



NT-MDT
Molecular Devices and Tools for NanoTechnology

SOLVER BIO
SCANNING PROBE MICROSCOPE

**РУКОВОДСТВО
ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ**
Solver BIO Cell



Россия, 124460, Москва,
НИИФП, ЗАО "НТ-МДТ"
т.: +7(095) 535-03-05
ф.: +7(095) 535-64-10
e-mail: spm@ntmdt.ru
<http://www.ntmdt.com>

845 версия программы
для Windows 95/98

Прочтите

Содержание данного документа может быть изменено компанией “НТ-МДТ” без предварительного уведомления.

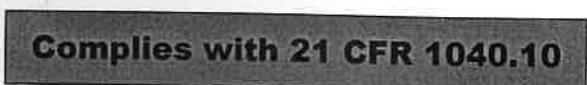
Замечание: Комплект поставки Вашего прибора может отличаться от описанного в данном руководстве. Обратитесь к спецификации Вашего контракта за более точной информацией.

Замечание: Некоторые названия, упомянутые в данном руководстве, могут являться торговыми марками или зарегистрированными торговыми марками соответствующих компаний.

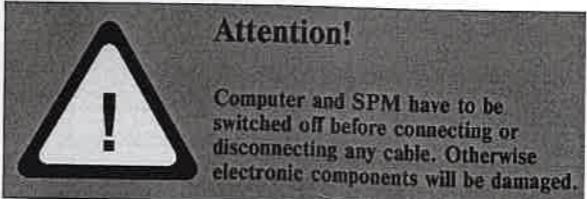
Внимание: Пожалуйста, ознакомьтесь с информацией, приведенной ниже, а также с разделом “Правила безопасности” перед использованием прибора.



Ярлык предупреждения о наличии источника лазерного излучения –
Расположен на СЗМ головке.



Ярлык сертификации – Расположен на СЗМ головке.



Ярлык «Внимание» – Расположен на задней панели СЗМ контроллера.

Комплект документов

- Общая информация*
- Руководство пользователя
- Описание программы управления СЗМ
- Анализ объектов поверхности с помощью инструмента “GRAIN ANALYSIS”

Copyright

Никакая часть данного руководства, ни для каких целей не может быть воспроизведена или передана в любой форме и любыми средствами, электронными или механическими, включая фотокопирование и видеозапись, без письменного разрешения компании “НТ-МДТ”.

* В стадии разработки

Содержание

Глава 1. Что такое Сканирующий Зондовый Микроскоп Solver BIO Cell	*
Глава 2. Общие представления и краткое описание работы прибора в режиме атомно-силового микроскопа	2-2
2.1. Основные элементы, общий принцип работы микроскопа и схема взаимодействия основных элементов	2-2
2.2. Общие представления о режимах работы AFM	2-6
2.3. Общие представления о контактном режиме работы прибора	2-7
2.4. Общие представления о работе в режимах, использующих вибрационные методики	2-10
2.5. Управление СЗМ и основные параметры, определяющие работу прибора	2-13
Глава 3. Подготовка прибора, СЗМ головки, зонда, образца ...	3-2
3.1. Основные операции, выполняемые при подготовке прибора к работе	3-2
3.2. Включение прибора, запуск программы управления	3-2
3.3. Выбор кантилевера	3-2
3.4. Установка кантилевера	3-3
3.5. Настройка лазера и фотодиода	3-10
3.6. Подготовка и установка образца	3-20
3.7. Установка СЗМ головки	3-24
3.8. Включение, настройка и работа оптического микроскопа, горизонтальное позиционирование головки	3-27
3.9. Приложение. Установка образца, установка СЗМ головки при работе в режиме «отдельно стоящего микроскопа»	3-29
Глава 4. Контактная атомно-силовая микроскопия	4-3
4.1. Исходное состояние. Основные стадии и операции контактного режима	4-3
4.2. Подготовка блок-схемы SPM к контактному режиму	4-6
4.3. Выбор и установка начального уровня сигнала “DFL” и значения параметра “Set point”	4-7
4.4. Автоматический подвод зонда к образцу	4-11
4.4A. Ручной подвод зонда к образцу	4-18
4.5. Установка параметров сканирования	4-21
4.6. Сканирование	4-28
4.7. Сохранение полученных данных	4-29
4.8. Переключение из контактного режима в полуконтактный	4-30
4.9. Выключение микроскопа	4-30
4.10. Микроскопия латеральных сил (Lateral Force Microscopy)	4-31
4.11. Метод изображения силы в контактном режиме	4-36
4.12. Режим регистрации сигнала ошибки обратной связи	4-39

Глава 5. Полуконтактная атомно-силовая микроскопия	5-3
5.1. Исходное состояние. Основные стадии и операции при проведении полуконтактной микроскопии	5-3
5.2. Подготовка блок-схемы SPM к полуконтактному режиму	5-7
5.3. Установка рабочей частоты и амплитуды колебаний кантилевера	5-9
5.4. Установка начального уровня сигнала «MAG»	5-14
5.5. Подвод зонда к образцу, выбор и установка рабочей точки	5-15
5.6. Установка параметров сканирования	5-28
5.7. Сканирование	5-35
5.8. Сохранение полученных данных	5-37
5.9. Переключение из полуконтактного режима в контактный	5-37
5.10. Выключение микроскопа	5-38
5.11. Метод фазового контраста (Phase Imaging)	5-39
5.12. Особенности и отличия полуконтактного режима в жидкой среде	5-45
Глава 6. Режим спектроскопии	6-2
6.1 Измерение зависимости FB(z) в полуконтактном режиме (сигнала FB от расстояния между зондом и образцом). Калибровка амплитуды колебаний кантилевера	6-2
Глава 7. Многопроходный режим работы прибора	7-2
7.1 Общие представления о многопроходном режиме	7-2
7.2 Настройка и управление в многопроходном режиме	7-3

Глава 2. Общие представления и краткое описание работы прибора в режиме атомно-силового микроскопа

Содержание

Глава 2. Общие представления и краткое описание работы прибора в режиме атомно-силового микроскопа	2-2
2.1. Основные элементы, общий принцип работы микроскопа и схема взаимодействия основных элементов	2-2
2.1.1. Зонд атомно-силового микроскопа	2-3
2.1.2. Пьезосканер	2-4
2.1.3. Оптическая схема регистрации отклонений кантилевера	2-4
2.2. Общие представления о режимах работы AFM	2-6
2.2.1. Силы, действующие между острием кантилевера и образцом	2-6
2.2.2. Режимы работы атомно-силового микроскопа и основные методики атомно-силовой микроскопии	2-6
2.3. Общие представления о контактном режиме работы прибора	2-7
2.3.1. Общие представления о работе прибора в режиме контактной атомно-силовой микроскопии	2-7
2.3.2. Схема петли обратной связи в контактном режиме	2-8
2.3.3. Достоинства и недостатки контактного режима SPM	2-9
2.4. Общие представления о работе в режимах, использующих вибрационные методики	2-10
2.4.1. Вибрационные и модуляционные методики атомно-силовой микроскопии	2-10
2.4.2. Общие представления о работе прибора в режиме полуконтактной атомно-силовой микроскопии	2-10
2.4.3. Петля обратной связи в режиме полуконтактной микроскопии	2-12
2.5. Управление СЗМ и основные параметры, определяющие работу прибора	2-13
2.5.1. Графический интерфейс управления СЗМ	2-13
2.5.1.1. Главное окно программы	2-13
2.5.1.2. Блок-схема управления SPM	2-15
2.5.1.3. Блок-схема управления синхронным усилителем и фазовым детектором	2-15
2.5.1.4. Окно управления параметрами сканирования	2-15
2.5.2. Основные параметры, определяющие работу прибора	2-16

Глава 2. Общие представления и краткое описание работы прибора в режиме атомно-силового микроскопа

2.1. Основные элементы, общий принцип работы микроскопа и схема взаимодействия основных элементов

Одним из основных элементов прибора **Solver BIO** является СЗМ головка, которая является универсальным, многофункциональным сканирующим зондовым микроскопом.

Основными элементами СЗМ являются зонд, система регистрации отклонения зонда, пьезосканер, система управления сканером.

Схема взаимодействия основных элементов является типичной для атомно-силового микроскопа (Рис. 2.1-1).

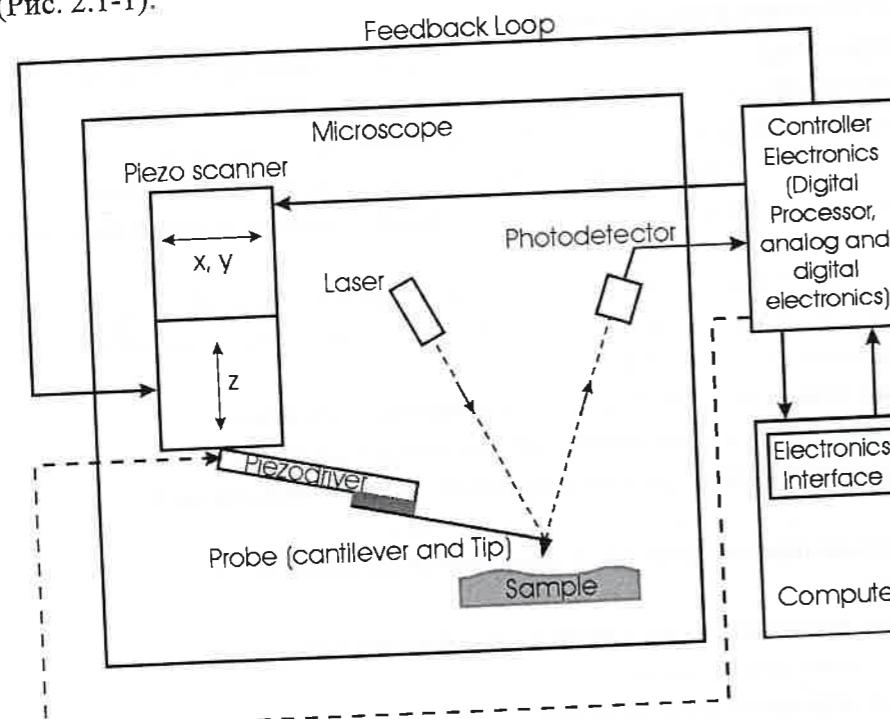


Рис. 2.1-1

Принцип работы атомно-силового микроскопа основан на зондировании поверхности образца острой иглой, которая сканирует вдоль плоскости образца. Острие находится на свободном конце кантилевера - гибкой пластины, закрепленной вторым концом на сканере.

Острие взаимодействует с поверхностью, сила взаимодействия вызывает изменение механического состояния кантилевера, например, заставляет кантилевер отклоняться.

При сканировании величина отклонения кантилевера (или отклонение какого-либо другого параметра взаимодействия) от начально установленного значения измеряется при помощи регистрирующей системы. Сигнал, пропорциональный отклонению, поступает в систему управления сканером.

В каждой сканируемой точке поверхности система обратной связи при помощи сканера перемещает зонд по нормали к поверхности таким образом, чтобы вернуть значение параметра взаимодействия к начально установленной величине. Одновременно величина перемещения зонда по нормали к поверхности записывается в память компьютера и интерпретируется как рельеф образца.

2.1.1. Зонд атомно-силового микроскопа

В атомно-силовом микроскопе используются зонды кантилеверного типа. Такой зонд состоит из гибкого кантилевера, острой иглы и подложки.

Кантилевер является балкой, один конец которой закреплен, а второй свободен. Острая игла находится на свободном конце кантилевера. Кантилевер закреплен на твердой подложке, которая вставляется в держатель зонда, расположенный на сканере.

Острие имеет радиус кривизны менее 10 нм и длину обычно от 3 до 15 микрон. Чем меньше радиус кривизны, тем большее разрешение может быть получено.

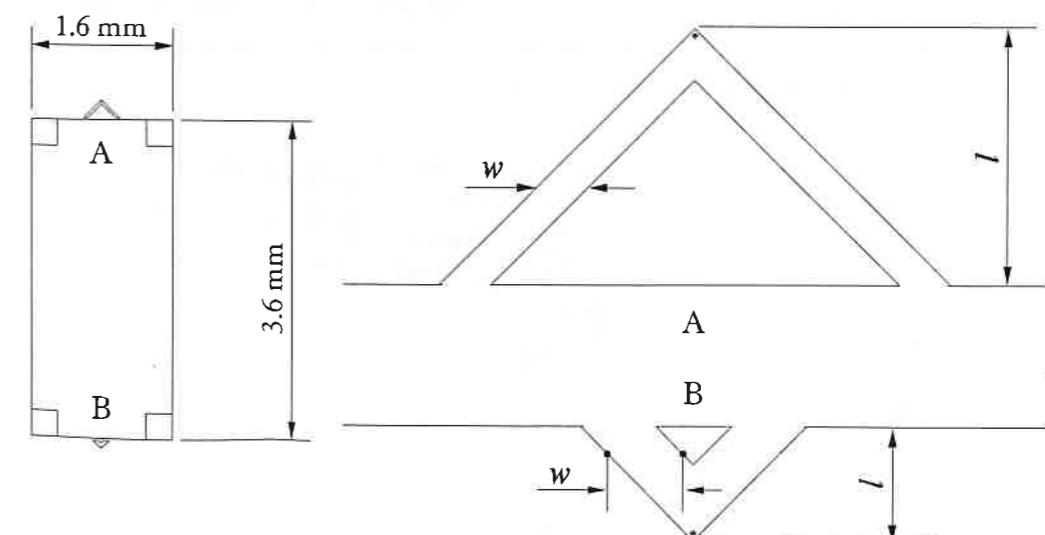
Большинство кантилеверов имеет треугольную (V-образную) или прямоугольную форму. Обычно, кантилеверы имеют длину в интервале 80-350 микрон. Основными материалами, из которых изготавливаются кантилеверы, являются кремний и нитрид кремния.

Важными параметрами кантилевера являются коэффициент упругости (жесткость) и резонансная частота. Величина коэффициента упругости определяется геометрическими размерами и материалом кантилевера и для различных кантилеверов лежит в интервале от 0.01 до 100 Н/м.

Обычно, на одной подложке имеется два или несколько различных кантилеверов с остриями.

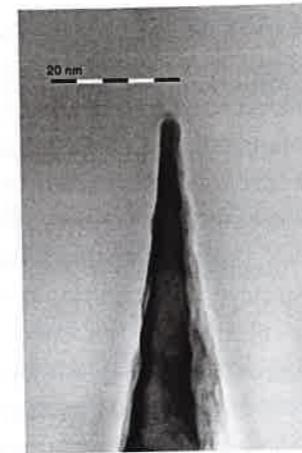
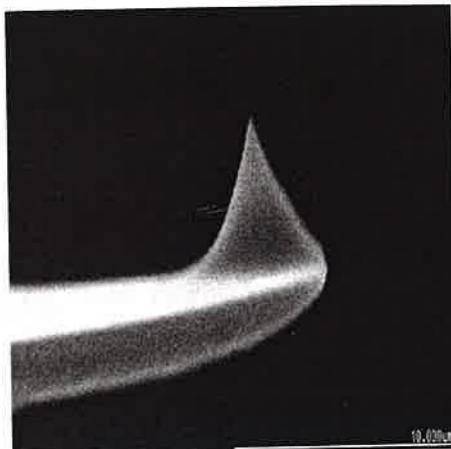
Ниже, в качестве примера приведены характеристики кантилеверов, выпускаемых фирмой NT-MDT.

Тип кантилевера	A			B		
	Min	Typical	Max	Min	Typical	Max
Длина кантилевера, l , мм		200			90	
Ширина кантилевера, W , мм		40			60	
Толщина кантилевера, мм	1.6	1.9	2.2	1.6	1.9	2.2
Резонансная частота, kHz	40	50	60	300	350	400
Силовая константа, N/m	1.8	3.0	4.2	24.0	30.0	36.0



Характеристики иглы:

- радиус кривизны - менее 10 нм;
- высота иглы - 7 мкм;
- угол при вершине - 22°;
- игла проводящая.



2.1.2. Пьезосканер

Сканер обеспечивает два независимых движения кантileвера: сканирование вдоль поверхности образца (в плоскости X, Y) и перемещение в направлении перпендикулярном к поверхности (по оси Z).

Сканер изготовлен из пьезоэлектрического материала, который расширяется или сжимается в зависимости от знака приложенного к нему электрического напряжения и пропорционально величине последнего.

В C3M головке используются две модификации сканеров, имеющих некоторые отличия в конструкции и обеспечивающих различное максимальное поле сканирования: 50-микронный и 90-микронный.

Сканер состоит из двух пьезотрубок разного диаметра, вставленных одна в другую. Нижний конец большой трубы закреплен на головке, к верхнему концу крепится пьезотрубка, имеющая меньший диаметр. К нижнему концу последней крепится держатель кантileвера. Пьезотрубка меньшего диаметра обеспечивает сканирование в плоскости образца (X, Y), большего - перемещение кантileвера по нормали (по оси Z).

2.1.3. Оптическая схема регистрации отклонений кантileвера

В приборе использована оптическая схема регистрации отклонений кантileвера, имеющая оптическую следящую систему. Регистрирующая система позволяет определять угловое отклонение кантileвера с разрешением менее 0.1", что обеспечивает разрешение по вертикали 0.05 нм.

Регистрирующая система состоит из источника излучения, позиционно-чувствительного фотоприемника и оптической системы (рис.2.1-2).

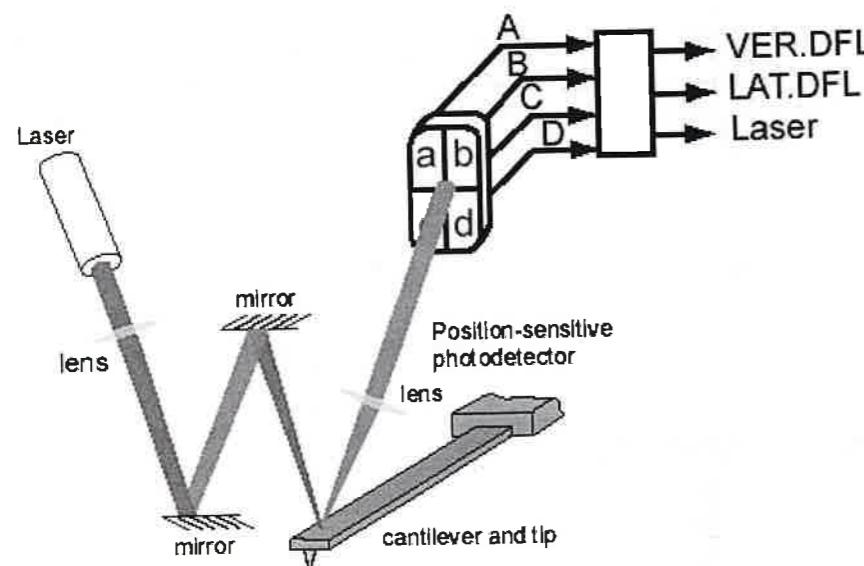


Рис.2.1-2.

Источником излучения является полупроводниковый лазер, $\lambda=670$ нм, $P = 0.9$ мВт. Позиционно-чувствительным фотоприемником является четырех секционный фотодиод. Оптическая система состоит из фокусирующего объектива, двух зеркал, зеркальной поверхности кантileвера, линзы.

Луч лазера фокусируется объективом в эллиптическое пятно размером ~ 50 мкм на обратной стороне кантileвера в районе острия. Отраженный от кантileвера свет попадает на четырех секционный фотодиод.

Отклонение кантileвера вызывает перемещение лазерного пятна относительно сегментов (a, b, c, d) фотодиода, что вызывает изменение электрических сигналов (A, B, C, D) поступающих с этих сегментов. Сигналы предварительно обрабатываются (усиливаются, складываются и вычитаются) и с выхода регистрирующей системы поступают три сигнала:

1) "VER.DFL" - сигнал пропорциональный отклонению кантileвера в вертикальном направлении. "VER.DFL" является разностным сигналом между верхней и нижней (на рис. 2.1-3) половинами фотодиода: "VER.DFL" = (A+B) - (C+D). Данный сигнал имеет тождественное обозначение: "VER.DFL" \equiv "DFL".

2) "LAT.DFL" - сигнал пропорциональный боковому отклонению луча. Регистрирующая система прибора позволяет измерять крутильную деформацию кантileвера, которую могут вызывать боковые силы. Крутильная деформация смещает отраженный луч в боковом направлении. "LAT.DFL" является разностным сигналом между правой и левой (на рис.2.1-3) половинами фотодиода: "LAT.DFL" = (A+C) - (B+D). Данный сигнал имеет тождественные обозначения: "LAT.DFL" \equiv "LF" = "LATERAL F"

3) "LASER" - сигнал пропорциональный суммарной интенсивности света, отраженного от кантileвера. "LASER" является суммарным сигналом от всех четырех сегментов фотодиода: "LASER" = A+B+C+D. Данный сигнал используется при юстировке лазера.

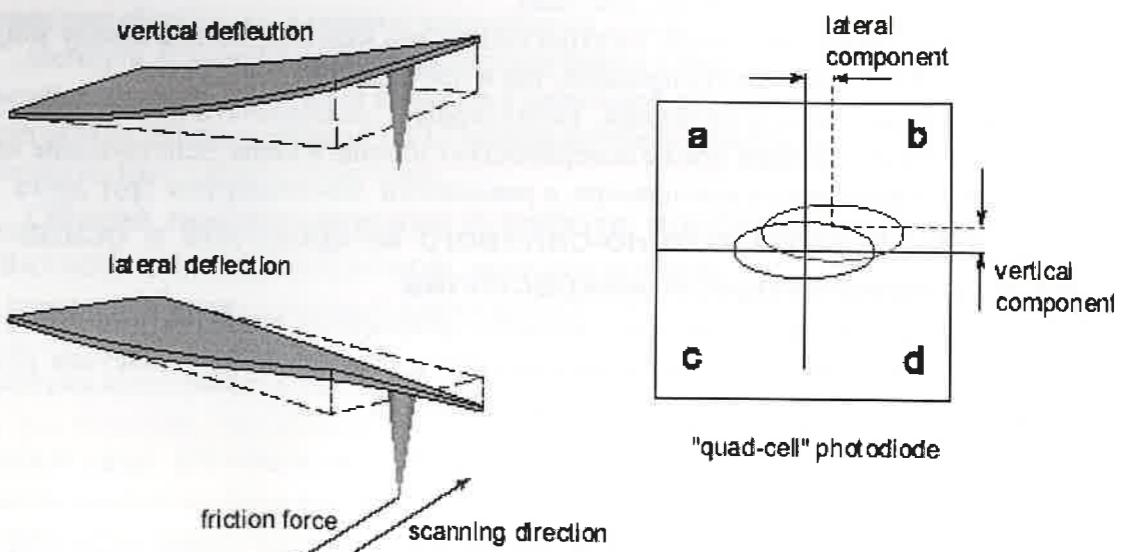


Рис.2.1-3

При сканировании пятно лазерного луча остается неподвижным относительно кантileвера, в то время как кантileвер закреплен на подвижной части головки, а лазер на неподвижной части. Это достигается благодаря использованию специально разработанной оптической следящей системы.

2.2. Общие представления о режимах работы AFM

2.2.1. Силы, действующие между острием кантилевера и образцом

При приближении острия кантилевера к поверхности образца на него начинает действовать сила Ван-дер-Ваальсова притяжения (Рис. 2.2-1).

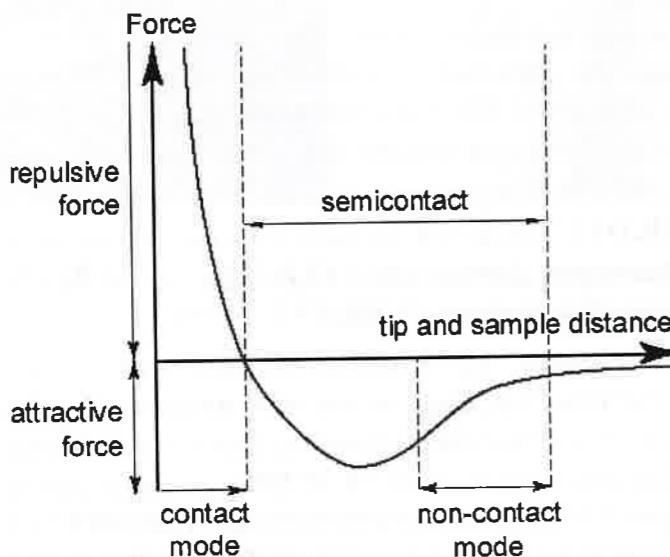


Рис. 2.2-1

Она достаточно дальнодействующая и заметна с расстояния десятков ангстрем. Затем на расстоянии в несколько ангстрем начинает действовать сила отталкивания.

Во влажном воздухе на поверхности образца присутствует слой воды. Возникают капиллярные силы, дополнительно прижимающие кантилевер к образцу и увеличивающие минимально достижимую силу взаимодействия.

Достаточно часто может возникать электростатическое взаимодействие между зондом и образцом. Это может быть как отталкивание, так и притяжение.

Ван-дер-Ваальсовы силы притяжения, капиллярные, электростатические силы, силы отталкивания в области касания иглы с поверхностью образца и силы, действующие на иглу со стороны деформированного кантилевера, в равновесии компенсируют друг друга.

2.2.2. Режимы работы атомно-силового микроскопа и основные методики атомно-силовой микроскопии

Физической основой работы атомно-силового микроскопа является взаимодействие острия зонда и поверхности. С точки зрения типа и степени взаимодействия режимы работы атомно-силового микроскопа можно разделить на:

- 1) контактный,
- 2) бесконтактный
- 3) "полуконтактный", который является промежуточным между контактным и бесконтактным.

В контактном режиме острие зонда непосредственно контактирует с поверхностью образца в процессе сканирования. Соответственно, в бесконтактном режиме острие зонда непосредственно не контактирует с поверхностью, а в полуконтактном контактирует частично.

Бесконтактный и полуконтактный режимы работы атомно-силового микроскопа реализованы на основе использования модуляционных методик.

Существует три метода измерения топографии поверхности при помощи атомно-силового микроскопа:

- контактная атомно-силовая микроскопия - измерение топографии поверхности в контактном режиме;
- бесконтактная атомно-силовая микроскопия - измерение топографии поверхности в бесконтактном режиме, основанном на использовании вибрационной методики;
- полуkontakteчная атомно-силовая микроскопия, называемая также аналогичной ей прерывисто-контактной атомно-силовой микроскопией, соответствует измерению топографии поверхности на основе вибрационной методики, при которой колеблющееся острие зонда слегка стучит по поверхности образца.

Работа прибора в режимах контактной атомно-силовой микроскопии и полуkontakteческой атомно-силовой микроскопии является основой для других методик атомно-силовой микроскопии. По этой причине ниже рассматриваются в основном общие представления о работе прибора в режимах контактной и полуkontakteческой микроскопии.

2.3. Общие представления о контактном режиме работы прибора

В контактном режиме кантилевер непосредственно касается острием поверхности образца и работает на отталкивание от поверхности. Сила отталкивания F , действующая на кантилевер, связана с величиной отклонения кантилевера x законом Гука: $F = -kx$, где k - коэффициент упругости (spring constant). Величина коэффициента упругости различных кантилеверов, применяемых в контактном режиме, обычно изменяется от 0.01 до нескольких N/m.

В нашем приборе величина отклонения кантилевера в вертикальном направлении измеряется при помощи оптической регистрирующей системы и преобразуется в электрический сигнал "DFL". В контактном режиме сигнал "DFL" используется в качестве параметра, характеризующего силу взаимодействия острия с поверхностью. Величина "DFL" связана с величиной силы линейной зависимостью.

Работа микроскопа в режиме поддержания постоянной силы взаимодействия острия с поверхностью образца, т.е. в режиме поддержания определенного, заданного уровня сигнала "DFL", является основой для измерения топографии поверхности, а также для измерения локальной жесткости, локальной вязкости и локальной силы трения.

В контактном режиме сигнал "DFL" используется в качестве сигнала обратной связи и включается на вход следящей системы.

2.3.1. Общие представления о работе прибора в режиме контактной атомно-силовой микроскопии

Под контактной атомно-силовой микроскопией принято понимать измерение топографии поверхности в контактном режиме.

Рассмотрим кратко работу прибора при измерении топографии поверхности в контактном режиме. Еще раз отметим, что измерение топографии производится в режиме поддержания постоянной силы, что обеспечивается поддержанием постоянного уровня сигнала "DFL". Этот сигнал используется в качестве сигнала обратной связи.

Вначале, перед сканированием, оператор производит подвод зонда к образцу на расстояние, при котором острие кантилевера начинает взаимодействовать с поверхностью.

Оператор устанавливает начальную величину "DFL" посредством установки параметра "Set point". Тем самым он устанавливает определенную величину отклонения кантилевера в подведенном состоянии и, соответственно, определенную величину силы взаимодействия острия и поверхности, поскольку сигнал "DFL" линейно связан с величиной силы, действующей на кантилевер.

Установка и поддержание заданной величины "DFL", равной значению "Set point" происходит благодаря работе системы обратной связи. Еще раз подчеркнем, что сигнал "DFL" в контактном режиме является сигналом обратной связи и при включении обратной связи

2-8

Руководство пользователя C3M Solver BIO Cell

этот сигнал поддерживается равным параметру "Set point", установленному оператором. Схема петли обратной связи, и краткое описание работы системы обратной связи приведены ниже (п. 2.3.2).

При сканировании величина отклонения кантилевера изменяется в каждой точке из-за рельефа поверхности. Соответственно, текущее значение сигнала "DFL" в каждой точке поверхности изменяется относительно уровня "Set point". Это отклонение от "Set point" при работе с обратной связью воспринимается, как сигнал ошибки. В каждой точке поверхности система обратной связи, при помощи сканера, перемещает зонд по нормали к поверхности таким образом, чтобы вернуть текущую величину "DFL" к значению "Set point", т.е. величину отклонения кантилевера к исходной величине.

Одновременно, сигнал, пропорциональный вертикальному перемещению сканера, подается на усилитель с регулируемым коэффициентом усиления. После усилителя, сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь и далее, через интерфейсную плату записывается в память компьютера, формируя топографический образ поверхности образца.

2.3.2. Схема петли обратной связи в контактном режиме

Схема петли обратной связи в контактном режиме изображена на рис.2.3-1.

Сигнал "DFL" с выхода регистрирующей системы сравнивается со значением "Set point" (установленным оператором) и разностный сигнал ("DFL" - "Set point") подается на вход интегратора.

Разностный сигнал воспринимается как сигнал ошибки, усиливается, интегрируется и подается на высоковольтный усилитель.

С высоковольтного усилителя сигнал подается на пьезосканер, который перемещает зонд таким образом, чтобы компенсировать возникшую ошибку.

Обратная связь поддерживает сигнал "DFL" вблизи заданного уровня ("Set point").

Точность работы применяемой здесь интегральной обратной связи зависит от коэффициента петлевого усиления.

Достижение максимальных скоростей сканирования требует быстрой работы обратной связи. Для увеличения скорости отработки обратной связью сигнала ошибки необходим максимально большой коэффициент петлевого усиления.

Но при слишком большом коэффициенте усиления, может быть достигнут порог генерации. Работа вблизи порога генерации характеризуется большими переколебаниями и поэтому точность падает.

С другой стороны при слишком малых коэффициентах усиления обратная связь не успевает отслеживать резкие изменения рельефа, что также снижает точность измерений.

Поэтому существует оптимальный коэффициент усиления для каждой системы зонд и образец, который обеспечивает максимальную точность работы обратной связи и достоверность данных.

На петлевой коэффициент усиления влияет несколько причин. В зависимости от используемого кантилевера при прочих равных параметрах он может изменяться в несколько раз. Коэффициент усиления изменяется обратно пропорционально длине кантилевера, и следовательно, чем кантилевер короче, тем выше коэффициент передачи. Кроме того, коэффициент усиления может заметно изменяться в зависимости от юстировки кантилевера.

Оператор может регулировать общий петлевой коэффициент усиления при помощи изменения коэффициента усиления (FB Gain) в усилителе интегратора.

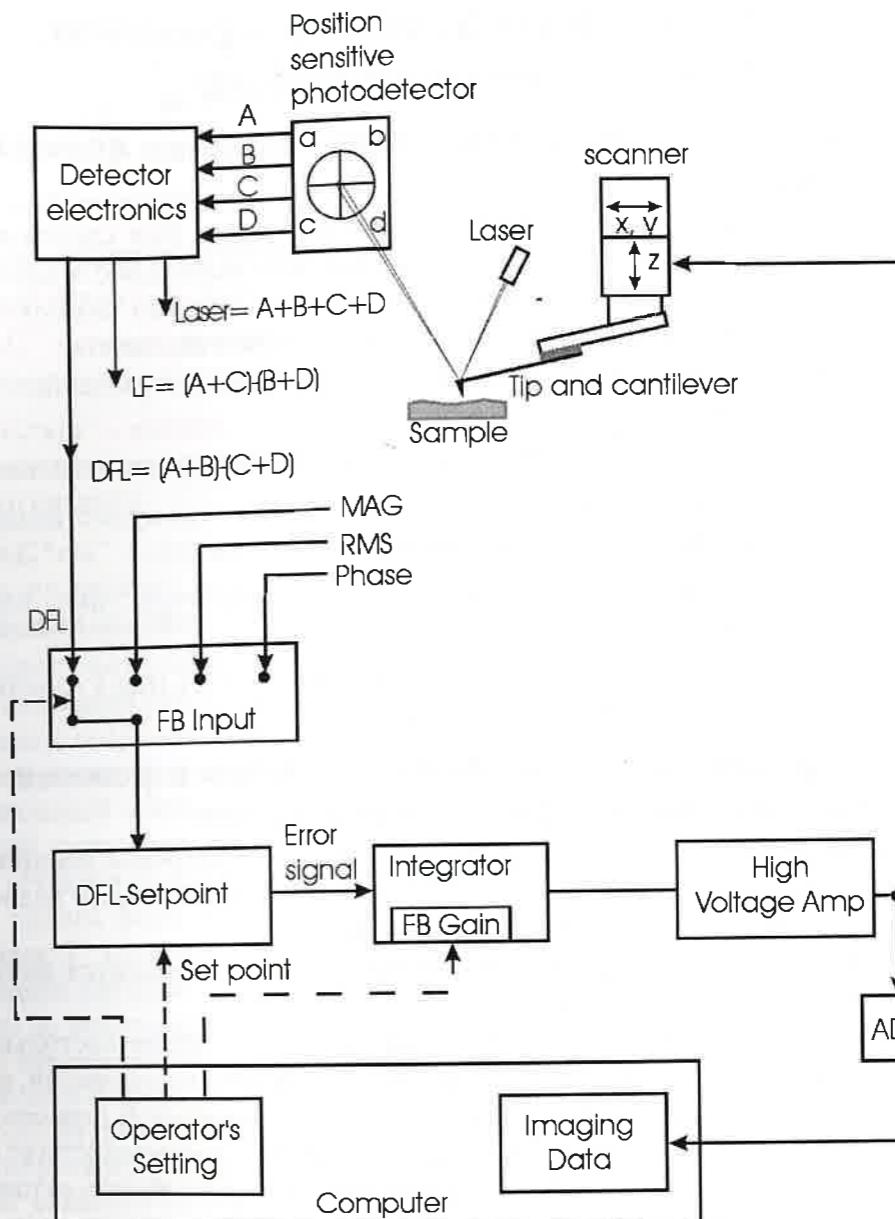


Рис.2.3-1

2.3.3. Достоинства и недостатки контактного режима SPM

Достоинства контактного режима SPM:

- 1) Высокая скорость сканирования.
- 2) Только в контактном режиме возможно получение изображений с разрешением атомарной решетки.
- 3) Возможность измерения локальной жесткости.
- 4) Возможность измерения локального трения.

Недостатки контактного режима SPM:

- 1) При исследовании мягких образцов (типа полимеров, биологических образцов, пленок Ленгмюра-Блоджетт и т.д.) возможно их разрушение, поскольку сканирующее острие зонда находится в прямом контакте с поверхностью.
- 2) Возможное существование значительных капиллярных сил, обусловленных жидким адсорбционным слоем, может снизить величину разрешения.
- 3) Возможное наличие боковых сил может искажать картину изображения.

2.4. Общие представления о работе в режимах, использующих вибрационные методики

2.4.1. Вибрационные и модуляционные методики атомно-силовой микроскопии

Значительный шаг в развитии атомно-силовой микроскопии был сделан в результате разработки различных методик, использующих вибрацию либо модуляцию зонда или образца.

К числу вибрационных методов атомно-силовой микроскопии относятся режимы полуконтактной, бесконтактной микроскопии, режим локальной жесткости.

В числе общих преимуществ отдельных вибрационных методов по сравнению с контактной микроскопией можно назвать:

- 1) уменьшение сил взаимодействия, в частности, боковых, между зондом и поверхностью;
- 2) использование резонансных свойств системы, что позволяет существенно повысить чувствительность по сравнению со статическим измерением;
- 3) возможность регистрировать дифференциальные характеристики, поддерживая постоянные средние значения величин;
- 4) уменьшение величины шумов с частотной зависимостью $1/f$ (где f - частота) за счет переноса спектра сигнала в область высоких частот.

2.4.2. Общие представления о работе прибора в режиме полуконтактной атомно-силовой микроскопии

Одним из вибрационных методов, получившим наиболее широкое распространение, является полуконтактная атомно-силовая микроскопия, называемая также аналогичной ей прерывисто-контактной атомно-силовой микроскопией.

В режиме полуконтактной микроскопии сканирование производится кантileвером, колеблющимся около поверхности образца.

Особенность состоит в том, что колеблющееся острие находится настолько близко к поверхности, что оно слегка "стучит" по поверхности образца при сканировании, контактируя с поверхностью в нижней части своего размаха. При этом, большую часть периода колебаний, кантileвер не касается поверхности и вообще относительно слабо взаимодействует с образцом. И только при сближении иглы с поверхностью вплоть до попадания в область отталкивающего потенциала (рис.2.2-1) взаимодействие резко усиливается, и при этом соударении кантileвер теряет избыток энергии, накопленный за остальную часть периода. В зависимости от характера взаимодействия может меняться сдвиг фазы основной гармоники колебаний относительно возбуждающего сигнала, а также амплитуда и фаза высших гармоник.

Кантileвер колеблется в вертикальном направлении на своей резонансной частоте или вблизи ее. Кантileвер является резонансной системой с большой добротностью и достаточно высокой резонансной частотой, обычно более 100 кГц. Амплитуда колебаний кантileвера имеет обычно величину в интервале примерно от 1 нм до 100 нм. Возбуждение механических колебаний кантileвера производится при помощи пьезодрайвера, с которым непосредственно контактирует подложка кантileвера.

Лазерный луч регистрирующей системы отражается от кантileвера, колеблющегося в вертикальном направлении. Колебания кантileвера вызывают осциллирующее движение лазерного пятна относительно верхней и нижней половины фотодиода. Это приводит к появлению на выходе регистрационной системы переменного электрического сигнала на частоте осцилляций кантileвера, амплитуда которого пропорциональна амплитуде колебаний острия кантileвера. В нашем случае этим сигналом является переменная составляющая сигнала "DFL" на частоте колебаний кантileвера.

Таким образом, регистрирующая система измеряет величину амплитуды колебаний кантileвера и преобразует ее в электрический сигнал в виде переменной составляющей сигнала "DFL". Далее, производится обработка переменной составляющей сигнала "DFL": фильтрация, усиление и детектирование.

В приборе имеется несколько возможных вариантов обработки переменной составляющей сигнала "DFL", любой из которых может быть выбран по желанию оператора. Переменная составляющая сигнала "DFL" может быть направлена на вход:

- 1) синхронного усилителя (Lock-In amplifier),
- 2) среднеквадратичного детектора (RMS detector),
- 3) фазового детектора (Phase detector).

Синхронный усилитель формирует на выходе три электрических сигнала:

- 1) "MAG" - сигнал, соответствующий амплитуде переменной составляющей сигнала "DFL" на частоте модуляции;
- 2) "MAG*sin" - сигнал, пропорциональный произведению амплитуды переменного сигнала на частоте модуляции на синус сдвига фазы колебаний кантileвера относительно опорного сигнала;
- 3) "MAG*cos" - сигнал, пропорциональный произведению амплитуды переменного сигнала на частоте модуляции на косинус сдвига фазы колебаний кантileвера относительно опорного сигнала.

Величина сдвига фазы колебаний кантileвера относительно опорного сигнала состоит из суммы сдвига фазы колебаний кантileвера относительно возбуждающего сигнала и сдвига фазы между возбуждающим и опорным сигналами (с точностью до некоторой "аппаратной" константы).

Среднеквадратичный детектор (RMS detector) формирует на выходе сигнал "RMS", пропорциональный среднеквадратичному значению переменной составляющей сигнала "DFL" во всей частотной полосе детектора.

Фазовый детектор формирует сигнал "Phase 1", изменение которого пропорционально изменению сдвига фазы колебаний кантileвера относительно возбуждающего сигнала. Сигнал "Phase 1" состоит из суммы сдвига фазы колебаний кантileвера относительно возбуждающего сигнала и сдвига фазы между возбуждающим и опорным сигналами (с точностью до некоторой "аппаратной" константы).

Любой из перечисленных сигналов может быть включен в петлю обратной связи.

В полуконтактном режиме амплитуда колебаний острия кантileвера используется в качестве параметра, характеризующего взаимодействия острия с поверхностью.

Работа микроскопа в режиме поддержания постоянной амплитуды колебаний острия кантileвера является основой для измерения топографии поверхности. Поддержание постоянной амплитуды колебаний обеспечивается поддержанием постоянного уровня сигнала, пропорционального амплитуде колебаний.

Такими сигналами, пропорциональными амплитуде колебаний, являются сигналы "MAG" и "RMS", и любой из них можно использовать в качестве сигнала обратной связи при измерении топографии.

Однако использование сигнала "MAG" является более предпочтительным, поскольку в этом случае можно достичь более низкого уровня шумов и, как следствие, получить более высокое разрешение, поскольку используется синхронное детектирование.

Выбор производится оператором путем подключения соответствующего сигнала в цепь обратной связи на графическом интерфейсе программного управления прибором.

Рассмотрим кратко работу прибора при измерении топографии поверхности в полуконтактном режиме. Как отмечалось выше, измерение топографии производится в режиме поддержания постоянной амплитуды колебаний кантileвера, что обеспечивается поддержанием постоянного уровня сигнала "MAG" (или "RMS"). Предполагается, что именно этот сигнал ("MAG") выбран в качестве сигнала обратной связи.

Общая схема работы в значительной мере подобна работе в контактном режиме.

Вначале, перед сканированием, оператор производит подвод зонда к образцу на расстояние, при котором острие кантileвера начинает взаимодействовать с поверхностью.

Оператор устанавливает начальную величину "MAG" посредством установки параметра "Set point". Тем самым он устанавливает определенную величину амплитуды колебаний кантileвера и, соответственно, определенный уровень взаимодействия острия и поверхности.

Установка и поддержание заданной величины "MAG", равной значению "Set point" происходит благодаря работе системы обратной связи. Так как "MAG" является сигналом обратной связи, то при включении обратной связи этот сигнал поддерживается равным параметру "Set point", установленному оператором. Схема петли обратной связи, и краткое описание работы системы обратной связи приведены ниже (п. 2.4.3).

При сканировании величина амплитуды колебаний кантилевера изменяется в каждой точке из-за рельефа поверхности. Соответственно, текущее значение сигнала "MAG" в каждой точке поверхности изменяется относительно уровня "Set point". Это отклонение от "Set point" при работе с обратной связью воспринимается, как сигнал ошибки. В каждой точке поверхности система обратной связи при помощи сканера перемещает зонд по нормали к поверхности таким образом, чтобы вернуть текущую величину "MAG" к значению "Set point", т.е. текущую величину амплитуды колебаний кантилевера к исходной величине.

Одновременно, сигнал, пропорциональный вертикальному перемещению сканера, подается на усилитель с регулируемым коэффициентом усиления. После усилителя сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь и далее через интерфейсную плату записывается в память компьютера, формируя топографический образ поверхности образца.

2.4.3. Петля обратной связи в режиме полуконтактной микроскопии

Схема петли обратной связи изображена на рис.2.4-1.

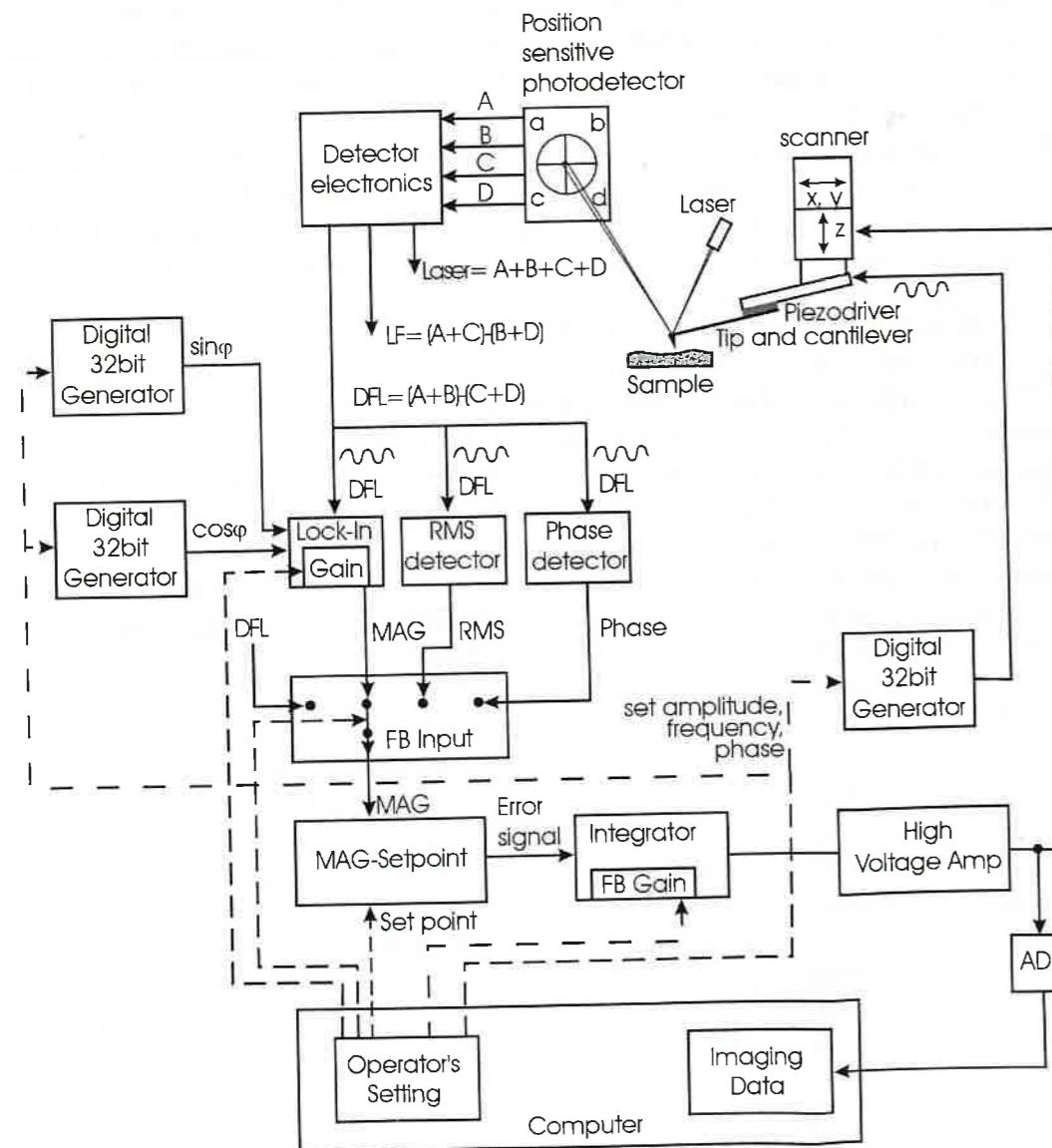


Рис.2.4-1

2.4. Общие представления о работе в режимах, использующих вибрационные методики

В отличие от контактного режима, при сканировании поддерживается постоянная величина амплитуды колебаний кантилевера, которая в этом случае является параметром взаимодействия острия и поверхности. Это обеспечивается посредством поддержания системой обратной связи заданного уровня сигнала "MAG" (или RMS), который используется в качестве сигнала обратной связи. В остальном работа системы обратной связи подобна случаю контактного режима (пункт 2.3.2).

2.5. Управление СЗМ и основные параметры, определяющие работу прибора

2.5.1. Графический интерфейс управления СЗМ

Для управления СЗМ используется графический интерфейс, основными элементами которого являются:

- главное окно программы, которое содержит верхнюю строку прямого управления, окно SPM, панель инструментов;
- блок-схема управления SPM;
- блок-схема управления синхронным усилителем и фазовым детектором;
- окно управления параметрами сканирования.

Программа имеет контекстную подсказку. Если вы хотите получить информацию о каком-либо объекте (окне, меню, кнопке и т.д.) необходимо установить курсор на этот объект и нажать F1. В результате появится окно с информацией о данном объекте.

2.5.1.1. Главное окно программы

Главное окно программы (рис.2.5-1) появляется на экране дисплея после запуска программы smena.exe:

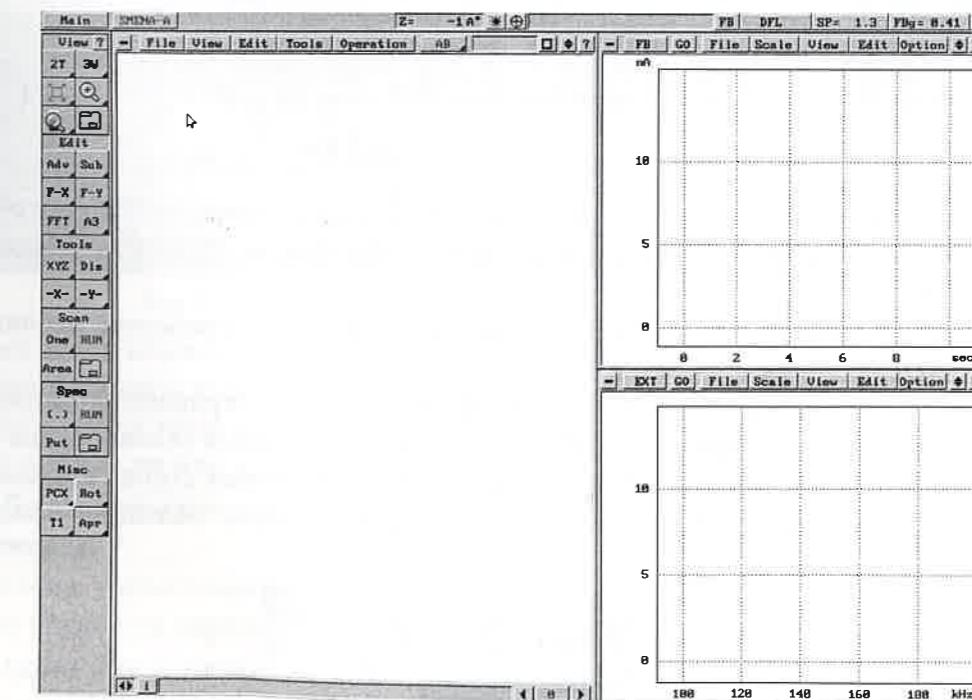


Рис.2.5-1

Основными элементами главного окна программы являются: верхняя строка прямого управления, окно SPM и панель инструментов.

Верхняя строка прямого управления (рис.2.5-2) позволяет осуществлять оперативный контроль и управление рядом параметров.



Рис.2.5-2

2.5. Управление СЗМ и основные параметры, определяющие работу прибора

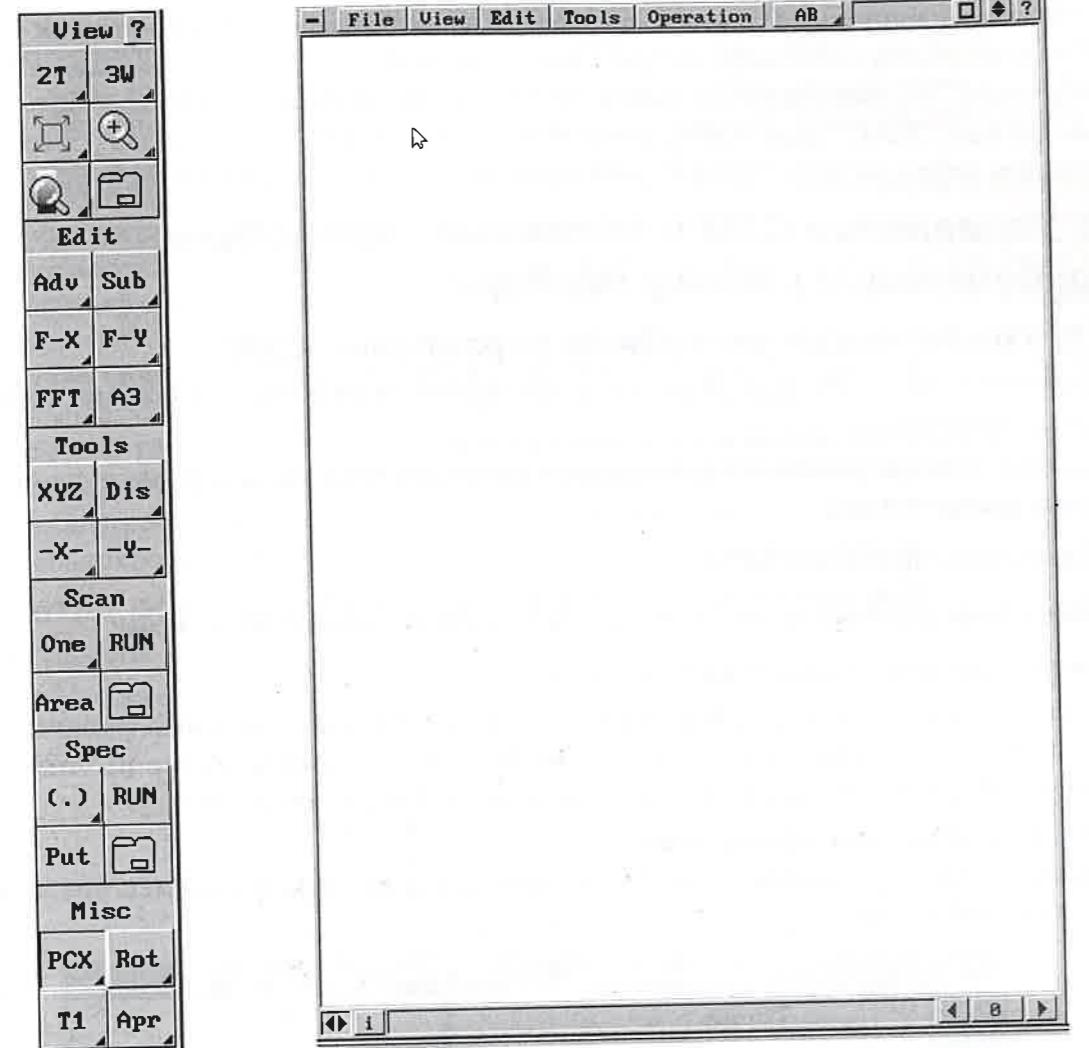


Рис.2.5-3

Панель инструментов (рис.2.5-3) расположена с левой стороны главного окна и состоит из кнопок, которые позволяют осуществлять быстрый доступ к некоторым командам и функциям.

Окно SPM (рис.2.5-4) является основным окном для управления прибором, наблюдения и обработки данных.

Для открытия блок-схемы управления SPM, блок-схемы управления синхронным усилителем и фазовым детектором или окна управления параметрами сканирования (SCAN) необходимо нажать кнопку "Operation" в меню окна SPM (вторая строка в приведенной конфигурации главного окна) и затем в открывшемся меню выбрать "Scanning" (рис.2.5-5).

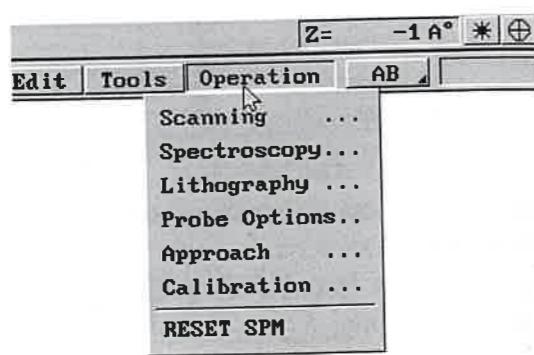


Рис.2.5-5

В результате появится окно "Scanning". Выбор в верхней строке данного окна, соответственно, SCAN, SPM или Lock-in открывает окно управления параметрами сканирования (SCAN), блок-схему управления SPM (рис.2.5-6) или блок-схему управления синхронным усилителем и фазовым детектором (рис.2.5-7).

Кроме того, существует более простой способ для открытия блок-схемы управления SPM и блок-схемы управления синхронным усилителем и фазовым детектором. Это можно сделать непосредственно в результате нажатия кнопки в меню окна SPM (рис.2.5-4).

2.5.1.2. Блок-схема управления SPM

Блок-схема управления SPM (Рис.2.5-6) позволяет выбирать и устанавливать режим работы прибора (контактный, полуконтактный, бесконтактный и т. д.), включать и выключать обратную связь, выбирать и включать в петлю обратной связи один из сигналов, характеризующих взаимодействие зонда и образца ("MAG", "RMS", "DFL" ("VER.DFL") и т.д.), выбирать и устанавливать величину рабочей точки "Set point", коэффициента обратной связи "FB Gain" и некоторых других параметров.

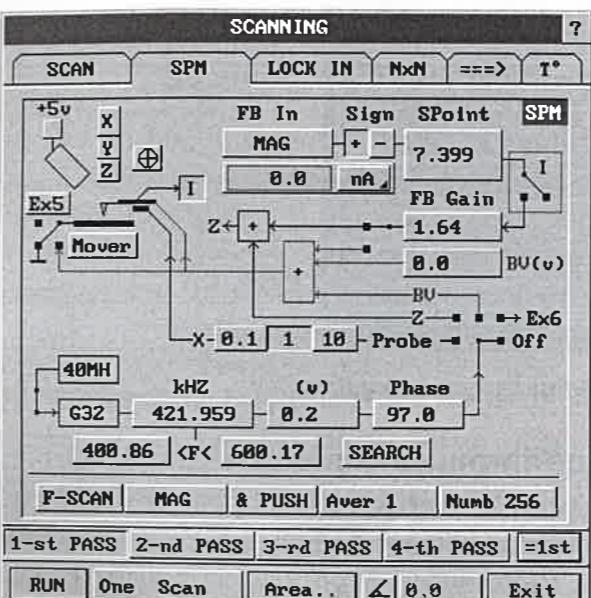


Рис.2.5-6

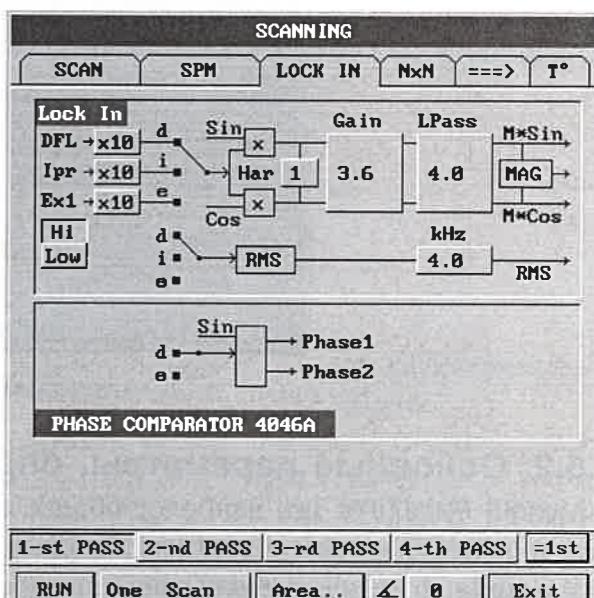


Рис.2.5-7

Для того чтобы изменить величину какого-либо параметра или установить другой параметр, достаточно поставить курсор на данный элемент блок-схемы и нажать левую кнопку мыши или "Enter". После этого в открывшемся окне при помощи мыши установить необходимую величину параметра или произвести выбор необходимого параметра.

2.5.1.3. Блок-схема управления синхронным усилителем и фазовым детектором

Блок-схема управления синхронным усилителем и фазовым детектором (рис.2.5-7) позволяет управлять параметрами синхронного усилителя и фазового детектора.

2.5.1.4. Окно управления параметрами сканирования

Окно управления параметрами сканирования (Рис.2.5-8) позволяет: устанавливать и изменять такие параметры сканирования как скорость, шаг, направление сканирования, число точек сканирования по осям X и Y; включать или выключать каналы (A, B, C, D), в каждом из которых при сканировании формируется изображение одного из выбранных сигналов. Одновременно может быть включено от одного до четырех каналов. Ниже приведены сигналы, которые могут быть использованы для формирования изображения в любом из указанных каналов:

Height	DFL (eVER.DFL)	Lateral F (eLFELAT.DFL)
MAG	MAG*sin	MAG*cos
RMS	Phase1	Phase2
Calc Phase	FB-out	Bias V
Calc Mag	Snap Back	BV probe
Current	Ex1	Ex2
HvX	HvY	Ex3
T°1		

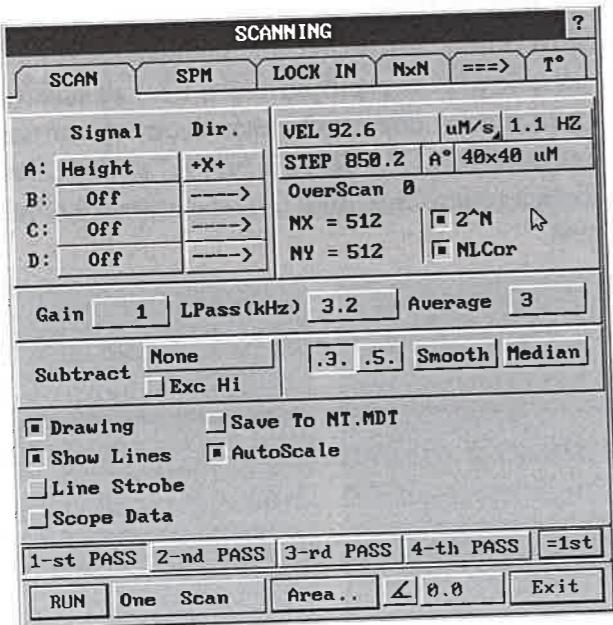


Рис.2.5-8

2.5.2. Основные параметры, определяющие работу прибора

Можно выделить три наиболее общих параметра: “Set point” - уровень параметра взаимодействия зонда и поверхности, поддерживаемый обратной связью при сканировании; “FB Gain” - коэффициент усиления интегратора, входящий в общий петлевой коэффициент обратной связи и “Vel” - скорость сканирования. Эти параметры обычно необходимо устанавливать и подбирать при любом режиме работы прибора и, кроме того, они оказывают существенное влияние на качество получаемого изображения.

Основные параметры можно условно разделить на несколько групп:

- 1) параметры, характеризующие взаимодействие зонда и поверхности образца;
- 2) параметры цепи обратной связи;
- 3) параметры сканирования;
- 4) параметры различных устройств, компонентов и элементов, входящих в состав прибора.

Основными параметрами, характеризующими взаимодействие зонда и поверхности образца, являются следующие сигналы:

- “DFL” (≡“VER.DFL”), изменение которого пропорционально отклонению зонда от поверхности образца;
- “LF” (≡“LAT.DFL”), изменение которого пропорционально величине кручильной деформации кантилевера;

- “MAG”, пропорциональный амплитуде колебаний зонда на частоте модуляции кантилевера при работе в модуляционных режимах (полуконтактный, бесконтактный режимы);
- “RMS”, пропорциональный среднеквадратичному значению колебаний зонда во всей частотной полосе RMS детектора при работе в модуляционных режимах (полуконтактный, бесконтактный режимы);
- “MAG*sin”, пропорциональный произведению сигнала “MAG” на синус сдвига фазы колебаний кантилевера относительно опорного сигнала;
- “MAG*cos”, пропорциональный произведению сигнала “MAG” на косинус сдвига фазы колебаний кантилевера относительно опорного сигнала;
- “Phase1”, изменение которого пропорционально сдвигу фазы колебаний кантилевера относительно опорного сигнала.

Основными параметрами петли обратной связи являются:

- “FB Gain” - коэффициент усиления интегратора в цепи обратной связи;
- “Gain” - коэффициент усиления синхронного усилителя (при работе в модуляционных режимах с использованием синхронного усилителя).

Основными параметрами сканирования являются:

- “Vel” - скорость сканирования зонда;
- “Step” - шаг сканирования;
- “NX”, “NY” - число точек, соответственно, по осям X, Y;
- параметры, определяющие направление сканирования:

“+X+”, “+Y+”;
“-X+”, “-Y+”;
“+X-”, “+Y-”;
“-X-”, “-Y-”;
“∠ ...” - угол сканирования.

Буква означает ось быстрого сканирования, например “+X+” означает, что быстрое сканирование происходит по оси X, тогда соответственно, медленное сканирование происходит по оси Y. Знак + перед буквой означает, что быстрое сканирование происходит в положительном направлении. Знак + после буквы означает, что медленное сканирование (т. е. по оси Y) производится в положительном направлении.

Параметры различных устройств, компонентов и элементов, входящих в состав прибора

К этому типу параметров относятся регулируемые коэффициенты усиления и деления в различных усилителях и делителях, регулируемые параметры фильтров, различные калибровочные коэффициенты и т.д. В частности, к этой группе относятся параметры генератора пьезодрайвера кантилевера, обеспечивающего возбуждение колебаний кантилевера при работе в модуляционных режимах: “F” - частота колебаний, “V” - амплитуда возбуждающего напряжения, подающегося на пьезодрайвер.

Глава 3. Подготовка прибора, СЗМ головки, зонда, образца**Содержание**

Глава 3. Подготовка прибора, СЗМ головки, зонда, образца ...	3-2
3.1. Основные операции, выполняемые при подготовке прибора к работе	3-2
3.2. Включение прибора, запуск программы управления	3-2
3.3. Выбор кантилевера	3-2
3.4. Установка кантилевера	3-3
3.4.1. Установка кантилевера в СЗМ головках SFC050, SFC050SEMI, SFC090, SFC090SEMI	3-3
3.4.2. Установка кантилевера в СЗМ головках SFC050L, SFC090L	3-6
3.4.2.1. Держатель кантилевера для работы на воздухе	3-6
3.4.2.2. Держатель кантилевера для работы в жидкости	3-6
3.4.2.3. Установка кантилеверов в держатели	3-7
3.4.2.4. Установка держателя кантилевера на СЗМ головку	3-8
3.4.2.5. Снятие держателя кантилевера с СЗМ головки	3-9
3.4.2.6. Замена кантилевера	3-10
3.5. Настройка лазера и фотодиода	3-10
3.5.1. Включение лазера, включение индикатора фотодиода	3-11
3.5.2. Настройка лазера	3-12
3.5.2.1. Зеркало для визуального наблюдения	3-12
3.5.2.2. Настройка лазера с использованием невооруженного глаза	3-12
3.5.3. Настройка фотодиода при помощи индикатора фотодиода	3-16
3.5.4. Точная настройка лазера при помощи индикатора фотодиода	3-17
3.5.5. Настройка лазера и фотодиода с помощью программных осциллографов ..	3-17
3.5.6. Особенности настройки лазера и фотодиода в случае СЗМ головок SFC050L, SFC090L с установленным держателем кантилевера для работы в жидкостной среде	3-19
3.6. Подготовка и установка образца	3-20
3.6.1. Сменные столики для различных образцов	3-21
3.6.2. Установка столика	3-21
3.6.3. Установка образцов типа предметных или покровных стекол	3-22
3.6.4. Установка стандартных чашек Петри	3-23
3.7. Установка СЗМ головки	3-24
3.7.1. Установка СЗМ головки на каретку блока подвода	3-24
3.7.2. Предварительный подвод зонда к образцу	3-25
3.7.3. Приложение (Перемещение каретки при помощи программы управления) ..	3-25
3.8. Включение, настройка и работа оптического микроскопа, горизонтальное позиционирование головки	3-27
3.8.1. Включение и настройка оптического микроскопа	3-27
3.8.2. Регулировка положения кантилевера в поле зрения оптического микроскопа	3-28
3.8.3. Выбор на образце места, предполагаемого для исследования, при помощи оптического микроскопа	3-28
3.9. Приложение. Установка образца, установка СЗМ головки при работе в режиме «отдельно стоящего микроскопа»	3-29
3.9.1. Установка образцов на поверхность основания (работа в режиме отдельно стоящего микроскопа)	3-29
3.9.2. Установка СЗМ головки (работа в режиме отдельно стоящего микроскопа)	3-29

Глава 3. Подготовка прибора, СЗМ головки, зонда, образца

В настоящем разделе рассматривается общая подготовка прибора к работе в режиме атомно-силовой микроскопии. Общая подготовка прибора включает операции и процедуры, которые необходимо выполнить при подготовке к работе в любой из мод атомно-силовой микроскопии.

3.1. Основные операции, выполняемые при подготовке прибора к работе

Подготовку прибора к работе в режиме атомно-силовой микроскопии можно разделить на следующие основные операции:

- 1) включение прибора, запуск программы управления;
- 2) подготовка зонда (выбор и установка кантилевера);
- 3) настройка лазера, настройка фотодиода (наведение лазерного луча на кантилевер, установка максимального значения сигнала **LASER**, нулевых значений сигналов **VER.DFL** и **LAT.DFL**);
- 4) подготовка и установка образца;
- 5) установка СЗМ головки на блок подвода (установка, начальный подвод зонда).
- 6) включение оптического микроскопа, настройка оптического микроскопа, регулировка положения кантилевера в поле зрения оптического микроскопа, выбор при помощи оптического микроскопа места на образце для последующего исследования посредством СЗМ.

Описание перечисленных операций приводится ниже.

СЗМ головка «Смена», используемая в составе прибора, может быть двух типов.

Первый тип СЗМ головок (имеется четыре модификации, SFC050, SFC050SEMI, SFC090, SFC090SEMI) может работать в воздушной среде.

Второй тип СЗМ головок (две модификации SFC050L, SFC090L) имеет два сменных держателя кантилевера и может работать как в воздушной, так и в жидкой среде.

Соответственно, для этих двух типов СЗМ головок, процедуры подготовки зонда (установки кантилевера), настройки лазера и настройки фотодиода имеют некоторые различия.

Кроме работы в основном режиме в составе прибора, СЗМ головка может также работать в режиме отдельно стоящего микроскопа (Stand Alone microscope). Соответственно, процедуры установки образца и установки СЗМ головки в этих случаях различаются.

3.2. Включение прибора, запуск программы управления

Для включения прибора необходимо:

- 1) включить блок управления СЗМ (SPM controller) при помощи выключателя, расположенного на блоке управления;
- 2) запустить программу управления СЗМ, запуск производится файлом **smena.exe**.

3.3. Выбор кантилевера

Выбор кантилевера зависит от решаемой задачи и исследуемого образца.

Для измерения топографии жесткого образца в контактном режиме, при условии, что нет необходимости получить атомарное разрешение, рекомендуется использовать короткие треугольные кантилеверы длиной 70-100 мкм. Это позволяет избежать «геометрической» генерации, связанной с силой трения. Она обычно не возникает при длине кантилевера до 150 мкм.

Для работы в контактном режиме, когда необходимо получить атомарное разрешение, лучше использовать более длинные кантилеверы, имеющие длину около 200 мкм. То же относится и к случаю, когда необходимо работать в режиме боковых сил и режиме измерения топографии одновременно или последовательно. Кроме того, для измерения боковых сил рекомендуется использовать прямоугольные кантилеверы.

При работе в контактном режиме с мягкими образцами лучше использовать длинные кантилеверы, имеющие небольшую жесткость, для того, чтобы уменьшить воздействие кантилевера на образец. Обычно для достижения минимально возможной силы взаимодействия (10^{-8} - 10^{-9} Н) достаточно использовать кантилеверы длиной 150-200 мкм и жесткостью порядка 0.1 - 0.2 Н/м (при работе на воздухе).

Для полуконтактного режима обычно используют кантилеверы с резонансной частотой более 80 кГц. Такой резонансной частотой обычно обладают короткие кантилеверы.

Для микроскопии электростатических сил, в зависимости от решаемой задачи, необходимо использовать различного типа проводящие кантилеверы: высоколегированные кремниевые или имеющие проводящее покрытие (W_2C , TiN, TiO, W, Cr).

Для емкостной микроскопии лучше использовать кантилеверы, которые имеют сравнительно большой радиус закругления зонда и жесткость балки в несколько Н/м, чтобы обеспечить высокую чувствительность прибора. Могут быть использованы высоколегированные кремниевые кантилеверы, однако лучше использовать кантилеверы с проводящим покрытием.

Для микроскопии поверхностного потенциала необходимо использовать проводящие кантилеверы с относительно малой резонансной частотой для бесконтактного режима измерений.

Для изучения поверхностных электрических свойств образцов методом измерения сопротивления растекания необходимо использовать кантилеверы с проводящим покрытием из W_2C , TiN, TiO, W, Cr.

Для магнитно-силовой микроскопии при изучении магнитных образцов необходимо использовать кантилеверы покрытые магнитно-чувствительным покрытием (например, Co или Ni).

3.4. Установка кантилевера

Поскольку для различных типов СЗМ головок процедура установки кантилевера имеет некоторые различия, то в п.3.4.1 приведено описание данной операции для случая СЗМ головок первого типа (SFC050, SFC050SEMI, SFC090, SFC090SEMI), которые предназначены для работы только в воздушной среде.

Соответственно, в п.3.4.2 приведено описание данной операции для случая СЗМ головок второго типа (SFC050L, SFC090L), которые предназначены для работы как жидкостной, так и в воздушной среде.

3.4.1. Установка кантилевера в СЗМ головках SFC050, SFC050SEMI, SFC090, SFC090SEMI

Для установки кантилевера или его замены выполните следующие операции.

- 1) Возьмите СЗМ головку, переверните ее и поставьте в перевернутом положении на стол (Рис.3.4-1).

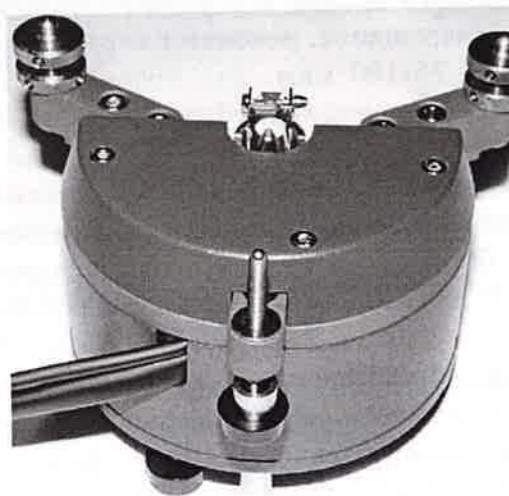


Рис.3.4-1

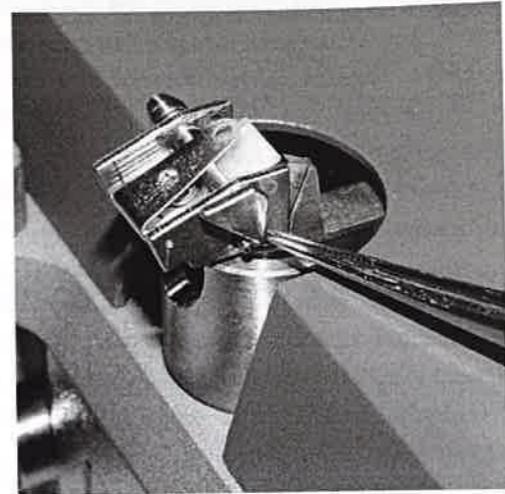


Рис.3.4-2

2) Откройте (поднимите) зажим держателя кантileвера. Для этого поверните вниз поворотный рычаг в открытое состояние при помощи пинцета (Рис.3.4-2, рис.3.4-3). Рычаг имеет форму трапеции и расположен сбоку от посадочного места.

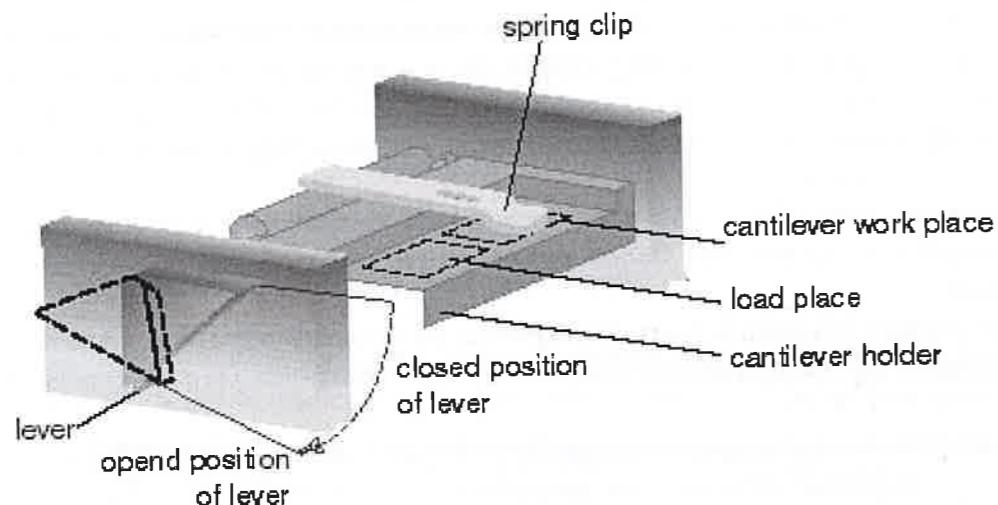


Рис.3.4-3

Внимание! Следует приподнимать зажимную пружину только поворотом рычага. Не отгибайте ее пинцетом или рукой, это может привести к необратимой деформации.

Внимание! Держатель кантileвера крепится на сканере и слишком большие усилия, прилагаемые к держателю, способны вызвать повреждение сканера.

3) Выберите рабочий край подложки с кантileверами, в зависимости от того, каким кантileвером Вы собираетесь работать.

4) Возьмите кантileвер из коробочки пинцетом с учётом того, что рабочий край подложки с кантileверами при установке будет с ближней стороны от Вас. Не переворачивайте кантileвер, т. к. в коробочке (Рис.3.4-4) кантileверы лежат остриями вверх.



PCL XL error

Subsystem: KERNEL
Error: IllegalOperatorSequence
Operator: EchoComment
Position: 3694

Глава 5. Полуконтактная атомно-силовая микроскопия

Содержание

Глава 5. Полуконтактная атомно-силовая микроскопия	5-3
5.1. Исходное состояние. Основные стадии и операции при проведении полуконтактной микроскопии	5-3
5.1.1. Исходное состояние	5-3
5.1.2. Основные стадии и операции полуконтактного режима	5-3
5.1.3. Конфигурация главного окна программы	5-4
5.1.3.1. Подключение сигналов к программным осциллографам	5-6
5.2. Подготовка блок-схемы SPM к полуконтактному режиму	5-7
5.2.1. Проверка положения переключателей	5-7
5.2.2. Включение сигнала «MAG» на вход обратной связи	5-8
5.3. Установка рабочей частоты и амплитуды колебаний кантileвера	5-9
5.3.1. Определение резонансной частоты кантileвера, установка рабочей частоты	5-9
5.3.1.1. Рабочая частота, резонансная частота, генератор пьезодрайвера кантileвера	5-9
5.3.1.2. Автоматическое определение резонансной частоты кантileвера и автоматическая установка рабочей частоты	5-10
5.3.1.3. Процедура измерения частотной характеристики амплитуды механических колебаний кантileвера	5-11
5.3.1.4. Ручная (неавтоматическая) установка рабочей частоты	5-13
5.3.2. Выбор и установка амплитуды колебаний кантileвера	5-13
5.3.4. Установка начального уровня сигнала «MAG»	5-14
5.5. Подвод зонда к образцу, выбор и установка рабочей точки	5-15
5.5.1. Процедура автоматического подвода зонда к образцу	5-16
5.5.1.1. Установка начального значения параметра «Set Point»	5-16
5.5.1.2. Включение процедуры автоматического подвода	5-17
5.5.1.2.1. Окна «Approach», «Probe», «Mover»	5-17
5.5.1.3. Начальный этап процедуры автоматического подвода зонда к образцу	5-19
5.5.1.4. Продолжение процедуры автоматического подвода	5-22
5.5.1A. Процедура ручного подвода зонда к образцу	5-23
5.5.1.1A. Установка начального значения параметра «Set Point»	5-23
5.5.1.2A. Включение обратной связи	5-23
5.5.1.3A. Начало процедуры ручного подвода зонда к образцу	5-24
5.5.1.4A. Продолжение процедуры ручного подвода	5-26
5.5.2. Выбор рабочей точки	5-26
5.5.2.1. Грубая оценка величины амплитуды колебаний кантileвера	5-27
5.5.3. Выбор коэффициента усиления обратной связи	5-27
5.6. Установка параметров сканирования	5-28
5.6.1. Окно управления параметрами сканирования	5-28
5.6.4. Размеры области сканирования, шаг и число точек сканирования	5-30
5.6.5. Режим сканирования	5-32
5.6.6. Коррекция нелинейности перемещения сканера (кнопка «NLCor»)	5-32
5.6.7. Каналы измерения: установка сигналов, направления сканирования	5-32
5.6.8. Коэффициент усиления предварительного усилителя АЦП, фильтр низких частот	5-33
5.6.9. Кнопки «Drawing», «Show Lines», «Scope Data», «Line Strobe», «AutoScale», «Save To NT. MDT»	5-33

5.6.10. Процедура вычитания (кнопка «Subtract», кнопка «Exc Hi»)	5-34
5.6.11. Параметры для сканирования тестового образца типа решетки	5-34
5.7. Сканирование	5-35
5.7.1. Запуск сканирования	5-35
5.7.2. Страна управления при сканировании	5-36
5.7.3. Подбор оптимальных параметров сканирования	5-37
5.8. Сохранение полученных данных	5-37
5.9. Переключение из полуконтактного режима в контактный	5-38
5.10. Выключение микроскопа	5-39
5.11. Метод фазового контраста (Phase Imaging)	5-39
5.11.1. Введение	5-39
5.11.2. Сигналы, связанные с фазой колебаний зонда	5-40
5.11.3. Подготовка прибора к работе в режиме получения изображения фазы (Необходимые условия и операции)	5-40
5.11.3.1. Включение сигнала фазы на вход измерительного канала	5-41
5.11.3.2. Настройка сигнала фазы	5-44
5.11.4. Работа прибора в режиме получения изображения фазы	5-45
5.12. Особенности и отличия полуконтактного режима в жидкой среде	5-45

Глава 5. Полуконтактная атомно-силовая микроскопия

В настоящей главе рассматривается работа прибора в режиме полуконтактной атомно-силовой микроскопии. Под полуконтактной атомно-силовой микроскопией понимается измерение топографии поверхности в полуконтактном режиме. Синонимами термина “полуконтактная атомно-силовой микроскопия” является термин “прерывисто-контактная атомно-силовая микроскопия”.

Работа прибора в режиме измерения топографии поверхности в полуконтактном режиме является основой для работы прибора в других методиках, использующих модуляцию зонда.

Настоящая глава содержит описание операций полуконтактного режима при работе в воздушной среде. Особенности и отличия полуконтактного режима в жидкой среде кратко рассматриваются в разделе 5.12.

5.1. Исходное состояние. Основные стадии и операции при проведении полуконтактной микроскопии

5.1.1. Исходное состояние

- прибор включен;
- программа запущена, на дисплее главное окно программы;
- главное окно программы имеет конфигурацию оптимальную для работы в полуконтактном режиме;
- кантilever установлен, юстировка лазера и фотодиода выполнена;
- образец установлен,
- C3M головка установлена на каретку блока подвода, выполнен предварительный подвод зонда;
- выбрано место для исследования на образце при помощи оптического микроскопа.

5.1.2. Основные стадии и операции полуконтактного режима

Работу в полуконтактном режиме можно разделить на следующие основные стадии и операции.

1. Подготовка блок-схемы SPM к полуконтактному режиму, которая включает:
подключение сигнала “MAG” на вход обратной связи и другие переключения в блок-схеме SPM, необходимые для работы прибора в полуконтактном режиме.
2. Установка рабочей частоты и амплитуды колебаний кантileвера.
1) Определение и установка рабочей частоты кантileвера.
2) Выбор и установка амплитуды колебаний кантileвера.
3. Выбор и установка начального уровня сигнала “MAG”
4. Подвод зонда к образцу.
1) Процедура подвода.
2) Выбор рабочего значения параметра “Set point”.
3) Выбор коэффициента усиления обратной связи.
5. Установка параметров сканирования.
1) Режим сканирования.
2) Скорость сканирования.

Руководство пользователя C3M Solver BIO Cell

- 3) Размеры области сканирования, шаг, число точек.
- 4) Нелинейная коррекция.
- 5) Каналы измерения. Установка сигналов, направления сканирования.
- 6) Другие параметры.
6. Сканирование.
 - 1) Запуск сканирования.
 - 2) Страна прямого управления при сканировании.
 - 3) Подбор оптимальных параметров сканирования.
7. Сохранение полученных данных.
8. Переключение в другие режимы.
9. Выключение прибора.

Более подробное описание перечисленных выше основных стадий и операций приводится ниже. Предполагается, что установлена конфигурация главного окна программы, краткое описание которой приведено ниже перед описанием основных операций.

5.1.3. Конфигурация главного окна программы

Для удобства настройки и последующей работы рекомендуется установить конфигурацию главного окна программы, показанную на (рис.5.1-1).

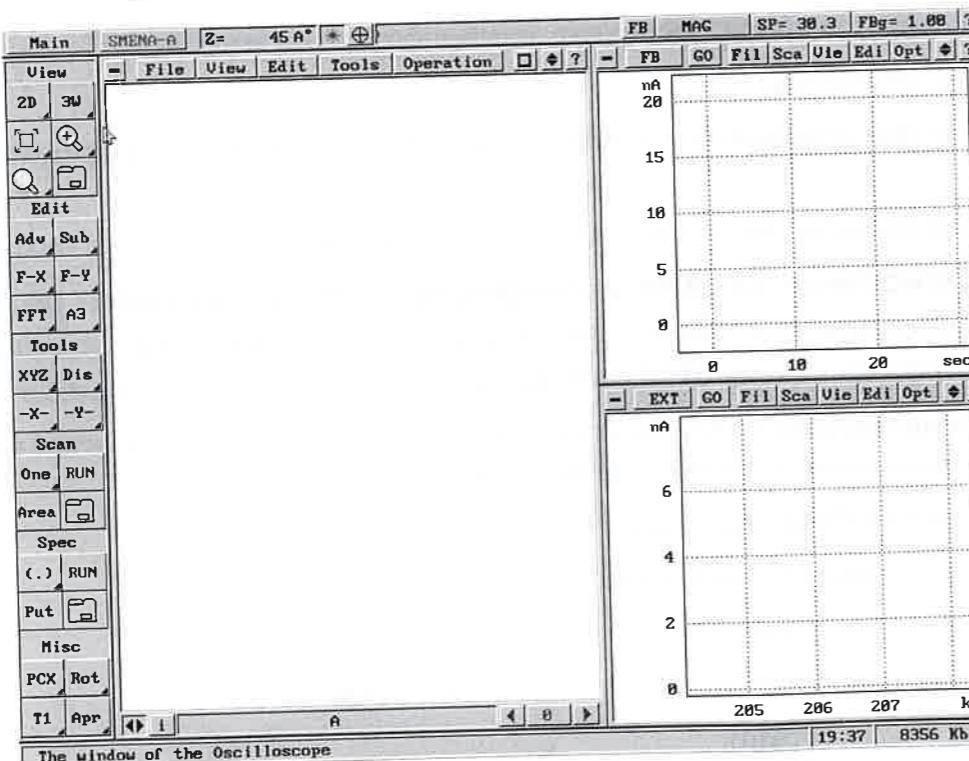


Рис.5.1-1

В представленной конфигурации левую часть главного окна программы занимает окно SPM, в котором при сканировании будет отображаться изображение сигнала, включенного на вход канала А.

Это окно можно легко разбить (посредством кнопки в нижнем левом углу окна SPM), на два окна, в каждом из которых будут отображаться данные сканирования, соответственно, каналов А и В (рис.5.1-2).

Глава 5. Полуконтактная атомно-силовая микроскопия

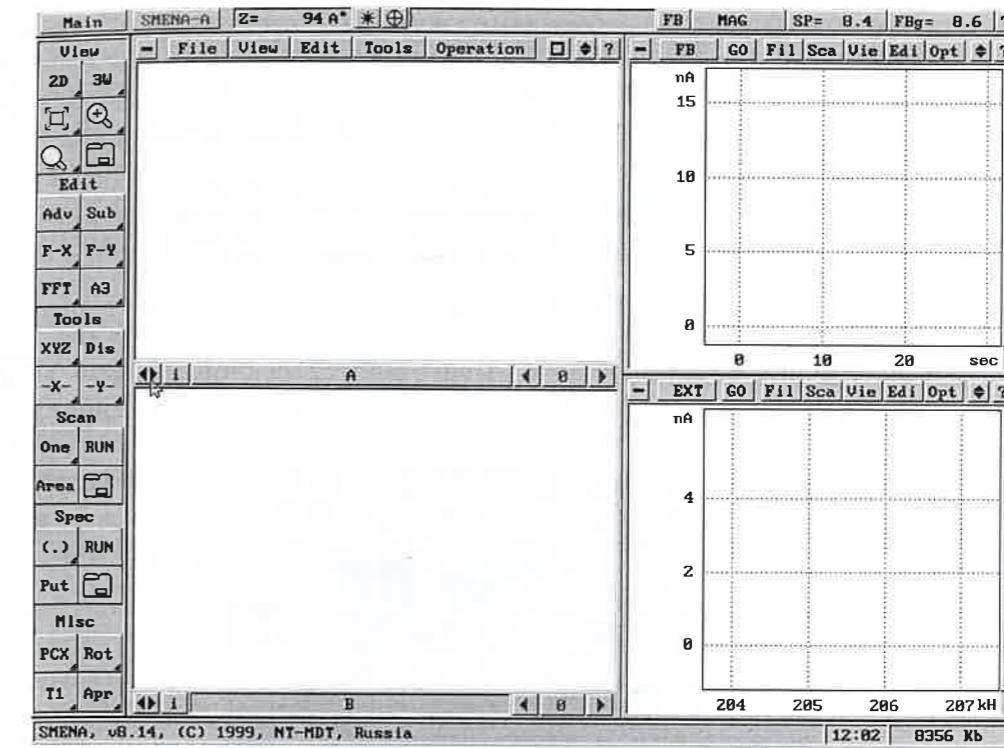


Рис.5.1-2

В правой части главного окна установлены два встроенных осциллографа. На вход одного из них (верхний) включен сигнал обратной связи "FB", а на другом установлен вход для просмотра двухмерных данных "Ext".

На левом краю главного окна расположена панель инструментов, при помощи которой можно управлять прибором, аналогично меню окна SPM.

Конфигурация главного окна программы может быть установлена самая разная. Некоторые пользователи предпочитают использовать конфигурацию главного окна программы, в которой окно SPM расположено в нижней части экрана, причем, само окно SPM разбивают на два для отображения каналов А и В (рис.5.1-3).

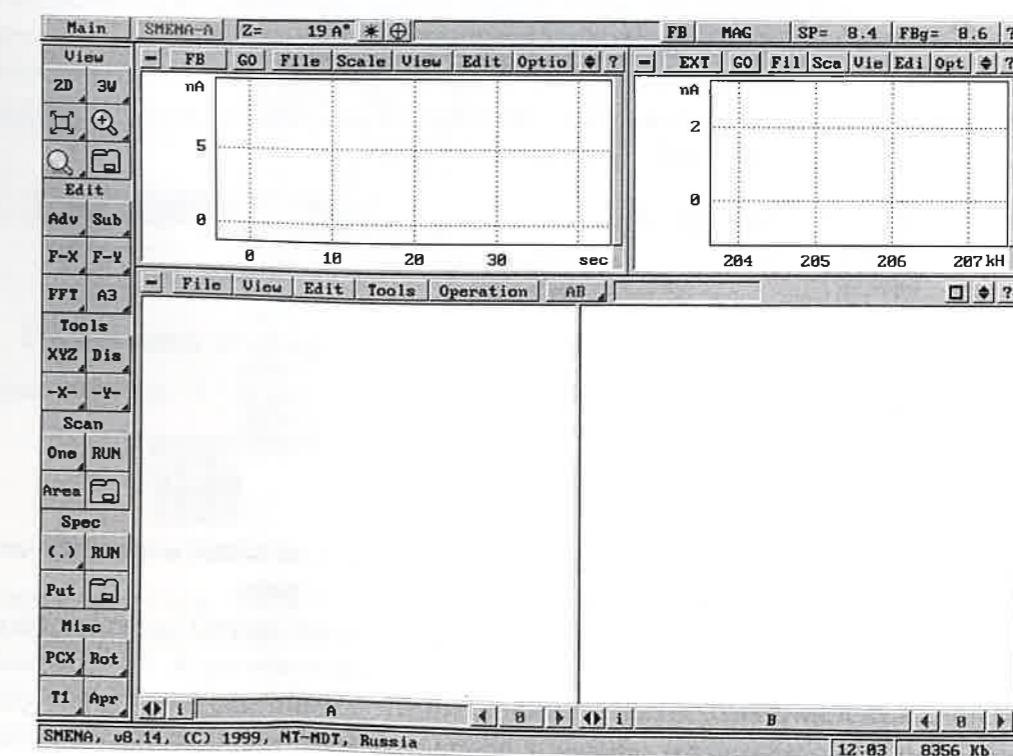


Рис.5.1-3

Руководство пользователя СЗМ Solver BIO Cell

Выбор и установку желаемой конфигурации можно производить при помощи кнопки **Main** в левом верхнем углу окна SPM, а также при помощи кнопки **Window**, которая появляется на месте кнопки **Main** при установке курсора на кнопку **Main** (рис.5.1-4).

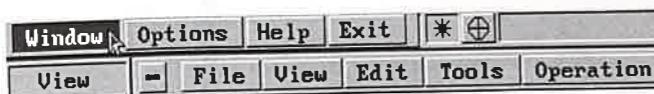


Рис.5.1-4

Если вы изменили конфигурацию и желаете ее сохранить для последующей работы, это можно сделать следующим образом. Курсор мыши ставится на кнопку **Main**. В результате появляется новая верхняя строка (рис.5.1-4). В этой строке включаем кнопку **Options**, открывается меню (рис.5.1-5).

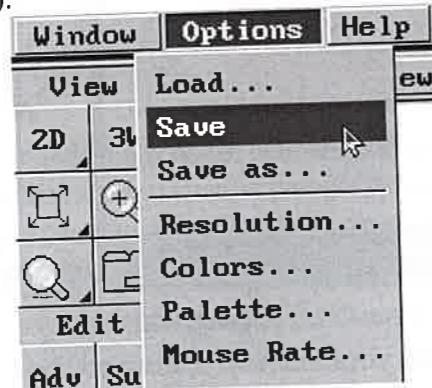


Рис.5.1-5

Для записи конфигурации необходимо нажать **“Save”** (рис.5.1-5), при этом запись производится в файл конфигурации **smena.opt**. Этот файл загружается автоматически при включении программы.

При помощи **“Save as”** конфигурацию можно записать в любой другой файл с расширением **.opt**, который затем можно загружать при помощи **“Load”** из этого же меню (рис.5.1-5).

5.1.3.1. Подключение сигналов к программным осциллографам

Подключение определенного сигнала к осциллографу производится следующим образом. Нажимается вторая кнопка слева в меню осциллографа, в результате открывается меню возможных сигналов. Производится выбор необходимого сигнала, и после нажатия левой кнопки мыши на входе осциллографа устанавливается выбранный сигнал, например, **“FB”** на рис.5.1-6 или **“Ext”** на рис.5.1-7:

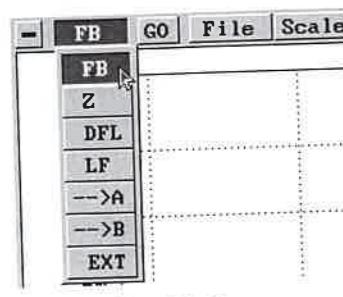


Рис.5.1-6

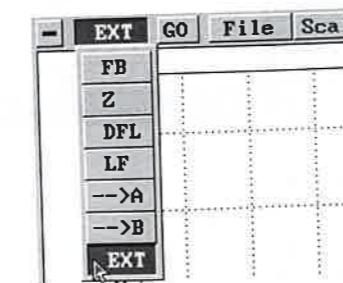


Рис.5.1-7

При помощи кнопки **GO** (третья слева) производится включение (или выключение) процесса измерения сигнала, установленного на входе осциллографа.

После включения процесса измерения может оказаться, что сигнал на экране осциллографа не наблюдается вследствие неправильного масштабирования осей. Измеряемый сигнал может не попадать в интервал шкалы, установленный по вертикальной или горизонтальной оси. Ниже приведено краткое описание процедуры масштабирования осей (более подробно смотри в п. 4.1.3.1.).

Глава 5. Полуконтактная атомно-силовая микроскопия

Для масштабирования шкалы осциллографа необходимо поставить курсор мыши на поле осциллографа, нажать одновременно **“Shift”** + левую клавишу мыши и перемещать мышь в необходимом направлении. Перемещение вниз (вверх) сжимает (растягивает) ось Y. Перемещение влево (вправо) сжимает (растягивает) ось X. При нажатии только на левую клавишу мыши (без клавиши **“Shift”**) перемещение мыши вызывает перемещение установленного интервала шкал вдоль осей, без изменения масштаба шкал. Для масштабирования можно также использовать кнопку **“Scale”** в меню осциллографа.

5.2. Подготовка блок-схемы SPM к полуконтактному режиму

Откройте блок-схему управления SPM нажатием кнопки **□** в меню окна SPM (в приведенной конфигурации во второй строке главного окна программы). Проверьте и установите в схеме правильные положения переключателей и подключите необходимые сигналы, как это показано на рис.5.2-1.

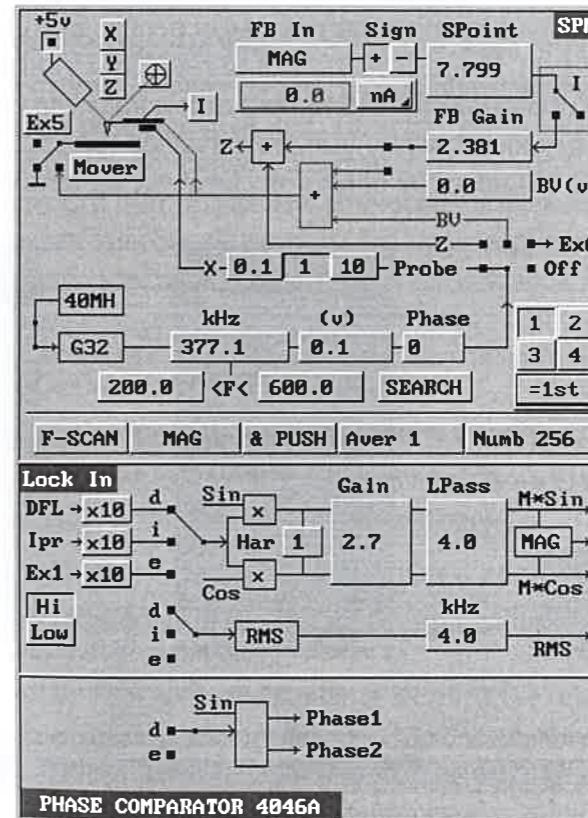


Рис.5.2-1

5.2.1. Проверка положения переключателей

1) Переключатель **“I”** должен быть выключен, т.е. петля обратной связи разорвана (рис.5.2-2).



Рис.5.2-2

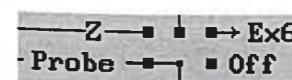


Рис.5.2-3



Рис.5.2-4

2) Переключатель, подключающий возбуждающее напряжение к пьезодрайверу кантилевера, должен быть включен в положение **“Probe”** (рис.5.2-3).

3) Если вы используете кантилевер с резонансной частотой больше 50 кГц, включите кнопку **“Hi”** переключателя входа предусилителя синхронного усилителя (**Lock-IN**) и RMS детектора (рис.5.2-4). В противном случае необходимо включить кнопку **“Low”**.

Это связано с тем, что предусилитель имеет два входа: высокочастотный и низкочастотный. Первый используется при частотах более 50 кГц, а второй, соответственно, при частотах менее 50 кГц. Кнопки "Hi" и "Low" производят выбор соответствующего входа, одна из них находится во включенном состоянии.

4) Переключатель на входе синхронного усилителя и переключатель на входе фазового детектора должны быть в положении "d", как это показано на блок-схеме и рис.5.2-5, рис.5.2-6.

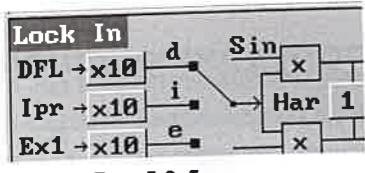


Рис.5.2-5

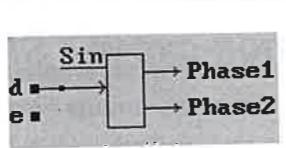


Рис.5.2-6

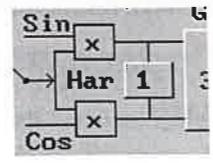


Рис.5.2-7

5) Переключатель номера гармоники синхронного усилителя должен быть установлен в положении 1, как это показано на рис.5.2-7.

5.2.2. Включение сигнала «MAG» на вход обратной связи

Для подключения сигнала на вход обратной связи необходимо в блок-схеме SPM нажать на кнопку «FB In» (рис.5.2-8). Надпись на кнопке соответствует сигналу, который в настоящий момент включен на вход обратной связи. В приведенном примере установлен сигнал «MAG». После нажатия кнопки открывается меню выбора сигналов (рис.5.2-9). После выбора в меню сигнала «MAG» (рис.5.2-10) на входе обратной связи установится сигнал «MAG».

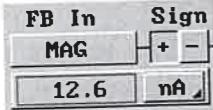


Рис.5.2-8

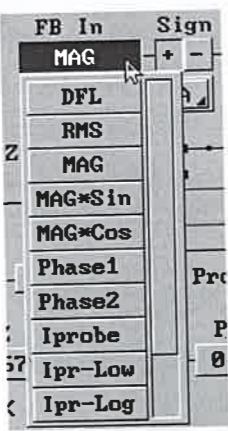


Рис.5.2-9

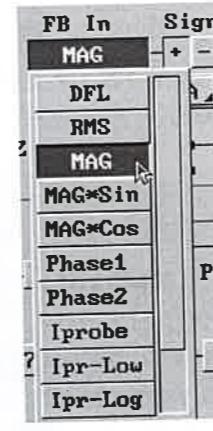


Рис.5.2-10

Существует более простой способ подключения необходимого сигнала на вход обратной связи.



Рис.5.2-11

Для этого нужно в верхней строке прямого управления (рис.5.2-11, рис.5.2-12) нажать кнопку выбора сигнала **FB**, которая находится между кнопками «**FB**» и «**SP**» (на рис.5.2-11 и рис.5.2-12 показано состояние, когда уже установлен сигнал «**MAG**», т.к. надпись на кнопке соответствует установленному сигналу). Установка необходимого сигнала производится аналогично рассмотренному выше случаю в результате выбора сигнала в открывшемся меню.



Рис.5.2-12

Замечание относительно выбора сигнала обратной связи

В полуконтактной атомно-силовой микроскопии мерой взаимодействия зонда и поверхности образца является сигнал, пропорциональный амплитуде колебаний зонда. В нашем микроскопе такими сигналами являются «**MAG**» (сигнал после синхронного усилителя) и «**RMS**» (сигнал после RMS детектора).

Любой из них можно использовать в качестве сигнала обратной связи.

Использование сигнала «**MAG**» является более предпочтительным, поскольку при этом используется синхронное детектирование и, как следствие, достигается более низкий уровень шумов.

5.3. Установка рабочей частоты и амплитуды колебаний кантилевера

5.3.1. Определение резонансной частоты кантилевера, установка рабочей частоты

5.3.1.1. Рабочая частота, резонансная частота, генератор пьезодрайвера кантилевера

Рабочая частота, на которой возбуждаются колебания кантилевера при работе в полуконтактном режиме, обычно равна или близка к резонансной частоте кантилевера.

Разные кантилеверы имеют различную резонансную частоту механических колебаний. Резонансная частота является паспортной характеристикой кантилевера. Однако для работы в полуконтактном режиме необходимо знать точное значение резонансной частоты, паспортные данные такой точности не обеспечивают. Паспортные данные лишь позволяют указать интервал, где можно искать резонансный пик. Поэтому после замены кантилевера необходимо определить его резонансную частоту. Резонансная частота определяется в результате снятия частотной зависимости амплитуды механических колебаний кантилевера.

Возбуждение механических колебаний кантилевера производится при помощи пьезодрайвера, с которым непосредственно контактирует подложка кантилевера. В свою очередь механические колебания пьезодрайвера возбуждаются в результате подачи на него переменного напряжения, поступающего с генератора пьезодрайвера через усилительно-делительный каскад.

Генератор пьезодрайвера кантилевера работает в двух режимах:

- 1) генерации переменного напряжения с определенной амплитудой и фиксированной частотой, значения которых устанавливаются оператором;
- 2) генерации переменного напряжения, сканирующего по частоте в заданном интервале.

Первый режим является основным и используется при работе в полуконтактном режиме, а также в других модуляционных методиках.

Второй режим является вспомогательным и используется при снятии частотной зависимости амплитуды колебаний кантилевера с целью определения резонансной частоты кантилевера.

Частота генератора может регулироваться оператором в диапазоне от 0 Гц до 2 МГц, напряжение на выходе генератора регулируется в диапазоне от 0 до 1 В.

В приборе процедура определения резонансной частоты кантилевера и установки рабочей частоты является автоматизированной. При выполнении этой процедуры происходит автоматическое определение резонансной частоты кантилевера и автоматически устанавливается рабочая частота, равная резонансной.

Кроме того, можно выполнить измерение частотной зависимости амплитуды механических колебаний кантилевера, из полученной зависимости определить значение резонансной частоты и затем установить вручную необходимое значение рабочей частоты.

Ниже приводится описание процедуры автоматической установки рабочей частоты, а также процедуры измерения частотной зависимости амплитуды колебаний кантилевера и процедуры ручной установки рабочей частоты.

Заметим, что кроме частотной зависимости амплитуды колебаний кантилевера, также возможно измерение частотных зависимостей ради других сигналов и величин (например, фазы колебаний кантилевера).

5.3.1.2. Автоматическое определение резонансной частоты кантеле́вера и автоматическая установка рабочей частоты

Для автоматического нахождения резонансной частоты кантеле́вера и автоматической установки рабочей частоты, равной по величине резонансной, необходимо выполнить следующие операции.

- 1) Открыть блок-схему управления SPM нажатием кнопки  в окне SPM.
- 2) Нажать на кнопку **SEARCH** (рис.5.3-1), эта кнопка запускает процедуру.

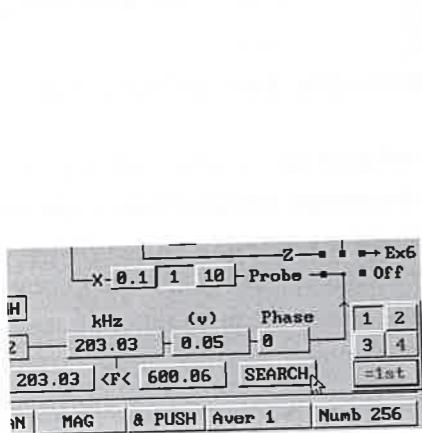


Рис.5.3-1

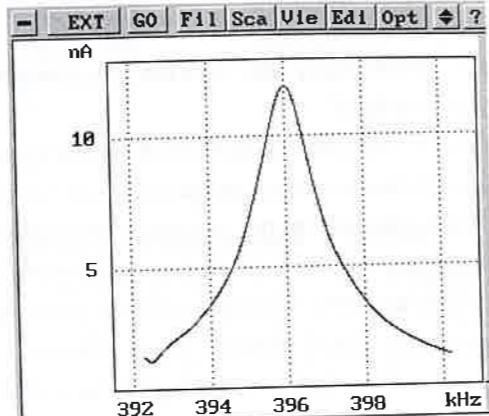


Рис.5.3-2

В результате выполнения процедуры будет измерена частотная зависимость сигнала (в нашем случае сигнала **MAG**, пропорционального амплитуде колебаний кантеле́вера), определена резонансная частота кантеле́вера и установлена рабочая частота равная резонансной. На осциллографе «Ext» будет отображен максимум резонансной кривой (рис.5.3-2). На кнопке – индикаторе **kHz** (кнопка установки резонансной кривой) будет автоматически установлено значение равное рабочей частоте генератора (рис.5.3-3).

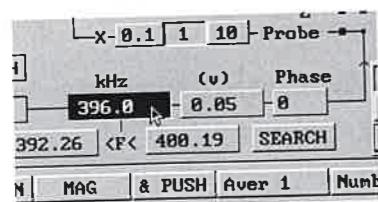


Рис.5.3-3

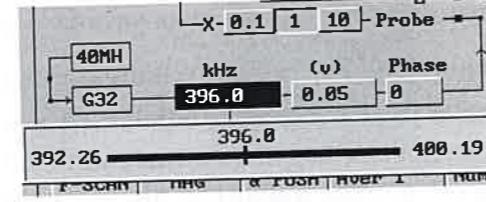


Рис.5.3-4

В этом можно убедится, если нажать на кнопку **kHz**. При нажатии на эту кнопку откроется окно-регулятор (рис.5.3-4), а на резонансной кривой появится линия-визир, положение которой будет совпадать с положением максимума (рис.5.3-5).

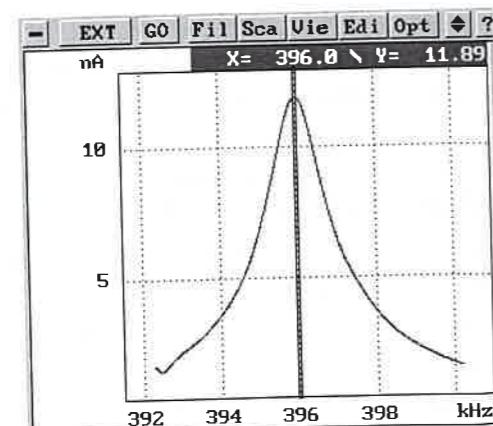


Рис.5.3-5

5.3.1.3. Процедура измерения частотной характеристики амплитуды механических колебаний кантеле́вера

1) Откройте блок-схему управления SPM нажатием кнопки  во второй строке главного окна программы. Управление параметрами генератора производится следующей частью блок-схемы управления SPM (рис.5.3-6).

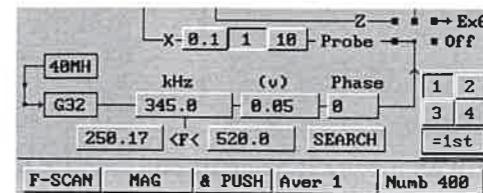


Рис.5.3-6

Три кнопки в третьем ряду служат для установки, соответственно:

«kHz» - частоты переменного напряжения на выходе генератора;

«(v)» - амплитуды переменного напряжения;

«Phase» - фазы переменного напряжения относительно опорного сигнала.

Кнопки слева и справа от «F» (второй ряд снизу на рис.5.3-6) устанавливают, соответственно, минимальное («Min») и максимальное («Max») значения интервала сканирования по частоте.

Кнопки в строке управления генератора (рис.5.3-7) служат:

F-SCAN MAG & PUSH Aver 1 Numb 400

Рис.5.3-7

первая кнопка «F-SCAN», — для запуска сканирования по частоте при снятии частотной зависимости установленного сигнала (в нашем случае включен сигнал «MAG»);

вторая кнопка в строке — для установки сигнала, частотная зависимость которого будет сниматься (в нашем случае включен сигнал «MAG»);

последняя кнопка «Numb....» — для установки числа точек в частотном интервале, на которые разбивается интервал, и в которых будет происходить генерация при сканировании по частоте.

2) Установите нижнее и верхнее значение интервала, в пределах которого предположительно лежит резонансная частота кантеле́вера.

Для этого нажмите на кнопку, устанавливающую нижнее значение интервала (рис.5.3-8). В открывшемся окне регулятора (рис.5.3-9) установите соответствующую величину нижней границы.

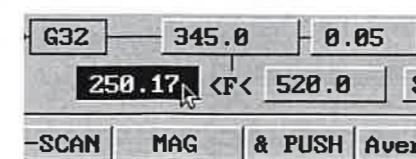


Рис.5.3-8

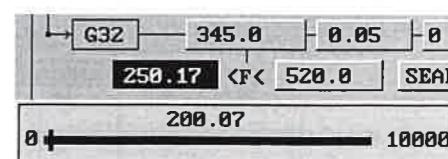


Рис.5.3-9

Затем, аналогично установите верхнее значение интервала.

3) Включите сканирование частоты генератора драйвера кантеле́вера. Для этого нажмите кнопку «F-SCAN» в строке управления генератором.

После сканирования на осциллографе «Ext» отображается частотная зависимость выбранного сигнала (рис.5.3-10), в нашем случае это будет сигнал «MAG».

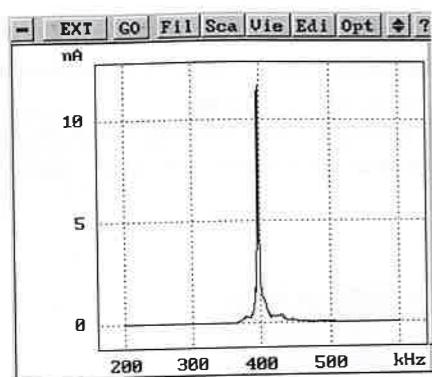


Рис.5.3-10

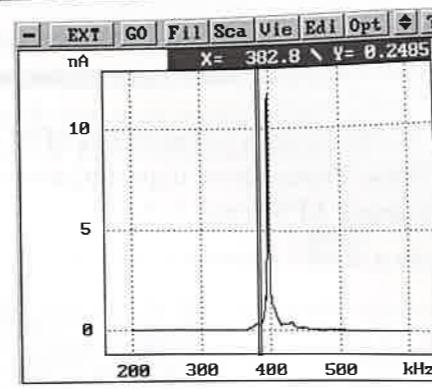


Рис.5.3-11

Из приведенной зависимости видно, что на некоторой частоте имеется резонанс. Если интервал сканирования выбран достаточно большой, то на кривой может наблюдаться несколько пиков.

Для более точного определения положения резонансной частоты необходимо уменьшить интервал сканирования.

Для этого необходимо нажать на кнопку-индикатор, соответствующей нижней границе интервала сканирования. При нажатии вместе с открытием окна-регулятора в окне осциллографа Ext с резонансной кривой появится линия-визир.

Положение этой линии – визира соответствует текущему значению нижней границы интервала сканирования. Перемещая данную линию – визир установите необходимое значение нижней границы интервала (рис.5.3-11).

Затем аналогичным образом установите верхнее значение интервала сканирования (рис.5.3-12) и повторите сканирование.

В результате сканирования получится более подробная кривая в области резонансного пика (рис.5.3-13).

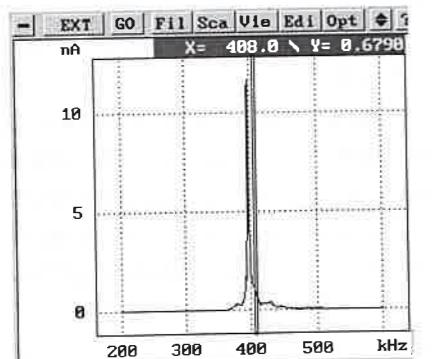


Рис.5.3-12

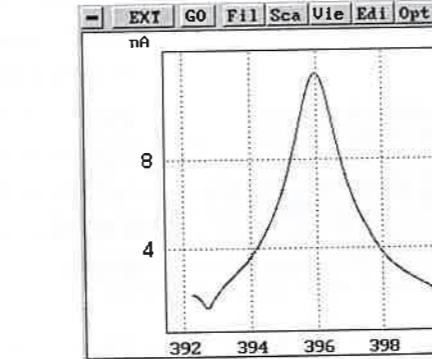


Рис.5.3-13

Резонансную частоту кантелеявера можно определить по положению максимума на резонансной кривой, отображенной на осциллографе «Ext». Для этого нажмите на кнопку «Vie» в строке управления осциллографа и, двигая курсором, определите значение частоты, соответствующее максимуму резонансной кривой (рис.5.3-14).

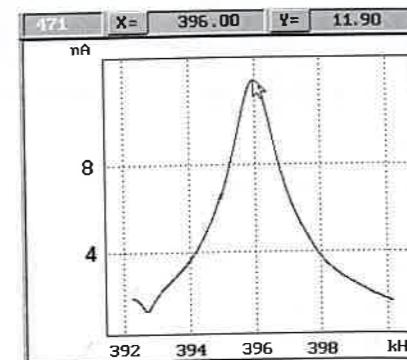


Рис.5.3-14

5.3.1.4. Ручная (неавтоматическая) установка рабочей частоты

После определения резонансной частоты кантелеявера установите рабочую частоту генератора драйвера кантелеявера. Обычно в полуконтактном режиме значение рабочей частоты генератора устанавливают равной величине резонансной частоты кантелеявера или близкой к ней. Для установки рабочей частоты нажмите кнопку «kHz» (рис.5.3-15) и в открывшемся окне регулятора установите необходимое значение (рис.5.3-16).



Рис.5.3-15

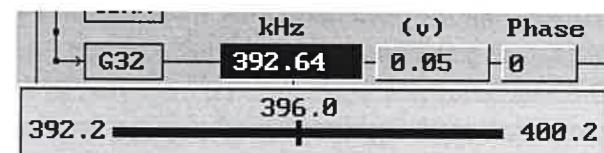


Рис.5.3-16

Устанавливая рабочую частоту, удобно наблюдать за текущим значением частоты по положению линии – визира на резонансной кривой в окне осциллографа Ext (рис.5.3-17, рис.5.3-18).

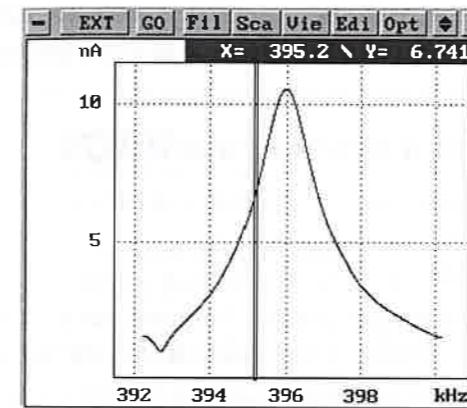


Рис.5.3-17

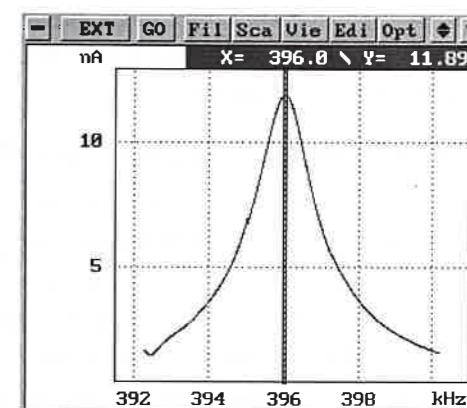


Рис.5.3-18

5.3.2. Выбор и установка амплитуды колебаний кантелеявера

Амплитуда колебаний кантелеявера регулируется величиной переменного напряжения, которое подается на пьезодрайвер кантелеявера от генератора через усилительно-делительный каскад. Для установки рабочей величины напряжения генератора необходимо нажать кнопку «(v)» (рис.5.3-19) в схеме управления генератора и установить необходимое значение при помощи окна регулятора (рис.5.3-20).

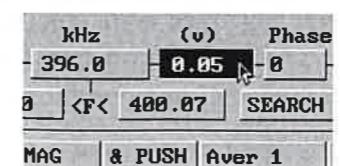


Рис.5.3-19

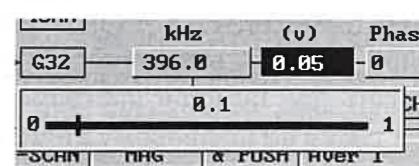


Рис.5.3-20

Напряжение с выхода генератора поступает после переключателя «Probe» на усилительно-делительный каскад, который устанавливается в одно из трех состояний включением одной из кнопок **0.1**, **1**, **10**. Соответственно, в зависимости от включенного состояния, результирующее напряжение, поступающее на пьезодрайвер, ослабляется в 10 раз, остается без изменения, либо увеличивается в 10 раз.

На начальном этапе измерений величину напряжения, поступающего на пьезодрайвер кантелеявера, рекомендуется установить равной примерно 0.1-0.2В.

Руководство пользователя C3M Solver BIO Cell

Замечания относительно выбора величины амплитуды колебаний кантileвера.
Амплитуда колебаний кантileвера является одним из параметров, который может существенно влиять на качество получаемого изображения поверхности.

С точки зрения получения более высокого разрешения и более «мягкого» воздействия на образец желательно использовать небольшую амплитуду колебаний кантileвера.

Однако при малой амплитуде колебаний возможен эффект «залипания» кантileвера, вызванный наличием капиллярных сил, или каких либо других причин (например, сильной адгезией, электростатическим взаимодействием и т. д.). Поэтому амплитуду колебаний приходится увеличивать.

Оптимальная величина амплитуды зависит от природы и физических свойств исследуемого образца, условий измерения, характеристик используемого кантileвера.

Непосредственно измеряется некоторый сигнал, пропорциональный амплитуде колебаний кантileвера. По изменениям этого сигнала мы можем судить об относительном изменении амплитуды колебаний.

Реальную величину амплитуды колебаний мы будем знать, если проведем калибровку сигнала, т.е. определим коэффициент пропорциональности между величиной амплитуды сигнала колебаний и величиной сигнала. Эту связь можно найти, если измерить зависимость сигнала от расстояния между зондом и поверхностью. Процедура измерения этой зависимости приведена ниже в разделе 6.1.

5.4. Установка начального уровня сигнала «MAG»

В полуконтактном режиме амплитуда механических колебаний кантileвера является параметром, характеризующим взаимодействие зонда и поверхности.

В нашем приборе сигнал «MAG» (либо «RMS») используется в качестве сигнала, пропорционального амплитуде колебаний кантileвера при снятии топографии поверхности.

Сигнал «MAG» пропорционален величине амплитуды механических колебаний, коэффициенту усиления промежуточного усилителя и коэффициенту усиления синхронного усилителя.

Соответственно, уровень сигнала можно регулировать, изменяя амплитуду колебаний кантileвера, величину коэффициента усиления промежуточного усилителя (два значения 1 и 10) и величину коэффициента усиления («Gain») синхронного усилителя.

Сигнал «RMS» пропорционален величине амплитуды механических колебаний коэффициенту усиления промежуточного усилителя. Поэтому в этом случае уровень сигнала можно регулировать, изменяя амплитуду колебаний кантileвера и величину коэффициента усиления промежуточного усилителя (последний может иметь два значения: 1 и 10).

Сигнал «MAG» является токовым и выражается вnanoамперах. В качестве начального уровня сигнала «MAG» рекомендуется устанавливать значение, лежащее в интервале 10-15 нА.

За величиной сигнала, выбранного в качестве сигнала обратной связи (сигнала FB), можно наблюдать при помощи программного осциллографа, включенного на измерение сигнала FB, а также по цифровому индикатору сигнала FB.

Цифровой индикатор сигнала FB расположен на блок-схеме управления SPM под кнопкой выбора сигнала обратной связи «FB In» (рис.5.4-1) и состоит из собственно цифрового индикатора и расположенной рядом кнопки, определяющей режим работы индикатора (рис.5.4-2).

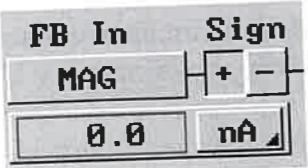


Рис.5.4-1



Рис.5.4-2

Глава 5. Полуконтактная атомно-силовая микроскопия

Особенность цифрового индикатора сигнала FB состоит в том, что он имеет два режима работы. В первом случае он отображает сигнал FB в нА, а во втором случае сигнал, прокалибранный в ангстремах, т.е. фактически показывает величину амплитуды колебаний кантileвера.

Для переключения режима необходимо нажать на уголок кнопки или просто подержать кнопку в нажатом состоянии некоторое время и в открывшемся окне выбрать нужную кнопку (рис.5.4-2).

Следует подчеркнуть, что работа индикатора в режиме индикации амплитуды колебаний кантileвера возможна только в том случае, если для используемого кантileвера предварительно была произведена калибровка и определен коэффициент пропорциональности K, связывающий амплитуду колебаний и сигнал FB (сигнал «MAG»).

Коэффициент K может быть определен в результате процедуры измерения зависимости сигнала FB от расстояния между зондом и поверхностью образца, которая описывается далее в разделе 6.1. Если, в результате выполнения указанной процедуры, определена величина $K = Dz/DFB(z)$, то величина коэффициента K определяется из соотношения $K = K * Gain$, где Gain – это текущее значение величины коэффициента усиления синхронного усилителя.

Таким образом, если величина коэффициента K известна, можно нажать на кнопку «K =» (рис.5.4-2) и установить его значение. Только в этом случае можно будет использовать индикатор сигнала FB в режиме индикации амплитуды колебаний кантileвера.

Процедура регулировки уровня сигнала «MAG» посредством изменения коэффициента усиления «Gain» синхронного усилителя производится следующим образом.

1) Включите один из программных осциллографов (если это еще не сделано) на измерение сигнала FB. Контроль уровня сигнала производится по программному осциллографу.

2) Откройте блок-схему управления SPM нажатием кнопки в окне SPM (вторая строка в главном окне программы).

3) Нажмите на кнопку «Gain» в блок схеме управления синхронным усилителем (рис.5.4-3).

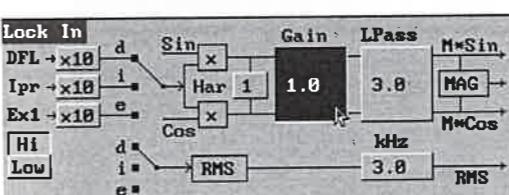


Рис.5.4-3

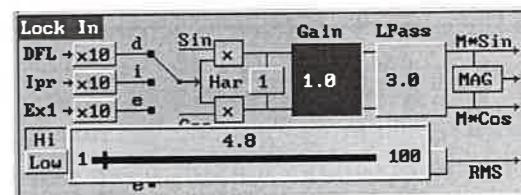


Рис.5.4-4

4) Наблюдая за уровнем сигнала в осциллографе FB, установите в открывшемся окне регулятора необходимое значение коэффициента усиления синхронного усилителя (рис.5.4-4).

Регулировка уровня сигнала «MAG» посредством изменения амплитуды колебаний кантileвера производится в результате изменения величины во збуджающего напряжения, подаваемого на пьезодрайвер кантileвера. Процедура регулировки напряжения описана ранее в п.5.3.2.

Наблюдение за уровнем сигнала «MAG» при изменении напряжения генератора пьезодрайвера кантileвера производится по осциллографу, аналогично описанному выше случаю регулировки при помощи изменения коэффициента усиления синхронного усилителя.

5.5. Подвод зонда к образцу, выбор и установка рабочей точки

После установки начального уровня сигнала «MAG», необходимо выполнить процедуру подвода зонда к образцу.

В нашем случае сигнал «MAG» является сигналом обратной связи «FB», поскольку ранее (в п.5.1.2) мы включили на вход обратной связи именно «MAG». Поэтому далее в тексте выражения ‘сигнал «MAG»’ и ‘сигнал «FB»’ совпадают.

Замечание 5.5-1. Перед тем, как приступить к процедуре подвода, необходимо обратить внимание на установленное значение коэффициента обратной связи (параметр FB Gain). Необходимо, чтобы величина FB Gain была не слишком малой (не меньше единицы). Установленное значение этого параметра отображается на кнопке «FB Gain» в блок-схеме управления SPM, а также на кнопке «FBg» в верхней строке главного окна программы. Соответственно, при нажатии любой из этих кнопок откроется окно-регулятор, при помощи которого можно изменить величину FB Gain.

В приборе используется автоматический подвод зонда к образцу. Подвод производится при помощи шагового двигателя, который перемещает каретку блока подвода вместе с установленной на ней С3М головкой. Соответственно, вместе с перемещением С3М головки относительно образца происходит и перемещение зонда.

Замечание 5.5-2. Кроме автоматического подвода зонда к образцу в приборе имеется возможность ручного подвода зонда к образцу. Ручной подвод используется только при работе С3М головки в качестве автономного С3М. Процедура ручного подвода приводится ниже в пункте 5.5.1А после описания процедуры автоматического подвода.

5.5.1. Процедура автоматического подвода зонда к образцу

Процедуру автоматического подвода можно разделить на следующие основные стадии:

- 1) Установка начального значения параметра «Set Point».
- 2) Подготовка и включение процедуры автоматического подвода.
- 3) Начальный этап процедуры автоматического подвода.
- 4) Продолжение процедуры автоматического подвода.

Ниже приводится более подробное описание данных стадий.

5.5.1.1. Установка начального значения параметра «Set Point»

Установите начальное значение параметра «Set Point» примерно на 50% меньше, чем величина начального уровня сигнала «MAG» (сигнала «FB»).

Для установки необходимого значения «Set Point»:

- 1) откройте блок-схему управления SPM нажатием кнопки  в меню окна SPM (во второй строке главного окна программы);
- 2) нажмите кнопку «SPoint» (рис.5.5-1) и в открывшемся окне с регулятором (рис.5.5-2) установите необходимое значение. Например, если уровень сигнала равен 14nA, то величину «SPoint» установите примерно 7-8nA.

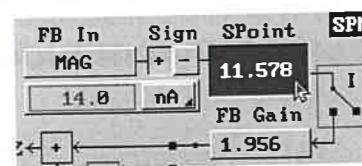


Рис.5.5-1

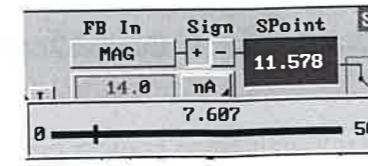


Рис.5.5-2

Окно с регулятором можно также открыть в результате нажатия кнопки «SP» в верхней строке главного окна программы или кнопки «Setpoint» в окне «Probe».

5.5.1.2. Включение процедуры автоматического подвода

Для того, чтобы начать процедуру автоматического подвода необходимо открыть окно «Approach». Для открытия окна «Approach» необходимо последовательно нажать кнопку «Operation» в меню окна SPM (рис.5.5-3) и затем в открывшемся меню «Approach» (рис.5.5-4).

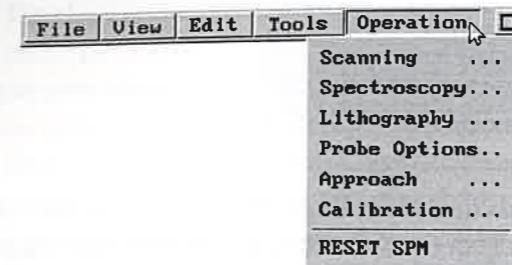


Рис.5.5-3

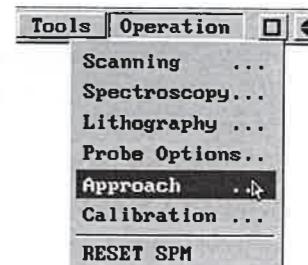


Рис.5.5-4

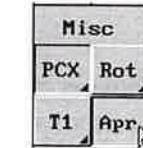


Рис.5.5-5

Окно «Approach» можно также открыть нажатием кнопки , которая находится на панели инструментов в самом низу (рис.5.5-5).

В открывшемся окне «Approach» выберите ярлык «Probe» в результате откроется окно «Probe», показанное на рис.5.5-6.

Далее, при помощи кнопки «Landing» запускается процесс автоматического подвода, при условии, что установлена необходимая величина параметра «Set Point» согласно изложенному выше п.5.5.1.1 и выполнена подготовка к процедуре подвода. Ниже приводится более подробное описание подготовки к подводу, описание необходимых для подвода кнопок и других составляющих, входящих в состав окон «Approach» и «Probe».

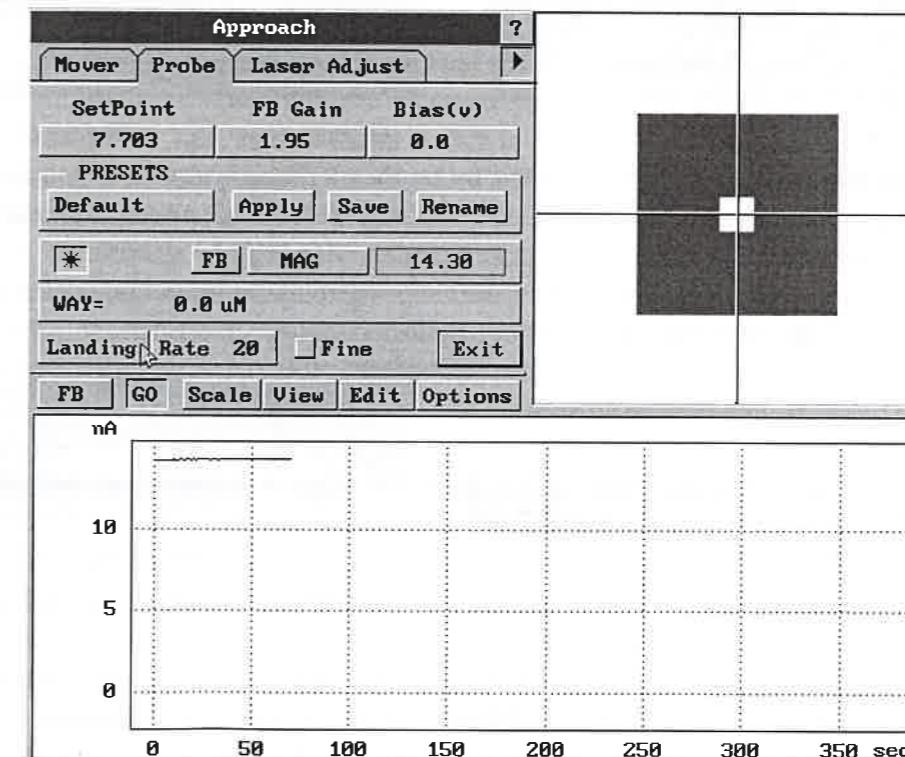


Рис.5.5-6

5.5.1.2.1. Окна «Approach», «Probe», «Mover»

Как упоминалось выше, при нажатии кнопки «Approach» или закладки «Approach» открывается окно, которое имеет вид, показанный на рис.5.5-6. Вверху слева находится собственно окно «Approach», в котором отображается или окно «Probe», или окно «Mover», или окно «Laser Adjust». Это определяется тем, какой из ярлыков выбран в меню «Approach». На рис.5.5-6 выбран «Probe».

Вверху справа находится индикатор настройки фотодиода. В нижней части находится программный осциллограф.

Если кнопку в меню окна «Approach» выключить (рис. 5.5-7), то индикатор фотодиода и осциллограф будут закрыты и останется только одно окно «Approach» (рис. 5.6-8).

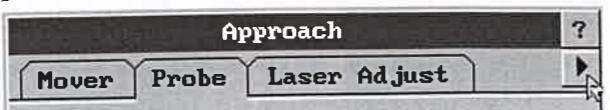


Рис.5.5-7

Окна «Probe», «Mover» (рис. 5.5-8, 5.5-9) содержат кнопку «Landing», ряд кнопок-индикаторов, в частности кнопку-индикатор «Rate». В кнопках-индикаторах отображаются текущие значения соответствующих параметров. При нажатии такой кнопки открывается окно - регулятор, посредством которого можно, при необходимости изменять значение установленного параметра.

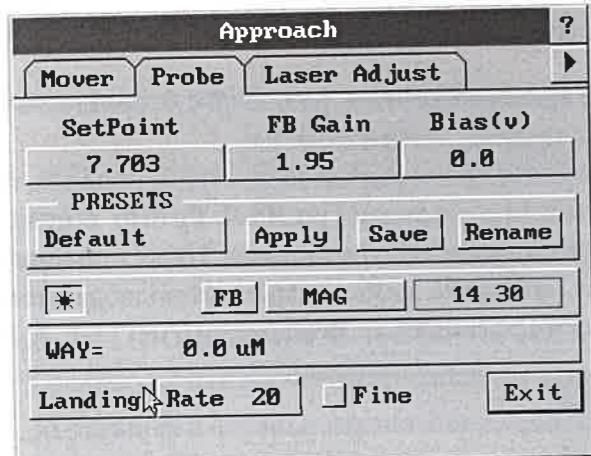


Рис.5.5-8

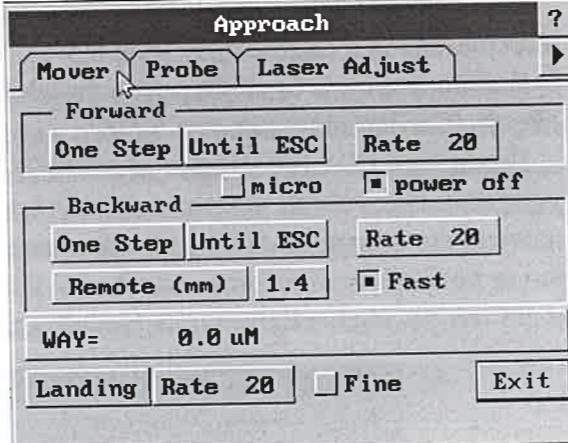


Рис.5.5-9

Кнопки «Landing», «Rate», «Fine», «Exit», индикатор относительного положения шагового двигателя «Way» являются общими для всех закладок меню «Approach», а не только для закладки «Probe» (рис. 5.5-8, 5.5-9).

Кнопка «Landing» (рис. 5.5-6, 5.5-10) служит для включения процедуры автоматического подвода. При нажатии этой кнопки начинает работать шаговый двигатель.



Рис.5.5-10

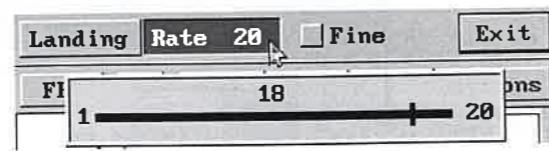


Рис.5.5-11

Рядом с кнопкой «Landing» находится кнопка-индикатор «Rate» (рис. 5.5-10, рис. 5.5-11), которая устанавливает скорость подвода.

Скорость выражается в некоторых условных единицах. Максимальная величина скорости составляет 20 единиц. Шкала скорости является нелинейной. Так уменьшение скорости с 20 единиц до 19 единиц соответствует тому, что реальная скорость перемещения зонда уменьшается в несколько раз.

Для изменения величины скорости подвода необходимо нажать кнопку «Rate» и при помощи открывшегося окна-регулятора установить необходимое значение (рис. 5.5-11).

Если скорость подвода окажется слишком большой, то при подводе может возникнуть ситуация, когда следящая система не сможет в нужный момент остановить зонд. Это связано с тем, что в механической системе при перемещении возникают деформации и механические напряжения, которые имеют довольно большие времена релаксации.

Вследствие этого после остановки шагового двигателя имеет место некоторое остаточное перемещение зонда, связанное с релаксацией указанных выше механических напряжений. Причем это остаточное перемещение может превышать возможный интервал перемещения пьезосканера, и вследствие этого следящая система не может поддерживать заданный уровень сигнала **FB**.

При уменьшении скорости подвода величина механических напряжений, а вместе с ними и величина остаточного перемещения уменьшается. Соответственно, при некоторой величине скорости подвода величина остаточного перемещения становится меньше величины возможного интервала перемещения пьезосканера.

Для того, чтобы избежать изложенные выше сложности в приборе предусмотрена система автоматического управления подводом, которая в частности уменьшает скорость подвода, когда зонд начинает взаимодействовать с поверхностью.

Для полуконтактного режима система управления подводом работает наиболее оптимальным образом при включенной кнопке «Fine», которая расположена рядом с кнопкой «Rate» (рис. 5.5-10). В этом случае (при включенной кнопке «Fine») скорость изменяется с учетом изменения производной сигнала **FB**, остановка шагового двигателя производится таким образом, чтобы сканер находился вблизи середины своего интервала выдвижения и производится автоматический отвод шагового двигателя в режим люфта и т.д.

Относительно скорости и режима подвода в полуконтактном режиме можно дать следующие рекомендации:

- 1) подвод рекомендуется производить при включенной кнопке «Fine», как это показано на рис. 5.5-10;
- 2) начальную скорость подвода в полуконтактном режиме при включенной кнопке «Fine» рекомендуется установить максимальной, т.е. равной 20 единицам.

В верхнем ряду (рис. 5.5-6) окна «Probe» находятся кнопки «Set Point», «FB Gain» и «Bias(v)».

В кнопке-индикаторе «Set Point» отображается значение параметра «Set Point», которое мы установили ранее при выполнении п. 5.5.1.1.

Соответственно, в кнопке-индикаторе «FB Gain» отображается установленное ранее значение коэффициента усиления обратной связи «FB Gain».

В нижней части окна «Approach» находится программный осциллограф.

На вход осциллографа необходимо установить сигнал **FB**, используя первую кнопку в меню осциллографа, и включить процесс измерения сигнала при помощи кнопки «GO» (вторая кнопка в меню осциллографа). Более подробно работа с программным осциллографом описана ранее в пункте 5.1.3.1. настоящей главы, где рассматривается, как включать сигнал на вход осциллографа, производить масштабирование осей и т.д.

При помощи осциллографа можно будет наблюдать, как изменяется сигнал **FB** в процессе подвода.

На рисунке 5.5-6 показано состояние, в котором на входе осциллографа установлен сигнал **FB** и включен процесс измерения этого сигнала. Величина текущего сигнала **FB** также отображается в индикаторе сигнала **FB** (рис. 5.5-6, рис. 5.5-12), который находится рядом с кнопкой выбора сигнала обратной связи (в нашем случае это сигнал **MAG**).



Рис.5.5-12

5.5.1.3. Начальный этап процедуры автоматического подвода зонда к образцу

Если установка начального значения параметра «Set Point» выполнена, согласно изложенному выше пункту 5.5.1.1, можно начать процедуру подвода.

Как указывалось выше, процедура автоматического подвода начинается при нажатии кнопки «Landing» (рис. 5.5-6, рис. 5.5-10). При этом включается шаговый двигатель, который начинает перемещать зонд по направлению к образцу.

Одновременно происходит автоматическое включение обратной связи.

В результате включения обратной связи пьезосканер (а вместе с ним и зонд) выдвигается на максимальную величину по оси Z по направлению к образцу.

В исходном состоянии острый зонд находится на достаточно большом расстоянии от образца (около 1 мм) по сравнению с величиной максимально возможного перемещения пьезосканера (около 3 мкм) по оси Z. Хотя зонд и приближается к образцу в результате полного выдвижения сканера, расстояние между острием и образцом остается еще достаточно большим для того, чтобы между ними возникло какое-либо взаимодействие.

Поэтому уровень текущего сигнала FB не меняется, разница между уровнем «FB» и «Set Point» остается большой.

Выдвижение сканера регистрируется по показаниям аналогового индикатора удлинения сканера, который находится в верхней строке главного окна программы между кнопкой сканера и кнопкой «FB» (рис.5.5-13).

Степень выдвижения сканера характеризуется длиной красной линии.



Рис.5.5-13



Рис.5.5-14

При полном выдвижении сканера красная линия заполняет весь индикатор (рис.5.5-14).

В процессе подвода наблюдаем за изменениями сигнала «FB» в окне осциллографа «FB» и за состоянием индикатора выдвижения сканера.

Рис.5.5-15 показывает, как обычно изменяется сигнал «FB» (т.е. амплитуда колебаний кантилевера) от времени в процессе подвода при приближении кантилевера к поверхности. Увеличение времени соответствует приближению к поверхности.

Сначала величина сигнала не изменяется. Затем при приближении кантилевера на достаточно близкое расстояние к образцу амплитуда колебаний кантилевера начинает уменьшаться и, соответственно, начинает уменьшаться и текущее значение сигнала «FB».

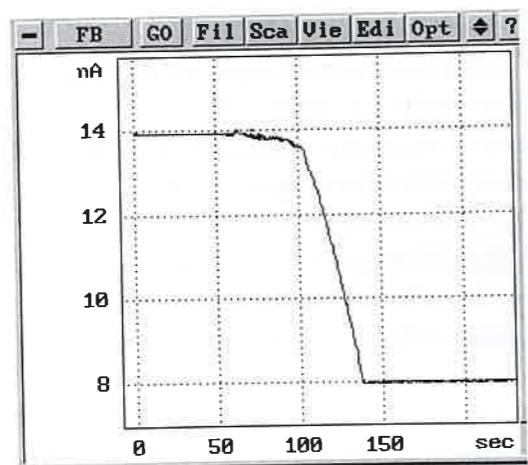


Рис.5.5-15

Первый участок зависимости FB - расстояние от поверхности (т.е. амплитуда колебаний - расстояние от поверхности), на котором начинается уменьшение амплитуды с уменьшением расстояния, связан не с началом взаимодействия острия и поверхности, а обусловлен демпфирующим эффектом воздушной прослойки между балкой кантилевера и поверхностью. Этот участок очень растянут и неустойчив.

При дальнейшем приближении амплитуда колебаний будет продолжать уменьшаться и в какой-то момент начнется участок с более резким уменьшением амплитуды колебаний. Этот второй участок как раз и соответствует началу взаимодействия острия зонда с поверхностью.

Момент, когда уровень текущего сигнала «FB» уменьшится до значения «SPoint», мы сразу зарегистрируем по индикатору выдвижения сканера. При этом возможны два случая:

1) красная линия уменьшается и занимает некоторое промежуточное положение на индикаторе (рис.5.5-16);

2) красная линия выдвижения сканера уменьшается до нуля (рис.5.5-17).

Рассмотрим эти два случая более подробно.



Рис.5.5-16



Рис. 5.5-17

Первый случай соответствует успешному выполнению начального этапа процедуры автоматического подвода, в результате которого удалось установить состояние нормального функционирования (нормальной работы) следящей системы. Промежуточное положение красной линии на индикаторе соответствует промежуточному положению сканера между крайними состояниями.

В этом случае следящая система смогла компенсировать разницу между текущим уровнем «FB» и величиной «SPoint» путем перемещения сканера и при этом она еще имеет возможность поддерживать уровень сигнала «FB» равным «SPoint», поскольку сканер находится в пределах возможного интервала выдвижения. Приведенный выше рисунок 5.5-15 как раз соответствует первому случаю, когда следящая система после успешного выполнения начального этапа подвода поддерживает уровень сигнала FB равным установленному значению «SPoint» (равному на рисунке 8 нА).

Именно реализация первого случая необходима для дальнейшего продолжения процедуры подвода.

Обычно, если подвод производится при включенной кнопке «Fine» и система автоматического управления подводом работает правильно, именно первый случай имеет место.

Однако при неправильной настройке системы автоматического управления подводом или вследствие каких-либо других причин возможен второй случай.

Во втором случае мы проскакиваем рабочую точку из-за слишком быстрого приближения зонда к образцу. При этом после прохождения «SPoint» зонд перемещается на слишком большое расстояние, которое больше максимального диапазона выдвижения сканера.

Следящая система, пытаясь установить уровень сигнала «FB» равным значению «SPoint», отодвигает зонд от поверхности образца на максимально возможное расстояние, т.е. полностью втягивает сканер. Но этого перемещения оказывается недостаточно, чтобы компенсировать изменение сигнала «FB», величина которого стала меньше уровня «SPoint».

Система управления начинает вращать шаговый двигатель в обратную сторону, чтобы отвести зонд от образца. При этом текущий уровень сигнала FB начнет увеличиваться и в какой-то момент превысит значение «SPoint». Соответственно, начнет работать следящая система, сканер начнет выдвигаться, что должно будет отобразиться на индикаторе состояния сканера, как появление и рост красной линии.

Если при этом система управления удастся реализовать первый случай (успешно выполнить начальный этап подвода), т.е. остановить шаговый двигатель в таком положении, когда сканер находится вблизи середины своего интервала (красная линия выдвижения занимает промежуточное положение на индикаторе), можно будет продолжить процедуру подвода.

В противном случае, система управления отведет зонд от образца на расстояние, при котором взаимодействие между острием зонда и поверхностью отсутствует, сканер полностью выдвигается, красная линия займет весь индикатор и произойдет выключение шагового двигателя. В этом случае необходимо попробовать повторить запуск процедуры подвода повторным нажатием кнопки «Landing».

Пусть удалось выполнить успешный подвод при заданном значении «SPoint», т.е. удалось установить состояние, в котором следящая система поддерживает уровень сигнала «FB» равным заданному «SPoint», а сканер находится в пределах возможного интервала выдвижения. На индикаторе выдвижения сканера красная линия занимает промежуточное положение. После этого можно продолжить процедуру подвода.

5.5.1.4. Продолжение процедуры автоматического подвода

Далее необходимо сделать попытку уменьшить величину параметра «SPoint». Уменьшение величины параметра «SPoint» можно производить при помощи окна-регулятора, которое открывается при нажатии кнопки «Set Point» в окне «Probe» (рис.5.5-6) или кнопки SP в верхней строке главного окна программы, или кнопки SPoint в блок-схеме SPM.

При этом возможны два случая: 1) при уменьшении величины «SPoint» красная линия практически не растет, 2) при уменьшении величины «SPoint» длина красной линии выдвижения сканера будет увеличиваться и удлинится до крайнего положения.

Реализация первого случая, т.е. случая, когда при уменьшении величины «SPoint» линия выдвижения не растет, соответствует завершению процедуры подвода.

Тот факт, что при попытке уменьшения величины «SPoint» красная линия выдвижения сканера перестает расти, указывает на то, что мы наконец-то подвели зонд достаточно близко к поверхности. Зонд начинает ударять по поверхности и при дальнейшем приближении зонда амплитуда его колебаний ограничивается из-за соприкосновения с поверхностью.

Таким образом, если реализован первый случай, то процедура подвода завершена.

Второй случай соответствует тому, что процедуры подвода не завершена.

Если реализуется второй случай, то уменьшаем величину «SPoint» до такого уровня, при котором красная линия выдвижения сканера удлиняется до крайнего правого положения. Значение «SPoint», при котором красная линия удлиняется до крайнего положения, устанавливаем в качестве нового уровня «SPoint».

Затем вновь запускаем процедуру автоматического подвода в результате нажатия на кнопку «Landing», уже для нового уровня «SPoint». Соответственно, подвод для нового уровня «SPoint» считается успешным, если удается получить состояние, при котором красная линия выдвижения занимает промежуточное положение.

После этого процедура уменьшения уровня «SPoint» и последующая процедура запуска автоматического подвода при каждом новом уровне «SPoint» повторяются до тех пор, пока при попытке уменьшения уровня «SPoint» красная линия перестает расти, то есть до реализации первого случая.

Если вы производили подвод при выключенной кнопке «Fine», то после успешного завершения процедуры подвода необходимо перевести механическую систему в режим люфта. Для этого необходимо в меню «Approach» перейти в ярлык «Mover» в результате откроется окно «Mover» (рис.5.5-18).

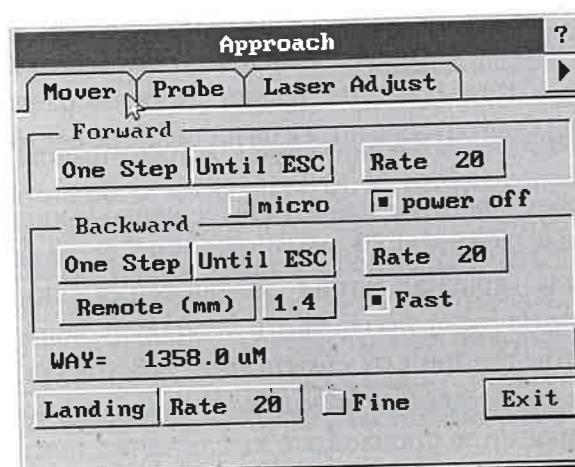


Рис.5.5-18

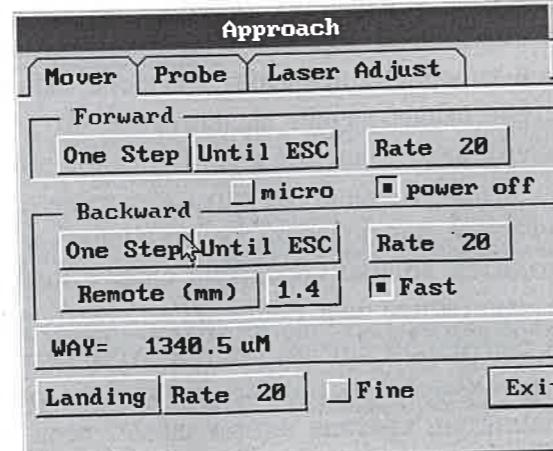


Рис.5.5-19

В этом окне необходимо нажать несколько (5-10) раз кнопку «Backward One Step» (рис.5.5-19). При этом шаговый двигатель при каждом нажатии будет делать шаг назад.

При подводе при включенной кнопке «Fine», после успешного завершения процедуры подвода перевод механической системы в режим люфта производится автоматически.

Далее следует перейти к пункту 5.5.2. Следующий ниже пункт 5.5.1A соответствует процедуре ручного подвода зонда.

5.5.1A. Процедура ручного подвода зонда к образцу

Как указывалось выше, в СЗМ головке предусмотрен ручной подвод зонда, который может быть использован только при работе СЗМ головки в режиме отдельно стоящего СЗМ микроскопа.

В этом случае предполагается, что проведена предварительная подготовка СЗМ головки. (Т.е. предполагается, что плоскость СЗМ головки и плоскость образца установлены параллельно, установлена необходимая длина ног СЗМ головки, проведена настройка лазера и фотодиода, СЗМ головка установлена над образцом, выполнены необходимые переключения в блок-схеме управления SPM и другие операции по подготовке к работе в полуконтактном режиме)

Процедуру ручного подвода зонда к образцу можно условно разделить на следующие операции:

- 1) установка начального значения параметра «Set Point»,
- 2) включение обратной связи,
- 3) начальный этап процедуры ручного подвода,
- 4) продолжение процедуры ручного подвода.

Более подробно описание этих операций приведено ниже.

5.5.1.1A. Установка начального значения параметра «Set Point»

Эта процедура полностью аналогична процедуре установки начального значения параметра «Set Point» в случае автоматического подвода, которая приведена выше в пункте 5.5.1.1 «Установка начального значения параметра Set Point».

5.5.1.2A. Включение обратной связи

После установки начального значения «Set Point» включите обратную связь.

Включение обратной связи производится либо нажатием кнопки «FB» (рис.5.5-1A) в верхней строке главного окна программы, либо при помощи блок-схемы управления SPM путем замыкания петли обратной связи переключателем «I» .



Рис.5.5-1A

После включения обратной связи пьезосканер (а вместе с ним и зонд) выдвигается на максимальную величину по оси Z в направлении образца.

В исходном состоянии зонд находится на достаточно большом расстоянии от образца (около 1 мм) по сравнению с величиной максимально возможного перемещения пьезосканера (около 3 мкм) по оси Z.

Поэтому, хотя зонд и приближается к образцу в результате полного выдвижения сканера, расстояние между зондом и образцом остается еще достаточно большим для того, чтобы между ними возникло какое-либо взаимодействие, поэтому уровень текущего сигнала «FB» не меняется, разница между уровнем «FB» и «Set Point» остается большой.

Выдвижение сканера регистрируется по показаниям аналогового индикатора удлинения сканера, который находится в верхней строке главного окна программы между кнопкой включения индикатора фотодиода и кнопкой «FB» (рис.5.5-2A). Степень выдвижения сканера характеризуется длиной красной линии.



Рис.5.5-2А

При полном выдвижении сканера красная линия заполняет весь индикатор (рис.5.5-3А).

5.5.1.3А. Начало процедуры ручного подвода зонда к образцу

После включения обратной связи и выдвижения сканера к образцу можно начинать подвод зонда к образцу.

Подвод производится вручную при помощи винта подвода (рис.5.5-4А). Винт подвода является одной из трех ног-опор SPM головки и имеет, в отличие от двух других, ручку. Вращение этого винта позволяет перемещать SPM головку, а вместе с ней и зонд, относительно образца в вертикальном направлении.

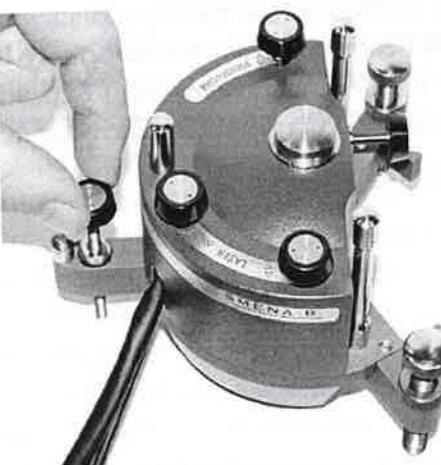


Рис. 5.5-4А

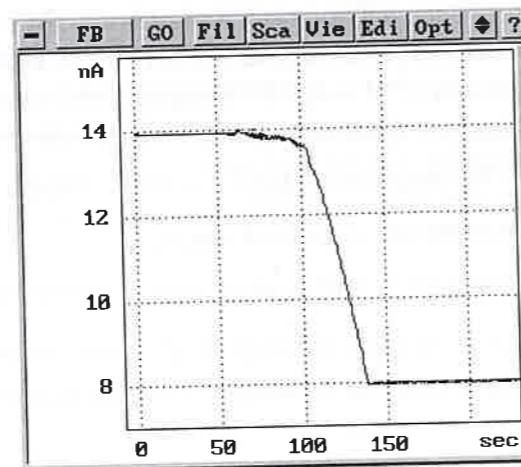


Рис.5.5-5А

Направление вращения определяет направление перемещения. При подводе вращение винта производится против часовой стрелки. Поворот винта на 360 градусов перемещает зонд примерно на 120 микрон.

При подводе, вращая винт, наблюдаем за изменениями сигнала «FB» в окне осциллографа «FB» и за состоянием индикатора выдвижения сканера.

Рис.5.5-5А показывает, как обычно изменяется сигнал «FB» (т.е. амплитуда колебаний кантилевера) от времени в процессе подвода при приближении кантилевера к поверхности. Увеличение времени соответствует приближению к поверхности.

Величина сигнала сначала не изменяется. Затем при приближении кантилевера на достаточно близкое расстояние к образцу амплитуда колебаний кантилевера начинает уменьшаться и, соответственно, начинает уменьшаться и текущее значение сигнала «FB».

С этого момента необходимо вращать винт более медленно, наблюдая за состоянием индикатора выдвижения сканера.

Первый участок зависимости **FB** - расстояние от поверхности (т.е. амплитуда колебаний - расстояние от поверхности), на котором начинается уменьшение амплитуды с уменьшением расстояния, связан не с началом взаимодействия острия и поверхности, а обусловлен демпфирующим эффектом воздушной прослойки между балкой кантилевера и поверхностью. Этот участок очень растянут и неустойчив.

При дальнейшем приближении амплитуда колебаний будет продолжать уменьшаться и в какой-то момент начинается участок с более резким уменьшением амплитуды колебаний. Этот второй участок как раз и соответствует началу взаимодействия острия зонда с поверхностью.

В тот момент, когда уровень текущего сигнала «FB» уменьшится до значения «SPoint», необходимо прекратить вращение винта подвода.

Этот момент мы сразу зарегистрируем по индикатору выдвижения сканера. При этом возможны два случая: 1) красная линия выдвижения сканера уменьшается до нуля (рис.5.5-6А); 2) красная линия уменьшается и занимает некоторое промежуточное положение на индикаторе (рис.5.5-7А).



Рис.5.5-6А



Рис.5.5-7А

В первом случае мы проскачиваем рабочую точку из-за слишком быстрого приближения зонда к образцу. При этом после прохождения «SPoint» мы по инерции перемещаем зонд на слишком большое расстояние, которое больше максимального диапазона выдвижения сканера.

Следящая система, пытаясь установить уровень сигнала «FB» равным уровню «SPoint», отодвигает зонд от поверхности образца на максимально возможное расстояние, т.е. полностью втягивает сканер, но этого перемещения оказывается недостаточно, чтобы компенсировать изменение сигнала «FB», величина которого стала меньше уровня «SPoint».

Если реализован первый случай, то необходимо слегка повернуть винт подвода в обратную сторону (по часовой стрелке), чтобы немного отвести зонд от образца.

При этом текущий уровень сигнала должен увеличиться и достигнуть значения «SPoint». Соответственно, начнет работать следящая система, сканер должен будет выдвинуться, что должно будет отобразиться на индикаторе состояния сканера, как появление и рост красной линии. Если при этом удалось реализовать второй случай, т.е. красная линия выдвижения займет промежуточное положение на индикаторе, можно продолжить процедуру подвода.

В противном случае, т.е. в случае полного выдвижения сканера (красная линия занимает весь индикатор), необходимо вновь начать приближение зонда к поверхности, медленно вращая винт против часовой стрелки.

Особо следует отметить возможную ситуацию, связанную с поломкой кантилевера при подводе. Реально такая ситуация случается крайне редко, но тем не менее иногда случается. При этом после реализации первого случая и при последующей попытке отвести зонд от образца красная линия выдвижения сканера не появляется на индикаторе.

Это соответствует тому, что произошла поломка кантилевера, сигнал «FB» при этом исчезает. Значение «SPoint» становится больше уровня сигнала «FB», поскольку последний просто отсутствует. Соответственно, система обратной связи будет держать сканер в полностью втянутом состоянии. В этом случае необходимо отвести зонд (вернее то, что от него осталось) и заменить кантилевер.

Второй случай соответствует успешному выполнению операции ручного подвода, в результате которого удалось установить состояние нормального функционирования (нормальной работы) следящей системы. Промежуточное положение красной линии на индикаторе соответствует промежуточному положению сканера между крайними состояниями. В этом случае следящая система смогла компенсировать разницу между текущим уровнем «FB» и величиной «SPoint» путем перемещения сканера и при этом она еще имеет возможность поддерживать уровень сигнала «FB» равным «SPoint», поскольку сканер находится в пределах возможного интервала выдвижения.

Именно реализация второго случая необходима для дальнейшего продолжения процедуры подвода.

Пусть удалось выполнить успешный подвод при заданном уровне «SPoint», т.е. удалось установить состояние, в котором следящая система поддерживает уровень сигнала «FB» равным заданному «SPoint», а сканер находится в пределах возможного интервала выдвижения. На индикаторе выдвижения сканера красная линия занимает промежуточное положение. После этого можно продолжить процедуру подвода.

5.5.1.4A. Продолжение процедуры ручного подвода

Далее необходимо сделать попытку уменьшить величину параметра «SPoint». Уменьшение величины параметра «SPoint» можно производить при помощи окна-регулятора, которое открывается при нажатии кнопки «SP» в верхней строке главного окна программы, или кнопки «SPoint» на блок-схеме SPM, или кнопки «Set Point» в окне «Probe»

При этом возможны два случая: 1) при уменьшении величины «SPoint» красная линия практически не растет, 2) при уменьшении величины «SPoint» длина красной линии выдвижения сканера будет увеличиваться и удлиняться до крайнего положения.

Реализация первого случая, т.е. случая, когда при уменьшении величины «SPoint» линия выдвижения не растет, соответствует завершению процедуры подвода.

Тот факт, что при попытке уменьшения величины «SPoint» красная линия выдвижения сканера перестает расти, указывает на то, что мы наконец-то подвели зонд достаточно близко к поверхности. Зонд начинает ударять по поверхности и при дальнейшем приближении зонда амплитуда его колебаний ограничивается из-за соприкосновения с поверхностью.

Таким образом, если реализован первый случай, то процедура подвода завершена и следует далее перейти к выполнению пункта 5.5.2.

Второй случай соответствует тому, что процедуры подвода не завершена.

Если реализуется второй случай, то уменьшаем величину «SPoint» до такого уровня, при котором красная линия выдвижения сканера удлиняется до крайнего правого положения. Значение «SPoint», при котором красная линия удлиняется до крайнего положения, устанавливаем в качестве нового уровня «SPoint».

Затем производим ручной подвод зонда при помощи винта подвода согласно процедуре, описанной выше (в 5.5.1.3), уже для нового уровня «SPoint». Соответственно, подвод для нового уровня «SPoint» считается успешным, если удается получить состояние, при котором красная линия выдвижения занимает промежуточное положение.

После этого процедура уменьшения уровня «SPoint» и последующая процедура ручного подвода при каждом новом уровне «SPoint» повторяются до тех пор, пока при попытке уменьшения уровня «SPoint» красная линия перестает расти, т.е. до реализации первого случая.

5.5.2. Выбор рабочей точки

Зависимость амплитуды колебаний кантилевера (сигнала пропорционального ей) от расстояния имеет характерный вид, изображенный на рис.5.5-20.

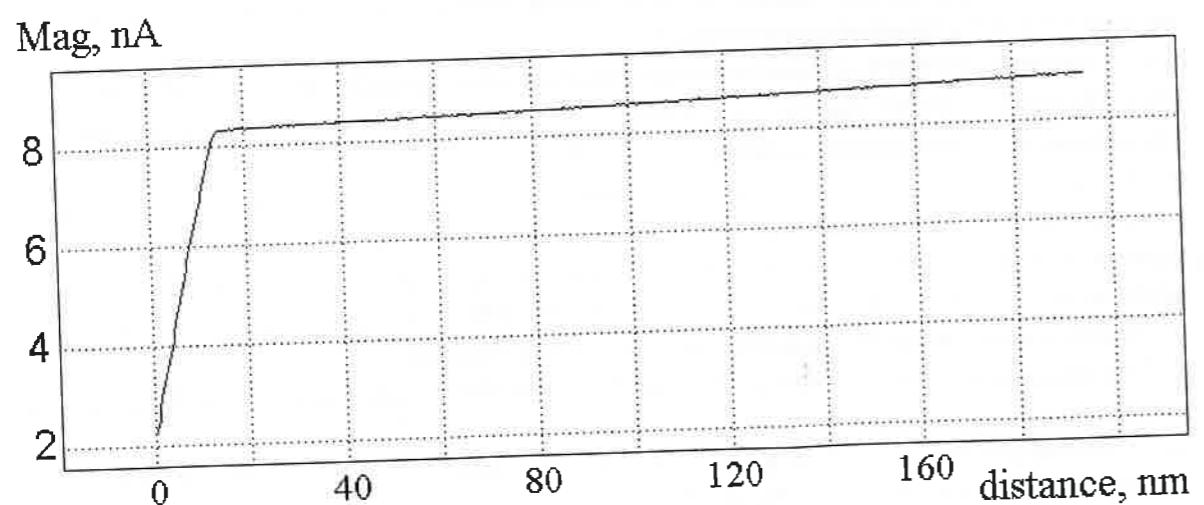


Рис.5.5-20

Если рассмотреть эту зависимость, на ней можно выделить некоторую характерную точку, в которой меняется характер зависимости. В выше этой точки амплитуда изменяется очень медленно при изменении расстояния, а ниже очень быстро. Заметим, что каждое установленное нами значение «SPoint» соответствует определенной величине амплитуды колебаний (вернее величине сигнала, пропорционального амплитуде колебаний), поскольку обратная связь поддерживает сигнал равным установленному уровню «SPoint».

Значение «SPoint», при котором красная линия выдвижения сканера перестает расти при попытке уменьшения величины «SPoint», как раз и является характерной точкой на кривой зависимости амплитуды колебаний от расстояния между зондом и поверхностью. В этой точке зонд начинает «стучать» по поверхности и, чем больше мы уменьшаем величину «SPoint», тем сильнее он стучит и, тем сильнее ограничивается амплитуда колебаний.

Значения «SPoint», начиная с уровня характерной точки и ниже, соответствуют полуконтактному режиму. Именно из этого интервала можно выбирать значение «SPoint» в качестве рабочей точки для работы в полуконтактном режиме.

Выбор оптимальной величины рабочей точки зависит как от свойств исследуемого объекта, так и от ряда других факторов, и лучше всего ее подбирать экспериментально.

В качестве начального уровня рабочей точки для «SPoint» можно рекомендовать установить величину «SPoint», равную примерно 0.8-0.9 от уровня характерной точки. Далее в процессе сканирования можно подобрать оптимальное значение.

5.5.2.1. Грубая оценка величины амплитуды колебаний кантилевера

После определения значения характерной точки, т.е. значения «SPoint», при котором красная линия выдвижения сканера перестает расти при попытке уменьшения величины «SPoint», можно сделать грубую оценку величины амплитуды колебаний кантилевера.

Для этого необходимо запомнить значение координаты Z, при которой величина «SPoint» равна значению характерной точки, затем уменьшить значение «SPoint» в два раза и по показаниям индикатора координаты Z определить изменение координаты Z. Это изменение координаты Z соответствует примерно половине амплитуды колебаний кантилевера.

Для того, чтобы более точно определить коэффициент пропорциональности между амплитудой колебаний и измеряемым сигналом, необходимо произвести измерение зависимости сигнала от расстояния между зондом и образцом. Процедура измерения такой зависимости приводится ниже в разделе 6.1.

5.5.3. Выбор коэффициента усиления обратной связи

После подвода образца и установки рабочей точки производится подбор величины коэффициента усиления обратной связи.

Процедура подбора коэффициента усиления обратной связи выполняется следующим образом.

Откройте блок-схему управления SPM нажатием кнопки во второй строке главного окна программы.

Откройте окно с регулятором «FB Gain» при помощи нажатия кнопки «FB Gain» (рис.5.5-21, рис.5.5-22). Увеличивая величину FB Gain, следите за уровнем сигнала FB при помощи программного осциллографа.

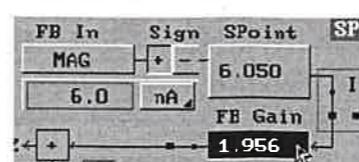


Рис.5.5-21

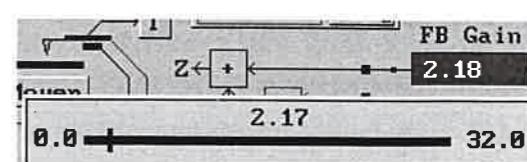


Рис.5.5-22

Определите значение коэффициента «FB Gain», при котором начинается генерация. Начало генерации регистрируется по резкому увеличению переменной составляющей сигнала FB (рис.5.5-23).

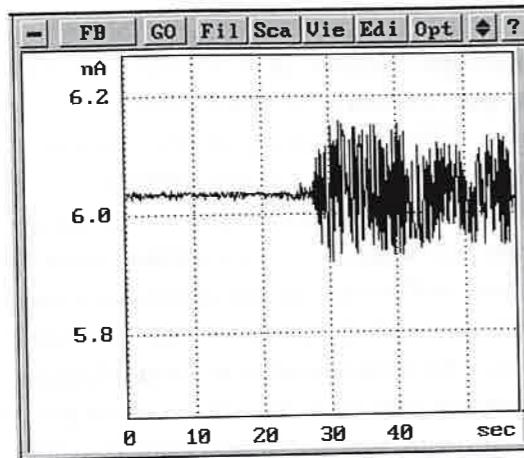


Рис.5.5-23

В качестве рабочей величины коэффициента усиления «FB Gain» рекомендуется установить величину на уровне 0.5-0.7 от значения коэффициента усиления «FB Gain», при котором начинается генерация сигнала «FB».

5.6. Установка параметров сканирования

5.6.1. Окно управления параметрами сканирования

Для установки параметров сканирования откройте окно управления параметрами сканирования (рис.5.6-1).

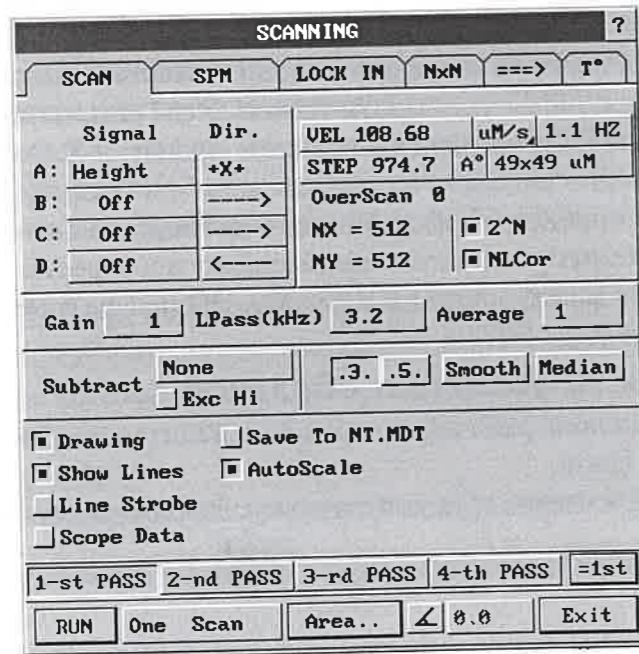


Рис.5.6-1

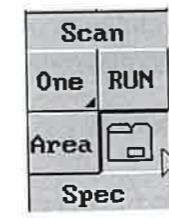


Рис.5.6-2

Окно управления параметрами сканирования открывается последовательным нажатием:

- 1) «Operation» в меню окна SPM;
- 2) «Scanning» в открывшемся меню;
- 3) «SCAN» в заголовке открывшегося окна.

Окно управления параметрами сканирования можно также открыть нажатием кнопки на панели инструментов в той ее части, которая имеет заголовок «Scan» и относится к управлению параметрами сканирования (рис.5.6-2), и последующим нажатием кнопки «SCAN» в заголовке открывшегося окна. (Панель инструментов расположена с левой стороны главного окна программы.)

5.6.2. Процедура установки параметров сканирования

Процедура установки параметров в окне управления параметрами сканирования является общей для всех элементов графического интерфейса управления. Для установки необходимо найти и нажать необходимую кнопку. В результате открывается меню с сигналами или состояниями или окно с регулятором.

Например, необходимо изменить величину шага сканирования. Нажимаем кнопку-индикатор «Step...» (рис.5.6-3) и в открывшемся окне регулятора устанавливаем необходимое значение (рис.5.6-4), которое фиксируется после нажатия левой клавиши мыши.

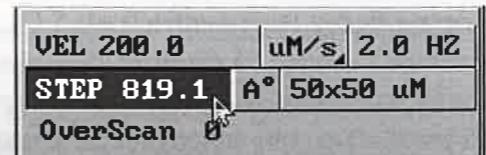


Рис.5.6-3



Рис.5.6-4

Или, например, необходимо включить канал А на измерение сигнала «Height». Нажимаем кнопку выбора сигнала канала А (рис.5.6-5), в открывшемся меню сигналов выбираем сигнал «Height» (рис.5.6-6) и нажатием левой кнопки мыши выбранный сигнал фиксируем (рис.5.6-7).

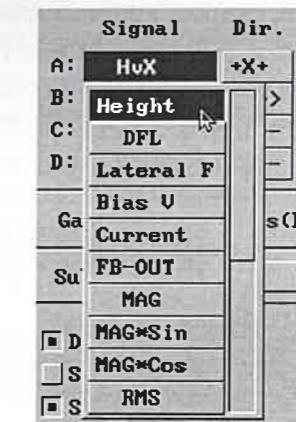


Рис.5.6-5

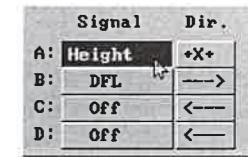


Рис.5.6-6

Рис.5.6-7

5.6.3. Скорость сканирования

Скорость сканирования является параметром, который оказывает существенной влияние на качество получаемого изображения.

Скорость сканирования устанавливается при помощи кнопки-индикатора «Vel ...» (рис.5.6-8), на которой отображается текущая величина скорости.

Единицы измерения скорости отображаются на соседней кнопке, расположенной справа. При помощи этой кнопки можно изменить единицу измерения скорости, которая может быть установлена либо в ангстремах /сек либо в микронах/сек.

Для установки необходимой единицы измерения маркер ставится на нижний правый уголок кнопки (рис.5.6-9) и нажимается левая кнопка мыши (можно просто нажать кнопку и подержать в нажатом состоянии некоторое время). В результате открываются две кнопки (рис.5.6-10), при помощи которых и производится соответствующий выбор единиц измерения скорости.

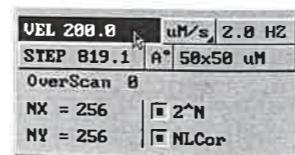


Рис.5.6-8

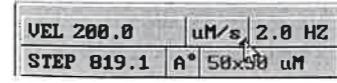


Рис.5.6-9

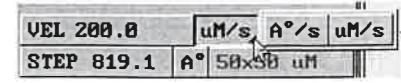


Рис.5.6-10

5-30

Руководство пользователя СЗМ Solver BIO Cell

Справа от кнопки, отображающей единицу измерения скорости, находится индикатор, в котором отображается частота сканирования строк (рис.5.6-8, 5.6-9), соответствующая установленной скорости сканирования.

Для изменения величины скорости сканирования необходимо нажать на кнопку «Vel ...» и открывшемся окне регулятора устанавливаем необходимое значение.

Возможный интервал регулировки скорости зависит от размеров области сканирования.

Чем больше размер области, тем больше верхнее значение скорости.

В качестве начальной величины скорости сканирования можно рекомендовать установить величину, при которой сканирование одной строки будет происходить примерно за 0.5-2 сек., т.е. частота сканирования строк будет составлять 2 - 0.5 Гц.

Выбор оптимального значения скорости сканирования зависит от свойств поверхности исследуемого объекта, размеров области сканирования, внешних условий. Поверхность с гладким рельефом можно сканировать с более высокой скоростью, чем поверхность, имеющую более резкий рельеф и значительные перепады по высоте.

Скорость можно регулировать непосредственно в процессе сканирования, подбирая оптимальную величину. Эта процедура описывается ниже в пункте 5.7.2.

5.6.4. Размеры области сканирования, шаг и число точек сканирования

Максимальный размер области сканирования СЗМ головки составляет 50x50 мкм или 90x90 мкм (в зависимости от модификации используемого сканера).

Размер области сканирования можно задавать при помощи кнопки «Area», расположенной в нижней строке окна управления параметрами сканирования (рис.5.6-11) и аналогичной кнопкой «Area», расположенной на панели инструментов, в той ее части, которая имеет заголовок «Scan» и относится к управлению параметрами сканирования (рис.5.6-12).



Рис.5.6-11

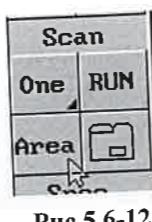


Рис.5.6-12

В этом случае при изменении размеров области сканирования автоматически изменяется величина шага сканирования. И, наоборот, при изменении шага сканирования, при заданной величине точек сканирования изменяются размеры области сканирования.

Величина шага сканирования задается кнопкой-индикатором «Step...» (рис.5.6-13, 5.6-14), на которой отображается текущее значение шага сканирования. Единицей измерения является ангстрем, что отображается на индикаторе справа от кнопки «Step...».

Еще правее находится индикатор, в котором отображается размер области сканирования (в микронах), соответствующий установленному шагу и числу точек по осям X, Y.

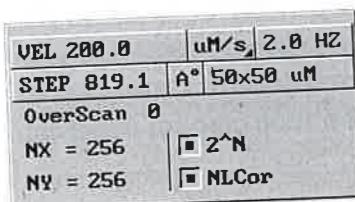


Рис.5.6-13

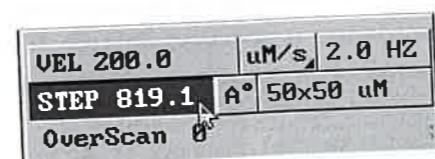


Рис.5.6-14

Число точек скана по осям X и Y задается, соответственно, «NX=...» «NY=...», показанными на рис.5.6-13.

При включенной кнопке « 2^N » (рис.5.6-13) размеры сторон скана в точках уменьшаются автоматически до ближайшего числа вида 2 в степени N.

Если кнопка « 2^N » выключена, то по обеим осям можно установить любое число точек сканирования в интервале от 16 до 8000, при условии, что произведение этого числа на величину шага сканирования не превышает размер максимальной области сканирования.

В противном случае максимальное значение числа точек ограничивается величиной, равной отношению максимального размера области сканирования к установленной величине шага сканирования.

В случае образца, о свойствах поверхности которого ничего не известно, можно рекомендовать начинать сканирование с области, имеющей небольшие размеры, например (0.5÷1) мкм на (0.5÷1) мкм.

По результатам сканирования небольшой области можно подбирать и устанавливать оптимальные значения таких параметров, как величина рабочей точки, скорость сканирования, коэффициент обратной связи. Затем можно увеличивать область сканирования до средних размеров, примерно 10÷20 мкм.

При выборе и установке размеров предполагаемой области сканирования можно рекомендовать проверить, достаточно ли диапазона сканера по оси Z для его нормальной работы на выбранном участке поверхности.

Эту операцию можно производить после того, как произведен подвод зонда к образцу, выбрана рабочая точка и установлены параметры сканирования.

После подвода, зонд находится в центре выбранного участка, а в других областях выбранного участка, особенно в углах, большой рельеф или наклон образца могут привести к тому, что диапазона сканера по оси Z может оказаться недостаточно.

Это можно проверить с помощью инструмента выбора площади сканирования «Area». В случае если устанавливать площадь сканирования через этот инструмент с опцией «Moving», при движении рамки устанавливаемой зоны сканирования зонд также двигается.



Рис. 5.6-15

Для проверки диапазона сканера нужно, медленно (что очень важно) двигая, установить центр рамки поочередно в каждый из углов намеченной площади сканирования, наблюдая за цветной полоской индикатора выдвижения сканера по оси Z.

Если при движении рамки по выбранной площади цветная полоска все время остается в рабочем диапазоне, это означает, что диапазона сканера хватит во всех точках.

Если цветная полоска в какой-либо области предполагаемого поля сканирования выдвигается на всю длину, в данной области (из-за общего наклона образца или слишком глубокой ямы в данном месте) при сканировании топография не пропишется.

Наиболее опасная ситуация, когда цветная полоска в какой-либо области исчезает совсем. Это означает, что сканер уменьшился до предела, пытаясь удержать величину сигнала обратной связи равной значению «SPoint», но из-за общего наклона или слишком высокого бугра его диапазона недостаточно. В этом случае острье кантилевера может сломаться.

Если во время инспекции предполагаемого поля сканирования цветная полоска укорачивается до 1/6 – 1/8 своей длины, ограничьте поле сканирования так, чтобы данный участок в него не попал.

5.6.5. Режим сканирования

Режим сканирования устанавливается второй кнопкой в нижней строке окна управления параметрами сканирования (рис.5.6-16).



Рис.5.6-16

Необходимо установить режим «One Scan», как показано на приведенном рисунке. В режиме «One Scan» будет производиться однократное сканирование выбранной области. Кроме указанного возможны также следующие режимы сканирования:
«Many Scans» - многократное сканирование выбранной области, которое будет производиться до прерывания процесса нажатием «ESC»;

«NxN Scans» - сканирование со смещением;

«Move Scans» - сканирование со смещением в заданном направлении. Эти специальные режимы рассмотрены более подробно в описании программы.

5.6.6. Коррекция нелинейности перемещения сканера (кнопка «NLCor»)

Включение и выключение коррекции нелинейности перемещения сканера производится кнопкой «NLCor» (рис.5.6-17). Данная кнопка должна находиться во включенном состоянии, как это показано на рисунке.

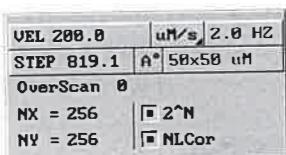


Рис.5.6-17

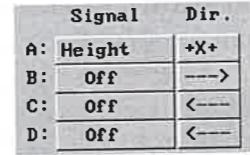


Рис.5.6-18

5.6.7. Каналы измерения: установка сигналов, направления сканирования

Прибор имеет четыре измерительных канала, к каждому может быть подключен определенный сигнал, и при сканировании будет производиться формирование данных изображения установленных сигналов.

В блоке измерительных каналов установите измерительные каналы А, В, С и D в состояние, показанное на рис.5.6-18.

Как видно из приведенного рис.5.6-18, сигнал «Height» включен на вход измерительного канала А, направление сканирования (Dir) выбрано +X+. Остальные каналы (каналы В, С и D) выключены.

Кнопка «Dir» каждого измерительного канала активируется только при включенном канале. Если канал выключен, то не имеет значения что установлено в кнопке «Dir» этого канала.

При сканировании данные изображения высоты (сигнал «Height») будут отображаться в окне SPM канала изображения А.

Буква «X» означает, что быстрое сканирование будет происходить вдоль оси X. Знак «+» перед буквой «X» означает, что быстрое сканирование будет происходить в положительном направлении, знак «+» после буквы «X» означает, что медленное сканирование (сканирование по оси Y) будет также происходить в положительном направлении.

Следует отметить, что канал А является выделенным относительно других каналов. Именно в этом канале задается направление сканирования. В других каналах задается только направление считывания сигналов.

Замечание 5.6-1. В настоящем разделе при описании функций кнопок блока измерительных каналов приведен только тот минимум, который необходим для работы в режиме измерения топографии. Более подробное описание функций кнопок блока измерительных каналов приведено в главе 7, где рассматривается многопроходный режим работы прибора.

5.6.8. Коэффициент усиления предварительного усилителя АЦП, фильтр низких частот

Значения таких параметров, как коэффициент усиления (Gain) предварительного усилителя АЦП, частота среза фильтра низких частот (LPass (kHz)) и число измерений в каждой точке (Average) рекомендуется установить, как показано на рис.5.6-19:

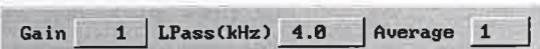


Рис.5.6-19

Коэффициент усиления Gain = 1 соответствует самой «грубой» чувствительности АЦП. Если сигнал высоты изменяется незначительно, то коэффициент усиления можно увеличить, что достигается переключением в положение 10 или 100.

При увеличении коэффициента усиления сигнал измеряется с более мелким шагом, однако при этом уменьшается измерительный интервал АЦП, в пределах которого возможно измерение сигнала. При большой чувствительности измеряемый сигнал может оказаться больше возможного измерительного интервала АЦП в некоторых областях сканируемой площади, что приведет к ‘обрезанию’ сигнала в этих областях.

Фильтр низких частот служит для подавления высокочастотных шумов. Частоту среза рекомендуется установить равной 2-4 kHz.

Увеличение числа измерений в каждой точке (Average) уменьшает скорость сканирования, особенно для малых полей (менее 1 мкм), но улучшает качество полученного результата.

Следует отметить, что предварительный усилитель и фильтр находятся только в цепях каналов А и канала С и, соответственно, отсутствуют в цепях каналов В и D.

5.6.9. Кнопки «Drawing», «Show Lines», «Scope Data», «Line Strobe», «AutoScale», «Save To NT. MDT»

Кнопки «Drawing», «Show Lines» и «Scope Data» (рис.5.6-20) имеют отношение непосредственно к процессу сканирования, они включают или отключают отображение соответствующих сигналов при сканировании образца.

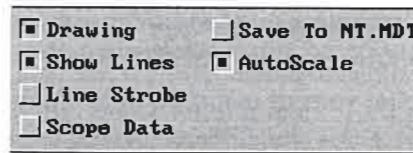


Рис.5.6-20

Эти кнопки должны быть поставлены в состояние, показанное на рис.5.6-20, где кнопка «Scope Data» выключена, а кнопки «Drawing» и «Show Lines» включены.

Кнопка «Drawing» включает или отключает отображение в окне SPM сигналов, поступающих из соответствующих измерительных каналов (канала А, или каналов А и В и т.д.). Если кнопка выключена, то сканируемое изображение не будет отображаться в окне SPM.

Кнопка «Show Lines» включает и выключает отображение в осциллографе «Ext» профиля изображения сигнала канала А вдоль линии сканирования. При сканировании переключение осциллографа «Ext» на сигналы с других каналов возможно при помощи строки прямого управления (раздел 5.7.2).

Кнопка «Scope Data» включает и выключает отображение сигналов в других программных осциллографах при сканировании. Так, если эта кнопка выключена, то при сканировании осциллографы не будут работать, даже если они включены. Данную кнопку рекомендуется установить в выключенное состояние. В этом случае при сканировании не производится измерение сигналов, подключенных к осциллографам. Это позволяет уменьшить помехи, связанные с переключением АЦП, а также позволяет более экономно использовать машинное время.

Кнопка «Line Strobe» включает или выключает подачу импульсного сигнала в начале сканирования каждой строки на внешний выход для синхронизации внешнего оборудования с процессом сканирования.

Кнопка «AutoScale» включает и выключает автоматическое масштабирование сигнала, отображаемого при сканировании в осциллографе «Ext».

Кнопка «Save To NT. MDT» включает и выключает автоматическое сохранение получаемых данных в файле NT. MDT.

5.6.10. Процедура вычитания (кнопка «Subtract», кнопка «Exc Hi»)

Кнопка «Subtract» (рис.5.6-21) позволяет включать или выключать процедуру вычитания. Она имеет следующие состояния (рис.5.6-22): «None», «Plane», «1st-Slope», «2nd-Slope», «3rd-Slope» и «4th-Slope».

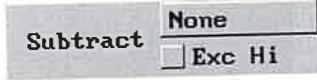


Рис.5.6-21

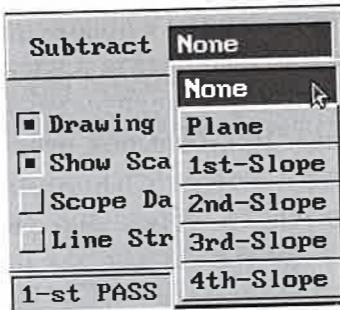


Рис.5.6-22

«None» - соответствует выключеному состоянию;

«Plane» - сразу после снятия скана производится операция вычитания плоскости;

«1st-Slope» - после снятия каждой строки производится вычитание наклона первого порядка;

«2nd-Slope» - после снятия каждой строки производится вычитание кривой второго порядка;

«3rd-Slope» - после снятия каждой строки производится вычитание кривой третьего порядка;

«4th-Slope» - после снятия каждой строки производится вычитание кривой четвертого порядка.

Если кнопка «Exc Hi» выключена, то при выполнении процедуры вычитания, при расчете вычитаемой кривой или плоскости, принимаются во внимание все просканированные точки поверхности.

Если кнопка «Exc Hi» включена, то при выполнении процедуры вычитания, при расчете вычитаемой кривой или плоскости, исключаются участки поверхности, содержащие «пики» и «провалы».

5.6.11. Параметры для сканирования тестового образца типа решетки

Для сканирования тестового образца типа решетки рекомендуется установить следующие параметры:

- «FB» — «Mag»;
- «Vel...» — 50 $\mu\text{m}/\text{s}$;
- «NX x NY» — 256 x 256;
- «Step ...» — максимальный;
- «NLCorr» — on;

Каналы:

A - «Height»,	«Dir» — «+X+»;
B - «Phase 1»,	«Dir» — «→»;
C - off;	
D - off;	
«Gain»	— 1;
«Lpass»	— 4 kHz;
«Average»	— 1;
«Drawing»	— on;
«Show Lines»	— on;
«Scope Data»	— off;
«Subtract»	— none;
«SP»	— по результатам подвода;
«FB Gain»	— по результатам подвода.

Выберите режим одиночного сканирования «One scan».

5.7. Сканирование

5.7.1. Запуск сканирования

После того как выполнены подготовительные операции, произведен подвод зонда к образцу, выбрана рабочая точка, установлены параметры сканирования, можно начинать сканирование поверхности образца.

Запуск сканирования производится нажатием кнопки «RUN», расположенной на панели инструментов, в той ее части, которая имеет заголовок «Scan» и относится к управлению параметрами сканирования (рис.5.7-1), либо аналогичной кнопкой «RUN», расположенной в нижней строке окна управления параметрами сканирования (рис.5.7-2).

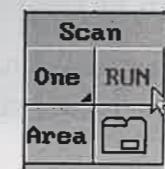


Рис.5.7-1



Рис.5.7-2

После этого начинается построчное сканирование зондом поверхности образца.

Одновременно изображение рельефа (высоты) сканируемой поверхности начнет построчно отображаться в окне канала A. Соответственно, если окно SPM включено на отображение двух каналов A и B, в окне канала B будет отображаться изображение сигнала, включенного на вход канала B. Это сигнал фазы («Phase 1») в нашем случае.

При сканировании управление прибором возможно через строку (меню) прямого управления при сканировании.

5.7.2. Стока управления при сканировании

После начала сканирования на месте верхнего меню появляется новая строка, это строка управления при сканировании (рис. 5.7-3).

UEL = 1133422 FBgn = 8.597 SP = 8.35 BV = -0.0 RESTART AREA PAUSE A: SUBPLANE REDRAV GAMMA ?

Рис.5.7-3

Управление прибором при сканировании производится только через эту строку. Она позволяет в процессе сканирования изменять основные параметры: скорость сканирования, коэффициент усиления обратной связи, величину рабочей точки, изменять размер и положение области сканирования и выполнять некоторые другие функции.

Строка управления при сканировании состоит из кнопок, каждая из которых соответствует определенному параметру или определенной функции.

Первые три кнопки **VEL = 1133422**, **FBgn = 8.597** и **SP = 8.35**, служат для изменения, соответственно, скорости, коэффициента усиления обратной связи и величины рабочей точки. Каждая из этих кнопок содержит цифровой индикатор, который отображает текущее значение параметра, соответствующего данной кнопке.

При запуске сканирования первая кнопка **VEL = 1133422** является выделенной, что соответствует ее включенному состоянию. Выделение необходимой кнопки производится при помощи клавиш клавиатуры «вправо» → и «влево» ←, которые передвигают положение выделяемой кнопки вдоль строки.

Величину параметра, соответствующего выделенной (включенной) кнопке, можно уменьшать и увеличивать при помощи клавиш клавиатуры «вниз» ↓ и «вверх» ↑.

Кнопки **RESTART**, **AREA**, **SUBPLANE**, **PAUSE**, **REDRAW**, **GAMMA** включаются после выделения и последующего нажатия клавиши «Enter».

Кнопка **RESTART** производит повторный запуск сканирования.

Кнопка **AREA** позволяет изменять размеры и положение области сканирования.

Кнопка **SUBPLANE** включает процедуру вычитания наклона плоскости. Параметры вычитаемой плоскости определяются для области, которая уже просканирована к моменту включения кнопки. И далее параметры именно этой плоскости будут вычитаться из всего массива данных.

Кнопка **PAUSE** останавливает развертку по медленной оси, при этом сканирование вдоль быстрой оси продолжается и происходит вдоль одной и той же линии. При включении

кнопки **PAUSE** происходит ее периодическое мигание, что указывает на включенное состояние. Для выключения этой кнопки необходимо повторно нажать на клавишу «Enter».

Во включенном состоянии кнопки **PAUSE** можно пользоваться всеми остальными кнопками строки. Этот режим работы можно использовать для подбора оптимальных параметров, например скорости сканирования.

5.7.3. Подбор оптимальных параметров сканирования

Основными параметрами, оказывающими значительное влияние на качество получаемого изображения поверхности, являются скорость сканирования, величина рабочей точки «SP», коэффициент усиления обратной связи «FB Gain», амплитуда колебаний зонда.

Первые три параметра: скорость сканирования, «SP» и «FB Gain», можно регулировать непосредственно в процессе сканирования, подбирая оптимальную величину при помощи соответствующих кнопок в строке управления при сканировании (пункт 5.7.2).

Скорость сканирования.

Выбор оптимального значения скорости сканирования зависит от свойств поверхности исследуемого объекта, размеров области сканирования, внешних условий. Поверхность с гладким рельефом можно сканировать с более высокой скоростью, чем поверхность, имеющую более резкий рельеф и значительные перепады по высоте.

Скорость сканирования следует уменьшить, когда не прописывается склон бугра или ямы в направлении сканирования.

При работе с мягкими материалами на скане могут возникнуть «затяжки» в направлении сканирования на буграх поверхности. В этом случае рекомендуется уменьшить скорость сканирования, а также увеличить значение «SP» для того, чтобы уменьшить воздействие на образец сканирования.

Коэффициент усиления обратной связи

В качестве рабочей величины коэффициента усиления «FB Gain» рекомендуется установить величину на уровне 0.5-0.7 от значения коэффициента усиления «FB Gain», при

котором начинается генерация сигнала «FB». Процедура подбора коэффициента усиления обратной связи приведена в пункте 5.5.3.

Иногда, после подвода зонда возникает неустойчивый режим работы системы обратной связи типа «генерации», которую не удается устранить путем уменьшения величины коэффициента усиления «FB Gain». Этот тип неустойчивости связан с эффектом «залипания». Данный тип неустойчивости обычно можно устранить в результате увеличения амплитуды колебаний кантилевера. Для этого необходимо выключить обратную связь, увеличить амплитуду колебаний кантилевера и величину параметра «SP» примерно на 30%, затем вновь включить обратную связь.

5.8. Сохранение полученных данных

После завершения сканирования поверхности образца, полученные данные изображения поверхности хранятся в оперативной памяти.

Каждому скану поверхности соответствует отдельный кадр.

Причем, если при сканировании в окне SPM было включено отображение только одного канала A, но было включено измерение кроме канала A и других каналов, то в памяти, кроме кадра, соответствующего данному канала A, будут сформированы кадры, соответствующие данным других включенных каналов.

Нумерация кадров соответствует порядку их получения. Данные, соответствующие спектроскопии (раздел 6.1), также существуют в виде отдельного кадра.

Для записи полученных данных на жесткий диск необходимо установить курсор на кнопку «File» в меню окна SPM (рис.5.8-1).

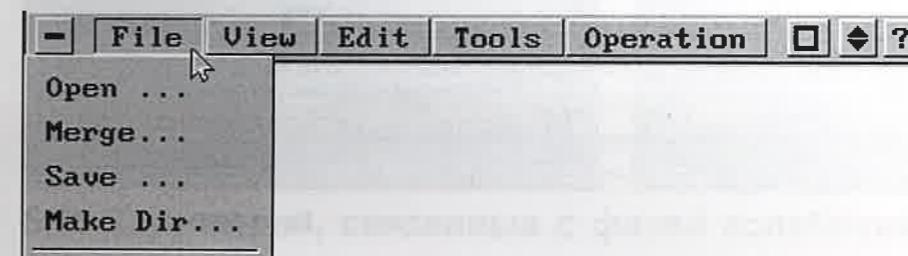


Рис.5.8-1



Рис.5.8-2

В открывшемся меню нажать на «Save» (рис.5.8-2) и записать в виде файла с произвольным названием, имеющим расширение *.MDT (рис.5.8-3).



Рис.5.8-3

Соответственно, опция «Open» из этого же меню (рис.5.8-2) позволяет вызывать ранее записанные файлы.

5.9. Переключение из полуконтактного режима в контактный

Для переключения из полуконтактного режима в контактный необходимо выполнить следующие операции:

- 1) отключить обратную связь;
- 2) выключить модуляцию кантилевера;
- 3) установить на вход обратной связи новый сигнал (сигнал «DFL»), определить текущее значение этого сигнала (по осциллографу FB);

5.9. Переключение из полуконтактного режима в контактный

- 4) установить значение «SP» относительно текущего значения нового сигнала FB (сигнала «DFL»);
- 5) включить обратную связь;
- 6) продолжить работу в контактном режиме;

5.10. Выключение микроскопа

Для выключения микроскопа необходимо:

- 1) Отвести зонд от образца примерно на 2-4 мм.

Чтобы сделать это:

- ◆ откройте меню управления шаговым двигателем «Mover» (рис.5.10-1), последовательно открывая: «Operation» - «Approach» - «Mover»;
- ◆ установите «Remote» на 2-4 мм (рис. 5.10-2) и нажмите кнопку «Remote».

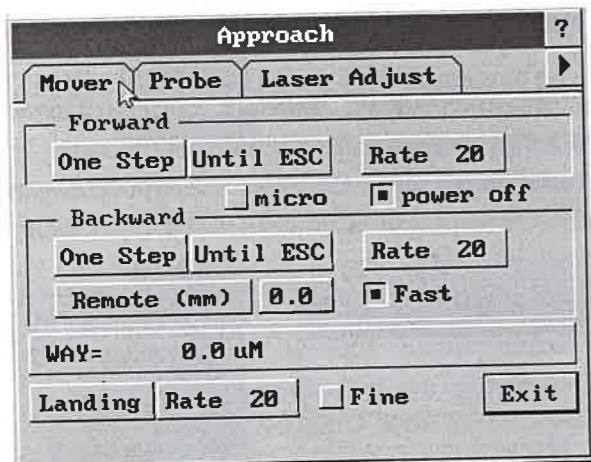


Рис. 5.10-1

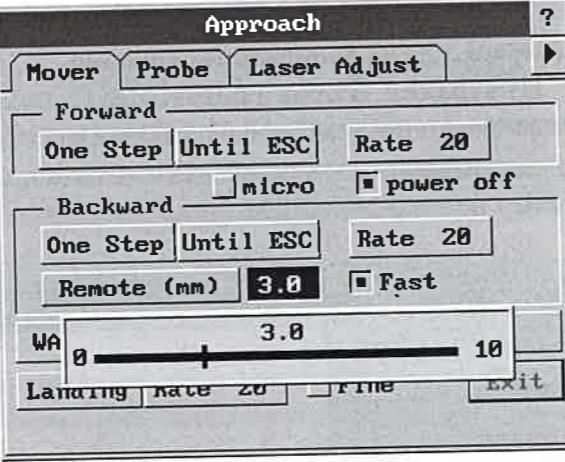


Рис.5.10-2

- 2) Отключить обратную связь нажатием кнопки «FB», которая расположена в верхней строке главного окна программы (пятая справа, рис.5.10-3);



Рис.5.10-3

- 3) Выключить лазер нажатием кнопки , которая расположенной в верхней строке главного окна программы (четвертая слева, рис.5.10-3), кнопка имеет красный цвет во включенном состоянии, черный в выключенном состоянии;
- 4) Выключить питание микроскопа тумблером «сеть» на блоке электроники;
- 5) Выйти из управляющей программы нажатием кнопки «Exit» (рис.5.10-4) в меню, которое открывается при установке курсора на кнопку «Main» в левом углу главного окна программы (рис.5.10-5).



Рис.5.10-4

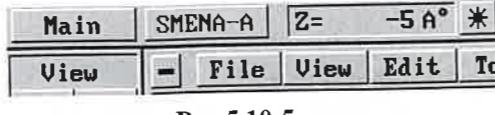


Рис.5.10-5

Можно также выйти из программы нажатием функциональной клавиши F10 (предварительно закрыв все открытые меню с помощью «Esc», т.к. F10 работает только при закрытых меню).

5.11. Метод фазового контраста (Phase Imaging)

5.11.1. Введение

В полуконтактном и бесконтактном режимах сканирование поверхности производится осцилирующим острием зонда, колебания которого возбуждаются при помощи пьезоэлектрического преобразователя (пьезодрайвера кантинлевера). Амплитуда колебаний острия и фаза колебаний относительно возбуждающего напряжения (напряжения генератора пьезодрайвера) являются параметрами, которые зависят от величины взаимодействия колеблющегося острия и поверхности.

Согласно экспериментальному опыту, фаза колебаний является более чувствительной, по сравнению с амплитудой, к изменениям взаимодействия зонда и поверхности, в частности, к изменениям, связанным с локальными различиями поверхностной адгезии и вязкоупругости.

Получение изображения сигнала фазы параллельно с топографическим изображением поверхности позволяет получить некоторую дополнительную информацию о деталях поверхностной структуры. Данная методика получила название «метода фазового контраста» (Phase Imaging).

В случае достаточно гладкой поверхности метод фазового контраста (Phase Imaging) обеспечивает контраст деталей поверхностной структуры объекта, связанной с локальными различиями поверхностной адгезии и вязкоупругости.

Прибор обеспечивает возможность получения изображения сигнала фазы, а также сигналов связанных с фазой колебаний зонда, как 1) параллельно с измерением топографии поверхности, так и 2) последовательно в результате чередования построчного измерения топографии поверхности и последующего измерения сигнала фазы. Последний случай рассматривается в разделах, посвященных многопроходным методикам, микроскопии магнитных сил, микроскопии электрических сил.

В данном разделе рассматривается первый случай, когда изображение сигнала фазы (или сигналов связанных с фазой колебаний зонда) получается параллельно с измерением топографии поверхности в полуконтактном или бесконтактном режиме. При этом сигналом обратной связи является сигнал, пропорциональный амплитуде колебаний кантинлевера (MAG или RMS).

5.11.2. Сигналы, связанные с фазой колебаний зонда

В СЗМ исходным сигналом, соответствующим колебательному движению зонда, является переменная составляющая сигнала «DFL». После его обработки синхронным детектором и фазовым детектором формируются следующие сигналы, связанные с величиной фазы колебаний зонда относительно возбуждающего напряжения:

- 1) «Phase 1» - сигнал, соответствующий сумме фазовых сдвигов: фазовому сдвигу между фазой колебаний кантинлевера и фазой возбуждающего сигнала, фазовому сдвигу между возбуждающим сигналом и опорным сигналом (с точностью до некоторой «аппаратной» константы). Этот сигнал поступает с выхода фазового детектора;
- 2) «MAG*Sin» - сигнал, пропорциональный произведению амплитуды переменного сигнала на частоте модуляции (MAG) на синус сдвига фазы колебаний кантинлевера относительно опорного сигнала. Соответственно, величина сдвига фазы колебаний кантинлевера относительно опорного сигнала состоит из суммы сдвига фазы возбуждающего сигнала относительно опорного и сдвига фазы колебаний кантинлевера относительно возбуждающего сигнала с точностью до некоторой «аппаратной» константы. Этот сигнал поступает с выхода синхронного детектора;
- 3) «MAG*Cos» - сигнал, пропорциональный произведению амплитуды переменного сигнала на частоте модуляции (MAG) на косинус сдвига фазы колебаний кантинлевера относительно опорного сигнала. Этот сигнал поступает с выхода синхронного детектора;
- 4) «Calc. Phase» - сигнал, соответствующий фазовому сдвигу между фазой колебаний кантинлевера и опорным сигналом. Этот сигнал вычисляется программой на основе измеренных сигналов «MAG*Sin» и «MAG*Cos».

5-40

Руководство пользователя C3M Solver BIO Cell

Любой из этих сигналов может быть использован для получения изображения. При использовании сигнала «Phase 1» это будет изображение именно фазы сигнала, соответственно измеряемой в угловых градусах.

При использовании сигнала «MAG*Cos» («MAG*Sin») это будет изображение сигнала, пропорционального косинусу (синусу) фазы. Эти сигналы имеют наиболее низкий уровень шумов.

Для метода фазового контраста рекомендуется использовать сигнал «Phase 1», однако в случае, когда необходимо получить наибольшую чувствительность и разрешение, можно рекомендовать использовать сигналы «MAG*Sin» или «MAG*Cos», поскольку последние имеют более низкий уровень шумов.

5.11.3. Подготовка прибора к работе в режиме получения изображения фазы (Необходимые условия и операции)

Необходимое условие для работы в режиме получения изображения сигнала фазы (Phase Imaging) - прибор предварительно должен быть подготовлен к работе в режиме полуконтактной топографии (полуконтактной AFM) согласно разделу 5 настоящего описания. После того, как прибор подготовлен к работе в режиме полуконтактной AFM необходимо выполнить дополнительно две следующие операции:

- 1) Включить выбранный сигнал (сигнал Phase 1 или MAG*cos или MAG*sin) на вход измерительного канала B.
- 2) Произвести правильную настройку выбранного сигнала.

5.11.3.1. Включение сигнала фазы на вход измерительного канала

Для подключения сигнала (например, сигнала «Phase 1») необходимо:

- 1) Открыть окно управления параметрами сканирования (рис.5.11-1)

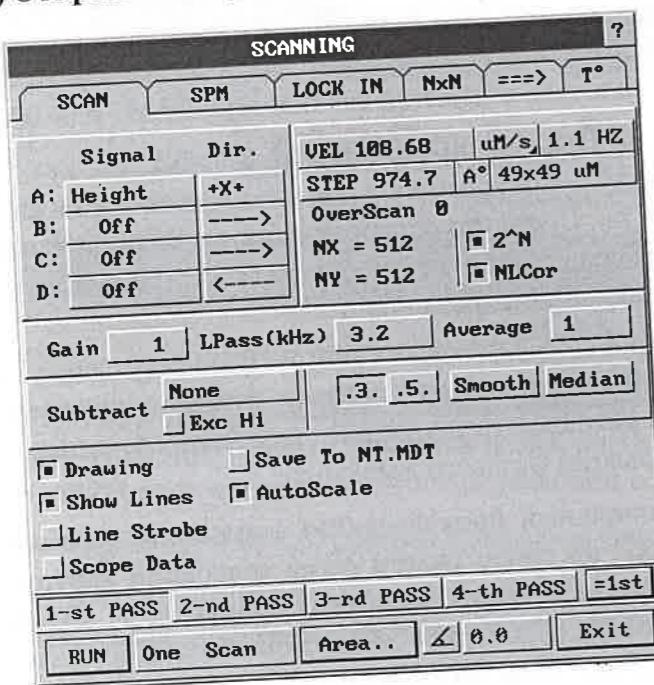


Рис.5.11-1

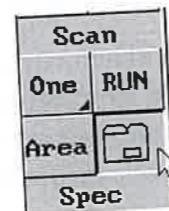


Рис.5.11-2

нажатием кнопки на панели инструментов в той ее части, которая имеет заголовок «Scan» и относится к управлению параметрами сканирования (рис.5.11-2), и последующим нажатием «SCAN» в заголовке открывшегося окна (рис.5.11-1). Панель инструментов расположена с левой стороны главного окна программы. Окно управления параметрами сканирования можно также открыть последовательным включением кнопок: 1) «Operation» в меню окна SPM, 2) «Scanning» в открывшемся меню и 3) «SCAN» в заголовке открывшегося окна.

5.11. Метод фазового контраста (Phase Imaging)

2) Нажать на кнопку выбора сигнала канала B (рис.5.11-3), в открывшемся меню (рис.5.11-4) выбрать сигнал «Phase 1» (рис.5.11-5).

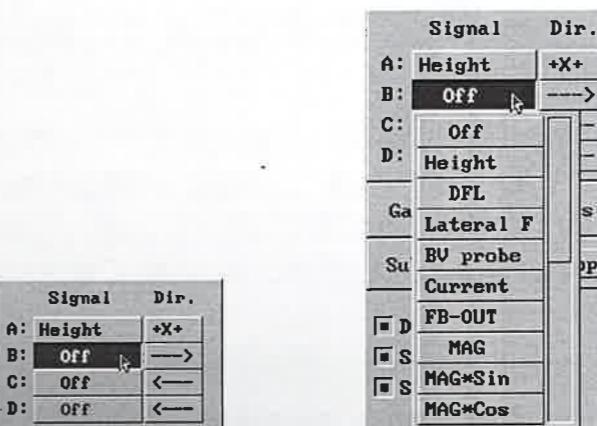


Рис.5.11-3

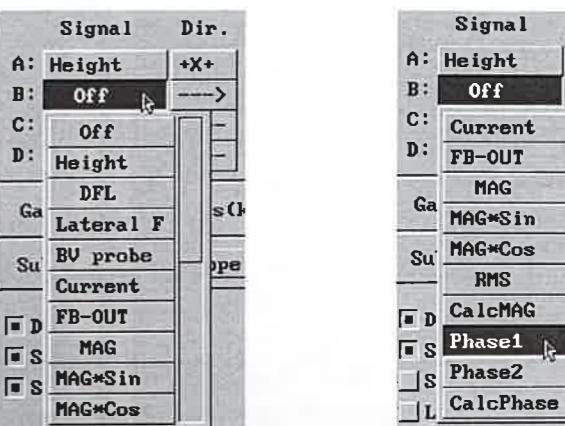


Рис.5.11-4

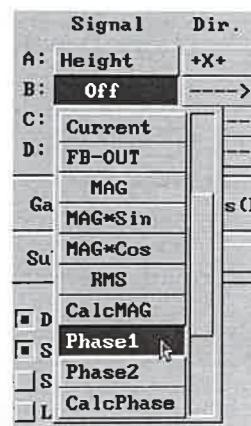


Рис.5.11-5

В результате на входе канала B должен быть установлен сигнал «Phase 1», как показано на рис.5.11-6. Аналогично, при помощи кнопки «Dir.» установите для канала B направление сканирования «S®», как показано на рис.5.11-6.

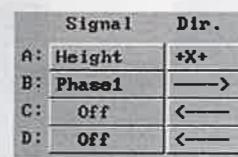


Рис.5.11-6

Если выбран сигнал MAG*sin (или MAG*cos), их установка производится аналогичным образом.

5.11.3.2. Настройка сигнала фазы

Настройка производится при помощи программного осциллографа. Краткие сведения о работе с программным осциллографом приведены в пункте 5.1.3.1 настоящей главы (более подробно в п. 4.1.3.1).

Настройка состоит из двух операций: 1) включения сигнала фазы на вход программного осциллографа, 2) установки начального уровня сигнала фазы.

- 1) Включение сигнала фазы на вход программного осциллографа.

Подключение сигналов фазы («Phase 1», «MAG*Sin», «MAG*Cos») к входу программного осциллографа производится в два этапа. Это связано с тем, что данные сигналы не входят в меню основных сигналов, которое открывается кнопкой выбора основных сигналов (вторая кнопка слева в меню осциллографа). Но в меню основных сигналов предусмотрено подключение двух дополнительных входов осциллографа («→A» и «→B»), к которым возможно подключение дополнительных сигналов.

Для включения сигнала фазы («Phase 1») необходимо выполнить следующую последовательность операций:

- a) нажать на кнопку «Opt» в меню осциллографа (третья кнопка справа, рис.5.11-7).



Рис.5.11-7

5.11. Метод фазового контраста (Phase Imaging)

Глава 5. Полуконтактная атомно-силовая микроскопия

5-42

Руководство пользователя C3M Solver BIO Cell

б) В открывшемся меню выбрать заголовок «Signal» (рис.5.11-8) и нажать кнопку выбора сигнала (рис.5.11-9).

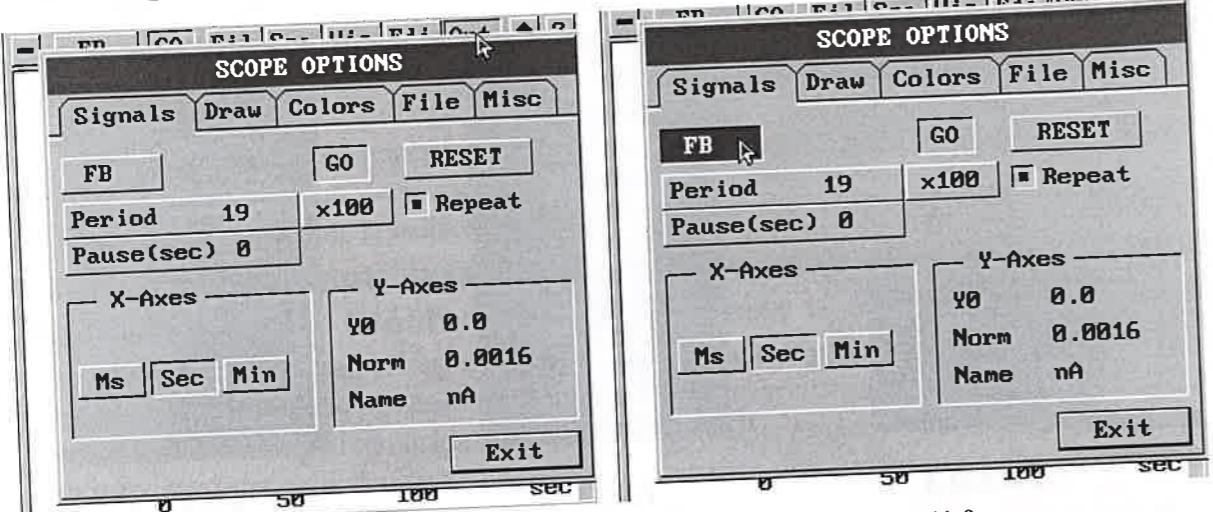


Рис.5.11-8

Рис.5.11-9

В результате откроется меню выбора сигналов, в котором необходимо выбрать один из дополнительных входов, например «→A» (рис.5.11-10).

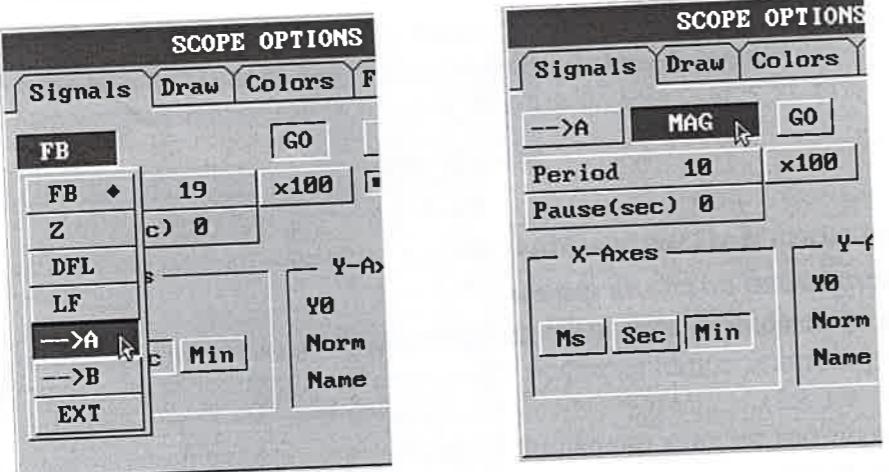


Рис.5.11-10

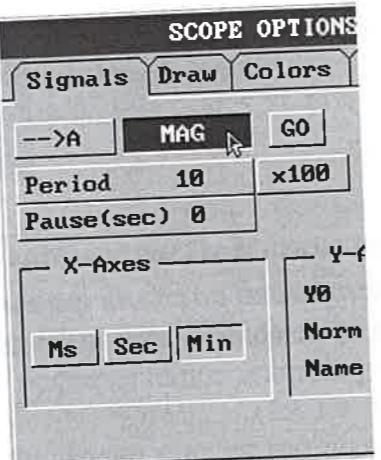


Рис.5.11-11

с) После выбора «→A» рядом с кнопкой выбора сигнала появится кнопка выбора дополнительных сигналов (рис.5.11-11), после нажатия которой откроется меню выбора дополнительных сигналов (рис.5.11-12).

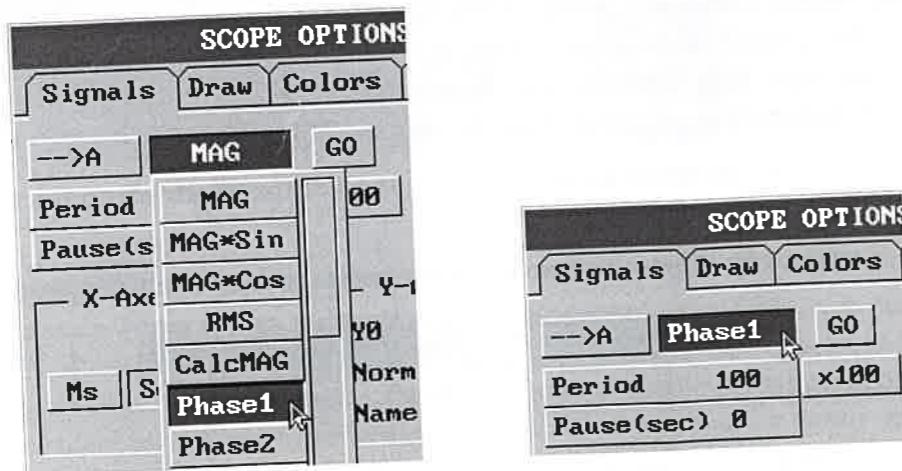


Рис.5.11-12

Рис.5.11-13

После выбора «Phase 1» в меню дополнительных сигналов этот сигнал будет установлен на дополнительном входе «→A» (рис.5.11-13) и на входе осциллографа.

Аналогичным образом производится подключение сигналов «MAG*Sin», «MAG*Cos» или других сигналов, которые отсутствуют в основном меню.

Включение (и выключение) процесса измерения зависимости установленного сигнала от времени производится кнопкой «GO» (третья кнопка слева в меню осциллографа).

2) Установка начального уровня сигнала фазы.

Начальный уровень сигнала «Phase 1» (а также сигналов «MAG*Sin», «MAG*Cos») можно регулировать путем изменения фазы напряжения генератора пьезодрайвера (параметр «Phase»).

Для этого необходимо открыть блок-схему управления SPM при помощи кнопки в меню окна SPM.

Затем нажать кнопку «Phase» (рис.5.11-14) и при помощи откывшегося окна-регулятора можно регулировать начальный уровень сигналов «Phase 1», «MAG*Sin», «MAG*Cos».

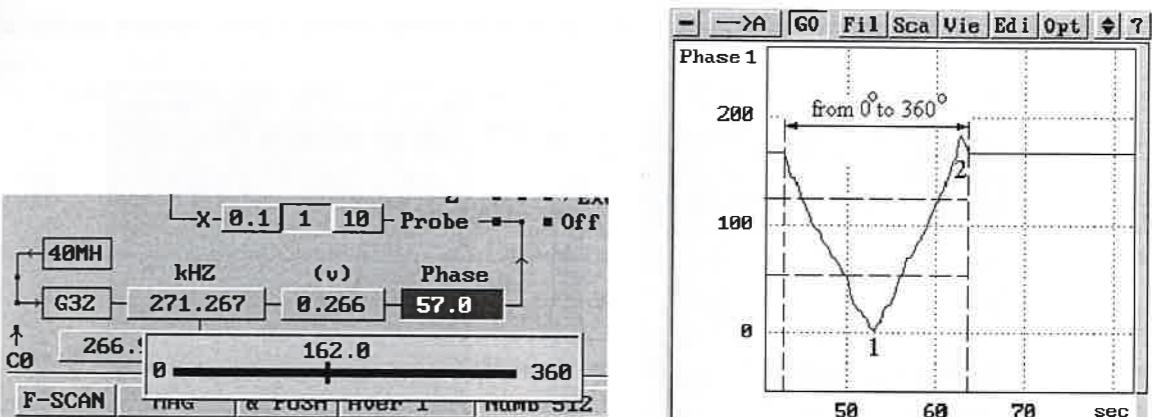


Рис.5.11-14

Рис.5.11-15

При изменении параметра «Phase» от 0 до 360 угловых градусов сигнал «Phase 1» изменяется в интервале от нуля до 180 градусов.

Используя осциллограф, на котором регистрируется зависимость «Phase 1» от времени, можно получить качественную зависимость «Phase 1» от параметра «Phase» в результате плавного изменения параметра «Phase» от 0 до 360 градусов. В результате будет получена зависимость, имеющая вид примерно такой, как показано на рис.5.11-15.

Исходя из полученного рисунка (рис.5.11-15) относительно выбора начального уровня сигнала «Phase 1» можно сказать следующее.

Нельзя устанавливать значения «Phase 1» вблизи границ возможного интервала, т.е. вблизи нулевого значения и вблизи 180 градусов. На рис.5.11-15 эти точки обозначены как 1 и 2. Рекомендуется устанавливать начальный уровень «Phase 1» примерно в середине диапазона изменения этого сигнала, т.е. в интервале значений 60-120 угловых градусов. Соответственно, установка уровня «Phase 1» производится регулировкой фазы напряжения генератора (параметра «Phase»).

В случае сигналов «MAG*Sin», «MAG*Cos» начальный уровень этих сигналов необходимо установить в нулевое значение путем регулировки величины фазы напряжения генератора (параметра «Phase»).

5.11.4. Работа прибора в режиме получения изображения фазы

Работа прибора в режиме получения изображения фазы (Phase Imaging) совпадает с работой в режиме полуконтактной топографии. Отличие состоит только в том, что дополнительно на вход измерительного канала В включен сигнал фазы и произведена его настройка. А также в окне SPM установлены два окна A и B, в которых при сканировании будут отображаться данные топографии и сигнала, связанного с фазой.

Если все указанные выше приготовления выполнены, можно начинать сканирование согласно рекомендациям и инструкциям, изложенным в разделах главы 5, описывающих работу прибора в режиме полуконтактной микроскопии (топографии).

Чтобы продемонстрировать эффективность метода фазового контраста (Phase Imaging) в контрастировании деталей поверхностной структуры объекта ниже в качестве примера приведены рисунки, на которых показаны изображения топографии поверхности и сигнала фазы или связанного с фазой сигнала, полученные для двух различных полимерных образцов.

На рис.5.11-16 показаны изображения топографии и сигнала «Phase 1», полученные при одновременном сканировании поверхности блок сополимера полибутиленперефталата-политетраметиленоксида. Данный полимер имеет ламелярную структуру сферолитов. На изображении топографии показан сферолит, а на изображении фазы получена ламелярная структура сферолита, из которой видно, что ламели выходят перпендикулярно к поверхности.

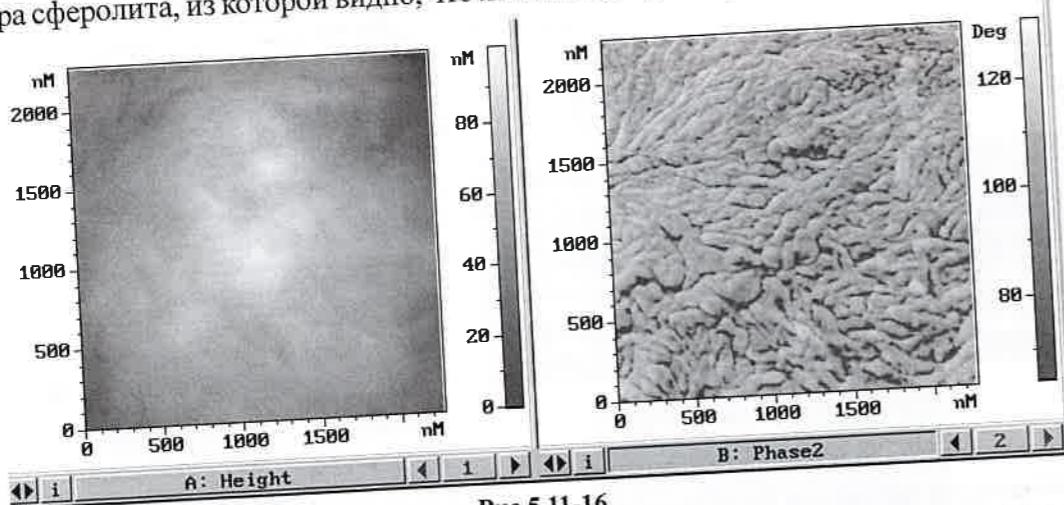


Рис.5.11-16

Соответственно, на рис.5.11-17 приведены изображения топографии и сигнала «MAG*Sin», полученные при сканировании поверхности другого полимерного образца (полиэтиленоксида). В этом случае сферолиты также имеют ламелярную структуру. На изображении фазового сигнала («MAG*Sin») также видна ламелярная структура, однако в отличие от предыдущего примера ламели выходят под некоторым углом к поверхности.

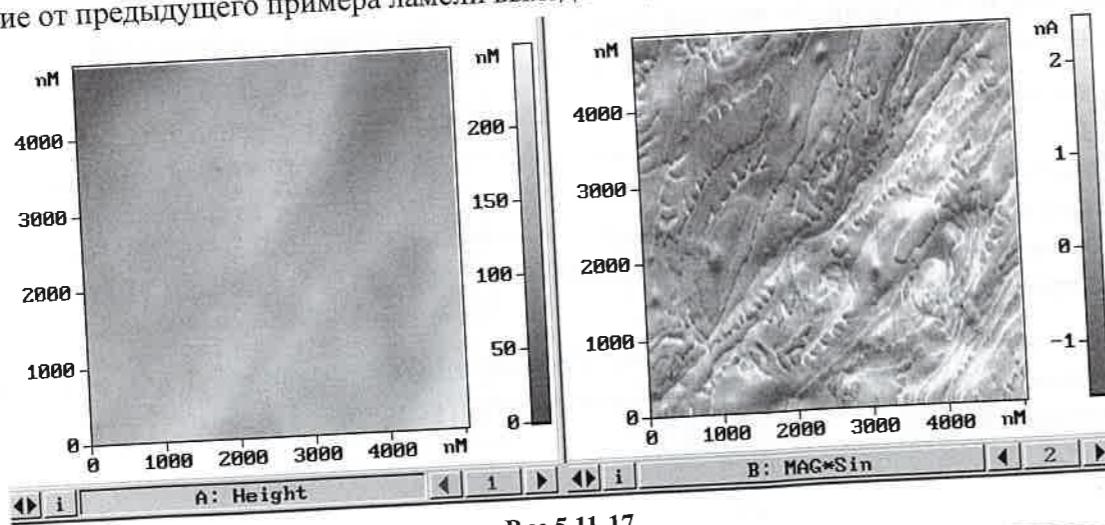


Рис.5.11-17

5.12. Особенности и отличия полуконтактного режима в жидкой среде

Для СЗМ головки с жидкостным держателем подводиться к поверхности следует только в контактном режиме, поэтому очень осторожно, поскольку изменение сигнала обратной связи «DFL» происходит достаточно резко в момент касания иглой кантителевера поверхности.

Для работы в полуконтактном режиме в жидкости следует сначала подвестись к образцу в контактном режиме.

Затем выключить обратную связь и, подав напряжение от генератора на пьезодрайвер «Probe» (на блок - схеме в программе), просканировать амплитуду колебаний кантителевера в полосе частот от 60 до 300-400 кГц.

В окне осциллографа вы увидите, в отличие от работы на воздухе, кривую с множеством резонансных пиков.

Выберите участок шириной в 50 - 60 кГц, на котором резонансные пики больше. Просканируйте этот участок.

Затем выключите обратную связь (сигналом обратной связи должен по-прежнему оставаться сигнал «DFL»). Нажав клавишу «Shift» нажмите «F-Scan» еще раз. При этом вы просканируете установленный частотный диапазон еще раз, но в окне осциллографа останутся данные предыдущего сканирования.

Сравните данные двух сканов – со свободным и прижатым к поверхности кантителевером. Одни из резонансных пиков резко уменьшились, другие практически не изменились, а некоторые и увеличились.

Для работы в полуконтактном режиме можно выбрать любой пик, амплитуда которого уменьшается в прижатом состоянии. Выберите тот пик, амплитуда которого в прижатом состоянии уменьшается наиболее сильно.

Снова отключите обратную связь, выставьте выбранную частоту, переключите сигнал обратной связи на «MAG», а значение «SP» выберите чуть большим, чем текущее значение амплитуды.

Включите обратную связь и, уменьшая значение «SP», перейдете на работу в полуконтактном режиме.

Устойчивость обратной связи и уровень шумов являются различными для разных пиков

Поэкспериментируйте. Для мягких кантителеверов просканируйте амплитуду в низкочастотном диапазоне 5 – 90 кГц не забыв нажать кнопку «LOW» частотного фильтра.

Замечание 5.12. При отводе от поверхности сигнал «MAG» на выбранной частоте может уменьшиться и использовать этот сигнал при повторном подводе не получится. Если при отводе сигнал «MAG» на выбранной частоте не уменьшится по сравнению с уровнем с выключенной обратной связью, то этот сигнал можно использовать для повторного подвода.

Глава 6. Режим спектроскопии

Содержание

Содержание	6-1
Глава 6. Режим спектроскопии	6-2
6.1 Измерение зависимости FB(z) в полуконтактном режиме (сигнала FB от расстояния между зондом и образцом). Калибровка амплитуды колебаний кантителевера	6-2
6.1.1 Открытие окна управления прибором в режиме спектроскопии	6-2
6.1.2 Установка измеряемой зависимости (зависимости FB(z))	6-3
6.1.3 Выбор режима измерения, установка интервала изменения аргумента и других параметров	6-4
6.1.3.1 Выбор режима измерения	6-4
6.1.3.2 Установка интервала изменения аргумента	6-4
6.1.3.3 Ограничение величины минимального приближения зонда к поверхности (limit, (пA))	6-5
6.1.3.4 Установка числа точек по оси Z, в которых будет измеряться зависимость FB(z) ..	6-6
6.1.3.5 Кнопки «Smooth», «Repeat», «& Back»	6-7
6.1.4 Запуск режима измерения, сохранение полученных данных	6-7
6.1.5 Просмотр данных спектроскопии	6-10
6.1.6 Калибровка амплитуды колебаний кантителевера	6-11

Глава 6. Режим спектроскопии

СЗМ имеет специальный режим работы, названный «режимом спектроскопии», в котором можно получать зависимости различных сигналов и величин от расстояния между зондом и образцом, величины **SP** и величины приложенного напряжения.

В частности, в режиме спектроскопии может быть получена зависимость сигнала обратной связи **FB** от расстояния между зондом и образцом **FB(z)**. Ниже на примере измерения зависимости **FB(z)** подробно рассмотрена работа прибора в режиме спектроскопии. Работа прибора при измерении других зависимостей производится подобным образом.

6.1 Измерение зависимости **FB(z)** в полуkontakteчном режиме (сигнала **FB** от расстояния между зондом и образцом). Калибровка амплитуды колебаний кантилевера

В полуkontakteчном режиме сигналом обратной связи **FB** является сигнал, пропорциональный амплитуде колебаний кантилевера. Поэтому, используя полученную зависимость сигнала обратной связи **FB** от расстояния между зондом и образцом, можно произвести калибровку амплитуды колебаний кантилевера.

Процедуру измерения зависимости сигнала **FB** от расстояния между зондом и образцом можно выполнять после того, как:

- 1) произведен подвод зонда к образцу;
 - 2) сделан хотя бы один скан поверхности или его часть.
- Процедуру измерения зависимости **FB(z)** (или другой зависимости, получаемой в режиме спектроскопии) можно разделить на следующие последовательные операции:
- 1) открытие окна управления прибором в режиме спектроскопии;
 - 2) установка измеряемой зависимости (зависимости **FB(z)** в рассматриваемом случае);
 - 3) выбор режима измерения, установка интервала изменения аргумента и других параметров;
 - 4) запуск режима измерения, сохранение полученных данных;
 - 5) просмотр данных спектроскопии.

6.1.1 Открытие окна управления прибором в режиме спектроскопии

Окно управления прибором в режиме спектроскопии (окно спектроскопии) открывается последовательным нажатием «Operation» в меню окна SPM (рис.6.1-1) и «Spectroscopy» в открывшемся меню (рис.6.1-2) или

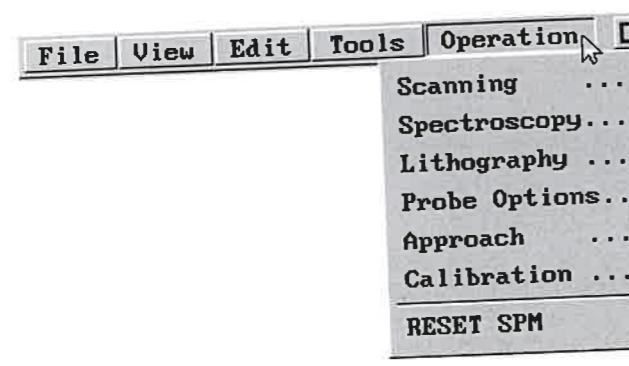


Рис.6.1-1

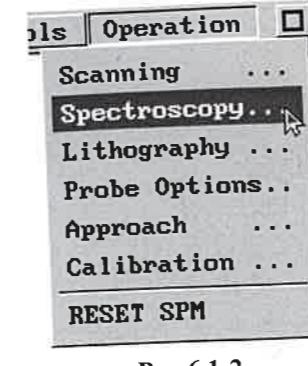


Рис.6.1-2

нажатием кнопки , расположенной на панели инструментов в той ее части, которая относится к управлению в режиме спектроскопии (рис.6.1-3). В результате открывается окно спектроскопии (рис.6.1-4).

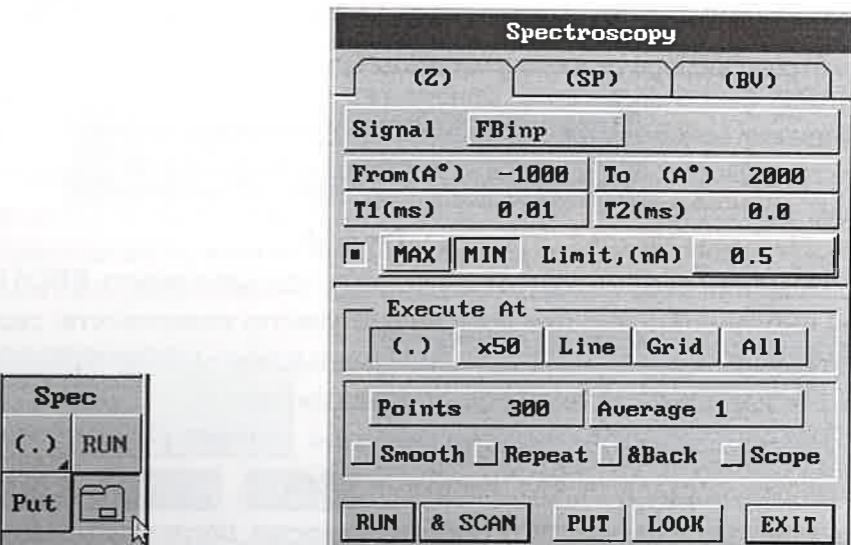


Рис.6.1-3

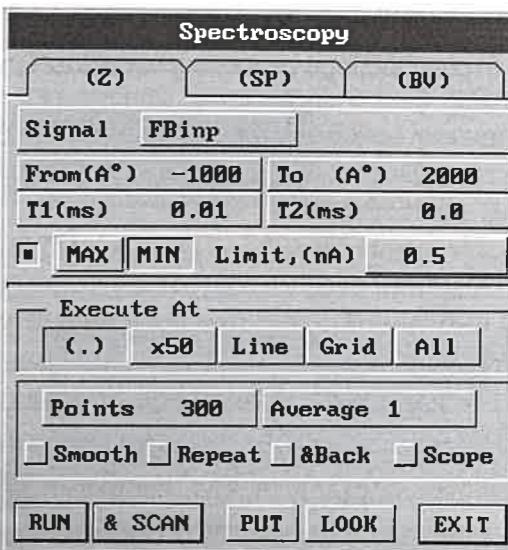


Рис.6.1-4

6.1.2 Установка измеряемой зависимости (зависимости **FB(z)**)

Для установки режима измерения зависимости **FB(z)** необходимо:

- a) выбрать **(z)** в меню аргументов (рис.6.1-5);

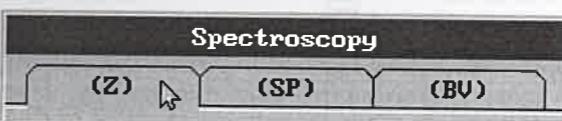


Рис.6.1-5



Рис.6.1-6

- b) установить сигнал **FB** при помощи кнопки выбора функции (рис.6.1-6).

Установка производится нажатием кнопки и последующим выбором сигнала **FBinp** в открывшемся меню возможных сигналов (рис.6.1-7).

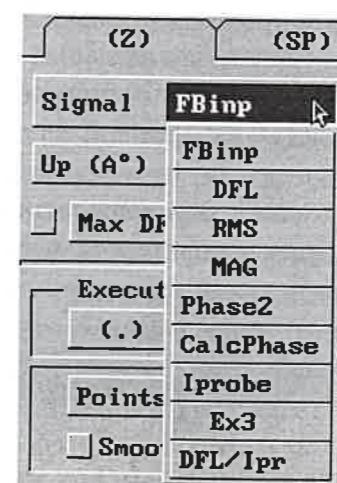


Рис.6.1-7

6-4

Руководство пользователя CSM Solver BIO Cell

6.1.3 Выбор режима измерения, установка интервала изменения аргумента и других параметров

6.1.3.1 Выбор режима измерения

Установите режим измерения в одной выбранной точке. Для этого включите кнопку **(.)** в строке выбора режима измерения (рис.6.1-8):

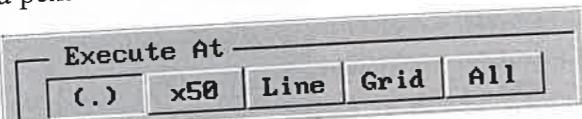


Рис.6.1-8

Выбор указанного режима соответствует тому, что зависимость **FB(z)** будет измерена один раз в одной выбранной точке, принадлежащей участку поверхности, сканирование которого было произведено последним. Полученные данные в этом случае доступны для просмотра и сохранения только в окне программного осциллографа.

Кроме указанного выше возможны еще четыре режима измерения, которые устанавливаются, соответственно, кнопками **x50**, **Line**, **Grid** и **All**.

В случае **x50** зависимость **FB(z)** будет измеряется последовательно 50 раз в одной и той же точке поверхности.

В режиме **Line** производится серия последовательных измерений установленной зависимости в точках поверхности, лежащих на выбранном отрезке прямой.

В режиме **Grid** серия измерений зависимости производится в точках выбранной сетки. Количество точек в сетке устанавливается стрелками «влево», «вправо» или соответствующими движениями мыши.

Результаты всех измерений выводятся по окончании работы в виде трехмерного графика, где по оси **X** - аргумент, в нашем случае это **z**, по оси **Y** - номер точки измерения, цветовая гамма - величина сигнала, в нашем случае это сигнал **FB**.

В режиме **All** зависимости измеряются в каждой точке сканируемой поверхности. Результаты измерений сохраняются в виде четырехмерного массива данных. Представление данных производится либо в виде последовательности трехмерных графиков, либо в виде последовательности зависимостей, каждая из которых относится к определенной точке сканируемой поверхности.

6.1.3.2 Установка интервала изменения аргумента

Как упоминалось выше, процедура измерения производится после того, как был выполнен подвод и установлена рабочая точка. Это означает, что в исходном состоянии следящая система поддерживает некоторый заданный уровень сигнала **FB**, и что зонд находится на некотором расстоянии от поверхности, соответствующем заданному уровню сигнала **FB**. Это исходное положение зонда относительно поверхности принимается за начало отсчета, т.е. считается нулевым значением аргумента (**z**) для измеряемой зависимости сигнала **FB(z)**. Изменение аргумента соответствует перемещению по нормали к поверхности. Положительное направление оси **Z** соответствует удалению от поверхности образца.

Интервал, в пределах которого будет измеряться зависимость, задается относительно начала отсчета (нулевого значения) при помощи двух кнопок, которые устанавливают нижнюю **«From»** и верхнюю **«To»** границы интервала (рис.6.1-9):

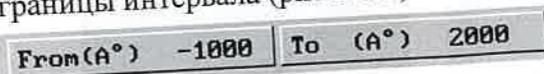


Рис.6.1-9

Замечание 1. В более ранних версиях программы управления нижняя и верхняя границы интервала изменения аргумента могут обозначаться, соответственно, как **«Forw»** и **«Back»** или **«Down»** и **«Up»**. В этих случаях

6.1 Измерение зависимости **FB(z)** в полуконтактном режиме (сигнала **FB** от расстояния между зондом и

кнопки, обозначающие нижнюю и верхнюю границы интервала имеют вид (рис.6.1-9А, 6.1-9В):

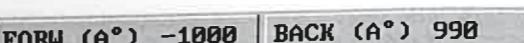


Рис.6.1-9А



Рис.6.1-9В

Нижняя граница соответствует точке интервала, которая является самой близкой к поверхности точки, а верхняя граница соответствует точке, наиболее удаленной от поверхности. Значение нижней границы интервала можно изменять в диапазоне от -10000 ангстрем до 0, а значение верхней границы от 0 до 10000 ангстрем. Для изменения значения нижней границы интервала необходимо нажать соответствующую кнопку (рис.6.1-10) и в открывшемся окне регулятора установить необходимое значение (рис.6.1-11).



Рис.6.1-10

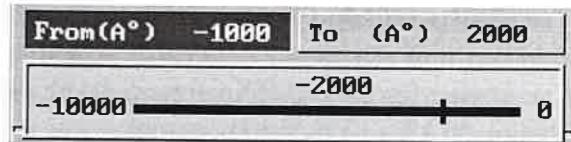


Рис.6.1-11

Аналогично, изменяется и устанавливается значение верхней границы интервала (рис.6.1-12, 6.1-13):

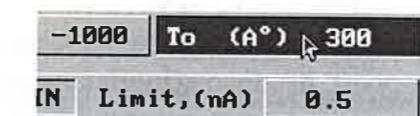


Рис.6.1-12



Рис.6.1-13

6.1.3.3 Ограничение величины минимального приближения зонда к поверхности (*limit, (nA)*)

При снятии зависимости **FB(z)** в приборе предусмотрена возможность ограничения величины минимального приближения кантилевера к поверхности с целью предохранения его от повреждения. Необходимость установки данного ограничения связана с тем, что при измерении зависимости **FB(z)** может возникнуть ситуация, которая описывается ниже.

В исходном состоянии зонд находится в начальной точке, от которой производится отсчет при снятии зависимости. Начальная точка находится на некотором расстоянии от поверхности образца, величина этого расстояния неизвестна. Модуль значения нижней границы интервала перемещения (модуль величины **«From»**) соответствует величине перемещения зонда от начальной точки к поверхности образца. Если установить величину перемещения очень большой, может оказаться, что эта величина превышает начальное расстояние между зондом и поверхностью. При снятии зависимости сканер начнет перемещать кантилевер к образцу. Свободный конец кантилевера переместится на величину расстояния между острием и поверхностью. Острие коснется поверхности образца. Дальнейшее перемещение острия, а вместе с ним и свободного конца кантилевера, будет ограничено поверхностью образца. Кантилевер начнет изгибаться, т. к. сканер будет продолжать приближать закрепленный конец кантилевера и переместит его на величину разницы между установленной величиной перемещения и начальным расстоянием между зондом и поверхностью. Если разница между установленной величиной перемещения зонда к образцу (модулем нижней границы) и начальным расстоянием между зондом и образцом окажется слишком большой, может произойти повреждение кантилевера.

Для того, чтобы этого избежать, в приборе предусмотрена возможность ограничения перемещения зонда по направлению к образцу. В полуконтактном режиме контроль за величиной перемещения производится по величине сигнала **«MAG»**, который

пропорционален амплитуде колебаний кантителевера . При приближении кантителевера к поверхности происходит уменьшение амплитуды колебаний кантителевера и , соответственно , уменьшение сигнала «MAG». Для ограничения перемещения задается параметр «MIN» Limit, (nA) (рис.6.1-14),



Рис.6.1-14

который ограничивает снизу возможный диапазон изменения сигнала «MAG» (сигнала FB). Как только при приближении к поверхности сигнал «MAG» уменьшится до установленной величины «MIN» Limit, (nA), дальнейшее приближение зонда к поверхности образца прекращается.

Для установки и включения ограничения перемещения по сигналу «MAG» необходимо:

- 1) включить маленькую кнопку, расположенную слева (рис.6.1-15), собственно эта кнопка и включает или выключает систему ограничения;
- 2) включить кнопку «MIN» (рис.6.1-16), (если предыдущий пункт не выполнен, то кнопки «MIN» и «MAX» не активированы);

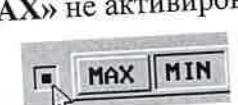


Рис.6.1-15



Рис.6.1-16

- 3) установить необходимую величину параметра «MIN» Limit, (nA).

Величина параметра «MIN» Limit, (nA) (величина минимально возможной величины сигнала «MAG») устанавливается кнопкой-индикатором, расположенной справа от Limit, (nA) (рис.6.1-17). При нажатии на эту кнопку открывается окно-регулятор (рис.6.1-18), при помощи которого и устанавливается значение величины, ограничивающей минимально возможную величину сигнала «MAG».

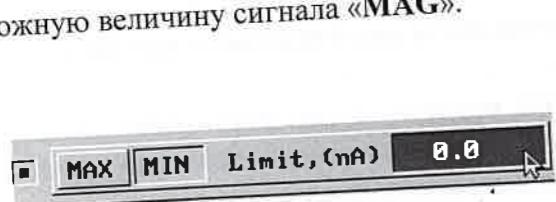


Рис.6.1-17

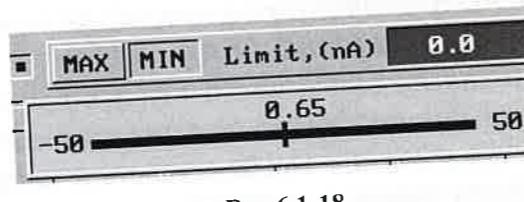


Рис.6.1-18

Для правильной работы системы ограничения в полуконтактном режиме величина параметра «MIN» должна быть больше нуля и меньше параметра SP. Рекомендуется установить значение в интервале примерно +0.5нА - +1нА.

6.1.3.4 Установка числа точек по оси Z, в которых будет измеряться зависимость FB(z)

Число точек по оси Z, в которых будет измеряться зависимость FB(z), устанавливается при помощи кнопки Points 300 . Для изменения числа точек необходимо нажать на эту кнопку (рис.6.1-19) и в открывшемся окне регулятора установить необходимое значение (рис.6.1-20):



Рис.6.1-19



Рис.6.1-20

Кнопка Average 1 устанавливает число измерений величины FB(z) в каждой точке аргумента. После выполнения установленного числа измерений производится усреднение измеряемой величины, и полученное среднее значение считается величиной FB(z) для данной точки аргумента (z). Для изменения числа измерений необходимо нажать кнопку «Average» (рис.6.1-21) и в окне регулятора установить необходимое значение (рис.6.1-22).



Рис.6.1-21



Рис.6.1-22

Число измерений можно изменять в интервале от 1 до 10000.

6.1.3.5 Кнопки «Smooth», «Repeat», «& Back»

Эти кнопки (рис.6.1-23) включают или выключают, соответственно:

«Smooth» - сглаживание получаемой кривой по трем точкам; «Repeat» - режим повторяющегося измерения зависимости до остановки клавишей «Esc»; «& Back» - режим измерения зависимости в прямом (при удалении от образца) и обратном направлениях, при этом получаются две кривые.



Рис.6.1-23

На рис.6.1-21 кнопки находятся в выключенном состоянии.

6.1.4 Запуск режима измерения, сохранение полученных данных

Для запуска режима измерения необходимо нажать кнопку «RUN», расположенную в нижней строке окна спектроскопии (рис.6.1-24), либо кнопку «RUN» на панели инструментов в той ее части, которая относится к управлению в режиме спектроскопии (рис.6.1-25).



Рис.6.1-24

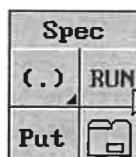


Рис.6.1-25

После этого в окне SPM появляется изображение последнего снятого скана. Вместо меню окна SPM появляется строка, в которой отображаются координаты точки, в которой находится курсор (рис.6.1-26).

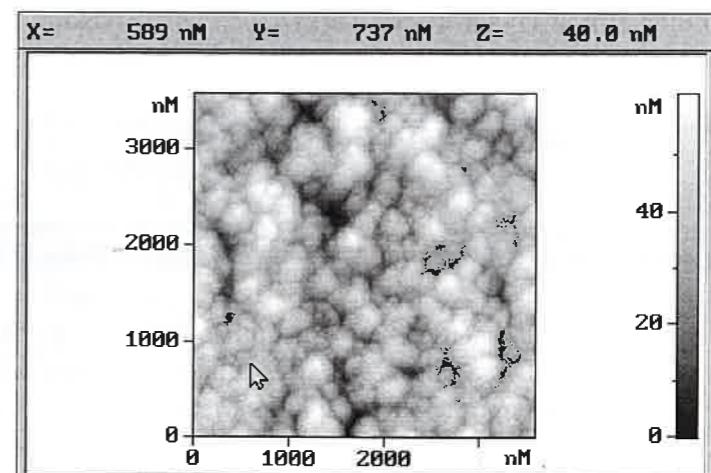


Рис.6.1-26

6-8

Руководство пользователя C3M Solver BIO Cell

Перемещая курсор в пределах изображения скана можно выбрать любую точку, в которой предполагается произвести измерение зависимости $FB(z)$.

Процесс измерения запускается нажатием левой кнопки мыши, на время измерения изображение курсора исчезает. После завершения процесса измерения вновь возникает изображение курсора.

Точка, в которой была измерена зависимость, маркируется (рис.6.1-27), в окне программного осциллографа «EXT» появляется измеренная зависимость $FB(z)$ (рис.6.1-28).

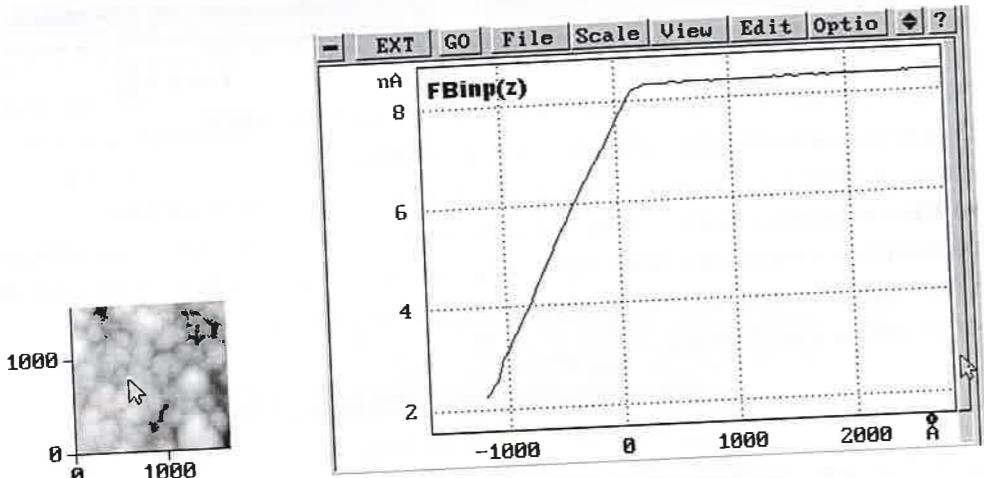


Рис.6.1-27

Рис.6.1-28

Процесс измерения зависимости производится по следующему алгоритму. Зонд перемещается из исходного состояния в точку, соответствующую верхней границе интервала, т.е. наиболее удаленную точку от поверхности.

Затем начиная с этой точки начинается измерение зависимости в результате последующего пошагового приближения зонда к поверхности с соответствующим измерением величины сигнала в каждой точке.

Соответственно, величина шага зависит от величины интервала (разницы между верхней и нижней границей) и установленного числа точек.

Если включена система защиты, и если величина сигнала уменьшается ниже установленного ограничения, дальнейшее приближение прекращается и зонд возвращается в исходное состояние.

Если включена кнопка «&Back» то производится снятие зависимости и при обратном ходе зонда, т. е. при удалении от поверхности. При этом зонд перемещается до точки верхней границы и после этого возвращается в исходное состояние.

Для сохранения полученной зависимости $FB(z)$ необходимо нажать кнопку «PUT» (рис.6.1-29).



Рис.6.1-29

В этом случае данные спектроскопии добавляются в оперативную память к данным, ранее снятых изображений, и будут сохранены вместе с ними при записи.

Затем процесс измерения зависимости можно повторить в других точках, не забывая после каждого измерения нажимать кнопку «PUT» для сохранения полученных данных.

Приведенное выше описание процесса измерения относится к случаю режима измерения в одной точке.

В других режимах процесс измерения и сохранения производится аналогичным образом.

Отличия заключаются в том, что, например, в случае режима «Line» задаются начальная и конечная точка отрезка прямой, в точках которой будет производится серия последовательных измерений, в режиме «Grid» устанавливается количество точек сетки.

Аналогично, после завершения процесса измерения необходимо выполнять операцию «добавления» полученных данных спектроскопии к основному массиву данных при помощи кнопки «PUT» для их сохранения.

Кроме того, в этих случаях («Line», «Grid») данные представляются на отдельном кадре в виде трехмерного графика, где по оси X - аргумент, в нашем случае это z , по оси Y - номер точки измерения, а величина сигнала передается цветовой гаммой или плотностью закраски (рис.6.1-30).

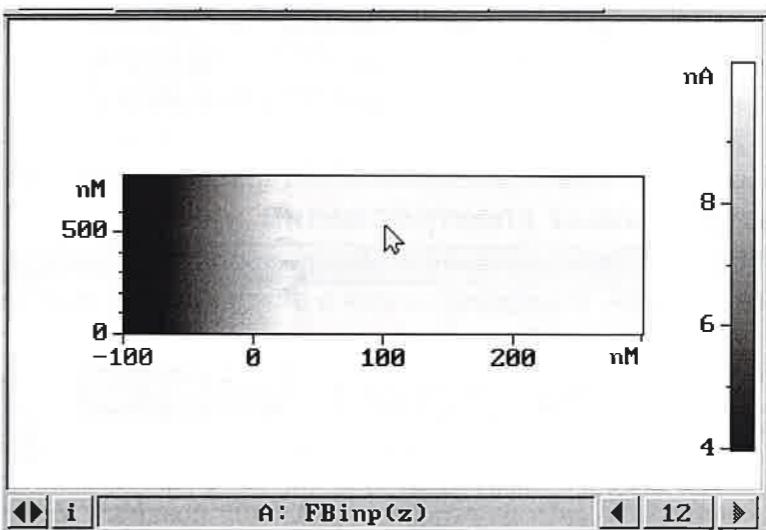


Рис.6.1-30

Зависимость $FB(z)$, отображенную в окне осциллографа «EXT», можно также сохранить отдельно в виде файла с расширением *.dat или *.os. Для этого необходимо нажать на кнопку «File» в меню осциллографа «EXT» (рис.6.1-31), в открывшемся меню нажать кнопку «Save» (рис.5.6-32) и записать в виде файла с расширением *.os (рис.6.1-33) или в формате ASCII в виде файла с расширением *.dat (рис.6.1-34).

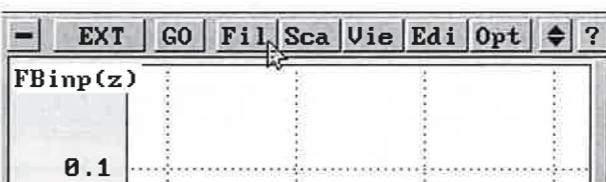


Рис.6.1-31

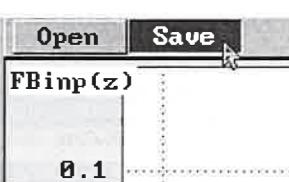


Рис.6.1-32



Рис.6.1-33



Рис.6.1-34

Выбор формата файла можно производить в результате нажатия кнопки «Opt» меню осциллографа (рис.6.1-35), последующего выбора «File» (рис.6.1-36) и установки соответствующего формата посредством включения *.os или *.dat (рис.6.1-37).

6-10

Руководство пользователя C3M Solver BIO Cell

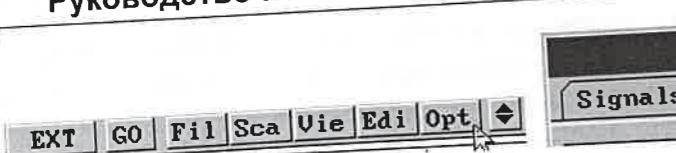


Рис.6.1-35

Рис.6.1-36

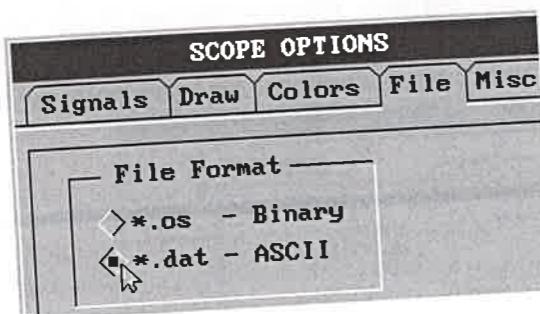


Рис.6.1-37

6.1.5 Просмотр данных спектроскопии

Для просмотра данных спектроскопии необходимо открыть окно спектроскопии (рис.6.1-4) и нажать кнопку «Look», которая находится в нижней строке окна (рис.6.1-38).



Рис.6.1-38

В результате в окне SPM вместо строки управления появится меню просмотра данных спектроскопии (рис.6.1-39).

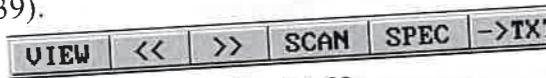


Рис.6.1-39

При нажатии на кнопку «View» зависимость стрелка курсора автоматически устанавливается в начальную точку на изображении скана поверхности, в которой измерялась зависимость $FB(z)$, одновременно в окне осциллографа «EXT» отображается зависимость, соответствующая данной точке (рис.6.1-40).

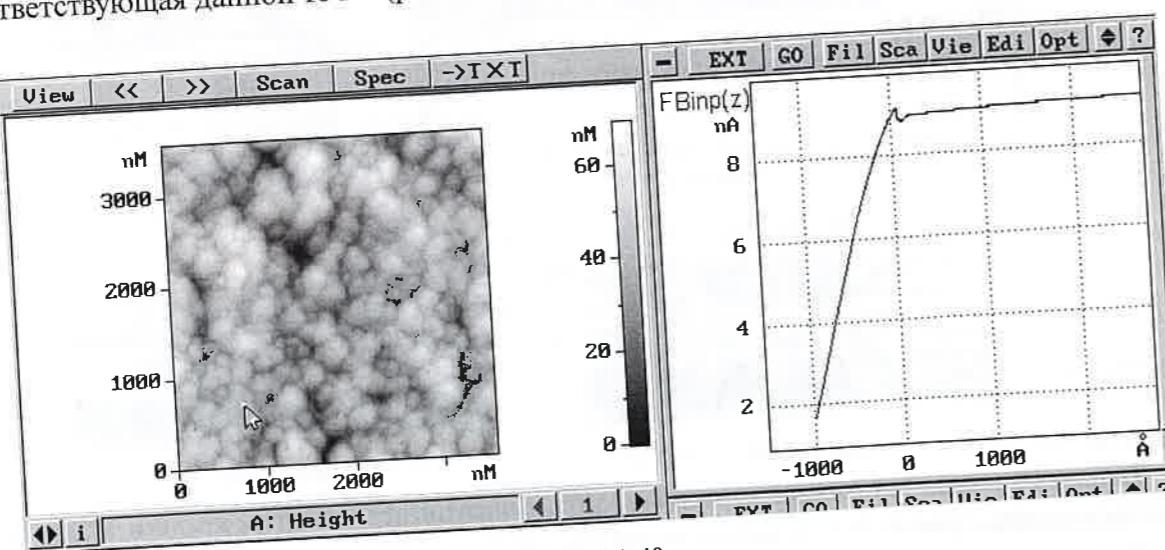


Рис.6.1-40

6.1 Измерение зависимости $FB(z)$ в полуконтактном режиме (сигнала FB от расстояния между зондом и

Если при получении данных спектроскопии использовался «режим измерения в одной точке», то для просмотра зависимости измеренной в следующей одиночной точке (если она существует) необходимо воспользоваться кнопкой « $>>$ ». Соответственно, для перехода к предыдущей точке служит кнопка « $<<$ ».

Если при получении данных спектроскопии использовался режим измерения серии зависимостей вдоль заданного отрезка прямой (режим «Line») или в точках заданной сетки (режим «Grid»), то курсор можно последовательно перемещать по точкам поверхности, в которых производились измерения, при помощи перемещения мыши в горизонтальном направлении, или стрелок «влево» («вправо»). При этом для каждой точки, в которой проводилось измерение, в окне осциллографа «EXT» будет отображаться зависимость, соответствующая данной точке.

Для перехода к последующему массиву данных спектроскопии необходимо воспользоваться кнопкой « $>>$ ». Аналогично, кнопка « $<<$ » служит для перехода к предыдущему массиву.

При нажатии кнопки «Spec» в окне SPM вместо изображения скана поверхности выводится массив данных спектроскопии в виде трехмерного графика, где по оси X - аргумент, по оси Y - номер точки измерения, а величина сигнала передается цветовой гаммой или плотностью закраски (рис.6.1-41).

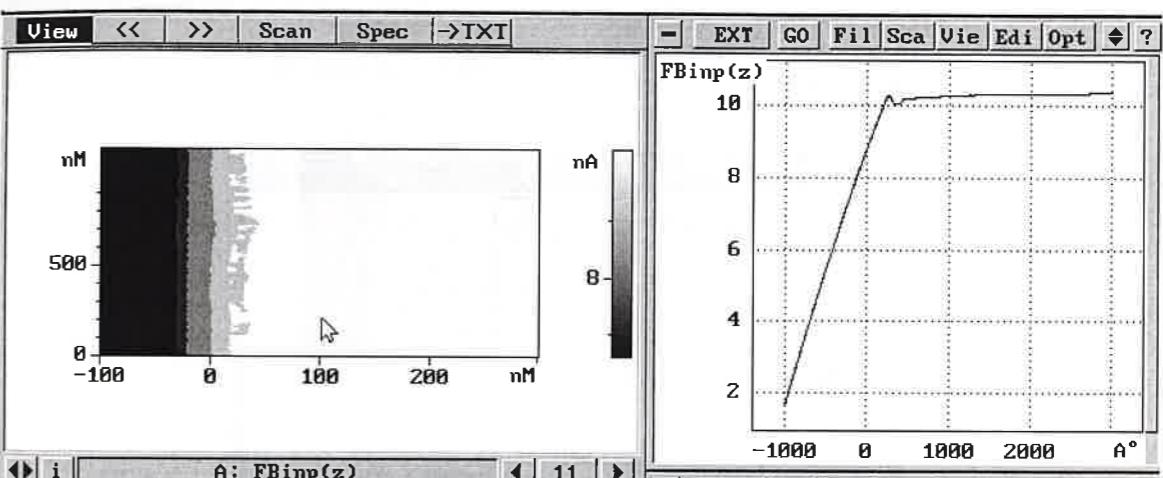


Рис.6.1-41

В этом случае аналогичным образом работает кнопка «View», только перемещение курсора происходит по изображению данных спектроскопии.

6.1.6 Калибровка амплитуды колебаний кантилевера

Сигнал FB является сигналом, пропорциональным амплитуде механических колебаний кантилевера. Если провести калибровку сигнала, т.е. найти коэффициент пропорциональности между величиной амплитуды колебаний и величиной сигнала FB , то можно будет знать реальную величину амплитуды колебаний кантилевера. Калибровку сигнала FB можно произвести исходя из зависимости сигнала FB от расстояния между зондом и поверхностью образца.

Возможность калибровки основана на следующем предположении. В полуконтактном режиме, когда зонд уже начинает стучать по поверхности образца, при дальнейшем приближении зонда к поверхности происходит ограничение амплитуды колебаний. Предполагается, что величина уменьшения амплитуды колебаний равна величине перемещения зонда к поверхности (Δz):

$$\Delta \text{амплитуды} = \Delta z \quad (1)$$

Это предположение является справедливым, если добротность системы сохраняется достаточно высокой и если образец является абсолютно твердым.

6-12

Руководство пользователя C3M Solver BIO Cell

Пример калибровки сигнала FB

Пусть измерена зависимость сигнала FB, которая отображена в окне программного осциллографа «EXT» (рис.6.1-42).

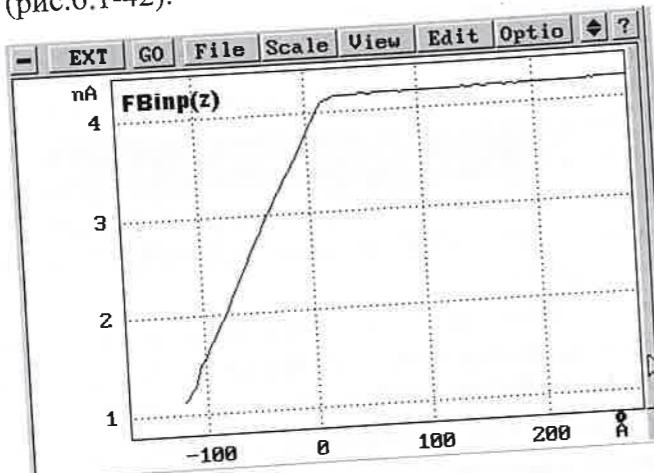


Рис.6.1-42

Нажимаем на длинную, узкую кнопку, расположенную вдоль правой границы окна осциллографа (рис.6.1-42). В результате открывается поле данных с правой стороны осциллографа (рис.6.1-43).

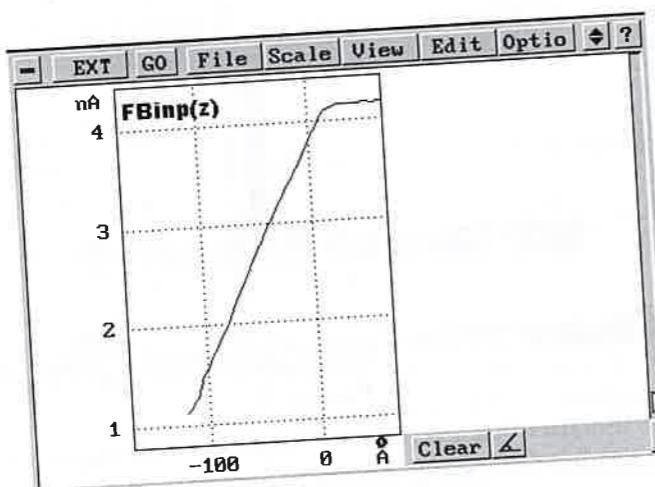


Рис.6.1-43

Короткая узкая кнопка, находящаяся под длинной узкой кнопкой позволяет регулировать ширину поля данных (рис.6.1-43).

Включаем режим просмотра координат точек кривой FB(z) нажатием кнопки «View» в меню осциллографа (рис.6.1-44).



Рис.6.1-44

Курсор при движении перемещается по кривой FB(z), при этом в появившемся вверху окна осциллографа меню отображаются координаты точек. Y соответствует функции, т.е. FB(z), а X соответствует аргументу, то есть z (рис.6.1-45).

6.1 Измерение зависимости FB(z) в полуконтактном режиме (сигнала FB от расстояния между зондом и

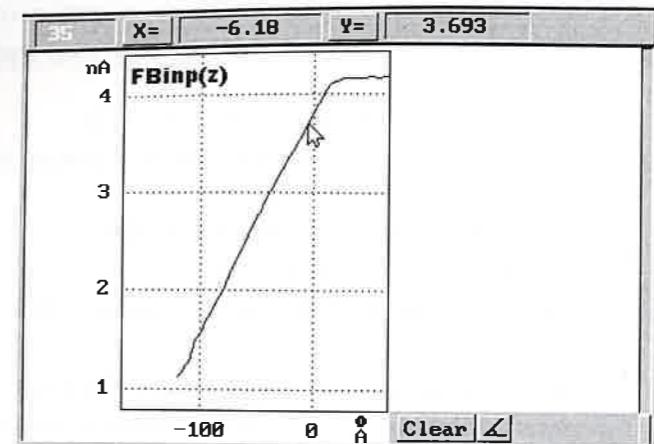


Рис.6.1-45

Выбираем какую-либо точку кривой из области соответствующей полуконтактному режиму, нажимаем на левую клавишу мыши, при этом производится маркировка выбранной точки (рис.6.1-46).

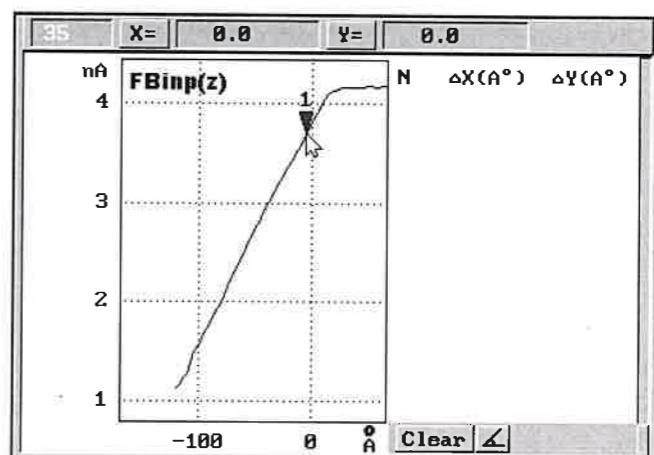


Рис.6.1-46

Аналогично, выбираем и маркируем вторую точку (рис.6.1-47). В поле данных появляются значения ΔX и ΔY , которые соответствуют приращению аргумента (Δz) и приращению функции ($\Delta FB(z)$) между выбранными точками (рис.6.1-45).

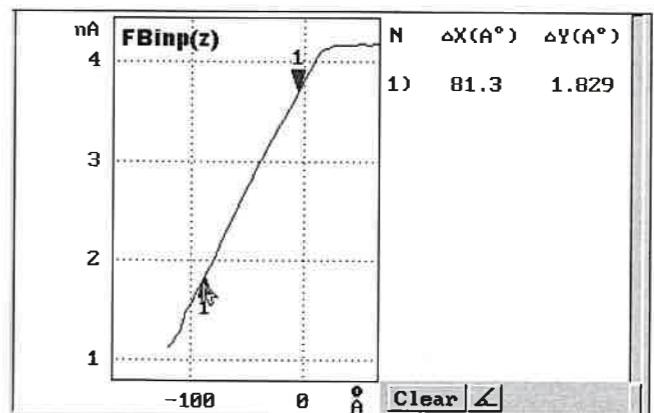


Рис.6.1-47

6.1 Измерение зависимости FB(z) в полуконтактном режиме (сигнала FB от расстояния между зондом и

Коэффициент пропорциональности, связывающий величину амплитуды механических колебаний кантileвера (зонда) и величину сигнала обратной связи, определяется как отношение:

$$K = \Delta z / \Delta FB(z) = \Delta X / \Delta Y \quad (2)$$

Соответственно, амплитуда механических колебаний зонда будет определяться из соотношения:

$$\text{Амплитуда } [\text{\AA}] = K * (\text{сигнал } FB[\text{nA}]) \quad (3)$$

В случае нашего примера $\Delta X = 81.3 \text{ \AA}$, $\Delta Y = 1.83 \text{ nA}$, следовательно $K = 81.3 / 1.83 = 44.4 \text{ [\AA/nA]}$. Соответственно, амплитуда механических колебаний зонда будет определяться из соотношения:

$$\text{Амплитуда } [\text{\AA}] = 44.4 * (\text{сигнал } FB[\text{nA}]).$$

Если полученное значение коэффициента К установить в индикаторе сигнала FB, то последний будет отображать непосредственно величину амплитуды колебаний кантileвера в ангстремах при работе в режиме индикации амплитуды колебаний (пункт 5.1.4).

Глава 7. Многопроходный режим работы прибора

Содержание

Глава 7. Многопроходный режим работы прибора	7-2
7.1 Общие представления о многопроходном режиме	7-2
7.2 Настройка и управление в многопроходном режиме	7-3
7.2.1 Состояния прибора и их переключение в блок-схеме SPM	7-3
7.2.2 Меню многопроходного режима	7-4
7.2.3 Установка многопроходного режима	7-5
7.2.3.1 Блок измерительных каналов, кнопки «Signal» и «Dir»	7-5
7.2.3.2 Как устанавливается однопроходный режим?	7-6
7.2.3.3 Особые случаи в однопроходном режиме	7-7
7.2.3.4 Как устанавливается многопроходный режим работы прибора	7-8

Глава 7. Многопроходный режим работы прибора

В настоящем разделе рассматриваются общие вопросы структуры и организации многопроходного режима в приборе, а также возможности реализации многопроходных методик на его основе.

7.1 Общие представления о многопроходном режиме

Важной особенностью прибора является его способность работать в многопроходном режиме. Электронное обеспечение и программный пакет прибора имеют большую гибкость и позволяют организовать самые различные конфигурации двух-, трех- и четырех проходных методик. В частности прибор обеспечивает работу традиционных двухпроходных методик, использующих двухпроходный режим, таких как магнитная силовая микроскопия, микроскопия электростатических сил, микроскопия поверхностного потенциала, сканирующая емкостная микроскопия.

В обычном, однопроходном режиме изображение топографии или какой-нибудь другой величины получают в результате построчного сканирования поверхности исследуемого образца при некоторых заданных параметрах сканирования.

В многопроходном режиме сканирование каждой строки производится определенное число раз: в двухпроходном - два, трехпроходном - три и так далее. Причем, что важно, каждому сканированию соответствуют некоторые определенные параметры и условия сканирования, которые могут быть различными для различных проходов.

Наш прибор при работе в многопроходном режиме способен обеспечить:

- 1) многократное сканирование каждой строки (от одного до четырех раз, в зависимости от установленного значения);
- 2) при каждом сканировании может производиться измерение различных величин и сигналов;
- 3) каждое сканирование строки может производиться при различных режимах сканирования (контактном, полуконтактном, бесконтактном), при различных параметрах и условиях сканирования;
- 4) данные топографии, измеренные при первом проходе могут учитываться при последующих проходах и более того, движение зонда при каждом последующем проходе может производиться на заданной высоте с учетом топографии, измеренной при первом проходе.

Самым простым случаем многопроходного режима является двухпроходный. Рассмотрим в качестве примера две различные схемы двухпроходных методик, основанных на двухпроходном режиме работы прибора.

В случае двухпроходного режима, каждая строка сканируется дважды.

В качестве одной из возможных схем двухпроходной методики рассмотрим следующую. Например, при первом проходе каждой строки измеряется топография поверхности в контактном режиме, а при втором проходе может производиться измерение какого-либо другого сигнала (другой величины). Это может быть сигнал **DFL**, который пропорционален силе, действующей на кантilever. Причем, при этом может учитываться рельеф поверхности, действующей на кантilever. При втором проходе сканирование может производиться измеренный при первом проходе. При втором проходе сканирование может производится при выключенном обратной связи. Зонд может поддерживаться на заданной, постоянной высоте относительно каждой локальной точки поверхности. В результате сканирования будут получены два изображения: изображение топографии и изображение сигнала, пропорционального силе, действующей на зонд, на определенном, фиксированном расстоянии от поверхности. Если при этом поверхность обладает магнитными свойствами, а зонд является

магнитным, то полученное изображение сигнала **DFL** будет соответствовать изображению магнитной силы, действующей на зонд на определенном, фиксированном расстоянии от поверхности.

Второй пример возможной схемы двухпроходной методики, основанной на двухпроходном режиме работы прибора. При первом проходе каждой строки может измеряться топография поверхности в полуконтактном режиме, а при втором проходе измеряться сигнал фазы. Причем, как и в предыдущем примере, на втором проходе сканирование может производится при выключенном обратной связи на определенной, фиксированной высоте относительно каждой локальной точки, на основе учета рельефа, измеренного на первом проходе. В этом случае, в результате сканирования будут получены изображение топографии и изображение сигнала фазы в условиях сканирования зонда на постоянной высоте относительно поверхности. Если при этом поверхность обладает магнитными свойствами, а зонд является магнитным, то полученное изображение сигнала фазы будет соответствовать изображению производной магнитной силы, действующей на зонд на определенном, фиксированном расстоянии от поверхности.

Соответственно можно построить и другие схемы различных двухпроходных методик, основанные на двухпроходном режиме.

В нашем приборе можно организовать также трех- и четырехпроходный режим работы. Это означает, что каждая строка будет сканироваться три раза, в случае трехпроходного режима, или четыре раза, в случае четырехпроходного режима. При этом при каждом проходе производится измерение определенной величины и при определенных условиях. Причем данные топографии, полученные при первом проходе (если при первом проходе измеряется именно топография) могут учитываться при последующих проходах.

В нашем приборе, обычный однопроходный режим можно рассматривать как частный случай многопроходного режима, в котором число сканирований каждой строки установлено равным единице.

7.2 Настройка и управление в многопроходном режиме

Настройка и управление прибора при работе в многопроходном режиме производится при помощи 1) блок-схемы SPM, 2) меню многопроходного режима и 3) меню измерительных каналов.

7.2.1 Состояния прибора и их переключение в блок-схеме SPM

Прибор может быть настроен на четыре различных состояния. В каждый момент времени прибор может находиться в одном из этих четырех состояний. Основным является первое состояние. При загрузке программы по умолчанию устанавливается первое состояние. Каждому состоянию соответствует определенная настройка прибора: определенный режим работы (контактный, полуконтактный, бесконтактный), параметры взаимодействия зонда и образца, петли обратной связи, параметры сканирования, параметры измерительных каналов, параметры усилителей и других элементов, входящих в состав прибора.

В блок-схеме SPM (рис.7.2-1) находятся четыре кнопки выбора состояния (рис.7.2-2), пронумерованные соответственно как «1», «2», «3» и «4». По умолчанию, при загрузке программы кнопка «1» является включенной. Это означает, что прибор находится в первом состоянии и все параметры блок-схемы SPM соответствуют именно этому первому состоянию. При работе в однопроходном режиме обычно работают при параметрах которые установлены в первом состоянии, однако можно использовать для работы в однопроходном режиме и любое другое состояние.

Если включить кнопку с номером «2», то прибор переключится во второе состояние с набором параметров настройки соответствующим второму состоянию. Этот второй набор параметров может как отличаться, так и совпадать с набором параметров, соответствующих первому состоянию.

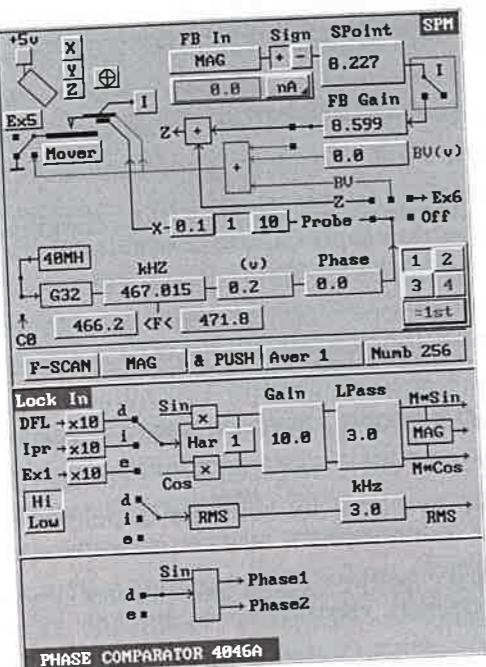


Рис.7.2-1



Рис.7.2-2

Аналогично, при нажатии кнопок с номерами «3» и «4» прибор будет переключен в третье и четвертое состояние. Соответственно, пользователь может сам изменять и устанавливать необходимые значения параметров настройки для различных состояний.

Если были произведены изменения параметров настройки в каких-либо состояниях и их необходимо сохранить, то это можно сделать, записав новую конфигурацию параметров настройки либо в основной файл параметров **smena.opt**, либо в какой-либо другой файл с расширением ***.opt**.

При каждом новом запуске программы загружается конфигурация параметров настройки, записанная в файле **smena.opt**. При необходимости установить конфигурацию, записанную в некотором другом файле с расширением ***.opt**, необходимо будет дополнительно загрузить соответствующий файл с необходимой конфигурацией параметров настройки.

Наличие возможности достаточно простого и быстрого переключения прибора в любое из четырех возможных состояний параметров настройки путем простого нажатия соответствующей кнопки состояния, делает работу прибора достаточно удобной и в обычном однопроходном режиме.

Любое из четырех состояний прибора может быть использовано для работы в однопроходном режиме. То есть, если прибор установлен в обычный однопроходный режим работы, то переключив прибор в любое из четырех состояний нажатием соответствующей кнопки, можно работать в однопроходном режиме при тех параметрах настройки прибора, которые соответствуют этому состоянию.

Например, если в первом состоянии прибор настроен на работу например в полуkontakte режиме, а во втором состоянии на работу в контактном режиме, то простым включением кнопки «2», соответствующей второму состоянию, можно перевести прибор из полуkontakte режима в контактный режим и продолжить работу в контактном режиме.

7.2.2 Меню многопроходного режима

Для открытия меню многопроходного режима необходимо нажать кнопку «**operation**» в окне SPM, затем в открывшемся меню выбрать «**scanning**» и в появившемся окне «**scanning**» выбрать заголовок «**=>**». В результате откроется меню многопроходного режима (рис.7.2-3).

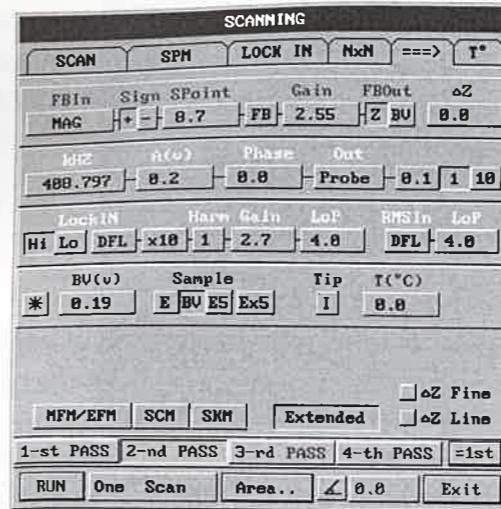


Рис.7.2-3

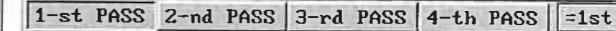


Рис.7.2-4

Меню многопроходного режима является фактически кратким протоколом состояния параметров настройки блок-схемы SPM. При помощи кнопок данного меню можно также, как и при помощи кнопок блок-схемы SPM изменять соответствующие параметры и состояние схемы.

В нижней части меню (рис.7.2-3) находится строка выбора состояния прибора (рис.7.2-4), кнопки которой (кнопки «1-st PASS», «2-nd PASS», «3-rd PASS», «4-th PASS») полностью эквивалентны кнопкам состояний, находящимся в блок-схеме SPM (кнопкам «1», «2», «3», «4»).

Если в блок-схеме SPM включается какая-либо кнопка состояния, например «2», то и в строке выбора состояния автоматически включается соответствующая кнопка, т.е. кнопка «2-nd PASS»

И наоборот, при включении определенной кнопки в строке состояний, автоматически включается соответствующая кнопка в блок-схеме SPM.

В строке состояний имеется кнопка «**=1st**», которая также эквивалентна аналогичной кнопке в блок-схеме SBM. При нажатии на неё

кнопке в блок-схеме SPM. При помощи этой кнопки можно устанавливать значения параметров настройки второго, третьего и четвертого состояний равными параметрам первого состояния. Для этого необходимо только нажать сначала кнопку соответствующего состояния в строке выбора состояний или в блок-схеме SPM, а затем нажать кнопку «=1st».

Кроме кнопок, дублирующих кнопки блок-схемы SPM, в меню многопроходного режима имеется ряд дополнительных кнопок, которых нет в блок-схеме SPM.

В частности кнопка-индикатор « ΔZ ». Данная кнопка используется, когда необходимо при последующих проходах организовать сканирование на определенной, заданной высоте относительно поверхности.

В этих случаях для последующих проходов при помощи этой кнопки устанавливается величина смещения зонда по высоте относительно первого прохода с учетом рельефа поверхности, измеренного при первом сканировании.

7.2.3 Установка многопроходного режима

7.2.3.1 Блок измерительных каналов, кнопки «Signal» и «Dir»

Необходимая конфигурация многопроходного режима устанавливается в блоке управления измерительными каналами (рис.7.2-5), который находится в окне управления параметрами сканирования (рис.7.2-6).

Signal	Dir.
A: Height	+X+
B: Phase1	--2-->
C: Off	--3-->
D: Off	--4-->

Рис.7.2-5

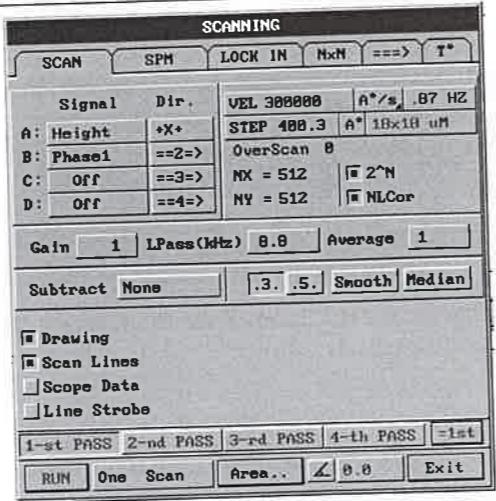


Рис.7.2-6

Прибор имеет четыре измерительных канала А, В, С и D, к каждому может быть подключен определенный сигнал и при сканировании будет производится формирование данных изображения установленных сигналов.

В блоке управления измерительными каналами (рис.7.2-5) каждый канал имеет две кнопки-индикатора: «Signal» и «Dir».

При помощи кнопок «Signal» устанавливаются необходимые сигналы на входы соответствующих каналов.

Канал А является выделенным, относительно других каналов. Во-первых на вход этого канала всегда включен какой-либо сигнал. Во-вторых именно в канале А задается направление сканирования.

Направление сканирования задается при помощи кнопки «Dir» данного канала. Направление считывания сигнала, установленного в этом канале совпадает с направлением сканирования.

Действие и функции кнопок «Dir» в каналах В, С и D отличаются от действия и функций соответствующей кнопки в канале А.

Во-первых кнопка «Dir» в этих каналах (каналах В, С и D) активизируются только в том случае, если на вход канала включен какой-либо сигнал. Если канал выключен, т.е. кнопка «Signal» данного канала установлена в состояние «off», то не имеет значения что установлено в кнопке «Dir» этого канала, кнопка «Dir» этого канала не активизирована.

Во-вторых кнопки «Dir» каналов В, С и D устанавливают направление считывания сигналов в этих каналах (относительно канала А).

В-третьих именно при помощи кнопок «Dir» каналов В, С и D устанавливается тип режима сканирования: однопроходный или многопроходный.

7.2.3.2 Как устанавливается однопроходный режим?

Если ни одна из активизированных кнопок «Dir» каналов В, С, D не установлена в состояние с двойной стрелкой, прибор находится в однопроходном режиме. Это соответствует случаям, когда активизированные кнопки «Dir» каналов В, С, D установлены в состояния с одинарной стрелкой, либо когда каналы В, С, D вообще выключены.

В однопроходном режиме при сканировании в канале А производится считывание сигнала, который установлен в этом канале.

Обратим внимание, что в канале А всегда будет производится считывание определенного сигнала, т.к. этот канал всегда включен, в отличие от каналов В, С, D, которые могут быть и выключены.

В однопроходном режиме сканирование производится при параметрах того состояния, которое включено в блок-схеме SPM . Так, если включена кнопка «1» (рис.7.2-7) то сканирование будет производится при параметрах настройки, соответствующих состоянию «1».

Соответственно, если включена кнопка «2» (рис.7.2-8), то сканирование будет производится при параметрах соответствующих состоянию «2», если кнопка «3» (рис.7.2-9), то при параметрах соответствующих состоянию «3», если кнопка «4» (рис.7.2-10), то при параметрах соответствующих состоянию «4».



Рис.7.2-7



Рис.7.2-8

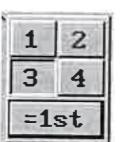


Рис.7.2-9

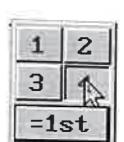


Рис.7.2-10

При установке любых комбинаций состояний с одинарной стрелкой в кнопках «Dir» в каналах В, С, D сканирование будет производится при параметрах настройки соответствующих установленному состоянию (номеру кнопки, включенной в блок-схеме SPM).

Каждое сканирование строки состоит из двух частей: движения в прямом направлении и движения в обратном направлении. Соответственно измерение сигналов можно производить при прямом движении и при обратном движении.

Направление считывания сигналов указывают направления стрелок на кнопках «Dir» в каналах В, С, D.

Для считывания сигналов имеется два АЦП. Первое АЦП обслуживает каналы А и С, второе АЦП, соответственно В и D.

Одновременно, при движении в одном направлении (в прямом или обратном) можно производить считывание только двух сигналов.

Канал А является выделенным и в нем всегда направление сканирования и направление считывания совпадают (в том смысле, что считывание в этом канале производится при движении в прямом направлении сканирования).

Поэтому одновременно в прямом направлении можно производить считывание в каналах А и В, либо А и D. Соответственно, при движении в обратном направлении, считывание можно производить в каналах С и D, либо С и В.

7.2.3.3 Особые случаи в однопроходном режиме

Имеется несколько особых случаев, когда при работе в однопроходном режиме (т.е. когда отсутствуют состояния с «двойными стрелками» на активизированных кнопках «Dir» в каналах В, С, D), тем не менее прибор вынужден делать по два прохода каждой строки, т.е. работать как в многопроходном режиме. Правда, при этом повторное сканирование производится при тех же параметрах, что и для первого прохода.

Существование этих особых случаев связано с тем, что для двух каналов, обслуживаемых одним АЦП, могут быть установлены одинаковые направления считывания сигналов. Например, для каналов А и С, как это показано на рис. 7.2-11 (или каналов В и D, как это показано на рис. 7.2-12). Прибор физически не может одновременно одним АЦП считать сигналы в этих каналах. Эта проблема решается повторным сканированием. В этом случае для пары каналов А и С при первом сканировании считывается сигнал в канале А, а при втором проходе этой строки в канале С. Аналогично для пары каналов В и D.

Signal	Dir.
A: Height	+X+
B: Off	---->
C: Phase1	---->
D: Off	<----

Рис.7.2-11

Signal	Dir.
A: Height	+X+
B: DFL	---->
C: Off	---->
D: Lateral F	---->

Рис.7.2-12

7.2.3.4 Как устанавливается многопроходный режим работы прибора

Если хотя бы одна из активизированных кнопок «Dir» каналов **B**, **C** и **D** находится в состоянии с двойной чертой (например «==2=>» или «<= 2==»), то прибор переключается в многопроходный режим.

При этом всегда при первом проходе будет производится измерение сигнала, установленного в канале **A**, режим сканирования и параметры сканирования при этом будут соответствовать состоянию «1» параметров настройки прибора. При этом неважно, какое состояние включено в блок-схеме SPM (кнопка с каким номером включена в блок-схеме SPM).

При втором проходе будет производится измерение сигнала в том канале, в котором кнопка «Dir» установлена в состоянии с двойной стрелкой. При этом сканирование будет производится в том режиме и при тех параметрах сканирования которые соответствуют установленному состоянию (номеру стоящему на двойной стрелке).

Каналы имеют очередьность **B**, **C**, **D**. То есть, если двойная стрелка стоит на кнопках «Dir» каналов **B**, **C**, **D** и все кнопки активизированы, то при втором проходе будет производится измерение в канале **B**, соответственно при третьем проходе в канале **C** и при четвертом в канале **D**.

Если двойная стрелка стоит в каналах активизированных кнопок **C**, **D**, то при втором проходе будет производится измерение сигнала в канале **C**, а при третьем в канале **D**.

Относительно цифры, стоящей на двойной стрелке важно подчеркнуть следующее. Цифра на двойной стрелке обозначает не номер прохода, а номер состояния параметров настройки прибора при которых будет производится сканирование, соответствующее этому проходу.

Направление двойной стрелки указывает направление считывания сигнала относительно первого прохода. Если стрелка направлена слева на право («== >»), та при этом проходе считывание сигнала будет производится в том же направлении (т.е. при прямом ходе этого прохода), если стрелка направлена справа налево («< ==»), то считывание сигнала будет производится на обратном ходе этого прохода.

Однако, снимать сигнал на обратном ходе («< ==») сразу после измерения топографии не рекомендуется, так как система может не успеть перенастроиться на другие параметры.

Рассмотрим, для наглядности несколько примеров соответствующих различным конфигурациям многопроходного режима.

Пример 1 (рис. 7.2-13).

Signal	Dir.
A: Height	+X+
B: Phase1	==2=>
C: DFL	==3=>
D: Off	----->

Рис.7.2-13

В этом примере установлено:

В канале А: «Signal»= «Height», «Dir»= «+X+».

В этом канале будет производится измерение высоты, в качестве направления быстрого сканирования выбрано положительное направление оси X, соответственно, медленное сканирование будет производится по оси Y в положительном направлении. В качестве сканирования можно было установить и любое другое из возможных. Относительно этого выбранного в канале А направления сканирования будут устанавливаться направления считывания сигналов в других каналах.

В канале В: «Signal»= «Phase 1», «Dir» = «==2=>».

Это означает, что на втором проходе зонда будет работать канал **B** и в этом канале будет производится измерение сигнала «Phase 1». При этом второй проход зонда будет производится при параметрах настройки прибора, которые установлены для состояния «2». При втором проходе направление считывания сигнала «Phase 1» задается направлением двойной стрелки «==2=>» и будет таким же, как при первом проходе. Если установить направление двойной стрелки на противоположное, «<= 2==», то считывание сигнала будет производится при обратном движении зонда (относительно первого прохода).

В канале С: «Signal»= «DFL», «Dir» = «==3=>».

Это означает, что при третьем проходе зонда будет работать канал **C**, в этом канале будет производится измерение сигнала «DFL». Третий проход зонда будет производится при параметрах настройки прибора, которые установлены для состояния «3». Аналогично предыдущему каналу, при третьем проходе направление считывания сигнала «DFL» задается направлением двойной стрелки «==3=>» и будет таким же как при первом проходе. Если установить направление двойной стрелки на противоположное, «<= 3==», то считывание сигнала будет производится при обратном движении зонда (относительно первого прохода).

В канале D : «Signal»= «Off».

Это означает, что канал выключен. Если канал выключен, то не имеет ни какого значения, что установлено в кнопке «Dir».

Пример 2 (рис.7.2-14).

Signal	Dir.
A: Height	+X+
B: Off	==2=>
C: Off	==3=>
D: Off	==4=>

Рис.7.2-14

На вход канала А включен сигнал «Height». Каналы **B**, **C**, **D** выключены. Несмотря на то, что кнопки «Dir» в каналах **B**, **C**, **D** установлены в состояния соответствующие многопроходному режиму («==2=>», «==3=>» и «==4=>»), прибор будет работать в однопроходном режиме. Поскольку кнопка «Dir» активизируется только в том случае, если на вход канала включен какой-либо сигнал.

Пример 3 (рис.7.2-15).

Signal	Dir.
A: Height	+X+
B: Off	==2=>
C: DFL	==3=>
D: Off	==4=>

Рис.7.2-15

В канале А: «Signal»= «Height» - измерение высоты; «Dir»= «+X+», т.е. в качестве направления быстрого сканирования выбрано положительное направление оси X, соответственно, медленное сканирование будет производится по оси Y в положительном направлении.

В канале В: «Signal»= «Off».

Это означает, что канал выключен и не имеет значения что стоит в кнопке «Dir».

В канале С: «Signal»= «DFL», «Dir» = «==3=>».

Это означает, что при втором проходе зонда будет работать канал С, в этом канале будет производится измерение сигнала «DFL». Второй проход зонда будет производится при параметрах настройки прибора, которые установлены для состояния «3». Направление считывания сигнала «DFL» задается направлением двойной стрелки «==3=>» и будет таким же как при первом проходе.

В канале D: «Signal»= «Off».

Это означает, что канал выключен и не имеет значения что стоит в кнопке «Dir».