, т. е. в каждом сегменте и в каждой апертуре из рельефа удалялась одна и та же плоскость, определяемая в начале работы по приблизительно той площади поверхности, которую предполагалось отсканировать.

Следует обратить внимание на большую в сравнении с предыдущей поверхностью дисперсию размеров особенностей и расстояний между особенностями, а также на меньшие размеры особенностей. Приведённая поверхность является прототипом поверхности искусственного хрусталика глаза человека. Наличие углеродного покрытия обеспечивает более быстрое заживление имплантата после операции. Сходная технология осаждения углерода на полиэтилене низкой плотности<sup>50</sup> представляется перспек-

тивной при создании протезов кровеносных сосудов человека, имеющих меньшую склонность к образованию тромбов.<sup>97</sup>

Крайне большое время сканирования разупорядоченных поверхностей объясняется как невысоким быстродействием зондового микроскопа и сравнительно большим числом пикселей в апертуре и сегменте, так и достаточно сильным развиваемым во время работы крипом. Сильный крип возникал из-за того, что особенности на измеряемых поверхностях являются довольно крупными по размеру и располагаются на довольно больших расстояниях друг от друга.

Неисправленный в сегментах дрейф вместе с погрешностями используемой схемы линеаризации является основной причиной появления едва заметного паттерна на реконструированных изображениях. Такой показатель как плотность (число особенностей на единицу площади, см. Таблицу 1), отвечающий за эффективность применения ООС, для данных поверхностей следует считать вполне приемлемым.

Анализ сканов разупорядоченных поверхностей, полученных предлагаемым методом и обычным путём (сравни Рис. 32а с Рис. 32б и Рис. 37а с Рис. 37б), показывает, что искажение вследствие дрейфа, основную часть которого составляет крип, вдоль направления медленного сканирования небольшое, а вдоль быстрого значительное<sup>22,23</sup> и может достигать 20...35 %. Следует обратить внимание на то, что в представленных изображениях присутствует результат искажения только от крипа, самовозбуждённого непосредственно в процессе ООС, так как после перемещения в область начала сканирования позиционер долгое время был привязан к особенности поверхности. Поскольку скорость сканирования задавалась небольшой, то полученные значения, скорее всего, являются нижней оценкой погрешности.

Практика сканирования разупорядоченных поверхностей показывает, что в ряде случаев в качестве особенностей рельефа следует стремиться выбирать холмы, а не ямы. Дело в том, что из-за конечных размеров кончика зонда, последний не всегда способен достичь дна ямы, в результате чего разброс ям по глубине на получаемых изображениях оказывается меньше разброса холмов по высоте, что снижает надёжность распознавания.

При выполнении ООС представленных выше разупорядоченных поверхностей был установлен ряд признаков, доказывающих факт практически полной компенсации крипа. Первое, скорости дрейфа, измеренные в процессе скиппинга на разупорядоченной поверхности, оказались такими же по величине, что и скорости дрейфа, измеренные в процессе скиппинга на атомарной поверхности графита, хотя средние размеры особенностей и средние расстояния между особенностями на разупорядоченной поверхности были на 2-3 порядка больше, чем на атомной. Исходя из существенной разницы в размерах, было бы правомерно предположить возникновение значительного крипа, что действительно

наблюдалось в ходе любых перемещений за исключением перемещений при скиппинге.

Второе, шумы и сбои при сканировании разупорядоченных поверхностей с гораздо более крупными по сравнению с атомами особенностями в меньшей степени влияют на получаемые изображения особенностей. Число точек в сегментах, а, следовательно, и число точек, из которых состоит изображение особенности на разупорядоченной поверхности, в несколько раз больше числа точек, из которых состоит изображение атома, что также стабилизирует измеряемое мгновенное положение особенности. Таким образом, при сканировании приведённых разупорядоченных поверхностей для определения дрейфа можно было не строить регрессионную кривую или вычислять среднее по десяткам и сотням измерений, как на атомарной поверхности графита, а непосредственно наблюдать изменение скорости дрейфа в процессе скиппинга. В ходе таких наблюдений нередко возникали моменты, когда скорость дрейфа на протяжении 2-3 последовательных циклов скиппинга не менялась с точностью  $\pm 0.001 \text{ \AA}$ , при этом характерное время сканирования сегмента могло составлять несколько десятков секунд (сравни со 100...150 мс при сканировании сегмента атома).

Третье, практически полное совпадение координат при повторном ООС участка поверхности с вдвое меньшей скоростью, а также успешная сборка изображения без видимых дефектов при стыковке сегментов. Четвёртое, даже если скорость изменения дрейфа из-за действия ряда внешних и внутренних дестабилизирующих факторов возрастёт во время скиппинга, настолько, что погрешность линеаризации дрейфа оказывается больше задаваемой перед сканированием погрешности измерения, то всегда возможно “приостановить” процесс измерения, вводя холостые циклы скиппинга до тех пор, пока скорость изменения дрейфа не окажется меньше критического значения.

Таким образом, приведённые экспериментальные факты позволяют достаточно уверенно говорить о том, что крип в процессе скиппинга значительно ослабляется встречными перемещениями, а результирующее движение имеет малую скорость изменения. Следовательно, использование схемы линеаризации правомерно и в масштабе размеров особенностей и расстояний между ними в 100...150 нм, и тем более в масштабе отдельных атомов или молекул.

### **3.8. Оценка накопленной погрешности**

Поскольку в представленном методе все элементы изображения связаны в цепь, то, как уже отмечалось, в ней происходит накопление погрешности. Рассмотрим простейший случай измерения расстояния между двумя особенностями. Пусть это будут атомы на упорядоченной поверхности, лежащие на линии, ориентированной вдоль кристаллографического направления. В любой цепочке накопленная погрешность  $\Delta$  равна сумме среднеквадратических погрешностей измерения  $\Delta_i$  её звеньев. Положим для простоты  $\Delta_i$

одинаковыми, тогда  $\Delta = (n-1) \cdot \Delta a$ , где  $n$  – число атомов в цепочке.

Рассмотрим теперь два случая. Пусть в первом из них измерение выполнено на средстве более высокой точности, чем СЗМ: дифракция нейтронов, рентгеновская интерферометрия и т. п., следовательно, нам известна постоянная решётки  $a$  образца и её среднеквадратическая погрешность измерения  $\Delta a$ . Тогда, используя способ, изложенный в начале параграфа 1.5.3 (см. также параграф 3.4), мы можем отмерять расстояния, просто подсчитывая количество атомных периодов.<sup>14,15</sup> Например, погрешность измерения решётки графита<sup>60</sup> ( $a=2.464 \text{ \AA}$ ) составляет<sup>98</sup>  $\pm 0.002 \text{ \AA}$ , следовательно, отмерить расстояние в 1 мкм можно с погрешностью  $\pm 0.002 \cdot 10000 / 2.464 = \pm 8.117 \text{ \AA}$  или  $\pm 0.081 \%$ . Для кремния, решётка которого ( $a=5.4310196 \text{ \AA}$ ) известна с погрешностью<sup>5</sup>  $\pm 0.0000011 \text{ \AA}$ , то же самое можно сделать с погрешностью  $\pm 0.002 \text{ \AA}$  или  $\pm 0.00002 \%$ . Причём, в описанном только что способе микроскоп может быть даже раскалиброван, поскольку сам метод используется для выполнения калибровки.

Во втором случае, наиболее часто встречающемся на практике, постоянная решётки либо точно неизвестна, либо измеряемый образец имеет дефекты на/вблизи поверхности, либо условия проведения наших измерений сильно отличаются от тех, которые приведены в справочнике, что делает некорректным использование метода подсчёта атомных периодов.

Из рассуждений данных выше следует, что для достижения высокой точности измерения цепи в целом необходимо увеличивать точность измерения каждого отдельного её звена. Благодаря встроенной в метод возможности выполнения больших усреднений, среднеквадратическую погрешность однократного измерения  $\Delta a$  звена можно существенно в  $\sqrt{l}$  раз уменьшить. Учитывая сказанное, формулу для погрешности можно переписать в виде

$$\Delta = (n-1) \cdot \Delta a / \sqrt{l}. \quad (4)$$

Применение больших усреднений ограничено на практике временем “жизни” иглы и поверхности образца, временной стабильностью измерительной системы, быстродействием используемого микроскопа. Как было ранее экспериментально определено, среднеквадратическая погрешность измерения постоянной решётки графита  $\Delta a = \pm 0.255 \text{ \AA}$ . При количестве усреднений, положим,  $l=100$  для числа атомов в цепи  $n=4060$ , которое приблизительно соответствует расстоянию в 1 мкм между первым атомом цепи и последним, погрешность измерения  $\Delta \approx \pm 103.5 \text{ \AA}$  или около  $\pm 1 \%$ .

В завершение параграфа следует указать на существенные различия метода дифракции нейтронов/рентгеновских лучей на узлах кристаллической решётки и ООС на СЗМ с позиции универсальности, удобства применения и достигаемой точности измерений. В первом методе интерференционная картина образуется в результате дифракции

пучка частиц на многих атомах. При этом можно измерить с малой погрешностью средний период высокоупорядоченной кристаллической решётки главным образом в объёме твёрдого тела. Фактически, высокая точность достигается здесь за счёт большого усреднения по пространству.

Однако, измерить точно расстояние между, например, двумя произвольно выбранными атомами на разупорядоченной поверхности не удаётся из-за больших поперечных размеров пучка и слабого сигнала на детекторе. Измерения методом СЗМ, напротив, происходят на поверхности и сильно локализованы. Используя ООС, можно выполнять не только большие усреднения по времени, но и по пространству, причём с более высокой эффективностью, поскольку в процессе измерения можно проводить отбраковку сомнительных результатов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен, разработан и подтверждён экспериментально объектно-ориентированный подход к сканированию и позиционированию на поверхности образца. Развиваемый метод без какой-либо переделки микроскопа может применяться на любом сканирующем зондовом приборе для изучения широкого класса упорядоченных, частично упорядоченных и разупорядоченных поверхностей. Предложенные решения носят комплексный характер, помимо прецизионного позиционирования в поле точного манипулятора рассматриваются не менее важные вопросы перемещения зонда на большом поле грубого манипулятора, автоматического возврата зонда в операционную зону, связывания зондов в многозондовом микроскопе, автоматизации измерений, сбора статистической информации о поверхности и др.

Отличительной чертой предложенного алгоритма ООС является его способность подавлять шумы микроскопа, что приводит к существенному увеличению точности СЗМ измерений. Многократное усреднение сегментов поверхности, а также относительного расстояния между ними позволяет избавиться от воздействия шумов как в системе стабилизации туннельного тока (силы), так и в системе латерального позиционирования. Причём, при возникновении случайного сбоя, вызванного внешними сейсмическими, акустическими, электромагнитными и другими источниками, испорченные данные автоматически отбрасываются, и производится повторное сканирование, что делает результаты измерения рельефа также нечувствительными к однократным возмущениям случайного характера.

К принципиальному недостатку метода следует отнести свойственное всем цепочкам накопление погрешности. Очевидно, что единственным способом её ограничения является увеличение числа усреднений при определении относительных координат следующей особенности, а также установление “поперечных” связей (см. ниже). Однако не следует думать, что накопление погрешности в цепочке особенностей есть свойство присущее только предложенному методу. Элементы изображения в обычном растре это тоже цепочка (слабосвязанная): цепочка из элементов строки и цепочка из самих строк.

Другим общим недостатком цепочек, последовательностей и т. п. структур является свойственная им ненадёжность как системы в целом: достаточно порвать одно звено и можно потерять всю конструкцию. Тем не менее, в технике и в живой природе мы часто наблюдаем высокую устойчивость цепочечных систем. В технике хорошим примером может служить современный компьютер фон-неймановской архитектуры, который при работе оперирует последовательностями бит, байт, слов. Длины последовательностей – огромные, исчисляются триллионами элементов, а надёжность вычислений за счёт применения специальных методов контроля остаётся высокой. В биосистемах гигантские моле-

кулы дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК), представляющие собой цепочки элементов, также демонстрируют высокую системную устойчивость.

В предложенном методе ООС достижение структурной устойчивости и высокой надёжности связывания может быть получено как за счёт увеличения числа используемых в методе признаков особенности, так и за счёт дальнейшего развития и оптимизации механизмов связывания. В первую очередь следует обратить внимание на возможность установления и контроля поперечных связей в получаемых сетях. Создание поперечных связей переводит цепочку из одномерной структуры в более стабильную двумерную структуру – сеть, вводя некоторую избыточность. Переход к сети требует выполнения дополнительных циклов поперечного скиппинга, поэтому повышение надёжности произойдёт здесь по цене более продолжительного времени сканирования. В качестве примера вновь можно привести молекулу ДНК, состоящую из двух спиралей – цепочечных структур, скреплённых поперечными связями.

Если в процессе ООС возникает ошибка связывания, то она легко обнаруживается либо по отсутствию особенности в заданной позиции цепочки, либо по большому смещению относительно этой позиции, либо по несоответствию других признаков особенности. Для устранения ошибки связывания существующий алгоритм следует снабдить специальным механизмом автоматического восстановления правильного связывания. Выполнив в месте сбоя привязку к ближайшей особенности, а затем сканирование апертуры с последующим анализом признаков захваченной особенности, а также признаков и структуры её ближайших соседей, отыскиваются совпадения в цепи. Если данных в текущей апертуре недостаточно для уверенной идентификации места “повреждения”, то размер апертуры увеличивается, и описанная последовательность действий повторяется. Определив ближайшую к месту сбоя особенность цепи, производится переход к этой особенности и привязка, после чего проверяется целостность цепи путём перемещения от одного её элемента к другому. Достигнув последней особенности цепочки, ООС возобновляется.

Следует отметить, что восстановление правильного связывания возможно только на разупорядоченной поверхности либо на упорядоченной, если последняя имеет дефекты или некоторую сверхструктуру, сверхрешётку и т. п.,<sup>19,60,63,99</sup> размеры которой превосходят размеры используемой апертуры. Обсуждаемые вопросы повышения надёжности ООС особенно актуальны в тех случаях, когда в процессе измерения существует вероятность непреднамеренной модификации поверхности, что обычно происходит на мягких образцах, на легко разрушаемых хрупких образцах, а также на образцах, имеющих значительный слой слабосвязанного адсорбата.

Изначально искажающие факторы в предложенном методе были разделены на две группы, в первую временную вошли термодрейф и крип, а во вторую пространственную –

нелинейность, кауплинг, неортогональность. В пределах каждой из групп дальнейшее разделение не требуется и, по-видимому, в полной мере невозможно. Так как в данном алгоритме гистерезис в сегменте никак не компенсирован, то измерения будут содержать погрешности. Учитывая сказанное, метод рекомендуется применять в микроскопах, где гистерезис либо устранён,<sup>100</sup> либо мал.<sup>101,102</sup>

Анализ экспериментального материала показывает, что в сравнении с обычным сканированием алгоритм ООС не порождает больших крипов и связанных с ними погрешностей: малые размеры апертур и сегментов, короткие плавные переходы между особенностями, взаимно-встречные перемещения в апертуре, в сегменте, при скиппинге и в квази-строках, возможность задания после перемещения паузы любой длительности посредством введения последовательности циклов привязки к особенности.

С целью дальнейшего уменьшения абсолютной величины крипа, самогенерируемого в процессе ООС, возможно осуществить оптимизацию траектории связывания. Необходимо уметь так связывать особенности в группе, чтобы развиваемый результирующий дрейф был бы минимальным, приблизительно постоянным по величине и по направлению. При выполнении анализа следует учитывать предыдущие перемещения в цепочке и будущие на некоторую глубину от текущего положения. Учёт перемещений можно вести, хотя и менее эффективно, “вслепую” – динамически в процессе сканирования, либо выполнить сканирование поверхности обычным способом, а затем производя на полученной картинке виртуальное сканирование и соответствующий анализ. В последнем случае можно найти некоторую оптимальную или близкую к ней траекторию связывания, после чего попытаться реализовать её в реальном режиме.

Другой вид искажений, всё ещё присутствующий в изображениях, полученных методом ООС, вызван эффектами взаимодействия зонда с поверхностью, размерами зонда и его формой.<sup>5,20,60,61,66,85,88,89,90,103,104,105,106</sup> Среди возможных причин появления временных нестабильностей, наблюдавшихся в процессе ООС атомной поверхности графита, следует отметить: наличие у использовавшихся механически срезанных игл многих окончаний, сложную динамику этих окончаний, нежелательную модификацию кончика иглы во время эксперимента, загрязнение и окисление кончика иглы при работе на воздухе.

Способы получения стабильных игл, оканчивающихся одним атомом, были описаны в работах Ватанабе<sup>90</sup> и Финка.<sup>107</sup> Финк, в частности, отмечал, что изготовленные в ионном микроскопе вольфрамовые иглы с моноатомным кончиком обладают долговременной стабильностью и позволяют проводить длительные эксперименты, связанные с накоплением статистических данных, что как раз и имеет место в ООС. Следовательно, для увеличения надёжности ООС атомного рельефа необходимо использовать высокий вакуум, чтобы предотвратить загрязнение и окисление иглы, а также встроить в вакуумную камеру ионный микроскоп, с помощью которого формировать и контролировать совершенный

кончик металлической иглы.

В настоящее время интенсивно развиваются работы по использованию нанотрубок в качестве зонда кантилевера.<sup>108,109</sup> Исследования нанотрубок показали, что они обладают целым рядом преимуществ по сравнению с обычными кремниевыми зондами. Зонд на основе одностенной нанотрубки имеет малый радиус кончика  $\sim 1$  нм, большое аспектное отношение, механически более прочен и износоустойчив. Применение зонда-нанотрубки и ООС представляется перспективным в АСМ-измерениях, где требуется получить рельеф поверхности с нанометровым и субнанометровым разрешением.

В представленной работе было показано, что пьезосканер микроскопа не может быть охарактеризован тремя фиксированными калибровочными коэффициентами, поскольку, строго говоря, данные параметры являются величинами распределёнными по пространству сканирования.

Усреднённая по нескольким областям величина компактности является полезной численной характеристикой формы основания особенности. Если форма основания особенности *a priori* известна, то по изменению компактности можно судить о шумах и искажениях, возникающих в процессе сканирования. Компактность может служить также критерием соразмерности особенности в латеральной плоскости и дополнительным признаком при распознавании.

Следует отметить, что виртуальное и реальное сканирование в настоящей работе было выполнено с использованием сегментов фиксированного размера. В случае, когда расстояния между особенностями и/или размеры самих особенностей имеют большой разброс, размер сегмента становится переменным и должен определяться динамически в процессе сканирования. При этом необходимо помнить, что, начиная с определённой плотности особенностей, эффективность применения метода ООС в реальном режиме может оказаться низкой: затраты времени сканирования большие, а увеличение точности измерений незначительное.

Поскольку в способе ООС высокая точность измерений достигается ценой резкого снижения производительности сканирования: большое число усреднений, дополнительные перемещения зонда, высокая избыточность данных, то использование алгоритма на практике во многом определяется долговременной стабильностью микроскопа и его быстроедействием. Чем быстрее происходит сканирование, тем более медленным на его фоне выглядит процесс изменения термодрейфа, и тем, в свою очередь, меньшую погрешность вносит применяемая схема линеаризации. Следует отметить, что точные измерения, выполняемые обычным строчным сканированием, часто также имеют продолжительный характер.<sup>13-16</sup>

По причине высокой избыточности проводимых измерений объём данных в приборе возрастает многократно (в 5-15 и более раз, в значительной степени зависит от задавае-

мого количества усреднений, устанавливаемого числа точек в апертуре и в сегменте, режимов работы и т. п.), поэтому управляющий компьютер должен обладать большим объёмом оперативной и массовой памяти. Управляющий компьютер также должен иметь высокопроизводительный процессор, для того чтобы обеспечить распознавание особенностей в реальном масштабе времени. Так как задача распознавания легко распараллеливается, то для достижения предельного быстродействия следует использовать пару процессоров (один процессор распознаёт холмы, а другой – ямы), разделяющую общую область памяти. Современное развитие средств вычислений вполне удовлетворяет тем требованиям, которые предъявляет к ним предлагаемый метод измерений.

СЗМ представляет собой механическое устройство последовательного действия и способен считывать рельеф поверхности или производить воздействие на поверхность шаг за шагом последовательно во времени. В связи с избыточным характером измерений предлагаемого метода сканирования, а также, учитывая размеры площадей атомарно-гладких поверхностей доступных исследователю в настоящий момент, низкие скорости сканирования современных микроскопов и объёмы литографических работ, остро встаёт вопрос о возможных путях повышения быстродействия однозондовых микроскопов-нанолитографов.<sup>74,100,110</sup>

Известно, что в существующих СЗМ критическими элементами при попытке достижения высокой скорости сканирования оказываются пьезоманипулятор и система стабилизации вертикального положения зонда. Поэтому для создания быстродействующего микроскопа-нанолитографа следует разработать манипулятор с малым временем отклика и систему стабилизации с минимальной задержкой управляющего сигнала в петле обратной связи.

Для того чтобы увеличить быстродействие манипулятора необходимо сделать его как можно более миниатюрным. Основная цель миниатюризации это уменьшение инерционной массы манипулятора и времени распространения в нём звуковой волны. Современная технология позволяет изготавливать не только миниатюрные, но даже микромеханические приводы.<sup>70,86,111</sup> Так как рабочий диапазон подобных манипуляторов оказывается небольшим (единицы нанометров), то следует использовать промежуточные ступени для согласования перехода от мили/микрометрового масштаба к нанометровому при подводе зонда, компенсации в процессе сканирования среднего наклона поверхности и z-составляющей дрейфа. Причём для достижения наибольшей производительности сканирования промежуточные манипуляторы должны образовывать чёткую иерархию – диапазон перемещения/быстродействие.<sup>100</sup>

Следует подчеркнуть, что предельную скорость сканирования можно развить только на атомарно-гладких поверхностях. Попытка измерения рельефа с большей шероховатостью приведёт к тому, что в работу будут вовлечены более грубые медленные ступени

сканера, в результате чего производительность упадёт до уровня сравнимого с обычными системами, и выигрыш по времени от применения быстродействующего микроскопа получен не будет. Поэтому под используемой в нанолитографии поверхностью необходимо понимать именно атомарно-гладкую или близкую к ней поверхность.

Как было показано ранее, метод ООС достигает предельной точности при использовании в качестве особенностей атомов и междоузлий поверхности кристаллического тела, а надёжность ООС в сильной степени зависит от наличия загрязнений на поверхности. Поскольку атомарно-гладкую свободную от адсорбированных атомов и молекул поверхность можно получить только в сверхвысоком вакууме ( $10^{-10} \dots 10^{-11}$  тор), то сверхвысоковакуумный СЗМ<sup>92,112,113</sup> является тем прибором, на котором метод ООС может показать наилучшие результаты.

Эксперименты по ООС, выполненные на воздухе, позволили сделать следующие выводы. Первое, существующее оборудование способно обеспечить непрерывное многосточное измерение/манипулирование на поверхности. Однако, для того чтобы ООС стало более надёжным, стабильность микроскопа во времени при изображении атомов должна быть увеличена вдвое и доведена до одного сбоя, приводящего к потере зондом текущего атома поверхности, на  $10^6$  привязок. Рост стабильности сканирования предполагается произвести путём переноса измерений в высокий вакуум и применения игл с хорошо определённым кончиком.

Второе, для устойчивого сканирования и получения качественной реконструкции изображения атомного рельефа при небольшом числе циклов скиппинга (3-10) средняя величина полного дрейфа в процессе измерения должна быть не более  $0.5 \text{ \AA}/\text{с}$  в латеральной плоскости и  $0.05 \text{ \AA}/\text{с}$  в вертикальной плоскости.

Максимальный по продолжительности непрерывный эксперимент по сканированию разупорядоченной поверхности продолжался около 30 часов. ООС может быть приостановлено путём непрерывно повторяемой привязки зонда к текущей особенности, а затем продолжено. ООС может быть также полностью остановлено, а затем через некоторое время возобновлено, для чего необходимо только вручную найти последнюю особенность цепочки. В перспективе поиск последней особенности может быть автоматизирован. Опыт, приобретённый в процессе реального ООС, показывает, что время работы на одном и том же участке стабильной поверхности образца в полуконтактном режиме без потери разрешения может составлять месяцы.

Повысить производительность СЗМ можно, идя по пути одновременного использования множества зондов – линеек или матриц.<sup>86,114</sup> Основная проблема, с которой столкнулись разработчики многозондовых устройств, заключается в том, что каждый зонд должен иметь, по крайней мере, Z-манипулятор со своей собственной системой регулирования, чтобы выполнить локальное измерение/воздействие, не повредив себя и поверх-

ность. Для того чтобы использовать метод ООС в многозондовом микроскопено-аналитическом устройстве необходимо, чтобы каждый зонд обладал ещё и своими собственными XY-манипуляторами. Однако наличие XYZ-манипулятора у каждого зонда значительно усложняет конструкцию многозондового СЗМ. Из-за многократного увеличения и без того большого объёма получаемых данных управление многозондовым СЗМ становится ещё более сложным и должно осуществляться с применением многих процессоров, обслуживающих зонды в режиме разделения времени.

В современных аналитических системах, предназначенных для изучения поверхности, возможно получение изображений одного и того же участка различными методами. Причём, чем больше было задействовано методов, тем более адекватной будет интерпретация полученных данных. Однако нужно быть уверенным, что представленные данные относятся к одному и тому же участку поверхности. Очевидно, что некоторые особенности на некоторых изображениях различной физической природы будут либо менее контрастно выражены, либо будут даже отсутствовать вообще. Если число подобных особенностей невелико, то при использовании объектно-ориентированного подхода множество изображений может быть достаточно просто совмещено.

Способность микроскопа автономно перемещать зонд в заданном направлении от одного атома к другому, можно использовать для автоматического поиска на поверхности различных дефектов: вакансий, включений, дислокаций, моноатомных ступенек, областей разупорядоченности и т. п. Одновременно с поиском может быть выполнено накопление статистической информации. Причём, траекторию перемещения при сборе статистики можно установить “блуждающей”, для чего последовательно случайным образом нужно задавать длину подцепочки и направление движения. Обладая соответствующими процедурами сорбции и десорбции, представляется совершенно реальным выполнить “залечивание” дефектов поверхности в полностью автоматическом режиме.

Удерживая направление движения так, чтобы оно постоянно совпадало с кристаллографическим направлением на поверхности, по искривлению цепочки можно выявлять присутствие микродефектов и напряжений в кристаллическом теле. Если представить себе цепочку атомов, молекул или иных особенностей<sup>37,115,116,117</sup> в качестве последовательности информационных бит, то данный принцип может быть использован при построении зондового запоминающего устройства (ЗЗУ) большой ёмкости<sup>117,118</sup> для целей стабилизации положения зонда на информационной дорожке.<sup>119</sup> Метод может также найти применение на начальном этапе проектирования ЗЗУ для натурального моделирования и идентификации<sup>120</sup> процесса считывания/записи, исследования механизмов записи, нахождения разброса размеров элементов памяти и их положений на дорожке, анализа дефектов дорожки, определения латеральной ориентации, локального тренда и взаимного положения дорожек и т. п.<sup>116</sup>

Так как негативное воздействие термодрейфа и ползучести практически сведено на нет, а нелинейность, неортогональность и кауплинг могут быть исправлены в процессе сборки изображения, то снимаются ограничения на размеры скана. Теперь последние определяются только диапазоном перемещения грубого пьезосканера, а также площадью поверхности образца пригодной для сканирования и/или модификации. При этом достигаемая методом ООС точность позволяет применять сканирующий зондовый микроскоп в качестве метрологического средства измерения и контроля.

Располагая информацией о пространственных положениях атомов, значительно упрощается обмен данными между СЗМ и существующими системами компьютерного молекулярного моделирования. Привязав зонд микроскопа к интересующему нас объекту, возможно *in situ* проследить за его движением по поверхности. Так, можно изучать миграцию отдельных атомов, молекул, подвижных кластеров, различного рода островков, следить за перемещениями и транспортом микробиологических объектов, исследовать движение дефектов в кристаллах и т. п.

Рассмотрим разработанный в университете Северной Каролины<sup>121</sup> США наноманипулятора DP-100 Phantom™.<sup>122,123</sup> Данное устройство стоимостью в несколько десятков тысяч долларов представляет собой ручной манипулятор с шестью степенями свободы, подключаемый к микроскопу фирмы ThermoMicroscopes.<sup>124</sup> Оператор перемещает ручку манипулятора в пространстве, а зонд СЗМ синхронно в соответствующем масштабе повторяет это движение на/вблизи поверхности образца. Причём три перемещения манипулятора имеют так называемую обратную реакцию (*force feedback*), что позволяет экспериментатору буквально почувствовать силы, с которыми поверхность притягивает/отталкивает зонд, почувствовать пластичность/упругость материала поверхности, адгезию, силы трения и т. п.

Так же как и наноманипулятор, предлагаемый в настоящей работе метод ООС компенсирует термодрейф и ползучесть, но делает это автоматически без всякого участия оператора (анализатор зрения человека заменён процедурой распознавания) и значительно более точно. Безусловно, предложенный наноманипулятор способен помочь экспериментатору особенно на самых ранних этапах исследования, когда на поверхности нужно что-то собрать или разобрать вручную.<sup>125</sup> Однако для продвижения наноманипулирования как промышленной технологии данное устройство, разумеется, нельзя считать критически важным элементом оборудования.

Благодаря постоянно действующей в методе ООС активной компенсации дрейфов и возможности эффективного подавления шумов, часть экспериментов по манипулированию атомами и молекулами, выполняемая ранее только на уникальных криоСЗМ,<sup>54,69,113,126</sup> теперь может быть проделана на обычных аппаратах при комнатной температуре, а СЗМ измерения нагреваемых/охлаждаемых образцов можно выполнять с

большим увеличением и с меньшими искажениями результатов. Непрерывный мониторинг дрейфа прибора полезен как при проведении экспериментов, так и при конструировании, испытании и анализе работы узлов самого микроскопа.

Перечисленные выше новые возможности, предоставляемые ООС, связанные с измерением, позиционированием, воздействием и манипулированием на поверхности, можно сочетать посредством составления сценариев с целью автоматизации сложных продолжительных экспериментов или технологических процессов.<sup>24</sup>

Как было показано, особенности определены в методе ООС в достаточно общем виде, что позволяет, в принципе, просканировать этим методом практически любую поверхность. Вопрос при применении метода состоит лишь в том, насколько использование данного подхода выгодно (эффективно) по сравнению с обычным сканированием, т. е. насколько велики преимущества метода ООС на данной поверхности, в заданных условиях и на данном приборе. На сегодняшний день решение этого вопроса полностью возлагается на плечи экспериментатора. Однако возможно создание методики, которая автоматически после пробного ООС исследуемой поверхности и анализа полученных результатов могла бы “посоветовать” оператору, опираясь на сделанные ею оценки, наиболее оптимальный для данного частного случая метод измерения рельефа.

## ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup>D. W. Pohl, Some design criteria in scanning tunneling microscopy, *IBM J. Res. Dev.*, vol. 30, № 4, p. 417, 1986.
- A. Hammiche, Y. Wei, I. H. Wilson, R. P. Webb, The surrey STM: Construction, development, and evaluation of a scanning tunneling microscope, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 62, № 12, p. 3010, 1991.
- <sup>2</sup>L. E. C. van de Leemput, P. H. H. Rongen, B. H. Timmerman, H. van Kempen, Calibration and characterization of piezoelectric elements as used in scanning tunneling microscopy, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 62, p. 989, 1991.
- <sup>3</sup>L. Libioulle, A. Ronda, M. Taborelli, J. M. Gilles, Deformation and nonlinearity in scanning tunneling microscope images, *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 9, p. 655, 1991.
- <sup>4</sup>E. Stoll, O. Marti, Restoration of scanning-tunneling-microscope data blurred by limited resolution, and hampered by  $1/f$ -like noise, *Surf. Sci.*, vol. 181, p. 222, 1987.
- <sup>5</sup>J. E. Griffith, D. A. Grigg, Dimensional metrology with scanning probe microscopes, *J. Appl. Phys.*, vol. 74, № 9, p. 83, 1993.
- <sup>6</sup>R. V. Lapshin, Hysteresis compensation model for STM scanning unit, *Proceedings of the Second International Conference on Nanometer-Scale Science and Technology (NANO-II)*, Herald of Russian Academy of Technological Sciences, vol. 1, № 7, part B, p. 511, Moscow, 1994.
- R. V. Lapshin, Analytical model for the approximation of hysteresis loop and its application to the scanning tunneling microscope, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 66, № 9, p. 4718, 1995.
- <sup>7</sup>Т. А. Поплёвкин, А. А. Ерофеев, Математическая модель пьезоэлектрического двигателя с учётом гистерезиса, *Применение туннельной микроскопии*, Межвузовский сборник научных трудов, стр. 35, МИРЭА, Москва, 1989.
- <sup>8</sup>E. P. Stoll, Correction of geometrical distortions in scanning tunneling and atomic force microscopes caused by piezo hysteresis and nonlinear feedback, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 65, № 9, p. 2864, 1994.
- <sup>9</sup>J. F. Jørgensen, K. Carneiro, L. L. Madsen, K. Conradsen, Hysteresis correction of scanning tunneling microscope images, *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 12, № 3, p. 1702, 1994.
- <sup>10</sup>S. Vieira, The behavior and calibration of some piezoelectric ceramics used in the STM, *IBM J. Res. Dev.*, vol. 30, № 5, p. 553, 1986.
- E. P. Stoll, Restoration of STM images distorted by time-dependent piezo driver aftereffects, *Ultramicroscopy*, vol. 42-44, p. 1585, 1992.
- <sup>11</sup>J. E. Griffith, G. L. Miller, C. A. Green, D. A. Grigg, P. E. Russell, A scanning tunneling microscope with a capacitance-based position monitor, *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 8, № 6, p. 2023, 1990.
- <sup>12</sup>R. C. Barrett, C. F. Quate, Optical scan-correction system applied to atomic force microscopy, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 62, № 6, p. 1393, 1991.
- <sup>13</sup>W. Lin, U. Kuetgens, P. Becker, L. Koenders, L. Dacheng, C. Mang, Calibration of standards for precision pitch measurement in the nanometre region by combined scanning tunnelling microscopy and x-ray interferometry, *Nanotechnology*, vol. 10, p. 412, 1999.
- <sup>14</sup>H. Kawakatsu, Y. Hoshi, T. Higuchi, H. Kitano, Crystalline lattice for metrological applications and posi-

- tioning control by a dual tunneling-unit scanning tunneling microscope, *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 9, № 2, p. 651, 1991.
- T. Fujii, M. Suzuki, T. Higuchi, H. Kougami, H. Kawakatsu, Step height measurement using a scanning tunneling microscope equipped with a crystalline lattice reference and interferometer, *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 13, № 3, p. 1112, 1995.
- H. Kawakatsu, H. Kougami, Automated calibration of the sample image using crystalline lattice for scale reference in scanning tunneling microscopy, *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 14, № 1, p. 11, 1996.
- H. Zhang, T. Higuchi, N. Nishioki, Dual tunneling-unit scanning tunneling microscope for length measurement based on crystalline lattice, *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 15, № 1, p. 174, 1997.
- H. Zhang, F. Huang, T. Higuchi, Dual unit scanning tunneling microscope-atomic force microscope for length measurement based on reference scales, *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 15, № 4, p. 780, 1997.
- M. Aketagawa, K. Takada, K. Kobayashi, N. Takeshima, M. Noro, Y. Nakayama, Length measurement using a regular crystalline lattice and a dual tunneling unit scanning tunneling microscope in a thermostabilized cell, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 9, p. 1076, 1998.
- T. Fujii, K. Imabori, H. Kawakatsu, S. Watanabe, H. Bleuler, Atomic force microscope for direct comparison measurement of step height and crystalline lattice spacing, *Nanotechnology*, vol. 10, p. 380, 1999.
- <sup>15</sup>M. Aketagawa, K. Takada, Correction of distorted STM image by using a regular crystalline lattice and 2D FFT, *Nanotechnology*, vol. 6, p. 105, 1995.
- <sup>16</sup>F. Meli, R. Thalmann, Long-range AFM profiler used for accurate pitch measurements, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 9, p. 1087, 1998.
- <sup>17</sup>T. Fujii, M. Suzuki, M. Yamaguchi, R. Kawaguchi, H. Yamada, K. Nakayama, Three-dimensional displacement measurement of a tube scanner for a scanning tunneling microscope by optical interferometer, *Nanotechnology*, vol. 6, p. 121, 1995.
- <sup>18</sup>M. F. Bocko, The scanning tunneling microscope as a high-gain, low-noise displacement sensor, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 61, № 12, p. 3763, 1990.
- <sup>19</sup>A. Charlier, M. F. Charlier, D. Fristot, Binary graphite intercalation compounds, *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 50, № 10, p. 987, 1989.
- <sup>20</sup>S. D. O'Connor, R. C. Gamble, R. K. Eby, J. D. Baldeschwieler, Noise reduction in atomic force microscopy: Resonance contact mode, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 67, № 2, p. 393, 1996.
- <sup>21</sup>E. E. Mola, C. A. Paola, J. L. Vicente, Interpretation of anomalous scanning tunneling microscopy images of layered materials, *Langmuir*, vol. 12, № 1, p. 125, 1996.
- <sup>22</sup>V. Y. Yurov, A. N. Klimov, Scanning tunneling microscope calibration and reconstruction of real image: Drift and slope elimination, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 65, № 5, p. 1551, 1994.
- <sup>23</sup>J. F. Jørgensen, L. L. Madsen, J. Garnaes, K. Carneiro, K. Schaumburg, Calibration, drift elimination, and molecular structure analysis, *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 12, № 3, p. 1698, 1994.
- <sup>24</sup>Р. В. Лапшин, Позиционирование зонда сканирующего микроскопа-наноитографа по локальным особенностям поверхности, Тезисы докладов третьей международной научно-технической конференции “Электроника и информатика – XXI век”, стр. 167, Москва, Зеленоград, 2000.

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*”, шифр “\*\*\*\*”, научно-технический отчет, 2000.

R. V. Lapshin, Feature-oriented scanning for spacecraft-borne remote SPM-investigations, Workshop on Micro-Nano Technology for Aerospace Applications, Montreal, Canada, 2002.

R. V. Lapshin, Feature-oriented scanning for probe microscopy and nanotechnology, Rev. Sci. Instrum., в печати.

<sup>25</sup>Р. В. Лапшин, Способ измерения рельефа поверхности сканирующим зондовым микроскопом, Патент РФ на изобретение № 2175761, приоритет от 08.06.1999.

<sup>26</sup>Р. В. Лапшин, Процедура распознавания атомов в СТМ изображениях, Тезисы докладов третьей международной научно-технической конференции “Микроэлектроника и информатика”, стр. 222, Москва, Зеленоград, 1997.

<sup>27</sup>Р. В. Лапшин, В. Н. Рябоконт, А. В. Денисов, Измерение пространственных характеристик упорядоченных поверхностных наноструктур на сканирующем туннельном микроскопе, Труды второй международной научно-технической конференции “Микроэлектроника и информатика”, выпуск 2, стр. 349, Москва, Зеленоград, 1997.

R. V. Lapshin, Automatic lateral calibration of tunneling microscope scanners, Rev. Sci. Instrum., vol. 69, № 9, p. 3268, 1998.

<sup>28</sup>G. E. Engelmann, J. C. Ziegler, D. M. Kolb, Electrochemical fabrication of large arrays of metal nano-clusters, Surf. Sci. Lett., vol. 401, p. L420, 1998.

<sup>29</sup>J. A. Alonso, M. J. López, L. M. Molina, F. Duque, A. Mañanes, Conditions for the self-assembling of cluster materials, Nanotechnology, vol. 13, № 3, p. 253, 2002.

<sup>30</sup>X. Hu, D. Sarid, P. von Blanckenhagen, Nano-patterning and single electron tunnelling using STM, Nanotechnology, vol. 10, p. 209, 1999.

<sup>31</sup>L. T. Hansen, A. Kühle, A. H. Sørensen, J. Bohr, P. E. Lindelof, A technique for positioning nanoparticles using an atomic force microscope, Nanotechnology, vol. 9, p. 337, 1998.

<sup>32</sup>H. Huang, G. Q. Xu, W. S. Chin, L. M. Gan, C. H. Chew, Synthesis and characterization of Eu:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles, Nanotechnology, vol. 13, № 3, p. 318, 2002.

<sup>33</sup>P. Coli, G. Iannaccone, Modelling of self-organized InAs quantum dots embedded in an AlGaAs/GaAs heterostructure, Nanotechnology, vol. 13, № 3, p. 263, 2002.

<sup>34</sup>V. V. Yuzhakov, H. C. Chang, A. E. Miller, Pattern formation during electropolishing, Phys. Rev. B, vol. 56, № 19, p. 12608, 1997.

<sup>35</sup>Y. Sui, J. M. Saniger, Characterization of anodic porous alumina by AFM, Materials Letters, vol. 48, p. 127, 2001.

<sup>36</sup>R. Gago, L. Vázquez, R. Cuerno, M. Varela, C. Ballesteros, J. M. Albella, Nanopatterning of silicon surfaces by low-energy ion-beam sputtering: dependence on the angle of ion incidence, Nanotechnology, vol. 13, № 3, p. 304, 2002.

<sup>37</sup>А. В. Емельянов, В. В. Егоркин, О природе упорядоченных структур на поверхности кремния, Поверхность. Физика, химия, механика, № 1, стр. 94, 1988.

С. Д. Дубровенский, А. В. Емельянов, А. В. Зимин, В. Н. Инкин, А. А. Малков, А. А. Малыгин,

- С. М. Портнов, Формирование поверхностных структур на графите в реакциях с галогенидами ванадия, титана, фосфора и хрома, Журнал прикладной химии, том. 65, стр. 2259, 1992.
- <sup>38</sup>К. Lieberman, N. Ben-Ami, A. Lewis, A fully integrated near-field optical, far-field optical, and normal-force scanned probe microscope, Rev. Sci. Instrum., vol. 67, № 10, p. 3567, 1996.
- <sup>39</sup>N. Nakagiri, T. Yamamoto, H. Sugimura, Y. Suzuki, M. Miyashita, S. Watanabe, Application of scanning capacitance microscopy to semiconductor devices, Nanotechnology, vol. 8, p. A32, 1997.
- <sup>40</sup>A. Baratoff, Theory of scanning tunneling microscopy – methods and approximations, Physica, vol. 127B, p. 143, 1984.
- J. Tersoff, Method for the calculation of scanning tunneling microscope images and spectra, Phys. Rev. B, vol. 40, № 17, p. 11990, 1989.
- <sup>41</sup>Y. Kuk, P. J. Silverman, Scanning tunneling microscope instrumentation, Rev. Sci. Instrum., vol. 60, № 2, p. 165, 1989.
- <sup>42</sup>C. J. D. M. Verhagen, R. P. W. Duin, F. C. A. Groen, J. C. Joosten, P. W. Verbeek, Progress report on pattern recognition, Reports on progress in physics, vol. 43, № 6, p. 785, 1980.
- <sup>43</sup>G. S. Sidhu, R. T. Boute, Property encoding: application in binary picture encoding and boundary following, IEEE Trans. Comput., vol. 21, p. 1206, 1972.
- <sup>44</sup>F. P. Preparata, M. I. Shamos, Computational Geometry. An Introduction, Springer-Verlag, New York, 1985.
- <sup>45</sup>H. Freeman, On the encoding of arbitrary geometric configurations, IRE Trans. Electron. Comput., vol. 10, p. 260, 1961.
- <sup>46</sup>A. Rosenfeld, A. C. Kak, Digital picture processing, Academic Press, New York, 1976.
- <sup>47</sup>Л. А. Залманзон, Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях, Наука, Москва, 1989.
- <sup>48</sup>J. S. Bendat, A. G. Piersol, Random data: Analysis and measurement procedures, John Wiley & Sons, New York, 1986.
- <sup>49</sup>Я. А. Рудзит, В. Н. Плуталов, Основы метрологии, точность и надёжность в приборостроении, Машиностроение, Москва, 1991.
- J. F. Jørgensen, K. Carneiro, L. L. Madsen, The scanning tunneling microscope and surface characterization, Nanotechnology, vol. 4, p. 152, 1993.
- П. А. Арутюнов, А. Л. Толстихина, В. Н. Демидов, Система параметров для анализа шероховатости и микрорельефа поверхности материалов в сканирующей зондовой микроскопии, Заводская лаборатория. Диагностика материалов, том. 65, № 9, стр. 27, 1999.
- <sup>50</sup>А. Р. Alekhin, A. G. Kirilenko, R. V. Lapshin, A. A. Sigarev, AFM studies of the morphology of the carbon layers deposited on medical low-density polyethylene films by the method of pulsed plasma-arc sputtering of graphite, Report Abstracts, International Conference on Nanotechnology and MEMS (IR04), Galway, Ireland, 2002.
- А. П. Алёхин, А. Г. Кириленко, Р. В. Лапшин, А. А. Сигарёв, Морфология поверхности тонких углеродных плёнок, осаждённых из плазмы на полиэтилен низкой плотности, готовится к публикации в журнале Поверхность.

- <sup>51</sup>Р. В. Лапшин, Исправление искажённых дрейфом СЗМ-изображений, Тезисы докладов третьей международной научно-технической конференции “Электроника и информатика – XXI век”, стр. 76, Москва, Зеленоград, 2000.
- R. V. Lapshin, Automatic drift elimination in scanning probe microscope images, готовится к публикации в журнале *Review of Scientific Instruments*.
- <sup>52</sup>Р. В. Лапшин, Способ автоматической коррекции искажённых дрейфом изображений сканирующего зондового микроскопа, Заявка на патент РФ (находится на стадии оформления), 2002.
- <sup>53</sup>N. E. McKeith, R. W. Smith, J. R. Whiteford, An interferometric technique for the electromechanical calibration of piezoelectric transducers, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, vol. 9, p. 15, 1976.
- В. А. Горбаренко, О. Г. Горбачёва, А. А. Ерофеев, В. А. Исупов, Г. Р. Левинсон, М. А. Салтхуцишвили, Е. П. Смирнова, Калибровка двигателей СТМ, Вопросы туннельной микроскопии, Межвузовский сборник научных трудов, стр. 64, МИРЭА, Москва, 1987.
- G. C. Wetsel, S. E. McBride, R. J. Warmack, B. Van de Sande, Calibration of scanning tunneling microscope transducers using optical beam deflection, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 55, № 6, p. 528, 1989.
- G. E. Poirier, J. M. White, Diffraction grating calibration of scanning tunneling microscope piezoscaners, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 61, № 12, p. 3917, 1990.
- H. Haitjema, N. Rosielle, G. Kotte, H. Steijaert, Design and calibration of a parallel-moving displacement generator for nano-metrology, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 9, p. 1098, 1998.
- <sup>54</sup>J. G. Adler, T. T. Chen, M. C. Gallagher, M. K. Konkin, D. P. Mullin, Comparison of various low-temperature scanning tunneling microscopy designs for use in spectroscopy and topography, *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 9, № 2, p. 992, 1991.
- <sup>55</sup>E. Ganz, K. Sattler, J. Clarke, Scanning tunneling microscopy of silver, gold, and aluminum monomers and small clusters on graphite, *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 6, № 2, p. 419, 1988.
- <sup>56</sup>S. Carrara, P. Facci, C. Nicolini, More information on the calibration of scanning stylus microscopes by two-dimensional fast Fourier-transform analysis, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 65, p. 2860, 1994.
- <sup>57</sup>D. M. Tratt, Voltage dependence of the  $d_{31}$  tensor element in  $Pb(Ti, Zr)O_3$ , *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 54, № 5, p. 635, 1983.
- <sup>58</sup>S. Morita, S. Tsukada, N. Mikoshiba, Scanning tunneling microscopy of Kish graphite and highly oriented pyrolytic graphite in air, *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 6, №2, p. 354, 1988.
- <sup>59</sup>H. Bando, N. Morita, H. Tokumoto, W. Mizutani, K. Watanabe, A. Homma, S. Wakiyama, M. Shigeno, K. Endo, K. Kajimura, Scanning tunneling spectroscopy study on graphite and  $2H-NbSe_2$ , *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 6, №2, p. 344, 1988.
- <sup>60</sup>D. Tománek, S. G. Louie, H. J. Mamin, D. W. Abraham, R. E. Thomson, E. Ganz, J. Clarke, Theory and observation of highly asymmetric atomic structure in scanning-tunneling-microscopy images of graphite, *Phys. Rev. B*, vol. 35, № 14, p. 7790, 1987.
- <sup>61</sup>I. P. Batra, N. Garcia, H. Rohrer, H. Salemink, E. Stoll, S. Ciraci, A study of graphite surface with STM and electronic structure calculations, *Surf. Sci.*, vol. 181, p. 126, 1987.
- I. P. Batra, S. Ciraci, Theoretical scanning tunneling microscopy and atomic force microscopy study of graphite including tip-surface interaction, *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 6, №2, p. 313, 1988.

- <sup>62</sup>H. W. M. Salemink, I. P. Batra, H. Rohrer, E. Stoll, E. Weibel, Topography of defects at atomic resolution using scanning tunneling microscopy, *Surf. Sci.*, vol. 181, p. 139, 1987.
- M. Kuwabara, D. R. Clarke, D. A. Smith, Anomalous superperiodicity in scanning tunneling microscope images of graphite, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 56, № 24, p.2396, 1990.
- T. Iri, H. Shiba, H. Nishikawa, Observation of surface corrugation of highly oriented pyrolytic graphite by scanning tunneling microscope in air, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 31, p. 1441, 1992.
- <sup>63</sup>J. Garbarz, E. Lacaze, G. Faivre, S. Gauthier, M. Schott, Dislocation networks in graphite: a scanning tunneling microscopy study, *Philosophical Magazine A*, vol. 65, № 4, p. 853, 1992.
- S. Kondo, M. Lutwyche, Y. Wada, Observation of threefold symmetry images due to a point defect on a graphite surface using scanning tunneling microscope (STM), *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 33, № 9B, Part 2, p. L1342, 1994.
- <sup>64</sup>W. J. Kaiser, R. C. Jaklevic, Scanning tunneling microscopy study of metals: spectroscopy and topography, *Surf. Sci.*, vol. 181, p. 55, 1987.
- M. P. Everson, R. C. Jaklevic, Measurement of the local density of states on a metal surface: Scanning tunneling spectroscopic imaging of Au(111), *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 8, №5, p. 3662, 1990.
- <sup>65</sup>C. M. Bishop, Neural networks and their applications, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 65, № 6, p. 1803, 1994.
- <sup>66</sup>W. L. Wang, D. J. Whitehouse, Application of neural networks to the reconstruction of scanning probe microscope images distorted by finite-size tips, *Nanotechnology*, vol. 6, p. 45, 1995.
- <sup>67</sup>H. J. Mamin, P. H. Guethner, D. Rugar, Atomic emission from a gold scanning-tunneling-microscope tip, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 65, p. 2418, 1990.
- <sup>68</sup>T. A. Jung, R. R. Schlittler, J. K. Gimzewski, H. Tang, C. Joachim, Controlled room-temperature positioning of individual molecules: Molecular flexure and motion, *Science*, vol. 271, p. 181, 1996.
- R. F. Service, Molecules get wired, *Science*, vol. 294, p. 2442, 2001.
- <sup>69</sup>D. M. Eigler, E. K. Schweizer, Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope, *Nature*, vol. 344, № 6266, p. 524, 1990.
- <sup>70</sup>J. A. Stroscio, D. M. Eigler, Atomic and molecular manipulation with the scanning tunneling microscope, *Science*, vol. 254, p. 1319, 1991.
- <sup>71</sup>M. O. Bashkin, V. A. Bespalov, A. V. Emelyanov, V. N. Inkin, S. M. Portnov, A. V. Zimin, S. I. Kharkevich, O. D. Menshikov, Surface modification of organic films deposited on graphite by the scanning tunneling microscope, *Ultramicroscopy*, vol. 42-44, p. 977, 1992.
- <sup>72</sup>K. Matsumoto, Room temperature operated single electron transistor made by STM/AFM nano-oxidation process, *Physica B*, vol. 227, p. 92, 1996.
- D. Fujita, Q-D. Jiang, Z-C. Dong, H-Y. Sheng, H. Nejh, Nanostructure fabrication on silicon surfaces by atom transfer from a gold tip using an ultrahigh vacuum scanning tunneling microscope, *Nanotechnology*, vol. 8, p. A10, 1997.
- H. W. Schumacher, U. F. Keyser, U. Zeitler, R. J. Haug, K. Eberl, Controlled mechanical AFM machining of two-dimensional electron systems: fabrication of a single-electron transistor, *Physica E*, vol. 6, p. 860, 2000.
- <sup>73</sup>M. Sundaram, S. A. Chalmers, P. F. Hopkins, A. C. Gossard, New quantum structures, *Science*,

vol. 254, p. 1326, 1991.

<sup>74</sup>S. Gregory, C. T. Rogers, High-speed scanning tunneling microscopes, *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 6, №2, p. 390, 1988.

S. Gregory, C. T. Rogers, High speed scanning tunneling microscope, Bell Communications Research, Inc., United States Patent № 4814622, March 21, 1989.

<sup>75</sup>G. Binnig, H. Rohrer, Scanning tunneling microscopy, *Surf. Sci.*, vol. 126, p. 236, 1983.

G. Binnig, H. Nievergelt, H. Rohrer, E. Weibel, Piezo-electric travelling support, International Business Machines Corporation, U. S. Patent № 4422002, December 20, 1983.

H. J. Mamin, D. W. Abraham, E. Ganz, J. Clarke, Two-dimensional, remote micropositioner for a scanning tunneling microscope, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 56, № 11, p. 2168, 1985.

B. W. Corb, M. Ringger, H.-J. Güntherodt, An electromagnetic microscopic positioning device for the scanning tunneling microscope, *J. Appl. Phys.*, vol. 58, № 11, p. 3947, 1985.

Ch. Gerber, G. Binnig, H. Fuchs, O. Marti, H. Rohrer, Scanning tunneling microscope combined with a scanning electron microscope, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 57, № 2, p. 221, 1986.

M. Ringger, B. W. Corb, H.-R. Hidber, R. Schlögl, R. Wiesendanger, A. Stemmer, L. Rosenthaler, A. J. Brunner, P. C. Oelhafen, H.-J. Güntherodt, STM activity at the University of Basel, *IBM J. Res. Dev.*, vol. 30, № 5, p. 500, 1986.

<sup>76</sup>K. Takata, S. Hosoki, S. Hosaka, T. Tajima, Scanning tunneling microscope with reliable coarse positioners, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 60, № 4, p. 789, 1989.

<sup>77</sup>J. G. H. Hermsen, H. van Kempen, B. J. Nelissen, L. L. Soethout, G. F. A. van de Walle, P. J. W. Weijs, P. Wyder, New mechanical constructions for the scanning tunneling microscope, *Surf. Sci.*, vol. 181, p. 183, 1987.

T. Kato, F. Osaka, I. Tanaka, S. Ohkouchi, A scanning tunneling microscope using dual-axes inchworms for the observation of a cleaved semiconductor surface, *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 9, № 4, p. 1981, 1991.

<sup>78</sup>K. Besocke, An easily operable scanning tunneling microscope, *Surf. Sci.*, vol. 181, p. 145, 1987.

D. W. Pohl, Sawtooth nanometer slider: a versatile low voltage piezoelectric translation device, *Surf. Sci.*, vol. 181, p. 174, 1987.

M. Anders, M. Thaer, M. Mück, C. Heiden, Scanning tunneling microscopy imaging of microbridges under scanning electron microscopy control, *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 6, № 2, p. 436, 1988.

Д. И. Старченко, В. Н. Горелов, Модель пьезодинамического двигателя грубых перемещений для СТМ, Применение туннельной микроскопии, Межвузовский сборник научных трудов, стр. 45, МИРЭА, Москва, 1989.

М. В. Евдокимов, А. В. Киселёв, В. Н. Сарычев, Инерционный шагатель для СТМ, Применение туннельной микроскопии, Межвузовский сборник научных трудов, стр. 82, МИРЭА, Москва, 1989.

C. Renner, P. Niedermann, A. D. Kent, Ø. Fischer, A vertical piezoelectric inertial slider, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 61, № 3, p. 965, 1990.

S. C. Meepagala, F. Real, C. B. Reyes, A. Novoselskaya, Z. Rong, E. L. Wolf, Compact scanning tunneling microscope with easy-to-construct X-Z inertial sample translation, *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 8,

№ 4, p. 3555, 1990.

C. N. Woodburn, A. W. McKinnon, D. A. Roberts, M. E. Taylor, M. E. Welland, A one-dimensional piezo-electric-driven inertial micropositioner with vertical capabilities, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 4, p. 535, 1993.

K. Svensson, F. Althoff, H. Olin, A compact inertial slider STM, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 8, p. 1360, 1997.

<sup>79</sup>E. C. Teague, The National Institute of Standards and Technology molecular measuring machine project: Metrology and precision engineering design, *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 7, № 6, p. 1898, 1989.

<sup>80</sup>M. Anders, M. Thaer, C. Heiden, Simple micropositioning devices for STM, *Surf. Sci.*, vol. 181, p. 176, 1987.

G. Y. Shang, J. E. Yao, J. He, A new scanning tunneling microscope with large field of view and atomic resolution, *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 9, № 2, p. 612, 1991.

V. B. Elings, System for scanning large sample areas with a scanning probe microscope, Digital Instruments, Inc., U. S. Patent № 4999494, March 12, 1991.

J. Fu, R. D. Young, T. V. Vorburger, Long-range scanning for scanning tunneling microscopy, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 63, № 4, p. 2200, 1992.

<sup>81</sup>National Institute of Standards and Technology, адрес в интернете: <http://www.nist.gov>.

<sup>82</sup>Р. В. Лапшин, Способ перемещения зонда сканирующего микроскопа-наноитографа в поле грубого X-Y позиционера, Патент РФ на изобретение № 2181212, приоритет от 07.09.1999.

<sup>83</sup>D. W. Pohl, R. Möller, "Tracking" tunneling microscopy, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 59, № 6, p. 840, 1988.

<sup>84</sup>M. Despont, H. Takahashi, S. Ichihara, Y. Shirakawabe, N. Shimizu, A. Inoue, W. Haberle, G. K. Binnig, P. Vettiger, Dual-cantilever AFM probe for combining fast and coarse imaging with high-resolution imaging, *Proceedings of IEEE 13th Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 2000.

<sup>85</sup>P. J. Ouseph, M. Gossman, Effects of self-modifying multiple tips on STM surface pictures, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 9, p. 701, 1998.

<sup>86</sup>S. A. Miller, K. L. Turner, N. C. MacDonald, Microelectromechanical scanning probe instruments for array architectures, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 68, № 11, p. 4155, 1997.

M. Lutwyche, C. Andreoli, G. Binnig, J. Brugger, U. Drechsler, W. Haeberle, H. Rohrer, H. Rothuizen, P. Vettiger, Microfabrication and parallel operation of 5×5 2D AFM cantilever arrays for data storage and imaging, *IEEE Proceedings of the Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, p. 8, 1998.

<sup>87</sup>M. Luna, J. Colchero, A. Gil, J. Gómez-Herrero, A. M. Baró, Application of non-contact scanning force microscopy to the study of water adsorption on graphite, gold and mica, *Applied Surface Science*, vol. 157, p. 393, 2000.

<sup>88</sup>T. Tiedje, J. Varon, H. Deckman, J. Stokes, Tip contamination effects in ambient pressure scanning tunneling microscopy imaging of graphite, *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 6, № 2, p. 372, 1988.

R. J. Colton, S. M. Baker, R. J. Driscoll, M. G. Youngquist, J. D. Baldeschwieler, W. J. Kaiser, Imaging graphite in air by scanning tunneling microscopy: Role of the tip, *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 6, № 2, p. 349, 1988.

- S. Watanabe, M. Aono, M. Tsukada, First principles study of the effect of tip shape on scanning tunneling microscopy images, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 32, № 6B, Part 1, p. 2911, 1993.
- <sup>89</sup>N. Isshiki, K. Kobayashi, M. Tsukada, Effect of electronic states of the tip on the STM image of graphite, *Surf. Sci. Lett.* vol. 238, p. L439, 1990.
- <sup>90</sup>M. O. Watanabe, T. Kinno, Rhenium tips for stable scanning tunneling microscopy, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 32, № 9A, Part 2, p. L1266, 1993.
- <sup>91</sup>M. Okano, K. Kajimura, S. Wakiyama, F. Sakai, W. Mizutani, M. Ono, Vibration isolation for scanning tunneling microscopy, *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 5, № 6, p. 3313, 1987.
- A. I. Oliva, V. Sosa, R. de Coss, R. Sosa, N. L. Salazar, J. L. Peña, Vibration isolation analysis for a scanning tunneling microscope, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 63, № 6, p. 3326, 1992.
- <sup>92</sup>G. E. Poirier, J. M. White, A new ultra-high vacuum scanning microscope design for surface science studies, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 60, № 10, p. 3133, 1989.
- <sup>93</sup>Molecular Devices and Tools for NanoTechnology, адрес в интернете: <http://www.ntmdt.com>.
- <sup>94</sup>N. A. Burnham, O. P. Behrend, F. Oulevey, G. Gremaud, P.-J. Gallo, D. Gourdon, E. Dupas, A. J. Kulik, H. M. Pollock, G. A. D. Briggs, How does a tip tap?, *Nanotechnology*, vol. 8, p. 67, 1997.
- <sup>95</sup>С. А. Гаврилов, В. В. Гусев, В. С. Днепровский, Е. А. Жуков, Е. А. Муляров, А. Н. Сырников, И. В. Яминский, Оптические свойства экситонов в квантовых нитях полупроводник (CdS) – диэлектрик, *Письма в ЖЭТФ*, том 70, вып. 3, стр. 216, 1999.
- S. Gavrillov, S. Lemeshko, V. Shevyakov, V. Roschin, A study of the self-aligned nanometre scale palladium clusters on silicon formation process, *Nanotechnology*, vol. 10, p. 213, 1999.
- <sup>96</sup>B. F. Coll, P. Sathrum, R. Aharonov, M. A. Tamor, Diamond-like carbon films synthesized by cathodic arc evaporation, *Thin Solid Films*, vol. 209, p. 165, 1992.
- J. Robertson, Deposition mechanisms for promoting  $sp^3$  bonding in diamond-like carbon, *Diamond and Related Materials*, vol. 2, p. 984, 1993.
- P. K. Chu, B. Y. Tang, L. P. Wang, X. F. Wang, S. Y. Wang, N. Huang, Third-generation plasma immersion ion implanter for biomedical materials and research, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 72, № 3, p. 1660, 2001.
- <sup>97</sup>В. И. Севастьянов, И. А. Титушкин, С. Л. Васин, И. Б. Розанова, А. П. Алёхин, В. И. Исаев, Влияние структурных и энергетических свойств углеродных покрытий на адгезию тромбоцитов человека, *Перспективные материалы*, № 5, стр. 24, 1999.
- <sup>98</sup>P. Trucano, R. Chen, Structure of graphite by neutron diffraction, *Nature*, vol. 258, № 5531, p. 136, 1975.
- <sup>99</sup>V. Elings, F. Wudl, Tunneling microscopy on various carbon materials, *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 6, № 2, p. 412, 1988.
- <sup>100</sup>R. V. Lapshin, O. V. Obyedkov, Fast-acting piezoactuator and digital feedback loop for scanning tunneling microscopes, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 64, № 10, p. 2883, 1993.
- <sup>101</sup>O. Nishikawa, M. Tomitori, A. Minakuchi, Piezoelectric and electrostrictive ceramics for STM, *Surf. Sci.*, vol. 181, p. 210, 1987.
- А. А. Ерофеев, В. А. Исупов, М. А. Салтхуцишвили, Е. П. Смирнова, А. В. Сотников, Н. К. Юшин, Электрострикционные микроманипуляторы для сканирующих туннельных микроскопов, *Вопросы*

- туннельной микроскопии, Межвузовский сборник научных трудов, стр. 47, МИРЭА, Москва, 1987.
- S. M. Hues, C. F. Draper, K. P. Lee, R. J. Colton, Effect of PZT and PMN actuator hysteresis and creep on nanoindentation measurements using force microscopy, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 65, № 5, p. 1561, 1994.
- <sup>102</sup>H. Kaizuka, Application of capacitor insertion method to scanning tunneling microscopes, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 60, № 10, p. 3119, 1989.
- <sup>103</sup>I. Ekvall, E. Wahlstöm, D. Claesson, H. Olin, E. Olsson, Preparation and characterization of electrochemically etched W tips for STM, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 10, p. 11, 1999.
- <sup>104</sup>E. J. Snyder, E. A. Eklund, R. S. Williams, Effects of tip size and asymmetry on scanning tunneling microscope topographs, *Surf. Sci. Lett.* vol. 239, p. 487, 1990.
- <sup>105</sup>R. A. Watts, J. R. Sambles, M. C. Hutley, T. W. Preist, C. R. Lawrence, A new optical technique for characterizing reference artefacts for surface profilometry, *Nanotechnology*, vol. 8, p. 35, 1997.
- <sup>106</sup>J. S. Villarrubia, Algorithms for scanned probe microscope image simulation, surface reconstruction, and tip estimation, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 102, № 4, p. 425, 1997.
- <sup>107</sup>H.-W. Fink, Mono-atomic tips for scanning tunneling microscopy, *IBM J. Res. Develop.*, vol. 30, № 5, p. 460, 1986.
- <sup>108</sup>Ю. Г. Красников, А. В. Покропивный, Моделирование сканирования поверхности графита углеродной (5,5) нанотрубкой с полукуполом бакминстерфуллерена на конце, *Поверхность*, № 10, стр. 13, 2000.
- <sup>109</sup>R. M. D. Stevens, N. A. Frederick, B. L. Smith, D. E. Morse, G. D. Stucky, P. K. Hansma, Carbon nanotubes as probes for atomic force microscopy, *Nanotechnology*, vol. 11, p. 1, 2000.
- L. Delzeit, C. V. Nguyen, R. M. Stevens, J. Han, M. Meyyappan, Growth of carbon nanotubes by thermal and plasma chemical vapour deposition processes and applications in microscopy, *Nanotechnology*, vol. 13, № 3, p. 280, 2002.
- <sup>110</sup>A. Bryant, D. P. E. Smith, C. F. Quate, Imaging in real time with the tunneling microscope, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 48, № 13, p. 832, 1986.
- V. B. Elings, J. A. Gurley, Feedback control for scanning tunnel microscopes, Digital Instruments, Inc., United States Patent № 4889988, December 26 1989.
- D. P. DiHella, J. H. Wandass, R. J. Colton, C. R. K. Marrian, Control systems for scanning tunneling microscopes with tube scanners, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 60, № 6, p. 997, 1989.
- R. Piner, R. Reifengerger, Computer control of the tunnel barrier width for the scanning tunneling microscope, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 60, № 10, p. 3123, 1989.
- T. Tiedje, A. Brown, Performance limits for the scanning tunneling microscope, *J. Appl. Phys.*, vol. 68, № 2, p. 649, 1990.
- S. Hosaka, T. Hasegawa, S. Hosoki, K. Takata, Fast scanning tunneling microscope for dynamic observation, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 61, № 4, p. 1342, 1990.
- R. S. Robinson, T. H. Kimsey, R. Kimsey, A digital integrator and scan generator coupled with dynamic scanning for scanning tunneling microscopy, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 62, № 7, p. 1772, 1991.

- B. A. Morgan, G. W. Stupian, Digital feedback control loops for scanning tunneling microscopes, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 62, № 12, p. 3112, 1991.
- G. Schitter, P. Menold, H. F. Knapp, F. Allgöwer, A. Stemmer, High performance feedback for fast scanning atomic force microscopes, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 72, № 8, p. 3320, 2001.
- <sup>111</sup>K. D. Wise, K. Najafi, Microfabrication techniques for integrated sensors and microsystems, *Science*, vol. 254, p. 1335, 1991.
- <sup>112</sup>O. Haase, M. Borbonus, P. Muralt, R. Koch, K. H. Rieder, A novel ultrahigh vacuum scanning tunneling microscope for surface science studies, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 61, № 5, p. 1480, 1990.
- D. M. Zeglinski, D. F. Ogletree, T. P. Beebe, Jr., R. Q. Hwang, G. A. Somorjai, M. B. Salmeron, An ultrahigh vacuum scanning tunneling microscope for surface science studies, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 61, № 12, p. 3769, 1990.
- <sup>113</sup>C. A. Lang, M. M. Dovek, C. F. Quate, Low-temperature ultrahigh-vacuum scanning tunneling microscope, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 60, № 10, p. 3109, 1989.
- <sup>114</sup>S. C. Minne, Ph. Flueckiger, H. T. Soh, C. F. Quate, Atomic force microscope lithography using amorphous silicon as a resist and advances in parallel operation, *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 13, № 3, p. 1380, 1995.
- <sup>115</sup>D. Saluel, J. Daval, B. Béchevet, C. Germain, B. Valon, Ultra high density data storage on phase change materials with electrical micro-tips, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 193, p. 488, 1999.
- <sup>116</sup>НИР “\*\*\*\*\*”, \*\*\*\*\*”, шифр “\*\*\*\*\*”, научно-технический отчет, 2000.
- НИР “Разработка микроэлектромеханического запоминающего устройства с постоянным накоплением информации”, шифр “Память”, научно-технический отчет, 2001.
- НИР “Разработка приборно-технологического базиса производства интеллектуальных нанотехнологических комплексов для создания нанозаписывающих устройств и терабитных микроэлектромеханических запоминающих устройств”, шифр “Терабит”, научно-технический отчет, 2002.
- <sup>117</sup>S. Hosaka, A. Kikukawa, H. Koyanagi, T. Shintani, M. Miyamoto, K. Nakamura, K. Etoh, SPM-based data storage for ultrahigh density recording, *Nanotechnology*, vol. 8, p. A58, 1997.
- B. W. Chui, H. J. Mamin, B. D. Terris, D. Rugar, and T. W. Kenny, Sidewall-implanted dual-axis piezoresistive cantilever for AFM data storage readback and tracking, *IEEE Proceedings of the Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, p. 12, 1998.
- <sup>118</sup>H. J. Mamin, B. D. Terris, L. S. Fan, S. Hoen, R. C. Barrett, D. Rugar, High-density data storage using proximal probe techniques, *IBM J. Res. Develop.*, vol. 39, № 6, p. 681, 1995.
- S. Hosaka, SPM based storage, *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 32, № 3, p. 1873, 1996.
- <sup>119</sup>Р. В. Лапшин, Способ считывания цифровой информации в зондовом запоминающем устройстве, Патент РФ на изобретение № 2181218, приоритет от 02.11.1998.
- R. V. Lapshin, Digital data readback for a probe storage device, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 71, p. 4607, 2000.

Р. В. Лапшин, Способ считывания цифровой информации в зондовом запоминающем устройстве, Тезисы докладов третьей международной научно-технической конференции “Электроника и информатика – XXI век”, стр. 169, Москва, Зеленоград, 2000.

<sup>120</sup>L. Ljung, System identification: theory for the user, Prentice-Hall, Inc., 1987.

<sup>121</sup>University of North Carolina at Chapel Hill, адрес в интернете: <http://www.cs.unc.edu/research/nano/index.html>.

<sup>122</sup>SensAble Technologies, адрес в интернете: <http://www.sensable.com>.

<sup>123</sup>3rdTech Inc., адрес в интернете: <http://www.3rdtech.com>.

<sup>124</sup>ThermoMicroscopes, адрес в интернете: <http://www.thermomicro.com>.

<sup>125</sup>M. R. Falvo, G. J. Clary, R. M. Taylor II, V. Chi, F. P. Brooks Jr., S. Washburn, R. Superfine, Bending and buckling of carbon nanotubes under large strain, *Nature*, vol. 389, № 6651, p. 582, 1997.

M. Guthold, W. G. Matthews, A. Negishi, R. M. Taylor II, D. A. Erie, F. P. Brooks Jr., R. Superfine, Quantitative manipulation of DNA and viruses with the nanomanipulator scanning force microscope, *Surface and Interface Analysis*, vol. 27, p. 437, 1999.

M. Falvo, R. M. Taylor II, A. Helser, V. Chi, F. P. Brooks Jr., S. Washburn, R. Superfine, Rolling and sliding on the nanometer scale, *Nature*, vol. 397, p. 236, 1999.

<sup>126</sup>J. Burger, S. C. Meepagala, E. L. Wolf, Wide range temperature compensated cryogenic scanning tunneling microscope, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 60, № 4, p. 735, 1989.

L. F. Cohen, E. L. Wolf, Microwave-coupled cryogenic STM, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 2, p. 83, 1991.

J. W. G. Wildöer, A. J. A. van Roy, H. van Kempen, C. J. P. M. Harmans, Low-temperature scanning tunneling microscope for use on artificially fabricated nanostructures, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 65, № 9, p. 2849, 1994.



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ им. Ф.В.ЛУКИНА

103460, Москва, НИИФП  
Тел.007(095)531-1306, факс 007(095)531-4656, 531-5592  
эл.почта: admin@niifp.zgrad.ru http: www.niifp.ru

ИНН 7735043980 ОКОНХ 95120 ОКПО 11474563  
р/с 40502810838150100025 БИК 044525342  
к/с 30101810600000000342 в Зеленоградском ОСБ  
№ 7954/00 Московский Банк Сбербанка РФ г. Москвы

УТВЕРЖДАЮ

№ \_\_\_\_\_

От \_\_\_\_\_  
Директор ГосНИИФП,  
д. т. н., профессор,  
Н. С. Самсонов  
\_\_\_\_\_ 2002 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Р. В. Лапина  
"Объектно-ориентированное сканирование для зондовой микроскопии и нанотехнологии"

Метод измерения рельефа с локальным распознаванием и связыванием особенностей поверхности, предложенный в диссертационной работе, нашёл применение в рамках следующих НИР, проводимых в ГосНИИФП в последние годы:

1. "\_\_\_\_\_", шифр "\_\_\_\_\_", по заказу Министерства обороны РФ, 2000 г.
2. "\_\_\_\_\_", шифр "\_\_\_\_\_", по заказу Министерства обороны РФ, 2000 г.
3. "Разработка микрорелектромеханического запоминающего устройства с постоянным накоплением информации", шифр "Память", 2001 г.
4. "Разработка технологии и исследование наноструктур для накопителей терабитных ЗУ", проект "Нанотехнология", 2001 г.
5. "Разработка мембранной и многослойно-тонкопленочной технологий для изготовления изделий микромеханики и наноэлектроники", шифр "Пласт", 2001 г.
6. "Разработка приборно-технологического базиса производства интеллектуальных нанотехнологических комплексов для создания наноэлементов и терабитных микромеханических запоминающих устройств", шифр "Терабит", по заказу Российского агентства по системам управления, 2002 г.

Разработанная диссертантом совокупность методов позволяет компенсировать и/или исправить большую часть искажений, возникающих в процессе измерения на сканирующем зондовом микроскопе, а также провести в перспективе целый ряд новых измерений/воздействий/манипуляций на поверхности для целей нанолитографии. Весьма полезной оказалась, выполняемая автоматически, статистическая обработка особенностей поверхности при нахождении разброса размеров элементов памяти и их положений на дорожке, анализа дефектов дорожки, определения латеральной ориентации, локального тренда и взаимного положения дорожек (НИР "\_\_\_\_\_", "Память"). Разработанные методы могут также найти применение на начальном этапе проектирования зондового запоминающего устройства для натурального моделирования и идентификации процесса считывания/записи, а также исследования механизмов записи.

Начальник НТО ГосНИИФП  
кандидат физ.-мат. наук,

О. Л. Колесник  
\_\_\_\_\_ 2002 г.

Начальник отдела 85 ГосНИИФП  
доктор физ.-мат. наук, профессор,

Э. А. Полторацкий  
\_\_\_\_\_ 2002 г.

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ  
ПРЕДПРИЯТИЕ “НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ имени Ф.В.ЛУКИНА”

124460, Москва, г. Зеленоград, проезд 4806, д. 6.  
Тел. 007 (095) 531-1306, факс 007(095)531-4656, 531-5592  
E-mail: admin@niifp.ru

ИНН 7735043980 ОКОНХ 95120 ОКПО 11474563  
р/с 40502810838150100025 БИК 044525225  
к/с 30101810400000000225 в Зеленоградском ОСБ  
№7954/00 Сбербанк России г. Москвы

“УТВЕРЖДАЮ”



И. о. директора ФГУП НИИФП,

Д. Т. Н.

А. П. Алёхин

2002 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Р. В. Лапшина

“Объектно-ориентированное сканирование для зондовой микроскопии и нанотехнологии”

Методика объектно-ориентированного сканирования рельефа поверхности, предложенная в диссертационной работе, использовалась в группе сверхвысоковакуумной сканирующей зондовой микроскопии отдела 84 для автоматического сбора статистической информации об особенностях исследуемых поверхностей и для автоматической калибровки сканера микроскопа по кристаллической решётке высокоориентированного пироли- тического графита. Перечисленные работы проводились в ФГУП НИИФП в рамках НИР “Разработка приборно–технологического базиса производства интеллектуальных нано- технологических комплексов для создания наноэлементов и терабитных микромеханиче- ских запоминающих устройств” (шифр “Терабит”) по заказу Российского агентства по сис- темам управления. В настоящее время продолжается поэтапное внедрение разработан- ных диссертантом решений, обеспечивающих проведение в условиях высокого вакуума процессов нанолитографии с высоким разрешением вплоть до атомарного.

Начальник НТО ФГУП НИИФП  
кандидат физ.-мат. наук,

О. Л. Колесник  
2002 г.



Начальник отдела 84 ФГУП НИИФП

Д. Т. Н.,

В. А. Быков

2002 г.



000101

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

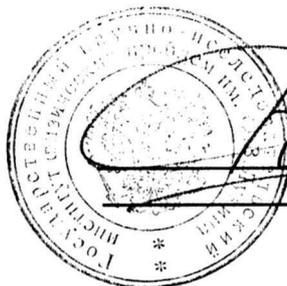
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ им. Ф.В.ЛУКИНА

103460, Москва, НИИФП  
Тел.007(095)531-1306, факс 007(095)531-4656, 531-5592  
эл.почта: admin@niiifp.zgrad.ru http://www.niiifp.ru

ИНН 7735043980 ОКОНХ 95120 ОКПО 11474563  
р/с 40502810838150100025 БИК 044525342  
к/с 30101810600000000342 в Зеленоградском ОСБ  
№ 7954/00 Московский Банк Сбербанка РФ г. Москвы

УТВЕРЖДАЮ

№ \_\_\_\_\_



От  
Директор ГосНИИФП,  
д. т. н., профессор,  
Н. С. Самсонов  
2002 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Р. В. Лапшина  
«Объектно-ориентированное сканирование для зондовой микроскопии и нанотехнологии»

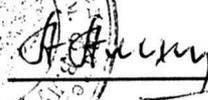
Метод измерения рельефа с локальным распознаванием и связыванием особенностей поверхности, предложенный в диссертационной работе, применялся при получении изображения рельефа поверхности осажденной из плазмы плёнки углерода. Данная углеродная плёнка является покрытием, препятствующим тромбообразованию в искусственных протезах кровеносных сосудов человека, а также используется в качестве покрытий, способствующих более быстрому заживлению искусственных клапанов сердца и искусственных хрусталиков глаза человека. Получение не искажённой процессом измерений морфологии поверхности плёнки, а также новые возможности, связанные со статистической обработкой особенностей поверхности, имеют большое значение при интерпретации результатов медико-биологических испытаний и обоснования модели избирательной адсорбции белков плазмы крови на поверхности плёнки. В перспективе после доработки метода открывается возможность для непосредственного наблюдения *in vitro* на сканирующем зондовом микроскопе за процессом адсорбции отдельных белков плазмы крови к поверхности плёнки. Методика использовалась в ОКР «Ткань», в рамках НИР научного направления «Разработки в интересах здравоохранения», 1998-2001 г., проводимых в ГосНИИФП совместно с НИИ трансплантологии и искусственных органов Минздрава РФ, а также в рамках гранта № 1.1.82 Правительства Москвы в области научно-технических работ и исследований, направленных на развитие города, 2001 г.

Начальник НТО ГосНИИФП  
кандидат физ.-мат. наук,

  
О. Л. Колесник  
2002 г.



Заместитель директора ГосНИИФП по науке  
Начальник отдела 81 ГосНИИФП  
д. т. н., профессор,

  
А. П. Алёхин  
2002 г.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2175761**

Российским агентством по патентам и товарным знакам на основании Патентного закона Российской Федерации, введенного в действие 14 октября 1992 года, выдан настоящий патент на изобретение

**СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ  
СКАНИРУЮЩИМ ЗОНДОВЫМ МИКРОСКОПОМ**

Патентообладатель(ли):

*Государственный научно-исследовательский институт  
физических проблем им. Ф.В. Лукина*

по заявке № 99112623, дата поступления: 08.06.1999

Приоритет от 08.06.1999

Автор(ы) изобретения:

*Лапшин Ростислав Владимирович*

Патент действует на всей территории Российской Федерации в течение 20 лет с **8 июня 1999 г.** при условии своевременной уплаты пошлины за поддержание патента в силе

Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации

г. Москва, **10 ноября 2001 г.**

*Генеральный директор*

*А.Д. Корсагин*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2181212**

Российским агентством по патентам и товарным знакам на основании Патентного закона Российской Федерации, введенного в действие 14 октября 1992 года, выдан настоящий патент на изобретение

**СПОСОБ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЗОНДА  
СКАНИРУЮЩЕГО МИКРОСКОПА-НАНОЛИТОГРАФА  
В ПОЛЕ ГРУБОГО X-Y ПОЗИЦИОНЕРА**

Патентообладатель(ли):

*Государственный научно-исследовательский институт  
физических проблем им. Ф.В. Лукина*

по заявке № 99119434, дата поступления: 07.09.1999

Приоритет от 07.09.1999

Автор(ы) изобретения:

*Лапшин Ростислав Владимирович*

Патент действует на всей территории Российской Федерации в течение 20 лет с **7 сентября 1999 г.** при условии своевременной уплаты пошлины за поддержание патента в силе

Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации

г. Москва, **10 апреля 2002 г.**

*Генеральный директор*

 *А.Д. Короткий*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2181218**

Российским агентством по патентам и товарным знакам на основании Патентного закона Российской Федерации, введенного в действие 14 октября 1992 года, выдан настоящий патент на изобретение

**СПОСОБ СЧИТЫВАНИЯ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ  
В ЗОНДОВОМ ЗАПОМИНАЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ**

Патентообладатель(ли):

*Государственный научно-исследовательский институт  
физических проблем им. Ф.В. Лукина*

по заявке № 98119766, дата поступления: 02.11.1998

Приоритет от 02.11.1998

Автор(ы) изобретения:

*Лалшин Ростислав Владимирович*

Патент действует на всей территории Российской Федерации в течение 20 лет с **2 ноября 1998 г.** при условии своевременной уплаты пошлины за поддержание патента в силе

Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации

*г. Москва, 10 апреля 2002 г.*

*Генеральный директор*

*А.Д. Корчагин*

