

Атомно-силовой микроскоп



Руководство по эксплуатации

2013

Атомно-силовой микроскоп NT-206: Руководство по эксплуатации. – Гомель: ОДО "Микротестмашины", 2013. – 40 с.



Внимание! Ввиду постоянных улучшений устройства и обновления механической части, электроники и управляющей программы микроскопа, могут существовать некоторые различия между реальным исполнением и данной инструкцией, что, однако, не означает ухудшение качества данного прибора.
 В зависимости от установленной комплектации в отдельных версиях описываемого АСМ могут отсутствовать определенные опции.

Pentium и Celeron – зарегистрированные торговые марки корпорации Intel. Windows - зарегистрированные торговые марки корпорации Microsoft.



ОДО «Микротестмашины», г. Гомель 246050, Беларусь Tel./Fax: +375 232 715463 E-mail: microtm@mail.ru

© Текст: А. А. Суслов, 2002–2013

- © Графический пользовательский интерфейс программного обеспечения: Д. И. Шашолко, 2002–2013 Иллюстрации и компоновка текста: А. А. Суслов, 2007–2013
- © ОДО «Микротестмашины», 2002–2013

СОДЕРЖАНИЕ

| 1 | ОБL | ЦИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА NT-206 | 5 |
|---|------|---|----|
| | 1.1 | Комплектация АСМ NT-206 | 5 |
| | 1.2 | Характеристики атомно-силового микроскопа NT-206 | 6 |
| | 1.3 | Устройство блока сканирования | 7 |
| | 1.4 | Блок электроники управления | 11 |
| 2 | УСТ | AHOBKA ACM NT-206 | 14 |
| | 2.1 | Размещение АСМ | 14 |
| | 2.1 | 1.1 Общие требования к размещению АСМ | 14 |
| | 2.1 | 1.2 Требования к среде помещения | 14 |
| | 2.1 | 1.3 Требования к электрической сети | 15 |
| | 2.2 | Подключение АСМ | 16 |
| 3 | ПОД | ДГОТОВКА АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА NT-206 К РАБОТЕ | 17 |
| | 3.1 | Включение и выключение АСМ | 17 |
| | 3.1 | 1.1 Включение АСМ | 17 |
| | 3.1 | 1.2 Выключение АСМ | 17 |
| | 3.2 | Установка зонда | 17 |
| | 3.3 | Настройка системы детектирования | 20 |
| | 3.4 | Установка образца | 24 |
| 4 | ИЗ№ | ИЕРЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА NT-206 | 25 |
| | 4.1 | Предварительные настройки | 25 |
| | 4.2 | Подвод поверхности к зонду | 27 |
| | 4.3 | Измерение (сканирование) | 28 |
| | 4.4 | Завершение работы | 30 |
| 5 | КАЛ | ИБРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АСМ | 31 |
| | 5.2 | Расчет параметров коррекции нелинейности с помощью программы SurfaceXplorer | 33 |
| П | РИЛС | ЭЖЕНИЕ | 37 |
| | П1 | Проверка управляющих напряжений пьезосканера | 37 |
| | П2 | Обшая блок-схема систем электроники управления АСМ NT-206 | 39 |
| | П3 | Схема электрических соединений в блоке сканирования (базовая платформа и | |
| | | измерительная головка) АСМ NT-206 | 40 |
| | | | |

1 ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА NT-206

Атомно-силовой микроскоп (ACM) в комплексе с управляющим программным обеспечением и средствами обработки ACM-изображений предназначен для измерения и анализа микро- и субмикрорельефа поверхностей, объектов микро- и нанометрового размерного диапазона с высоким разрешением.

Области применения АСМ – физика твердого тела, тонкопленочные технологии, нанотехнологии, микро- и нанотрибология, микроэлектроника, оптика, испытательные системы прецизионной механики, магнитной записи, вакуумной техники и др.

АСМ может использоваться в научных и промышленных лабораториях.

Изображение поверхности в атомно-силовом микроскопе получают при сканировании образца в горизонтальной плоскости зондом с радиусом кривизны острия порядка десятковсотен нанометров, который зафиксирован на чувствительной консоли. Управляющая система следит за положением зонда относительно поверхности образца в каждой измеряемой точке и поддерживает расстояние игла-образец на постоянном заданном уровне. Изменения вертикального положения зонда в каждой точке измерений образуют матрицу АСМ данных, которая записывается в файл, и используется в дальнейшем для обработки, визуализации и анализа.

Прибор характеризуется следующими особенностями:

- использование лазерной системы для детектирования отклонения консоли и кручения;
- работа в статическом и динамическом режимах, реализация статической и динамической спектроскопии;
- цифровая система управления сканированием;
- автоматизированная система перемещения измерительной головки относительно образца;
- видеосистема, интегрированная в измерительную головку для наблюдения за зондом и сканируемой областью поверхности образца;
- соединение с управляющим компьютером через USB-порт;
- модульная структура электронного блока управления и программного обеспечения, обеспечивающая возможность модификации для решения специфических исследовательских задач.

1.1 Комплектация ACM NT-206

Комплект поставки атомно-силового микроскопа NT-206 включает:

- Блок сканирования (Рис. 1.1);
- Блок электроники управления (Рис. 1.1);
- Комплект соединительных кабелей: З кабеля для соединения блока сканирования с блоком электроники управления, кабель USB (Am-Bm) для соединения блока электроники управления с управляющим компьютером, шнур питания для подключения блока электроники управления к электрической сети;
- Компакт-диск с комплектом программного обеспечения: управляющая программа 'SurfaceScan'; программа обработки, визуализации и анализа ACM-данных 'SurfaceView'; драйверы для интегрированной видеокамеры.

Опционально:

- Набор зондов для работы в статическом и динамическом режимах;
- Набор калибровочных решеток;
- Дополнительный(е) держатель зондов.
- Другая оснастка и принадлежности, расширяющие и/или улучшающие базовые функции прибора.



Рис. 1.1. Общий вид атомно-силового микроскопа NT-206 в базовой конфигурации: блок сканирования (справа) с блоком электроники управления (слева).

АСМ работает под управлением специализированного программного обеспечения, исполняемом на персональном компьютере с операционной системой **Windows XP SP2** и выше. Настоятельно рекомендуется выделить отдельный персональный компьютер для целей управления АСМ, сбора данных, хранения, обработки, визуализации и анализа АСМ-изображений. Рекомендуемая конфигурация ПК должна быть не ниже: Celeron® 2.2, RAM 512 MB, HDD 80 GB, VRAM 128 MB, monitor 17" 1024х768х32 bit, Windows® XP SP1, 2 USB port.

Расходные материалы (зонды, калибровочные решетки) рекомендуется приобретать у их изготовителей (например, Mikromasch, NT-MDT и др.).

1.2 Характеристики атомно-силового микроскопа NT-206

| Pe | жимы измерений | (1) Контактная статическая АСМ; (2) Латерально-силовая микроскопия |
|----|----------------|---|
| | | /одновременно с контактной статической АСМ/; (3) Бесконтактная динамическая |
| | | ACM; (4) Смешанная динамическая ACM (аналог Tapping Mode [®]); |
| | | (5) Микроскопия фазового контраста /одновременно со смешанной динамической |
| | | АСМ/; (6) Двухпроходный режим (для статической и динамической АСМ); |
| | | (7) Двухпроходный режим с переменным подъемом (для статической и |
| | | динамической АСМ) /Оригинальная методика!/; (8) Многоцикловое сканирование |
| | | участка (для статической и динамической АСМ) /Оригинальная методика!/; |
| | | (9) Многослойное сканирование участка с переменной нагрузкой (для |
| | | статической и динамической АСМ) /Оригинальная методика!/; |
| | | (10) Электростатическая силовая микроскопия (двухпроходная методика) *, **; |
| | | (11) Токовый режим *, **; (12) Магнитно-силовая микроскопия (двухпроходная |
| | | методика) *, **; (13) Статическая силовая спектроскопия (с расчетом |
| | | количественных характеристик, поверхностной энергии и модуля упругости |
| | | образца в точке анализа); (14) Динамическая силовая спектроскопия; |
| | | (15) Динамическая частотная силовая спектроскопия /Оригинальная методика!/; |
| | | (16) Наноиндентирование *; (17) Наноцарапание *; (18) Наноизнашивание по |
| | | линии *; (19) Нанолитография *; (20) Микротрибометрия * /Оригинальная |
| | | методика!/; (21) Микроадгезиометрия * /Оригинальная методика!/; |

| | (22) Микротрибометрия в режиме shear-force * /Оригинальная методика!/; | | | |
|------------------------------|--|--|--|--|
| | (23) Температурно-зависимые измерения (для всех вышеперечисленных | | | |
| | режимов) * | | | |
| | Примечание. * - требуется использование специализированной оснастки | | | |
| | ** - требуется использование специализированных зондов | | | |
| Режимы движения | По участку; по линии; измерения в точке | | | |
| Область сканирования | 20×20×3 мкм (опции: 5х5х2 мкм; 10х10х3 мкм; 50х50х3,5 мкм) | | | |
| Минимальный шаг сканирования | 0,3 нм | | | |
| Размер матрицы сканирования | До 1024×1024 точек (допускается и более) | | | |
| Скорость сканирования | До 10 мкм/с в плоскости Х–Ү | | | |
| Латеральное разрешение | 2–5 нм (в зависимости от жесткости поверхности образцов) | | | |
| (плоскость ХҮ) | | | | |
| Вертикальное разрешение | 0,2–0,5 нм (в зависимости от жесткости поверхности образцов) | | | |
| (направление Z) | | | | |
| Система детектирования | Лазерно-лучевая схема с четырехсекционным позиционно-чувствительным | | | |
| отклонения кантилевера | фотодетектором. | | | |
| Схема сканирования | Образец перемещается в плоскости XY (горизонтальной) и в направлении Z | | | |
| | (вертикальном) под неподвижным зондом. | | | |
| Сканирующее устройство | Пьезокерамический трубчатый сканер для перемещения образца в направлениях XYZ. | | | |
| Коррекция нелинейностей | Программира | | | |
| сканирования | Программная | | | |
| Зонд | Промышленно выпускаемые АСМ-зонды на чипах размером 3.4×1.6×0.4 мм | | | |
| Размеры исследуемого образца | не более 30×30×8 мм (ширина–глубина–высота); при использовании | | | |
| | дополнительной удлиняющей вставки допускается измерение образцов высотой | | | |
| | до 35 мм. | | | |
| Диапазон автоматизированных | 10×10 мм в плоскости XY для микропозиционирования зонда относительно | | | |
| перемещений измерительной | исследуемого объекта с шагом 2,5 мкм с оптическим визуальным контролем. | | | |
| ГОЛОВКИ | | | | |
| Встроенная видеосистема | Поле обзора 1×0.75 мм, размер окна визуализации 640×480 пиксел. | | | |
| Условия работы | Открытый воздух, 760±40 мм рт. ст., 22±4°С, относительная влажность <70% | | | |
| Виброизоляция | Рекомендуется использовать дополнительную виброизоляцию для диапазона частот | | | |
| | 4—100 Гц. | | | |
| Характеристики источника | Мощность излучателя – до 5 мВт; длина волны излучения – 650 нм; фокусное | | | |
| лазерного излучения | расстояние – 40 мм; диаметр луча в фокусе – около 20 мкм. | | | |
| Разрядность ЦАП сканера | 16 | | | |
| Напряжение высоковольтного | | | | |
| усилителя | | | | |
| Габаритные размеры, не более | Блок сканирования: 185x185x290 мм; Блок электроники управления: 470x210x195 мм (ш-г-в) | | | |
| Масса блоков, не более | Блок сканирования: 4.7 кг; Блок электроники управления: 7.7 кг | | | |
| Напряжение питания | 220 В, 50 Гц | | | |
| Потребляемая мощность | Не более 300 Вт | | | |

1.3 Устройство блока сканирования

Блок сканирования (Рис. 1.2) предназначен для работы на открытом воздухе и предоставляет удобный доступ для установки образца и смены зонда. В приборе применена измерительная схема с неподвижным зондом над подвижным образцом. В ходе измерений прецизионные перемещения образца обеспечиваются трубчатым пьезосканером, на котором образец устанавливается. Перед измерениями зонд может быть перемещен в необходимую область над образцом при помощи автоматизированной платформы.

Блок сканирования состоит из базовой платформы (корпуса) (1) и сменной измерительной головки (8). Все механизмы смонтированы на верхней плите корпуса, которая является базовой. С нижней стороны (внутри корпуса) базовой плиты установлен механизм вертикального перемещения пьезосканера. Данный механизм обеспечивает подвод (подъем) и отвод пьезосканера с образом на предметном столике, установленном на верхнем (подвижном) торце пьезотрубки (16), относительно зонда (вертикальное или Z-перемещение). Диапазон хода механизма вертикального перемещения составляет 20 мм с шагом около 200 нм.



Рис. 1.2. Блок сканирования атомно-силового микроскопа NT-206. 1 – корпус (базовая платформа); 2 – ступень грубого позиционирования по Y; 3 – шаговый электродвигатель ступени грубого позиционирования по Y; 4 – ступень грубого позиционирования по X; 5 – шаговый электродвигатель ступени грубого позиционирования по X; 6 – соединение типа «ласточкин хвост» для установки измерительной головки; 7 – винт фиксации измерительной головки в соединении «ласточкин хвост»; 8 – измерительная головка; 9 – ручка механизма регулировки лазера в направлении Y; 11 – ось поворота зеркала; 12 – держатель зонда; 13 – винт фиксации держателя зонда; 14 – ручка механизма регулировки фотодетектора в направлении X; 15 – ручка механизма регулировки фотодетектора в направлении Y; 16 – предметный столик, закрепленный на торце пьезосканера; 17 – труба видеосистемы; 18 – модуль видеокамеры; 19 – поворотное кольцо для тонкой фокусировки видеосистемы; 20 – кабель измерительной головки; 21 – кабель видеосистемы (USB).

На верхней стороне базовой плиты смонтирована платформа горизонтального (XY) перемещения для подготовительных передвижений измерительной головки над образцом (грубое XY-позиционирование) для выбора необходимой области. Платформа горизонтального перемещения состоит из Y-ступени (2) с приводным шаговым двигателем (3) и X-ступени (4) с соответствующим шаговым двигателем (5). Платформа XY-перемещения обеспечивает диапазон хода 10 мм в обоих направлениях с шагом 2,5 мкм.

Сверху на ступени X смонтирована направляющая «ласточкин хвост» (6), в которой устанавливается измерительная головка (8). Измерительная головка (8) вставляется в ласточкин хвост спереди движением ее в горизонтальной плоскости. Винт (7) служит для надежной фиксации измерительной головки на базовой платформе. Для подключения измерительной головки к системам прибора, вставьте ее кабель (20) в разъем на задней стенке корпуса. Дополнительно необходимо подключить USB-кабель (21) видеокамеры (18) к свободному USB-разъему на управляющем компьютере. Чтобы снять измерительной головки и кабель USB видеокамеры), освободите фиксирующий винт (7) и выньте измерительную головку из ласточкиного хвоста (6).

Измерительная головка (8) представляет собой высокоточную систему, содержащую механические, оптические и электронные компоненты и оборудованную специально разработанной видеокамерой (18). В нижней части измерительной головки устанавливается держатель зонда (12). Винт (13) используется для фиксации держателя зонда после его установки в измерительной головке. Ручки (9) и (10) служат для настройки лазерного луча на зонде при настройке. Источник лазерного излучения и видеокамера интегрированы в одной оптической системе, поэтому видеокамера (18) будет перемещаться вместе с источником лазерного излучения при его настройке. Данное решение обеспечивает постоянное нахождение области вокруг центра лазерного луча в поле обзора видеокамеры.

Ручки (14) и (15) используются для настройки фотодетектора на луч, отраженный от обратной стороны кантилевера зонда. Ось (11) служит для подстройки положения зеркала поворачивающего луч, отраженный от обратной стороны кантилевера зонда, на фотодетектор. Изменяя угол поворота зеркала, можно производить дополнительную подстройку системы детектирования (тем не менее, рекомендуется не изменять положение зеркала, установленное изготовителем, и использовать данную опцию в крайнем случае).

Кольцо (19) на трубке видеосистемы (17) служит для точной фокусировки видеосистемы в диапазоне около 1 мм вдоль вертикальной оси оптической системы. Модуль видеокамеры (18) может быть отсоединен от оптической системы путем освобождения специального винта на трубке (17) и выемки модуля вверх. Необходимо помнить, что оптическая система содержит точные оптические элементы, и поэтому открытые отверстия трубки необходимо защищать от пыли и грязи.



Рис. 1.3. Движение образца под зондом в процессе сбора данных.

Горизонтальное перемещение образца в процессе сканирования (перемещение в плоскости XY) осуществляется посредством пьезокерамического сканера. Образец перемещается под острием зонда от точки к точке по растровой схеме (рис. 1.3). Сканер начинает перемещаться вдоль первой линии сканирования и обратно. Затем он осуществляет перемещение на один шаг в перпендикулярном направлении ко второй линии сканирования, движется вдоль ее и обратно. Затем снова осуществляет перемещение на один шаг в

перпендикулярном направлении к третьей линии и т.д.. ACM регистрирует данные только при движении зонда в одном направлении, которое называется направлением быстрого сканирования. Для перемещения сканера по подобной растровой схеме электроника ACM прикладывает соответствующее напряжение к сегментам пьезотрубки, что вызывает ее изгиб в плоскости, параллельной поверхности образца (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Схема организации системы сканирования и детектирования положения зонда.

АСМ детектирует положение зонда в каждой точке измерений. Когда острие зонда находится у поверхности образца на расстоянии около нескольких нанометров, консоль с зондом изгибается под действием молекулярных сил (притяжения или отталкивания), возникающих между острием и поверхностью образца. Для измерения отклонения кантилевера зонда используется позиционно-чувствительный фотодетектор (ФД) (Рис. 1.4). Луч света, отраженный от обратной стороны кантилевера зонда попадает на фотодетектор. В результате изменения положения зонда (изгиба кантилевера) происходит перемещение отраженного светового пятна по фотодетектору. Данное перемещение может быть легко измерено. Таким образом, по изменению положения отраженного пятна на ФД электронная система определяет изменение расстояния между зондом и образцом и прикладывает соответствующее напряжение к Z-электроду пьезотрубки, с тем чтобы сжать или удлинить ее в направлении Z и поддержать зазор между зондом и образцом на постоянном уровне. В результате острие зонда перемещается на постоянной высоте над поверхностью образца и в точности повторяет ее рельеф.

В каждой точке измерений регистрируется величина напряжения, приложенного к пьезотрубке. Это значение запоминается и используется системой для формирования матрицы ACM-изображения. На основе полученных данных о высоте рельефа и соответствующих изображений контрастов строится трехмерное ACM-изображение поверхности.

Установленный в системе четырехсекционный фотодетектор дает возможность измерить как отклонения, так и кручения кантилевера. Благодаря этому возможно одновременное измерение топографии и картографирование латеральных сил (локальных сил трения) в контактном режиме. Схема этих измерений, а также отличие двухсекционного фотодетектора, допускающего измерение только вертикального отклонения, показаны на Рис. 1.5.



Рис. 1.5. Детектирование вертикального ∆z и горизонтального ∆r (torsion) отклонений консоли фотодетектором: а – измерение вертикального отклонения двухсекционным детектором; б – четырехсекционный детектор латерального силового микроскопа для одновременного измерения вертикального и горизонтального отклонений.

При работе в динамическом режиме, система возбуждает вынужденные колебания зонда с частотой от 10 Гц до 400 кГц. Частота колебаний подбирается соответствующей собственной резонансной частоте зонда, что существенно повышает чувствительность измерительной системы. Колебания зонда возбуждаются приложением модулированного напряжения к пьезоактюатору, который соединен с зондом механически.

1.4 Блок электроники управления

Электронный блок управления является связующим звеном между ПК и блоком сканирования. Он содержит электронные системы, управляющие атомно-силовым микроскопом по командам персонального компьютера. Он также передает измеренные данные управляющей программе. Назначение переключателей и разъемов на корпусе электронного блока показано на Рис. 1.6.

Электронный блок управления состоит из шести функционально завершенных модулей (Рис. 1.7):

- модуль связи с компьютером (2);
 - генератор колебаний зонда (4);
- система управления обратной связью (5);
- система управления вертикальным движением пьезосканера (6);
- система управления ХҮ-движением пьезосканера (7);
- система управления шаговыми электрическими двигателями для грубого позиционирования измерительной головки и подвода/отвода (8).

Все платы с описанными системами объединяются общей шиной (3).

Электронный блок управления функционирует следующим образом. Команды программы управления АСМ посылаются из компьютера через порт USB (1) модулю связи (2) электронного блока и передаются общей шине (3), которая объединяет все управляющие системы блока. Общая шина содержит 8-битную шину адреса, 16-битную шину данных и 2-битную шину управления.

При работе в динамическом режиме генератор (4) согласно установленным параметрам частоты колебаний зонда *f*, разности фаз $\Delta \varphi$ и амплитуды *A* генерирует сигнал для возбуждения колебаний пьезоактюатора (9) и синхронизирующий сигнал для системы обратной связи (5). Аппаратное обеспечение позволяет варьировать частоту колебаний, разность фаз и амплитуду в следующих пределах: *f* = 10...400 kГц; $\Delta \varphi$ = 0...360 °; *A* = 0...3,8 В (в абсолютных единицах).



Рис. 1.6. Схема расположения выключателей и разъемов на корпусе блока электроники управления (а – вид спереди; б – вид сзади).

Система обратной связи (5) анализирует сигнал с фотодетектора (10) и используя АЦП формирует сигнал, описывающий направление и величину отклонения кантилевера зонда. В соответствии с этим сигналом и установленным коэффициентом обратной связи система управления вертикальным движением пьезосканера (6) изменяет напряжение, приложенное к Z-электроду пьезотрубки (12) таким образом, чтобы поддержать установленное расстояние между зондом и исследуемой поверхностью. Программа управления АСМ регистрирует значения напряжения на Z-электроде пьезотрубки в каждой точке измерений, накапливает их в ОЗУ компьютера и далее использует для построения АСМ-изображения исследуемой поверхности.

Система управления ХҮ-движением пьезосканера (7) генерирует сигналы для электродов –Х, –Y, +Х, +Y пьезосканера (11) для организации его движения по растровой схеме (Рис. 1.3). По такой же схеме перемещается исследуемая поверхность относительно неподвижного зонда.

Система управления шаговыми электрическими двигателями для грубого позиционирования измерительной головки и подвода/отвода (8) обеспечивает выполнение подготовительных процедур. Шаговый двигатель (12) обеспечивает вертикальное перемещение

кассеты с пьезосканером и образцом, установленным на свободном торце пьезотрубки, что необходимо для его подвода к зонду и отвода. Шаговые двигатели (13) и (14) обеспечивают перемещение измерительное головки в горизонтальной плоскости при необходимости ее грубого позиционирования относительно образца для выбора области сканирования.

Система обратной связи (5) система управления вертикальным движением пьезосканера (6) и система управления ХҮ-движением пьезосканера (7) объединены на одной печатной плате и базируются на использовании программируемых логических интегральных схем. Плата системы управления шаговыми электрическими двигателями (8) размещена в корпусе блока сканирования и соединяется с общей шиной (3) при помощи кабеля.



Рис. 1.7. Функциональная схема блока электроники управления: 1 – USB-порт управляющего компьютера; 2 – модуль связи с управляющим компьютером; 3 – общая шина; 4 – генератор колебаний зонда; 5 – система управления обратной связью; 6 – система управления вертикальным движением пьезосканера; 7 – система управления XY-движением пьезосканера; 8 – система управления шаговыми электрическими двигателями; 9 – пьезоактюатор системы возбуждения колебаний зонда; 10 – позиционно-чувствительный фотодетектор для измерения отклонения и закручивания кантилевера; 11 – пьезосканер, перемещающий образец в направлениях XYZ; 12 – шаговый двигатель механизма подвода/отвода образца; 13 – шаговый двигатель Y-ступени грубого перемещения измерительной головки; 14 – шаговый двигатель X-ступени грубого перемещения измерительной головки.

2 УСТАНОВКА АСМ NT-206

2.1 Размещение АСМ

2.1.1 Общие требования к размещению АСМ

Для установки атомно-силового микроскопа необходимо подготовить специальную комнату, где намечается проводить измерения с помощью прибора. Основным условием расположения комплекса является минимальный уровень внешних вибраций, влияющих на процесс сканирования. Выполнение этого условия обеспечит устойчивую работу атомно-силового микроскопа и высокую точность полученных результатов.

Оптимальным местом установки ACM и его последующей эксплуатации является чистая сухая комната на первом этаже здания (как можно ближе к фундаменту) площадью как минимум 10–20 кв. м. Следует также выбирать комнату, расположенную как можно дальше от источников внешних вибраций, таких как дороги, силовое оборудование и др.

Блок электроники управления и управляющий персональный компьютер не требуют специальных условий изоляции от вибраций, однако они сами являются источником вибраций и не должны находиться на одном столе с блоком сканирования АСМ. Расстояние между столами, тем не менее, ограничивается длиной кабелей, соединяющих блоки прибора.

Рекомендуется произвести установку блока сканирования АСМ на отдельный виброустойчивый стол с жесткой рамой и прочной стальной или каменной крышкой. В качестве виброизолятора могут быть использованы листы пористой резины, помещенные под ножки стола. Верхняя поверхность стола, на которой устанавливается блок сканирования, должна быть плоской и строго горизонтальной. Высокий уровень виброизоляции могут обеспечить специальные антивибрационные столы, имеющиеся на рынке. Блок сканирования АСМ может быть также размещен на активной антивибрационной платформе, подавляющей нежелательные вибрации. Альтернативой дорогим антивибрационным устройствам может служить пружинная подвеска блока сканирования АСМ, которая также обеспечивает высокую степень защиты от вибраций. На Рис. 3.1 представлен пример такой подвески блока сканирования АСМ, которая может включаться в комплект поставки прибора опционально.

2.1.2 Требования к среде помещения

АСМ работает в обычных условиях. Тем не менее, необходимо поддерживать температуру и влажность воздуха на определенном постоянном уровне и избегать их резких изменений. Рекомендуется температура воздуха 22±4°С и относительная влажность воздуха менее 50%. Не следует располагать прибор возле нагревательных устройств.

В комнате, где установлен прибор, рекомендуется контролируемая среда, однако следует иметь ввиду, что колебания воздуха (потоки, сквозняки) негативно влияют на точность измерений. Поэтому рекомендуется дополнительно испоьзовать специальный чехол, чтобы накрывать блок сканирования во время работы АСМ. Этот чехол также следует использовать для защиты блока сканирования АСМ от пыли при хранении.



Рис. 2.1. Примеры настольной (слева) и напольной (справа) конструкций антивибрационной пружинной подвески блока сканирования АСМ.

В воздухе комнаты не должно быть никаких агрессивных веществ. Содержание пыли в воздухе должно быть сведено к минимуму. Необходимо помнить, что атмосферная влага и загрязнения, адсорбирующиеся на сканируемой поверхности могут существенно повлиять на результаты измерений в бесконтактном режиме.

2.1.3 Требования к электрической сети

Помещение, в котором устанавливается АСМ, должно быть оборудовано электрической сетью переменного тока напряжением 220±10 В и частотой 50±5 Гц, способной обеспечить нагрузку мощностью не менее 500 ВА. Высокочастотные скачки напряжения электрической сети, в которую включен атомно-силовой микроскоп, не должны превышать 500 В. Для гарантии надежной работы АСМ рекомендуется применять сетевые фильтры, поглощающие высокочастотный шум. Рекомендуется производить подключение всех электрических устройств, связанных с работой АСМ (т.е. блока электроники управления, управляющего компьютера, опционально – блока нагревательной платформы), через одну розетку с помощью удлинителя (разветвителя). Кроме того рекомендуется также соединить проводом корпуса блока электроники управления и управляющего компьютера для надежного выравнивания потенциала и обеспечения устойчивой связи между этими устройствами в процессе работы.



ВНИМАНИЕ! В процессе сканирования нежелательны любые нарушения в работе электрической сети, такие как короткое замыкание или обрыв. Даже кратковременное прекращение подачи питания во время работы комплекса может стать причиной <u>повреждения</u> сканера, зонда, электронных систем и персонального компьютера.

Для защиты персонала от поражения электрическим током, а также для защиты электронного оборудования, рекомендуется заземлить ACM (или использовать розетки с надежным заземлением). При работе с прибором необходимо следовать общим правилам эксплуатации с электрическими установками.

Необходимо помнить, что атомно-силовой микроскоп — это прецизионная и высокочувствительная система, которая требует бережной эксплуатации и хранения.

2.2 Подключение АСМ

После размещения компонентов АСМ по рабочим местам, необходимо их соединить между собой при помощи кабелей, входящих в комплект поставки.

1. Используя три специальных кабеля из комплекта поставки, соедините между собой блок сканирования и блок электроники управления. Кабели с соответствующими наклейками используются для соединения высоковольтной, аналоговой и цифровой цепей управления.



Внимание! Необходимо внимательно следить за тем, чтобы кабели, входящие в комплект поставки комплекса, использовались по назначению, а также, чтобы не использовались другие кабели. Неправильное использование кабелей может привести к повреждению электронных систем как самого комплекса, так и других устройств, а также стать причиной пожара.

- Подсоедините компоненты персонального компьютера монитор, клавиатуру, мышь к персональному компьютеру. Подробные инструкции для компонентов ПК смотрите в документации к компьютеру. Для подключения атомно-силового микроскопа необходимо наличие у управляющего ПК порта USB.
- Соедините с помощью USB-кабеля, входящего в комплект поставки микроскопа, блок электроники управления с ПК. Разъем типа В подсоединяется к блоку электроники управления, разъем типа А – к порту USB управляющего ПК. Подсоедините USB-кабель встроенной видеосистемы к свободному порту USB управляющего ПК.
- 4. Заземлите блок сканирования, блок электроники управления и управляющий ПК. Для этого с помощью проводов сечением не менее 3 мм² подсоедините указанные блоки к имеющейся в комнате шине заземления. Для закрепления проводов на корпусе могут быть

использованы винты, помеченные символом 📥.



Внимание! Для защиты системы связи блока электроники (для выравнивания потенциалов) рекомендуется соединить проводом корпуса блока электроники и управляющего ПК даже в случае использования заземленной сети переменного тока.

5. Подсоедините блок электроники управления, системный блок ПК и монитор к электрической сети 220 В при помощи сетевых шнуров.



Внимание! Для снижения уровня наводок в измерительных системах прибора рекомендуется подключать все соединяемые с ним (блоком электроники управления) электрические устройства (управляющий ПК, блок нагрева и т.д.) к одной розетке сети переменного тока.

3 ПОДГОТОВКА АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА NT-206 К РАБОТЕ

3.1 Включение и выключение АСМ

3.1.1 Включение АСМ

После соединения компонентов АСМ и подключения их к электрической сети, прибор может быть включен в следующем порядке.

- 1. Включите управляющий компьютер, в том числе и монитор.
- 2. Включите блок электроники управления с помощью кнопки **Power** на его передней панели.
- 3. Запустите программу у<u>правл</u>ения ACM *SurfaceScan*.

4. Активизируйте панель Laser в программе управления и включите лазер.

После этого комплекс готов к дальнейшей настройке и работе.

3.1.2 Выключение АСМ

АСМ должен выключаться в следующем порядке.

- 1. Отведите образец от зонда, нажав кнопку (отвод в автоматическом режиме :::Auto:::) в панели Main программы управления ACM *SurfaceScan*.
- 2. В панели Laser управляющей программы *SurfaceScan* выключите лазер.
- 3. Закройте программу управления ACM *SurfaceScan*, предварительно сохранив необходимые результаты измерений.
- 4. Выключите блок электроники управления, с помощью кнопки **Power** на его передней панели.
- 5. Выключите ПК, соблюдая последовательность, предусмотренную операционной системой ("Shut Down" в меню "Start" для Win32). Предварительно не забудьте завершить все исполняемые на управляющем ПК приложения.

3.2 Установка зонда

АСМ NT-206 ориентирован на использование промышленно изготавливаемых чипов с зондами с размерами чипа 3.6*1.6*0.4 мм. Для выбора конкретного типа зонда при проведении измерений необходимо учитывать как режим измерений, так и предполагаемую жесткость поверхности образца. При сканировании в статическом режиме (контактном) необходимо применять зонды с «мягким» кантилевером, имеющим жесткость не выше 1 Н·м (рекомендуется 0,03–0,12 Н·м). Для работы в динамическом (бесконтактном или промежуточном) режиме необходимо выбирать зонды с «жестким» кантилевером – жесткость должна быть не ниже 2 Н·м (рекомендуется 40 Н·м и выше). Кроме того при подборе зондов для динамического режима необходимо, чтобы величина собственной резонансной частоты кантилевера (консоли) была в

диапазоне 10–400 кГц. Информацию о характеристиках конкретных моделей зондов можно получить у их производителей, например, Mikromasch (www.spmtips.com), NT-MDT (www.ntmdt.com) и др.. Пример исполнения обычных чипов с АСМ-зондами представлен на Рис. 3.1.



Рис. 3.1. Исполнение чипов с АСМ-зондами с треугольными (слева) и прямоугольными (справа) кантилеверами (по данным www.spmtips.com)

Чипы с зондами устанавливаются в АСМ на съемном держателе, размещаемом в нижней части измерительной головки. Подобное решение позволяет обеспечить простую и удобную для пользователя процедуру установки/замены АСМ-зондов.

Выемка держателя зонда из измерительной головки АСМ производится следующим образом (Рис. 3.2).

- 1. Освободите держатель зонда внутри измерительной головки вращением фиксирующего винта против часовой стрелки.
- 2. Возъмите держатель зонда за ручку пальцами выньте из измерительной головки, двигая его строго параллельно дну измерительной головки.

Необходимо следить, чтобы при выемке и установке держателя зонда острие установленного зонда не касалось твердых поверхностей. Для предотвращения нежелательных контактов острия зонда с поверхностью образца при выемке и установке держателя зонда необходимо отводить образец, установленный на предметном столике, как можно ниже. Для этого выполняется процедура отвода в панели Main программы управления (см. руководство пользователя программы SurfaceScan).



Рис. 3.2. Схема выемки и установки держателя зонда из/в измерительной головке.



На Рис. 3.3 показано устройство съемного держателя зонда, используемого в ACM NT-206.

Рис. 3.3. Устройство держателя зонда. Слева показано положение держателя зонда при установкеего в измерительную головку; справа показано положение держателя зонда при замене/установке чипа с зондами или при его хранении.



ВНИМАНИЕ! Предохраняйте острие зонда от любых прикосновений к твердой поверхности! Для этого всегда кладите изъятый из измерительной головки держатель зонда (как для замены чипа с зондами, так и при хранении) нижней стороной вверх (Рис. 3.3 справа).

Тем не менее, помните, что держатель зонда необходимо устанавливать в измерительную головку в его нормальном положении – верхней стороной вверх, зондом вниз (Рис. 3.3 слева).

Установка или замена чипа с зондами производится по схеме, изображенной на Рис. 3.4:

1. Разместите держатель зонда на столе (ровной чистой поверхности) нижней стороной вверх. Слегка прижмите держатель пальцами руки к столу, чтобы кнопка отжатия пружины освободила прижимную пружину чипа.



Рис. 3.4. Схема смены/установки чипа с зондами в держатель.

- Используя пинцет, удалите старый чип с зондами из пространства между опорной призмой и прижимной пружиной.
- Возьмите новый чип с зондами с помощью пинцета так, чтобы зонд (сторона чипа), предназначенный для работы оказался между щупами пинцета и был направлен острием вверх. Помните, что чипы с зондами, поставляемые в упаковке типа Gel-Pack, размещаются в ней именно таким образом – острием вверх.

- Удерживая держатель зонда в прижатом состоянии, осторожно вставьте чип с зондами, фиксируемый пинцетом, в пространство между опорной призмой и прижимной пружиной. Перемещайте чип параллельно рабочей поверхности призмы до уступа на ней.
- 5. Разожмите сначала пинцет и затем отпустите держатель зонда.



Внимание! После установки/смены зонда необходимо произвести настройку системы детектирования отклонения кантилевера как это описано ниже.

3.3 Настройка системы детектирования

Система детектирования должна настраиваться после установки/смены зонда, а также в случае неправильного или ненадежного функционирования системы. Для настройки системы детектирования используются ручки на измерительной головке, показанные на Рис. 3.5.



Рис. 3.5. Ручки на измерительной головке, используемые для настройки системы детектирования АСМ.

Порядок настройки системы детектирования АСМ следующий.

1. Включите ACM (включите блок электроники, запустите программу управления ACM и включите лазер в панели Laser программы управления нажатием кнопки Laser (Рис. 3.6)). Настройка системы детектирования должна выполняться в статическом режиме работы АСМ, для чего необходимо выбрать соответствующий режим в селекторе режимов панели Main программы управления или временно переключиться в статический режим нажатием кнопки Temp. Static в панели Laser. Кроме того необходимо убедиться, что зонд, установленный в приборе не подведен к поверхности, т.е. находится в свободном состоянии.



Рис. 3.6. Панель Laser с включенной кнопкой лазера (слева) и панель индикаторов (справа) программы SurfaceScan.

- Настройте регулятор Load в панели Feedback программы управления АСМ таким образом, чтобы метка индикатора Load (рис. 3.6 справа или Руководство пользователя программы SurfaceScan) находилась в среднем положении или немного ниже.
- 3. Вращением ручек Laser X и Laser Y на измерительной головке (Рис. 3.5) отрегулируйте положение лазера так, чтобы лазерный луч позиционировался на свободном конце кантилевера (с его обратной стороны) (Рис. 3.7). Для удобства при настройке положения лазера и наблюдения за позиционированием лазерного луча на обратной стороне кантилевера рекомендуется воспользоваться изображением, получаемым встроенной видеокамерой.



Рис. 3.7. Схема позиционирование лазерного луча на свободном конце кантилевера. Справа представлен пример изображения, получаемого интегрированной видеокамерой при правильном позиционировании лазерного луча.

Для устранения влияния бликов, отраженных от поверхности образца и дающих неправильное представление о размере и положении светового пятна, при позиционировании лазерного луча на кантилевере допускается вынимать измерительную головку из направляющей («ласточкин хвост») не отсоединяя кабелей с тем, чтобы в окне визуализации видеокамеры было видно только пятно, отраженное от кантилевера. С особой осторожностью можно также с той же целью поступить иначе – подвести поверхность образца к зонду на расстояние около 0,5 мм (или меньше при достаточной квалификации), визуально контролируя зазор между острием зонда и поверхностью образца.

Для проверки правильности регулировки положения лазера рекомендуется оценить интенсивность и конфигурацию светового луча, отраженного от обратной стороны кантилевера. Визуальную оценку этих характеристик можно провести, поместив экран (узкую черную полоску) в ход отраженного луча между держателем зонда и поворотным зеркалом в измерительной головке (Рис. 3.8). При этом необходимо обратить внимание, чтобы экран не закрывал падающий луч от лазера.



Рис. 3.8. Схема оценки интенсивности и конфигурации светового луча, отраженного от обратной стороны кантилевера. Экран (узкая черная полоса) помещен в ход отраженного луча между держателем зонда и зеркалом.

Рекомендуется также, следя за пятном на экране, произвести окончательную подстройку положения лазера. Для этого вращением в небольшом диапазоне ручек *Laser X* и *Laser Y* на измерительной головке добиться, чтобы световое пятно на экране было как можно более ярким и круглым.

4. Вращением ручек Detector X и Detector Y на измерительной головке (Рис. 3.5) отрегулируйте положение фотодетектора таким образом, чтобы луч, отраженный от обратной стороны кантилевера, попадал на активную зону фотодетектора. Контролировать данную процедуру необходимо с помощью панели Laser программы управления АСМ – в ее зоне визуализации отображается положение светового пятна на фотодетекторе. Вначале необходимо добиться максимальной интенсивности отраженного пятна на фотодетекторе, о чем будет свидетельствовать значение I=100% (обычно – не хуже 90%) и красный цвет подвижного круга в графической зоне панели. Наиболее оптимальное положение фотодетектора при настройке системы детектирования отмечено серым кругом, т.е. положение с координатами X=100%, Y=75% – в этом случае подвижное красное пятно «лежит» в центре на оси X, касаясь своей нижней точкой горизонтальной оси (Рис. 3.9).



Рис. 3.9. Положение отраженного пятна в окне визуализации панели Laser при оптимальной регулировке положения фотодетектора.

Настройка положения фотодетектора представленным образом обеспечит устойчивую работу системы детектирования после подвода зонда к поверхности образца, т.к. после контакта и отклонения (изгиба) кантилевера отраженное пятно сместится вниз к центру фотодиода. В этом случае система в рабочем состоянии будет иметь максимально возможный диапазон измерения отклонения (изгиба) кантилевера.

5. Для контроля правильности регулировки положения фотодетектора, проверьте диапазон изменения отклонений. Для этого после завершения позиционирования фотодетектора слегка вращайте ручки *Detector X* и *Detector Y* на измерительной головке (рис. 3.5) и наблюдайте за перемещением отраженного пятна в окне визуализации панели Laser. Пятно при легком вращении ручек в обе стороны должно отклоняться соответствующим образом от исходного положения (соответственно, влево-вправо и вверх-вниз). Если этого не происходит, положение фотодетектора отрегулировано неправильно и световой луч не попадает на активную зону фотодетектора. В этом случае необходимо тщательно повторить процедуру регулировки положения фотодетектора.

Допускается визуально оценивать попадание отраженного луча на фотодетектор – при правильной регулировке красное пятно от отраженного луча будет видно на защитном стекле фотодетектора напротив его активной зоны.

3.4 Установка образца

Образец, предназначенный для исследования на приборе, необходимо размещать на предметном столике ACM (Рис. 1.2). Размеры образца должны быть в пределах диаметра 30 мм и высоты 8 мм. Если образец имеет слишком малые размеры, рекомендуется фиксировать его на подложке. Однако общие размеры образца с подложкой не должны превышать указанных параметров. Для получения высококачественного ACM изображения, исследуемая поверхность образца должна быть параллельна основанию подложки (или нижней поверхности самого образца, если он устанавливается без подложки).

Перед установкой образца на предметном столике АСМ необходимо обеспечить достаточное пространство между столиком и зондом, чтобы избежать повреждения зонда. Для этого предварительно отведите предметный столик вниз в крайнее нижнее положение,

прибегнув к процедуре отвода (нажмите кнопку панели Main программы управления). Дополнительно перед установкой образца можно передвинуть измерительную головку вперед по направляющей «ласточкин хвост» (Рис. 1.2), освободив предварительно соответствующий фиксирующий винт, что обеспечит больше свободного пространства для манипуляций с образцом. Допускается также отсоединение измерительной головки от базовой платформы (без отсоединения кабелей) или выемка держателя зонда из измерительной головки для предупреждения повреждения зонда при неосторожном обращении с образцом при его установке на предметный столик ACM.

Предметный столик ACM NT-206 оснащен магнитами, что позволяет образцы или подложки из ферромагнитных материалов размещать на нем без дополнительной фиксации. Образцы и подложки, не притягиваемые магнитами столика, необходимо закреплять на нем другими способами, например, с помощью двухсторонней липкой ленты. Рекомендуется использовать ферромагнитные подложки (например, шайбы диаметром до 30 мм и толщиной 0,5–1 мм из стали) для всех образцов, не притягиваемых магнитами в предметном столике ACM.

Непосредственно перед установкой образца необходимо очищать его исследуемую поверхность растворителями или в установке ультразвуковой очистки, чтобы удалить все загрязнения и посторонние объекты с нее, которые могут ухудшить работу измерительной системы и испортить результаты измерений.

При установке образца необходимо помнить, что область на поверхности, которую планируется сканировать, должен находиться по возможности ближе к центру предметного столика. В этом случае искажения на полученном АСМ-изображении, вызываемые сферическим характером движения сканера, будут минимальными.

После размещения образца на предметном столике прибора необходимо установить (вернуть) в рабочее положение измерительную головку (или держатель зонда) и позиционировать ее в направляющей так, чтобы зонд находился над центром сканера (предметного столика), окончательно плотно зафиксировав винтом.

4 ИЗМЕРЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА NT-206

В данной главе описываются действия, которые необходимо последовательно выполнять при измерениях. Управление работой ACM, его настройки и регистрация данных производится в программе SurfaceScan, подробности работы с которой приведены в соотвествующем руководстве пользователя.

Перед началом работы необходимо выполнить подготовительные процедуры, описанные в главе 3 настоящего руководства, согласно следующей очередности.

- 1. Включите АСМ, в т.ч. лазер системы детектирования отклонения измерительной консоли (§3.1.1).
- 2. Проверьте наличие зонда в держателе и при необходимости переустановите или замените его (§3.2).
- Проверьте настройку системы детектирования и если необходимо выполните ее согласно §3.3.
- 4. Расположите на предметном столике в АСМ образец, сориентировав его исследуемой поверхностью вверх (§3.4).
- 5. Установите измерительную головку в направляющей над образцом, так чтобы зонд располагался примерно над интересующей областью поверхности образца, и зафиксируйте головку винтом.

4.1 Предварительные настройки

Предварительно визуально или с помощью микроскопа оцените расположение зонда относительно исследуемой поверхности в плоскости и при необходимости переместите измерительную головку над образцом либо с помощью ручек с тыльных сторон шаговых электродвигателей позиционирования, либо воспользовавшись электродвигателями позициционирования через панель **Drives** программы управления.

После этого в панели Area задайте необходимую область сканирования, линию или точку, в которой будут производиться измерения. Для этого используются, соответственно, закладки Matrix, Line или Point. Задайте схему движения зонда, линию или точку измереня в зависимости от выбранной задачи, и при необходимости – другие параметры, контролируемые в панели Area. Если измерения предусматривают сканирование области, то предпочтительной схемой движения зонда в селекторе *Pattern* является схема

Выбор режима работы ACM – статический или динамический – производится селектором режима *Mode* в панели Main программы управления (Рис. 2.1). Также оператору с помощью селектора *Task* необходимо выбрать задачу, которая будет выполняться в ходе измерения:

- Сканирование матрицы (Scanning matrix),
- Сканирование линии (Scanning line),
- Двухпроходное сканирование (Two-pass scanning),
- Многослойное сканирование (Multilayer scanning),
- Спектроскопия в точке (Spectroscopy in point),
- Динамическая частотная спектроскопия (Dynamic force spectroscopy),
- Литография (Lithography),
- Трибометрия вдоль линии (Tribometry line),
- Сканирование спектров (Spectroscan),
- «Наносверление» (Drilling).

В панели FeedBack программы управления произведите настройку параметров обратной связи измерительной системы:

- Регулятор задержки обратной связи *FB Delay* в панели FeedBack рекомендуется установить на значение 2–10. Минимальные значения предпочтительны, однако для повышения стабильности измерительной системы допускается увеличение параметра.
- Параметр *Z trace steps* в панели FeedBack рекомендуется задать порядка 61–63. Большие значения параметра замедляют сканирование, но предотвращают повреждение и износ острия зонда и позволяют точнее производить измерение высоты микрорельефа. Если известно, что сканируемая поверхность гладкая (с высотами менее 10 нм), то параметр *Z trace steps* может быть существенно снижен.
- Задайте подеерживаемую системой нагрузку на зонд:

1) нажатием кнопки >0< у регулятора *Load* в панели FeedBack программы управления обнулите текущую нагрузку кантилевера (фактически это означает сообщить системе, что текущее положение кантилевера является его нейтральным, т.е свободным положением);

2) регулятором *Load* (или в соответсвующем цифровом поле) установить нагрузку порядка 10...15%.



состояние индикаторов на панели Indicator. Определенное сочетание текущего положения фотодетектора в АСМ и установки регулятора *Load* программы управления, оставшееся ОТ предыдущего измерения, может привести к ложному срабатыванию защитного алгоритма программы управления и, как следствие, сокращению пьезосканера. Признаками подобной ситуации, как в примере на рисунке справа (при гарантированном отсутсвии контакта между зондом и поверхностью), является полное отсутсвие показания на индикаторе Z (0%) при стабильном отклонение текущего показания нагрузки (Load) вниз от установленного уровня (столбик красного цвета вниз от отметки на индикаторе Load). В этой ситуации рекомендуется либо повысить с помощью регулятора *Load* в панели FeedBack задаваемую нагрузку (сдвинуть регулятор вниз или увеличить число в цифровом поле), так чтобы отметка на индикаторе сместилась ниже столбика текущего отклонения (пример на рисунке ниже слева), либо (предпочтительно) отрегулировать положение фототектора в измерительной головке АСМ так, чтобы пятно лазера на панели Laser (или в ее аналоге в панели Main) поднялось выше (пример на рисунке ниже справа). Текущее отклонение при этом будет переведено в область допустимых значений, и система обратной связи автоматически расширит Z-секцию сканера, что отобразится на индикаторе Z его полным заполнением (100%).

Внимание! Перед настройкой системы обратной связи проверяйте





Приведенные настройки системы обратной связи рекомендуется применять при измерении поверхности с неизвестной твердостью и микрорельефом. Однако, если для исследуемого образца поверхности ранее были подобраны другие рабочие параметры сканирования, то предпочтительно использовать именно их. Также рекомендуется в случае нестабильной работы измерительной системы при заданных настройках варьировать их с целью подбора наиболее оптимальных режимов измерений для конкретных образцов поверхностей.

В случае выбора динамического режима работы АСМ необходимо дополнительно произвести настройку параметров колебания зонда с помощью панели Generator (в том числе, если необходимо, и дополнительной панели Get Frequency Sweep) программы управления.

В процедурах, базирующихся на вертикальном движении зонда относительно поверхности образца (напр., спектроскопия, наносверление), задайте необходимые параметры и опции в панели **FvsD**.

4.2 Подвод поверхности к зонду

Процедура подвода непосредственно предшествует процессу измерения и должна выполняться в автоматическом режиме, поскольку система управления может достаточно точно зафиксировать вхождение зонда в контакт с поверхностью и отключить подвод в необходимый момент.

В АСМ NT-206 предусмотрено вертикальное перемещение платформы (предметного столика) с образцом с несколькими скоростями. Данную особенность можно использовать для ускорения процесса подвода. Например, произвести быстрый подвод образца к зонду на расстояние порядка 1 мм, а затем, установив меньшую скорость вращения шагового двигателя вертикального перемещения, завершить процесс автоматического подвода. Скорость вращения двигателя вертикалбльного перемещения регулируется установкой задержки между шагами привода селектором *Drive delay* в панели Main. При этом следует учитывать, что большее значение задержки соответствует меньшей скорости подвода.

Таким образом, грубый подвод можно осуществить, установив значение задержки Drive

delay 1.36 мкс и нажав кнопку автоподвода **10**. Оператор при этом должен визуально следить за процессом подвода и по достижении расстояния между образцом и зондом порядка 1 мм

остановить грубый подвод, нажав кнопку **STOP** в панели Main. или клавишу Esc на клавиатуре управляющего компьютера.

Дальнейший подвод выполняется в следующей последовательности.

- 1. Установите повышенное значение задержки *Drive delay* в панели Main, например, 2.72 мкс, для обеспечения низкой скорости подвода.
- 2. Нажмите на кнопку **то** в зоне автоматического подвода :::*Auto*::: панели Main и ожидайте автоматической остановки подвода, о чем будет выведено соответствующее сообщение. После этого кнопка автоподвода будет заблокирована и дальнейший подвод к поверхности будет возможен только в ручном режиме.
- 3. Если индикатор Z в панели Indicators не находится примерно в середине диапазона, необходимо дополнительно подвести (если индикатор выше середины) или отвести (если индикатор ниже середины) поверхность относительно зонда. Для этого в зоне ручного управления подводом ::: *Мапиаl*::: панели Main введите некоторое (3–20) количество шагов, которое определит диапазон перемещения шагового двигателя после нажатия кнопки, и

нажмите кнопку **10** (TO) или **OFF** (OFF), соответственно, для подвода или отвода образца относительно зонда. Эту операцию допускается производить многократно до тех пор, пока индикатор Z не переместится в середину своего диапазона.



Внимание! В процессе подвода под воздействием внешних факторов (например, вибрации, шум, другие помехи) возможно ложное срабатывание системы защиты сканера, приводящее к преждевременной остановке автоматического подвода. Внешними признаками такой ситуации является отключение автоподвода при полном заполнении индикатора Z (100%) и деактивации кнопки включения (ТО), как в примере на рисунке ниже. Для дальнейшей автоподвода TO активации кнопки автоподвода (ТО) и обеспечения возможности дальнейшего продолжения процедуры автоматического подвода нажмите кнопку STOP в зоне автоматического подвода :::*Auto*::: панели Main. После этого то кнопка (ТО) будет активирована и оператор сможет снова ее нажать для запуска автоматического подвода.



4.3 Измерение (сканирование)

- 1. Перед началом сканирования при необходимости дополнительно отрегулируйте параметр *Load* (панель Feedback). Помните, что чем ниже установлена отметка *Load* в панели индикаторов, тем больший изгиб кантилевера будет считаться его рабочим состоянием и поддерживаться системой при сканировании, а соответственно, с тем большей силой острие зонда будет воздействовать на поверхность.
- 2. Проверьте скорость обратной связи. Слишком высокая скорость обратной связи (низкое значение задержки *Delay* в панели Feedback) может стать причиной самовозбуждения измерительной системы и резко ухудшить качество ACM-изображения. Признаки появления самовозбуждения в системе появление периодических помех («ряби») на ACM изображении или наложение искусственной периодической составляющей на линиях профиля или кривой зависимости сила-расстояние (при спектроскопии в точке). Учитывая эти соображения, при необходимости снизить скорость обратной связи постепенно повысьте значение задержки *FB Delay* и/или параметра *Z trace steps* в панели Feedback. Также можно снизить параметры *Proportional gain* и повысить *Integral gain* в блоке PID regulators панели.
- 3. Если до этого не были определены, в панели Area задайте необходимую область сканирования, линию или точку, в которой будут производиться измерения. Для этого используются, соответственно, закладки Matrix, Line или Point. Задайте схему

движения зонда, линию или точку измереня в зависимости от выбранной задачи. При первом сканировании образца или нового участка на нем рекомендуется установить максимальное поле сканирования.

- 4. В панели Area установите необходимые параметры для количества точек по осям X и Y (*Num points X, Num points Y*), размера шага между точками измерения (*Step, nm*), длительности задержки измерения в точке измерения (*Delay, mks*).
- 5. Если измерения предусматривают сканирование области, выберите схему движения зонда в селекторе *Pattern*: предпочтительная схема движения зонда 🛅
- 6. Запустите процесс измерения (сканирования) нажать либо кнопку Start в нижней части панели Main. Оперативно запустить сканирование выбранной области можно также с помощью кнопки (Start scanning on the set matrix) в линейке инструментов, либо командой меню Task > Scanning matrix. Оперативно запустить другие процедуры измерения можно с помощью соответствующих кнопок в линейке инструментов или с помощью соответствующих пунктов меню программы управления.

После запуска процесса измерения на экран будет выведено окно визуализации АСМизображения и дополнительное окно визуализации текущего профиля, в которых можно наблюдать за процессом измерения, что позволит визуально контролировать качество получаемого АСМ-изображения. Допускается также в ходе «пробного» сканирования подстраивать параметры задержки *FB Delay, Z trace steps, Proportional gain* и *Integral gain* в панели **Feedback**. В ходе измерений оператору рекомендуется наблюдать за процессом для предупреждения выхода измеряемой высоты за пределы допустимого диапазона вертикального движения пьезосканера. При этом особенно критична для системы ситуация, когда сканер полностью сжимается (полностью исчезают показания на индикаторе Z), что свидетельствует о превышении высоты рельефа верхнего предела вертикального движения пьезосканера. Итогом этого может стать повреждение зонда и самой поверхности. При возникновении подобной ситуации рекомендуется остановить процесс сканирования и немного отвести поверхность от зонда, но оставляя тем не менее их в контакте (т.е. показания индикатора Z должны после такого отвода оставаться ниже максимума).

- 7. Процесс измерения (сканирования) будет завершен автоматически, о чем будет выведено соответствующее сообщение. Если возникнет необходимость остановить измерение до его автоматического завершения, нажмите кнопку Stop в панели Main или кнопку в линейке инструментов программы управления.
- 8. По завершении процесса сканирования полученное ACM-изображение будет передано в сектор измеренных данных. Рекомендуется полученное ACM-изображение сохранить в файле на жестком диске.

Если необходимо просканировать другой участок на поверхности образца, переместите измерительную головку с помощью автоматизированной платформы грубого позиционирования. При этом за перемещением зонда относительно образца можно наблюдать с помощью интегрированной видеосистемы. Не забудьте, что перед сменой участка сканирования необходимо незначительно отвести поверхность от зонда. Для этого установите в панели Main значение порядка 50–100 шагов (*Steps*) в зоне ручного управления (:::*Manual:::*) двигателем

вертикального перемещения образца и нажмите в этой зоне кнопку OFF (OFF), чтобы отвести

поверхность от зонда в ручном режиме. После отвода индикатор Z должен показывать максимальное значение (т.е. растяжение сканера), а кнопка автоподвода активизироваться. Перемещение измерительной головки производится шаговыми двигателями, управляемыми в панели **Drives**. После установки измерительной головки над новым участком образца можно продолжить измерения, повторив автоподвод (§4.2) и последующие процедуры сканирования.

4.4 Завершение работы

Для завершения работы с АСМ выполните следующие действия.

- 1. Остановите процедуру измерения, если она не завершена автоматически.
- 2. Установите максимальную скорость обратной связи (т.е. минимальное значение задержки *Delay* в панели Feedback).
- 3. В панели Main нажмите кнопку автоотвода OFF (OFF) в зоне управления автоматическим движением двигателя вертикального перемещения образца :::*Auto*:::. Альтернативно можно также установить количество шагов (*Number of steps*) не менее

1000 в зоне ручного управления (::: Manual:::) и нажать кнопку ручного отвода OFF

(OFF). После выхода поверхности из контакта с зондом индикатор Z увеличится до максимального значения. Продолжайте выполнять отвод до тех пор, пока острие зонда не окажется на достаточно большом расстоянии от образца, что необходимо проконтролировать визуально. Если необходимо, снимите образец с предметного столика.

- Удостоверьтесь, что все необходимые АСМ-изображения, накопленные в секторе измеренных данных, сохранены в файлах на жестком диске и сохраните их если этого не было сделано.
- 5. Выключите лазер (отожмите кнопку Laser в панели Laser).
- 6. Выключите блок электроники управления с помощью кнопки **Power** на его передней панели (Рис. 1.6).
- 7. Закройте программу управления АСМ.
- 8. При необходимости выключите управляющий компьютер.



Рис. 4.6. Окно программы Surface Scan после получения АСМ-изображения

5 КАЛИБРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АСМ

Калибровку измерительной системы АСМ производят для определения коэффициентов, используемых электронными системами для правильной интерпретации вертикального и латеральных движений пьезосканера. Правильно измеренные данные, полученные прибором, позволят в дальнейшем иметь достоверную информацию о просканированных объектах.

Рекомендуется производить калибровку каждый раз после замены пьезосканера, а также как минимум раз в неделю для проверки ранее установленных констант (коэффициентов).

Для калибровки необходимо использовать набор калибровочных решеток. Калибровочные решетки представляют собой специально изготовленные периодические поверхностные структуры (обычно на кремнии) с известной геометрией элементов рельефа (шаг и высота элементов рельефа). Наиболее распространенными являются тест-структуры, изготавливаемые компаниями NT-MDT и Mikromasch (Рис. 5.1).



Рис. 5.1. Электронные микрофотографии тест-структур, изготавливаемых компанией Mikromasch.

Реальные размеры максимального поля сканирования прибора при данном пьезосканере определяются из анализа АСМ-изображений тест-структуры (Рис. 5.2). Найденные при этом параметры вводятся в полях *X range, nm, Y range, nm* и *Z range, nm* панели калибровки **Calibrate ACM Data** (Рис. 5.3).



Рис. 5.2. АСМ-изображение тест-структуры.

Например, для расчета диапазона движения пьезосканера по оси X необходимо подсчитать количество периодов элементов рельефа на АСМ-изображении тест-образца (включая неполные периоды) при установленном максимальном поле сканирования и умножить это число на шаг периода.

| Calibrate AFM Data 🛛 🔯 | | | | |
|--|-------|--|--|--|
| X range, nm | 65535 | | | |
| Y range, nm | 65535 | | | |
| Z range, nm | 2413 | | | |
| Deflection | 427 | | | |
| Torsion | 65535 | | | |
| Phase | 360 | | | |
| 4th chan (min) | -10 | | | |
| 4th chan (max) | 10 | | | |
| Min amplitude | 0 | | | |
| Max amplitude | 1000 | | | |
| Spring constant 0.03 | | | | |
| Nonlinearity correction | | | | |
| Simple cubic | ▼ | | | |
| ✓ Fast scan direction ✓ Slow scan direction | | | | |
| Scanner | | | | |
| default 📑 🖮 🔛 | | | | |
| 🖌 OK 🛛 🗶 Cancel | | | | |

Рис. 5.3. Панель установки основных параметров калибровки ACM NT-206.

Для калибровки диапазона вертикального движения пьезосканера сравнивают высоту элементов тест-образцов на АСМ-изображении с действительными параметрами. В данном случае необходимо разделить существующий вертикальный диапазон Z_{current} на высоту элемента рельефа h_{image}, определенную по АСМ-изображению, и затем умножить результат на действительную высоту элемента h_{real} (Рис. 5.4):

$Z = Z_{current} * h_{real} / h_{image}$

Рассчитанную таким образом величину необходимо ввести в поле *Z range, nm* панели калибровки. Аналогичную методику можно также использовать для расчета калибровочных параметров диапазонов движения пьезосканера по осям X и Y.



Рис. 5.4. Сравнение регистрируемой и реальной высоты ступеньки на тест-структуре

Параметры *Deflection* и *Torsion* в панели калибровки **Calibrate ACM data** описывают количество бит, используемых АЦП измерительной системы для измерения, соответственно, отклонения и кручения кантилевера при сканировании поверхности. Для 16-разрядного АЦП, установленного в системе, эти величины составляют 65535.

Угол сдвига фазы *Phase* описывает пределы изменения этого параметра и обычно устанавливается равным 360.

5.2 Расчет параметров коррекции нелинейности с помощью программы SurfaceXplorer

Параметры программной коррекции нелинейности движения пьезосканера рассчитываются с помощью специализированной программы обработки СЗМ-изображений SurfaceXplorer. Функция *Расчёт коэффициентов уравнения коррекции движения пьезосанера* программы SurfaceXplorer ориентирована для совместного использования с управляющим программным обеспечением атомно-силового микроскопа NT-206 (т.е. SurfaceScan) и позволяет автоматизировать данную процедуру при калибровке прибора.

Функция рассчитывает коэффициенты *a*, *b* и *c* кубического уравнения (полинома третьей степени) вида:

$$y = ax^{3} + bx^{2} + cx$$

которые затем могут быть непосредственно использованы программой управления измерительным модулем ACM NT-206 для коррекции нелинейности движения используемого трубчатого пьезосканера.

Для реализации функции расчета коэффициентов программной коррекции с помощью программы SurfaceXplorer необходимо получить как минимум одно тестовое ACM-изображение на ACM NT-206. Тестовое ACM-изображение – это ACM-изображение тестовой структуры с известными геометрическими характеристиками. Сканирование тестовой структуры необходимо производить при следующих условиях:

- 1. предварительно установить в полях *X range, nm* и *Y range, nm* панели калибровки Calibrate ACM Data (Рис. 5.3) значение 65535 (число точек сканирования аппаратной матрицы при 16-разрядном ЦАП);
- отключить опцию программной коррекции установить значение None в селекторе Nonlinearity correction) панели калибровки Calibrate ACM Data (Рис. 5.3);
- 3. установить максимальное поле сканирования в панели настройки параметров области сканирования Area нажать кнопку 🔄 (справа от окна графического выбора поля)



Внимание! Функция *Расчёт коэффициентов уравнения коррекции движения пьезосанера* программы SurfaceXplorer предназначена для автоматического расчета на основе анализа одного тестового изображения двух уравнений, которые затем применяются системой при противоположных направлениях сканирования. Рассчитанные данные, таким образом, могут быть использованы затем для простой кубической коррекции (опция Simple cubic correction в панели калибровки Calibrate ACM Data (Рис. 5.3) программы SurfaceScan. Если Вы планируете активировать опцию расширенной кубической коррекции (Аdvanced cubic correction), то используйте только те параметры, которые соответствуют действительному направлению сканирования при получении тестового изображения.

Процедура расчёта коэффициентов уравнения коррекции движения пьезосанера в программе SurfaceXplorer выполняется в следующем порядке.

1. Откройте файл подготовленного тестового АСМ-изображения. Если необходимо, воспользуйтесь функциями выравнивания изображения для устранения наклона и сферической компоненты на тестовом изображении. Пример открытого тестового АСМ-изображения:



2. Активируйте функцию выделения профиля поперечного сечения, например, нажав кнопку на панели инструментов в программе SurfaceXplorer. После этого

проведите (с помощью мыши при нажатой левой кнопке) линию перпендикулярно периодическим структурам на изображении, например:



3. Визуализируйте профиль поперечного сечения для выделенной линии, например, нажав кнопку на панели инструментов в программе SurfaceXplorer. Профиль будет отображен в специализированном окне, например:



4. Расставьте на однородных элементах профиля в характерных точках метки. Для установки метки можно воспользоваться вертикальными маркерами [a] и [b] на графике, перемещая их к интересующей точке и нажимая затем кнопку Добавить (Add) на панели настройки параметров профиля поперечного сечения Профиль (Profile) вкладки Свойства (Properties) сектора объектов (панель у левой границы окна). Другой способ расстановки меток – установить курсор мыши над необходимой точкой профиля и щелкнуть левой кнопкой мыши при нажатой клавише Shift на клавиатуре компьютера. Пример расставленных меток:



Для корректной работы функции автоматического расчета необходимо установить как минимум четыре метки на линии профиля. При этом больше количество расставленных меток позволяет повысить точность определения поправочных коэффициентов.

5. После расстановки всех необходимых меток активируйте контекстное меню, щелкнув правой кнопкой мыши в окне профиля, и выберите команду Рассчитать коэффициенты (Calculate correction):



 После выполнения команды активируется специализированное окно, в котором отображаются кривые корректирующей функции, а также соответствующие коэффициенты кубического полинома, например:



7. После этого Вы можете сохранить рассчитанные параметры, нажав кнопку OK в этом окне результатов расчета. Нажатие кнопки Cancel приведет к закрытию окна без сохранения результатов. По умолчанию результаты расчетов сохраняются в файл конфигурации программы SurfaceScan в необходимом для этого формате и позиции (в секцию [Nonlinearity correction] файла). По умолчанию имя файла для сохранения данных SurfaceScan.ini. Для автоматического внесения рассчитанных данных в рабочий файл конфигурации (тот, который используется программой SurfaceScan) Вам необходимо указать путь к нему в стандартном диалоге сохранения:

| Save As | | | | | <u>? ×</u> |
|------------------------|---------------|-----------------|---|---------|------------|
| Save in: | process | | • | + 🗈 💣 💷 | |
| | | | | | |
| My Recent Documents | | | | | |
| | | | | | |
| Desktop | | | | | |
| 1 | | | | | |
| My Documents | | | | | |
| I | | | | | |
| My Computer | | | | | |
| - C | | | | | |
| My Network Places | File name: | SurfaceScan.ini | | • | Save |
| | Save as type: | SurfaceScan.ini | | • | Cancel |

Необходимо проследить, чтобы при сохранении рассчитанных данных в файл конфигурации программа SurfaceScan не была запущена.

Структура сохраняемых данных следующая:

[Nonlinearity correction] smpl_cuba01=4.83940346274115E-11 smpl_cubb01=-3.17043978888385E-6 smpl_cubc01=0.999930318572792 smpl_cuba10=4.84354711622256E-11 smpl_cubb10=-4.73941656959738E-6 smpl_cubc10=1.10257524876609 При необходимости Вы также можете просмотреть рассчитанные параметры на вкладке Данные (Data) в секторе объектов программы SurfaceXplorer, когда окно профиля активно, к примеру:

| Browse | Properties | Data | |
|---|--|---|--|
| Statistic i | nformation: | | |
| Line 1 Zmean: - Ra: 13.7 Rg: 14.0 Rsk: 0.1 Rku: 1.1 | 0.019 58 02 23 01 | | |
| LABELS CS-Topo 0: x=181 1: x=229 2: x=181 3: x=181 4: x=180 5: x=319 6: x=451 7: x=451 8: x=560 9: x=569 | graphy: 49.8um z=26 9.0um z=15. 49.8um z=26 49.8um z=26 28.8um z=15 43.7um z=13 32.6um z=16 69.4um z=16 90.4um z=16 | 18nm 3nm 18nm 18nm 18nm 18nm 16nm 16nm | |
| Calibratio y(x) = ax' a01=4.80 b01=-3.1 c01=9.99 a10=4.84 b10=-4.7 c10=1.10 | n coeff: 3 + bx ² + c 39403E-11 70440E-06 39303E-01 43547E-11 39417E-06 12575E+00 | 3X | |

приложение

П1 Проверка управляющих напряжений пьезосканера

При необходимости проеврить диапазон изменения управляющих напряжений, подаваемых на пьезосканер прибора, рекомендуется воспользоваться следующей процедурой.

 Вызвать в программе SurfaceScan панель тестирования Commands. Для этого, находясь в работающей программе SurfaceScan, необходимо нажать комбинацию клавиш Alt + Ctrl + T на клавиатуре управляющего компьютера.

| Commands | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|
| MICRO_INFO WRITE_PORT / READ_PORT WRITE_MEM / READ_MEM START_SCAN AUTO_MOVE READ_STATU | | | | | |
| Single port Port 8 Value A Write Read | Several ports Scan Control Write Read Start 200 Ports 3 Generate 0000 0000 0000 Port Value 0004 0000 0000 0000 0000 02 00000 0000 0000 0000 0000 0000 02 0000C 000C 000C 000C 000C 000C 000C | | | | |

- 2. Перейти на вкладку WRITE_PORT / READ_PORT панели.
- 3. Нажать кнопку Generate в зоне Several ports.
- Если под регуляторами Control нет наименований портов, то необходимо ввести их вручную: слева – диапазон напряжений по Х – порт А (шестнадцатиричное А, вводится большая английская буква А);

посредине – диапазон напряжений по Y – порт 9 (шестнадцатиричное 9, вводится цифра 9); справа – диапазон напряжений по Z – порт 0 (шестнадцатиричное C, вводится большая английская буква C);

5. Чтобы корректно работал третий регулятор (Z, порт C), необходимо в зоне Single port ввести Port 8

| /alue | | А |
|-------|-------|------|
| | 22704 | 1121 |

и затем нажать кнопку Write в этой же зоне.

6. Подключить вольтметр (с диапазоном не ниже 350 В постоянного тока) к выходу высоковольтного усилителя к необходимому контакту: выход Х, Y или Z – соответственно, X input (pin 1), Y input (pin 3) или Z input (pin 5). Для удобства можно воспользоваться разъемом высоковольтного кабеля, подключенного к блоку электроники.



ВНИМАНИЕ! Перед отсоединением (а также перед последующим подсоединением) кабеля на блоке сканирования необходимо выключить питание блока электроники управления (обесточить его).

На рисунке приведена раскладка контактов на свободном разъёме высоковольтного кабеля:



Рисунок – Разъем высоковольтного кабеля Figure – High voltage cable connector

Примечание. Все выводы заземления (с индексом GND) соединены вместе и с корпусом прибора (в т.ч. с корпусом разъёма).

7. С помощью регуляторов Control (по соответствующим каналам/портам) необходимо изменять управляющее значение ЦАП прибора во всем диапазоне (от 0000 до FFFF в цифровых индикаторах над соответствующим регулятором) и отслеживать на вольтметре изменения напряжения на выходе высоковольтного усилителя. В исправном состоянии напряжение на выходе высоковольтного усилителя. В исправном состоянии напряжение на выходе высоковольтного напряжения зависят от версии платы высоковольтного усилителя и ее настроек: стандартный усилитель обеспечивает изменение напряжения от – 160 В до +160 В, высоковольтный усилитель расширенного диапазона обеспечивает максимальное изменение напряжения от –350 В до +350 В, но обычно для предотвращения механического разрушения и/или электрического пробоя пьезокерамического сканера прибора ограничен диапазоном –250...+250 В.

Примечание. Для точного изменения значения регулятора можно воспользоваться клавишами 🛧 (Up) и 👽 (Down) на клавиатуре управляющего компьютера. При этом вначале необходимо активировать интересующий регулятор канала с помощью мыши.

8. Для считывания действительного значения управляющего напряжения ЦАП прибора можно воспользоваться индикаторами в зоне Scan (в данном случае под сканированием подразумевается сканирование значений каналов/портов). Опрос показаний каналов/портов производится через интервалы времени, задаваемые вручную в поле Intervals, ms (в мс). При нажатой кнопке Start считываемые значения будут отображаться в графическом виде столбчатыми индикаторами и дублироваться в цифровом виде над ними.

П2 Общая блок-схема систем электроники управления АСМ NT-206



ПЗ Схема электрических соединений в блоке сканирования (базовая платформа и измерительная головка) АСМ NT-206



