



НаноФаб 100

Модуль UHV SPM

Руководство пользователя



НаноФаб 100

Модуль UHV SPM

Руководство пользователя

18 ноября 2008 г.

Copyright © «НТ-МДТ»

Сайт: <http://www.ntmdt.com>

Общие вопросы: spm@ntmdt.ru

Тех.поддержка: support@ntmdt.ru

ЗАО «Нанотехнология-МДТ»

124460, Москва, Зеленоград, корп.167

Тел.: 8-(495)-535-03-05, 535-83-69,

Факс: 8-(495)-535-64-10

Обратная связь

Если в процессе работы у Вас возникнут дополнительные вопросы, не освещенные в описаниях, свяжитесь со специалистами компании, которые максимально подробно ответят на любые Ваши вопросы.

Также для связи со специалистами компании в онлайне удобно воспользоваться услугой «Онлайн-сервис!» (<http://www.ntmdt.ru/online.pl>).

ФИО	e-mail	По каким вопросам обращаться
Сербу Антон Викторович <i>Инженер технологической группы производства НТК</i>	serbu@ntmdt.ru	Модули UHV SPM, SPM GIS, вакуумная и транспортная системы, все общие вопросы
Знатков Павел Юрьевич <i>Инженер технологической группы производства НТК</i>	znatkov@ntmdt.ru	Модули UHV SPM, SPM GIS, вакуумная и транспортная системы
Наумов Павел Сергеевич <i>Инженер технологической группы производства НТК</i>	naumov@ntmdt.ru	Модули FIB UHV, FIB Implant, FIB CVD
Харламов Роман Валентинович <i>Руководитель технологической группы производства НТК</i>	kharlamov@ntmdt.ru	Модули MBE, модули CVD, модули плазменных технологий
Карпов Игорь Леонидович <i>Инженер технологической группы производства НТК</i>	karpov_i@ntmdt.ru	Модули PLD

НаноФаб 100. Модуль UHV SPM

Оглавление

1. ВВЕДЕНИЕ.....	8
2. УСТРОЙСТВО.....	9
3. ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ.....	27
4. УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	28
5. ПОДГОТОВКА К ПРОВЕДЕНИЮ ИЗМЕРЕНИЙ.....	29
6. КОНТАКТНАЯ АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ.....	46
7. ПОЛУКОНТАКТНАЯ АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ.....	76
8. АСМ СПЕКТРОСКОПИИ.....	103
9. МНОГОПРОХОДНЫЕ МЕТОДЫ.....	125
10. СКАНИРУЮЩАЯ ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ.....	150
11. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ.....	173
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	184
1. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ.....	184
2. СКАНЕРЫ С ДАТЧИКАМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ.....	190

НаноФаб 100. Модуль UHV SPM

Содержание

1. ВВЕДЕНИЕ	8
2. УСТРОЙСТВО	9
2.1. ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ	9
2.2. ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА	10
2.2.1. Принципиальная схема	11
2.2.2. СЗМ камера	13
2.2.3. Камера зондов	15
2.3. СКАНИРУЮЩИЙ ЗОНДОВЫЙ МИКРОСКОП	17
2.4. СИСТЕМА СМЕНЫ ЗОНДОВЫХ ГОЛОВОК	21
2.5. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ	24
3. ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ	27
4. УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ	28
5. ПОДГОТОВКА К ПРОВЕДЕНИЮ ИЗМЕРЕНИЙ	29
5.1. Установка АСМ зондового датчика	30
5.2. Установка СТМ зонда	31
5.3. Установка зондовых головок в камеру зондов	33
5.4. Перегрузка образца в СЗМ камеру	36
5.5. Перемещение зондовой головки в СЗМ камеру	38
5.6. Настройка оптической системы регистрации отклонений кантилвера	43
5.7. Предварительный подвод	45
6. КОНТАКТНАЯ АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ	46
6.1. Метод Постоянной Силы	46
6.1.1. Подготовка к измерениям	46
6.1.2. Выбор конфигурации	47
6.1.3. Подвод образца к зонду	47
6.1.4. Установка рабочего уровня коэффициента усиления обратной связи	50
6.1.5. Установка параметров сканирования	52
6.1.6. Сканирование	55
6.1.7. Сохранение полученных данных	59
6.1.8. Завершение измерений	59
6.2. Метод Латеральных Сил	59
6.2.1. Краткая характеристика метода	59
6.2.2. Подготовка к измерениям	61
6.2.3. Сканирование	62
6.3. Метод Постоянной Высоты	62
6.3.1. Краткая характеристика метода	62
6.3.2. Подготовка к измерениям	64
6.3.3. Настройка параметров	64
6.3.4. Сканирование	65
6.4. ОТОБРАЖЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАСТЕКАНИЯ	65
6.4.1. Краткая характеристика метода	65
6.4.2. Подготовка к измерениям	66
6.4.3. Настройка параметров	67
6.4.4. Сканирование	67
6.4.5. Способы улучшения изображения	68
6.5. Метод Модуляции Силы	69
6.5.1. Краткая характеристика метода	69
6.5.2. Подготовка к измерениям	69
6.5.3. Настройка параметров	70

6.5.4.	Сканирование	72
6.5.5.	Способы улучшения изображения	73
6.6.	КОНТАКТНЫЙ МЕТОД РАССОГЛАСОВАНИЯ	73
6.6.1.	Краткая характеристика метода	73
6.6.2.	Подготовка к измерениям	74
6.6.3.	Настройка параметров	74
6.6.4.	Сканирование	75
7.	ПОЛУКОНТАКТНАЯ АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ.....	76
7.1.	ПОЛУКОНТАКТНЫЙ МЕТОД.....	76
7.1.1.	Подготовка к измерениям	76
7.1.2.	Выбор конфигурации	77
7.1.3.	Установка рабочей частоты пьезо драйвера	77
7.1.4.	Установка начального уровня сигнала Mag.....	81
7.1.5.	Подвод образца к зонду.....	82
7.1.6.	Установка рабочего уровня коэффициента усиления обратной связи.....	86
7.1.7.	Установка параметров сканирования	87
7.1.8.	Сканирование	91
7.1.9.	Сохранение полученных данных	95
7.1.10.	Завершение измерений	95
7.2.	ПОЛУКОНТАКТНЫЙ МЕТОД РАССОГЛАСОВАНИЯ	96
7.2.1.	Краткая характеристика метода	96
7.2.2.	Подготовка к измерениям	96
7.2.3.	Настройка параметров	97
7.2.4.	Сканирование	98
7.3.	МЕТОД ОТОБРАЖЕНИЯ ФАЗЫ	99
7.3.1.	Краткая характеристика метода	99
7.3.2.	Подготовка к измерениям	99
7.3.3.	Настройка параметров	100
7.3.4.	Сканирование	102
7.3.5.	Способы улучшения изображения	102
8.	АСМ СПЕКТРОСКОПИИ.....	103
8.1.	ВВЕДЕНИЕ.....	103
8.2.	СИЛОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ (DFL(HEIGHT)).....	103
8.2.1.	Основные операции.....	103
8.2.2.	Переход на вкладку спектроскопии	104
8.2.3.	Выбор измеряемой зависимости	104
8.2.4.	Выбор точек спектроскопии	107
8.2.5.	Запуск измерений	109
8.2.6.	Просмотр данных спектроскопии	110
8.2.7.	Вычисление силы адгезии	112
8.3.	ТОКОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ (IPR-LOW(BIAS VOLTAGE)).....	114
8.3.1.	Подготовка и проведение измерений	114
8.3.2.	Просмотр данных спектроскопии	116
8.4.	АМПЛИТУДНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ (MAG(HEIGHT)).....	117
8.4.1.	Подготовка и проведение измерений	117
8.4.2.	Просмотр данных спектроскопии	118
8.4.3.	Калибровка амплитуды колебаний кантилевера	120
8.5.	ФАЗОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ (PHASE(HEIGHT)).....	121
8.5.1.	Подготовка и проведение измерений	121
8.5.2.	Просмотр и анализ данных спектроскопии	123
9.	МНОГОПРОХОДНЫЕ МЕТОДЫ.....	125
9.1.	ВВЕДЕНИЕ.....	125
9.2.	МАГНИТНАЯ СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ.....	125
9.2.1.	Краткая характеристика метода	125
9.2.2.	Подготовка к измерениям	127
9.2.3.	Установка параметров сканирования	128
9.2.4.	Сканирование	129

9.3.	ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ	132
9.3.1.	Краткая характеристика метода	132
9.3.2.	Подготовка к измерениям	133
9.3.3.	Установка параметров сканирования	134
9.3.4.	Сканирование	135
9.4.	МЕТОД ЗОНДА КЕЛЬВИНА	138
9.4.1.	Краткая характеристика метода	138
9.4.2.	Подготовка к измерениям	139
9.4.3.	Установка параметров сканирования	140
9.4.4.	Сканирование	141
9.5.	СКАНИРУЮЩАЯ ЕМКОСТНАЯ МИКРОСКОПИЯ	144
9.5.1.	Краткая характеристика метода	144
9.5.2.	Подготовка к измерениям	145
9.5.3.	Установка параметров сканирования	146
9.5.4.	Сканирование	147
10.	СКАНИРУЮЩАЯ ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ.....	150
10.1.	МЕТОД ПОСТОЯННОГО ТОКА	150
10.1.1.	Подготовка к измерениям	150
10.2.	ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ПРИБОРА ДЛЯ РАБОТЫ ПО СТВ МЕТОДАМ.....	151
10.2.1.	Подвод образца к зонду.....	151
10.2.2.	Установка рабочего уровня коэффициента усиления обратной связи.....	154
10.2.3.	Переключение сигнала обратной связи	155
10.2.4.	Установка параметров сканирования	156
10.2.5.	Сканирование	159
10.2.6.	Сохранение полученных данных	162
10.2.7.	Завершение работы.....	163
10.3.	МЕТОД ПОСТОЯННОЙ ВЫСОТЫ. ПОЛУЧЕНИЕ АТОМАРНОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА ГРАФИТЕ	163
10.4.	СТМ СПЕКТРОСКОПИИ	167
10.4.1.	$I(V)$ спектроскопия.....	167
10.4.2.	Модуляционная методика. Отображение Работы Выхода	169
10.4.2.1.	Установка СЗМ метода	169
10.4.2.2.	Установка рабочей частоты пьезогенератора	170
10.4.2.3.	Сканирование.....	172
11.	ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ	173
11.1.	УПРАВЛЕНИЕ КООРДИНАТНЫМ СТОЛОМ.....	173
11.2.	ЗАМЕНА ЗОНДОВОГО ДАТЧИКА	179
	ПРИЛОЖЕНИЯ.....	184
1.	СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ.....	184
1.1.	СЗМ КОНТРОЛЛЕР.....	184
1.2.	БЛОК РАСШИРЕНИЯ СЗМ.....	187
1.3.	КОМПЬЮТЕР	188
1.4.	КОНТРОЛЛЕР КООРДИНАТНОГО СТОЛА	188
2.	СКАНЕРЫ С ДАТЧИКАМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ	190
2.1.	ВВЕДЕНИЕ	190
2.2.	ПРИНЦИП РАБОТЫ.....	192
2.3.	ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ СКАНЕРА С ДАТЧИКАМИ.....	193
2.3.1.	Загрузка калибровочных параметров сканера.....	193
2.3.2.	Проверка и устранение генерации	195
2.4.	ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ	198
2.4.1.	Проверка настройки датчиков перемещения.....	198
2.4.2.	Подстройка датчиков перемещения	203
2.4.3.	Калибровка датчиков перемещения.....	204
2.4.3.1.	Калибровка датчиков перемещения по осям XY	205
2.4.3.2.	Калибровка датчика перемещения по оси Z.....	207

1. Введение

Модуль UHV SPM (сверхвысоковакуумный модуль сканирующего зондового микроскопа) входит в состав нанотехнологического комплекса НТК-9 платформы НаноФаб 100 и предназначен для исследований полупроводниковых пластин диаметром до 100 мм, в условиях сверхвысокого вакуума.

Отличительной особенностью модуля UHV SPM является универсальность – зондовые головки СЗМ являются сменными, что позволяет устанавливать на один и тот же сканер АСМ или СТМ зондовые головки. Это позволяет проводить в модуле UHV SPM измерения методами как атомной силовой микроскопии (АСМ), так и сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) с разрешением вплоть до атомарного. Переход от АСМ к СТМ осуществляется простой сменой зондовых головок.

Наличие свободных фланцев в камерах позволяет устанавливать дополнительные устройства и оборудование, предназначенное для работы в условиях сверхвысокого вакуума, и тем самым расширить функциональные возможности модуля.

2. Устройство

2.1. Основные узлы

На Рис. 2-1 приведен общий вид модуля UHV SPM.

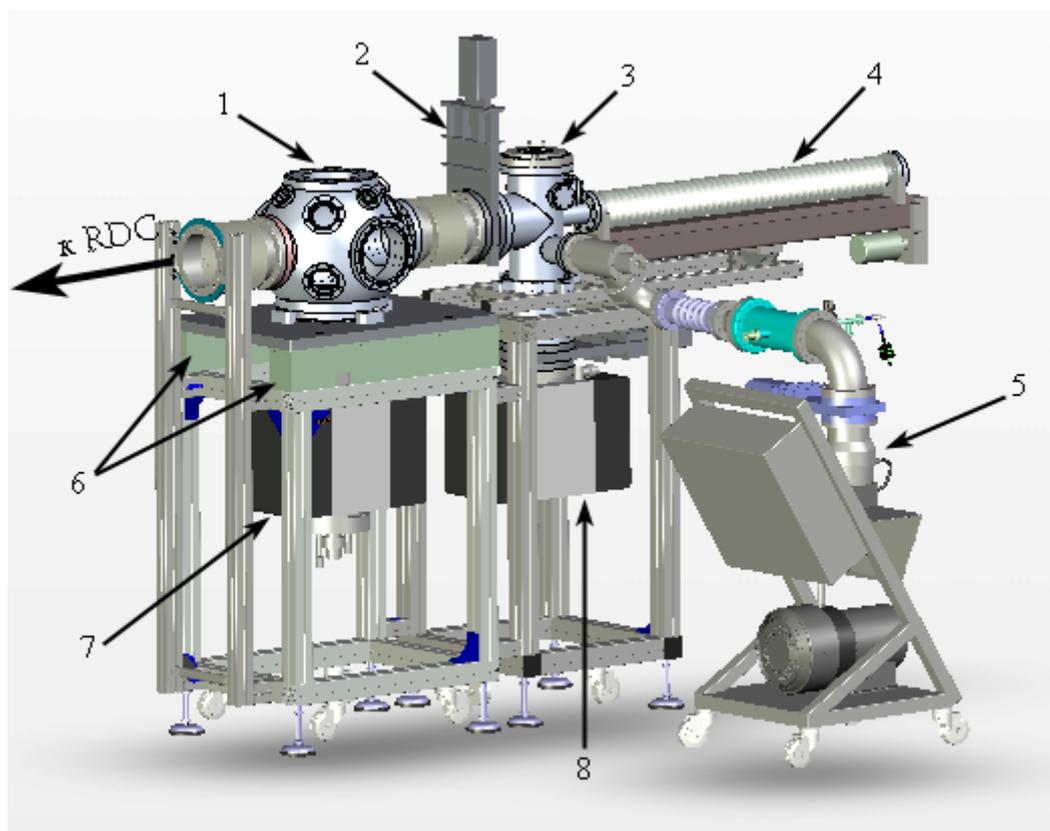


Рис. 2-1. Модуль UHV SPM платформы НаноФаб 100
 1 – СЗМ камера; 2 – шиберный затвор; 3 – камера смены зондовых головок;
 4 – манипулятор замены зондовых головок; 5 – станция предварительной откачки;
 6 – модули активной виброзащиты; 7, 8 – ионные насосы

Модуль UHV SPM включает в себя аналитическую СЗМ камеру и камеру смены зондовых головок.

СЗМ камера 1 предназначена для проведения СЗМ измерений пластин диаметром до 100 мм в условиях сверхвысокого вакуума.

Камера смены зондовых головок 3 (далее – камера зондов) предназначена для загрузки сменных зондовых головок и подготовки зондовых датчиков к измерениям.

Манипулятор 4 обеспечивает транспортировку зондовых головок в СЗМ камеру без ее разгерметизации.

СЗМ камера установлена на модулях активной виброзащиты 6. СЗМ камера снабжена смотровыми окнами для контроля процессов перегрузки образцов и зондов, а также процедуры предварительного подвода. С камерой зондов и транспортным модулем RDC СЗМ камера соединяется через шиберные затворы, которые изолируют СЗМ камеру при проведении измерений. К шиберным затворам СЗМ камера присоединяется через сильфоны. В нижней части камеры установлен ионизационный датчик для контроля вакуума в СЗМ камере. На верхнем фланце СЗМ камеры смонтированы элементы измерительной системы и механизм установки зондовых головок.

К одному из фланцев камеры зондов присоединен манипулятор замены зондовых головок 4. Камера снабжена смотровыми окнами для контроля операции перегрузки зондовых головок. На верхнем фланце камеры расположен фланец быстрой загрузки с витоновым уплотнением. На нижних фланцах камеры расположены: шиберный затвор с пневматическим управлением, высоковакуумный вентиль и ионизационный датчик контроля вакуума. Камеру зондов от ионного насоса 8 отделяет шиберный затвор. Высоковакуумный вентиль используется в системе предварительной откачки модуля UHV SPM с атмосферного давления.

Предварительная откачка вакуумных камер осуществляется станцией предварительной откачки 5, включающей безмасляный спиральный и турбомолекулярный насосы. Станция откачки через вентиль соединяется с вакуумной магистралью системы предварительной откачки. На вакуумной магистрали размещены датчик давления и натекагель.

Все блоки питания и управления СЗМ модулем размещены в стойке – шкафу электроники.

2.2. Вакуумная система

Вакуумная система содержит:

- вакуумные камеры;
- станцию предварительной откачки (включающую спиральный и турбомолекулярный насосы);
- ионные насосы;
- вакуумметры;
- вакуумную арматуру (вентили, вакуумную магистраль, уплотнения и т.д.).

Технические характеристики вакуумной системы

Табл. 2-1

Параметр	Значение
количество камер	Две
тип вакуумной системы	Безмасляная
рабочее давление в СЗМ камере	$\leq 5 \cdot 10^{-8}$ Па
Рабочее давление в камере зондов	$\leq 5 \cdot 10^{-6}$ Па
Нагрев вакуумных камер съемным ленточным нагревателем: камера СЗМ	до 80°C (до 120° С при снятой платформе, с расположенными на ней лазером и фотодиодом, и снятых платах, расположенных на верхнем фланце СЗМ камеры)
камера зондов	до 120°C

2.2.1. Принципиальная схема

На Рис. 2-2 приведена принципиальная схема вакуумной системы модуля UHV SPM.

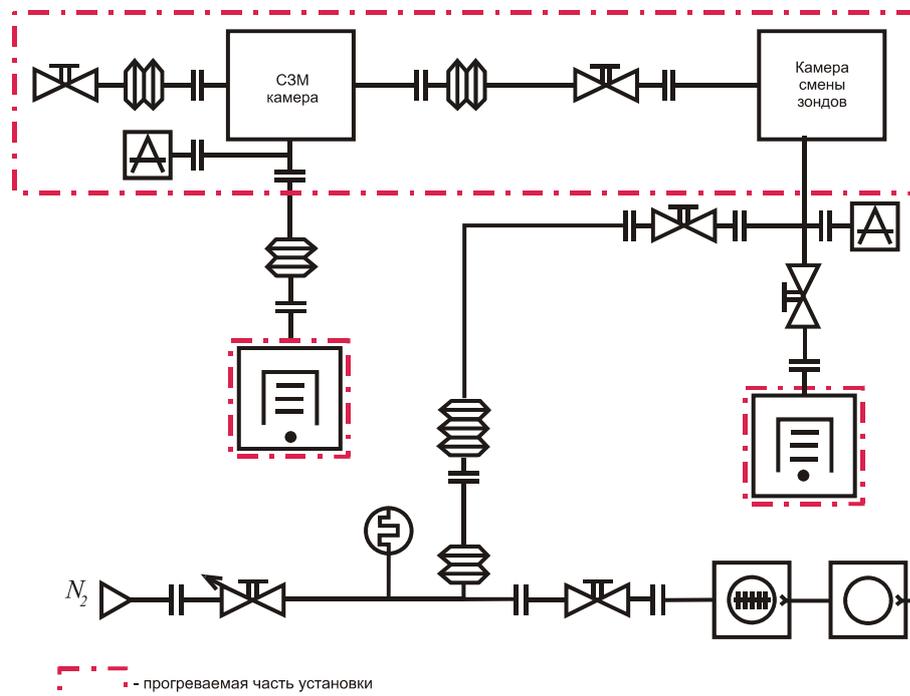


Рис. 2-2. Вакуумная схема модуля UHV SPM со станцией предварительной откачки

Для предварительной откачки модуля UHV SPM (до 10^{-4} Па) используется станция предварительной откачки Turbo Pumping Cart V301, включающей безмасляный спиральный и турбомолекулярный насосы. Контроль вакуума осуществляется датчиком модели ConvectOgг, позволяющим измерять давление в

диапазоне от атмосферного до $1.3 \cdot 10^{-5}$ Па. После достижения давления $< 10^{-2}$ Па контроль вакуума осуществляется ионизационными датчиками Байарда-Альперта, расположенными в каждой камере.

Предварительная откачка модуля UHV SPM осуществляется через камеру зондов, с которой станция предварительной откачки соединяется через вентиль. Натекатель используется для напуска в камеры осушенного азота, либо воздуха.

Для откачки до сверхвысокого вакуума ($10^{-8} \div 10^{-9}$ Па) используются ионные насосы с прогреваемым геттером. Каждая камера имеет индивидуальную сверхвысоковакуумную систему откачки.

Откачка СЗМ камеры осуществляется ионным насосом фирмы Varian серии VacIon Plus Diode со встроенным титан-сублимационным насосом для увеличения скорости откачки.

Откачка камеры зондов осуществляется ионным насосом фирмы Varian серии VacIon Plus StarCell. Насосы управляются контроллерами модели DUAL фирмы Varian.

Контроль вакуума в камерах осуществляется ионизационными датчиками Байарда-Альперта. Датчики позволяют измерять давление в диапазоне $10^{-2} \div 10^{-9}$ Па.

Для обеспечения изоляции камеры СЗМ от камеры зондов и транспортного модуля используются шиберы с пневматическим приводом.

Для уплотнения используются фланцевые соединения типа «конфлат» с медными прокладками.

Модуль UHV SPM допускает нагрев до следующих температур:

Ионные насосы	– до 250°C;
Камера зондов	– до 120°C;
СЗМ камера	– до 80°C (до 120°C при снятой с верхнего фланца платформе с расположенными на ней лазером, фотодиодом, видеомикроскопом).

Прогрев ионных насосов осуществляется при помощи нагревательных элементов, установленных на корпусе насоса.

Для прогрева камер используются гибкие нагревательные элементы, входящие в комплект поставки прибора.

2.2.2. СЗМ камера

Компоновка СЗМ камеры показана на Рис. 2-3.

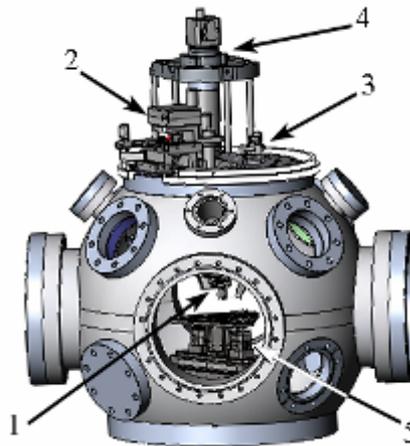


Рис. 2-3. СЗМ камера

1 – сканер; 2 – фотодиод; 3 – лазер; 4 – оптический видеомикроскоп; 5 – координатный стол

Четыре фланца dNCF160 размещены по взаимно перпендикулярным горизонтальным осям камеры. Два из них используются для установки смотровых окон. Два других служат для соединения через сильфоны с модулем RDC и камерой смены зондов.

В верхней и нижней частях камеры, под углом 45° к вертикальной оси камеры, симметрично расположены восемь фланцев dNCF63, предназначенных для размещения дополнительных смотровых окон, а также дополнительных технологических устройств.

К верхнему фланцу с внешней стороны крепятся система позиционирования лазера, фотодиода и оптического видеомикроскопа. С внутренней стороны фланца расположены сканер и система зеркал.

К нижнему фланцу камеры присоединён переходник для связи с ионным насосом. Датчик давления располагается на переходнике.

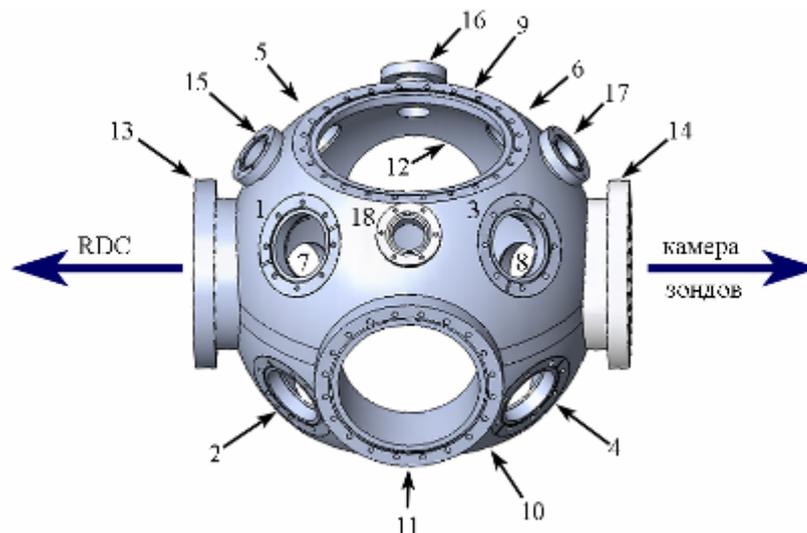


Рис. 2-4. Расположение фланцев СЗМ камеры (см. Табл. 2-2)

Расположения фланцев СЗМ камеры

Табл. 2-2

№	Название	Назначение
1	CF63	Для установки смотрового окна
2	CF63	Резервный
3	CF63	Для подключения верхнего сканера и системы установки зондовых головок
4	CF63	Для подключения координатного стола и системы подвода образца к зонду
5	CF63	Для установки смотрового окна
6	CF63	Для установки смотрового окна
7	CF63	Резервный
8	CF63	Резервный
9	CF250	Для установки верхнего фланца СЗМ камеры
10	CF250	Для подсоединения откачной системы
11	CF150	Для установки смотрового окна
12	CF150	Для установки смотрового окна
13	CF150	Для соединения с модулем RCD
14	CF150	Для соединения с камерой смены зондов
15	CF40	Для подачи напряжения на зондовую головку
16	CF40	Резервный
17	CF40	Резервный
18	CF40	Резервный

2.2.3. Камера зондов

Компоновка камеры смены зондовых головок (далее – камера зондов) с манипулятором замены зондовых головок и элементами вакуумной системы показана на Рис. 2-5.

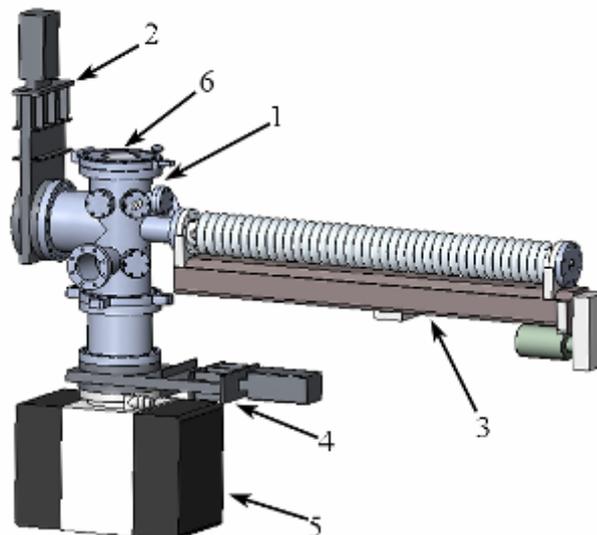


Рис. 2-5. Камера зондов

1 – вакуумная камера; 2 – шиберный затвор; 3 – манипулятор замены зондовых головок; 4 – шиберный затвор ионного насоса; 5 – ионный насос; 6 – окно быстрого доступа

Вакуумная камера 1 выполнена в виде цилиндра с внутренним диаметром 160 мм. На боковой поверхности камеры расположены фланцы dNCF150 и dNCF63. Фланец dNCF150 предназначен для монтажа шибера 2. К фланцу dNCF63 крепится манипулятор замены зондовых головок 3. На верхнем фланце камеры установлен фланец быстрого доступа со смотровым окном 6.

К нижнему фланцу камеры присоединен дополнительный переходник для монтажа элементов вакуумной системы: шиберного затвора и ионизационного насоса.

В верхней части камеры расположен фланец быстрой загрузки. В качестве уплотнения для фланца быстрой загрузки используется витонвый уплотнитель.



ВНИМАНИЕ! Необходимо бережно относиться к уплотняемым поверхностям НТК-9. Беречь витонвые и медные уплотнения от повреждений.

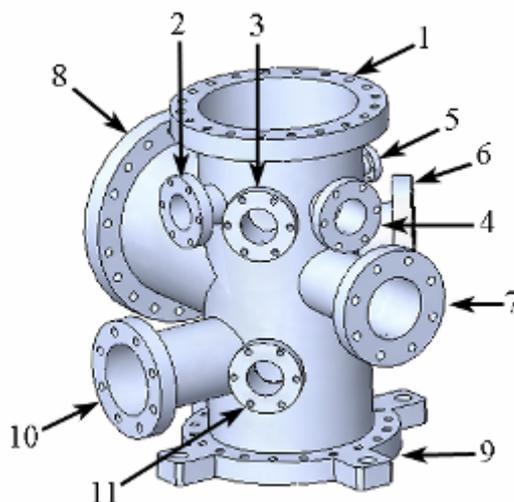


Рис. 2-6. Расположение фланцев камеры зондов (см. Табл. 2-3)

Расположение фланцев камеры зондов

Табл. 2-3

№	Название	Назначение
1	CF150	установлен фланец быстрой загрузки зондовых головок
2	CF40	Резервный
3	CF40	Установлен фланец с разъемом для подключения шагового двигателя карусели
4	CF40	установлена кассета для хранения зондовых головок
5	CF16	Резервный
6	CF63	смотровое окно
7	CF63	установлен манипулятор замены зондовых головок
8	CF150	используется для соединения с СЗМ камерой
9	CF150	для подсоединения ионного насоса
10	CF63	установлен высоковакуумный вентиль для подсоединения форвакуумной откачной системы
11	CF40	Установлен датчик высоко вакуума

2.3. Сканирующий зондовый микроскоп

Технические характеристики СЗМ

Табл. 2-4

Параметр	Значение
Размер образца	2", 3", 4"
Позиционирование образца: Диапазон перемещения	100×100×15 мм
Максимальная скорость перемещения координатного стола	2 мм/сек
Точность репозиционирования образца	0.3 мкм (peak-to-peak)
Диапазон сканирования	80×80×10 мкм (±10%) сканер с датчиками перемещения
Способ сканирования	сканирование зондом

Сканирующий зондовый микроскоп располагается в СЗМ камере и включает элементы сканирующей измерительной головки, закрепленные на верхнем фланце, и координатный стол с системой подвода. Общий вид СЗМ камеры представлен на Рис. 2-7.

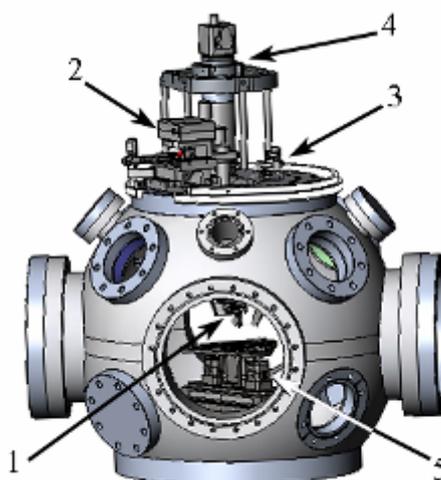


Рис. 2-7. Аналитическая СЗМ камера
1 – сканер; 2 – фотодиод; 3 – лазер; 4 – оптический видеомикроскоп;
5 – координатный стол

В нижней части камеры расположен координатный стол, обеспечивающий перемещение образца по трем координатам (Рис. 2-8).

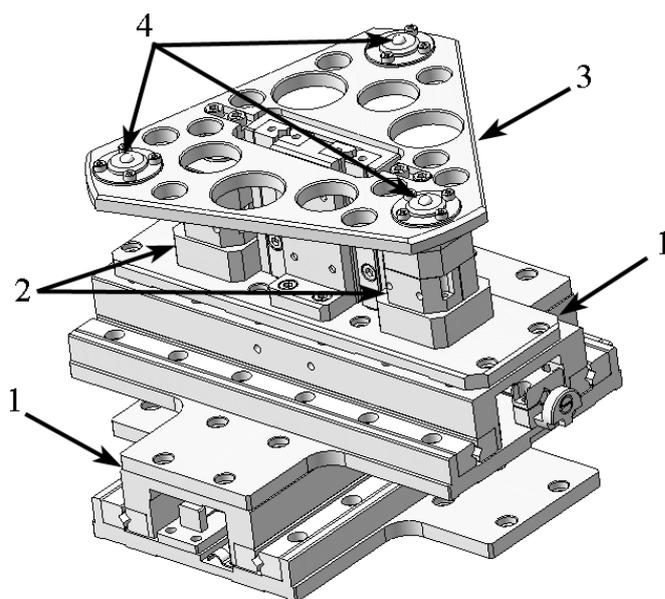


Рис. 2-8. Координатный стол

1 – каретки X, Y-перемещения; 2 – пьезоприводы вертикального перемещения образцов;
3 – платформа позиционирования; 4 – опорные площадки

Координатный стол состоит из двух кареток 1, перемещающихся во взаимно перпендикулярных направлениях по осям X, Y, и двух пьезоприводов 2 вертикального перемещения образца.

Ход кареток 1 по каждой из осей составляет 100 мм. Перемещение кареток осуществляется при помощи пьезоприводов. Каретки снабжены датчиками перемещения RENISHAW RCF2000H25OB с дискретностью 10 нм.

Вертикальное перемещение образца обеспечивают два пьезопривода 2, расположенные на верхней каретке.

Образец устанавливается на три опорные площадки 4, расположенные на платформе позиционирования 3.

На верхнем фланце СЗМ камеры (см. Рис. 2-9) расположены сканер 1, и оптическая система регистрации изгибов кантилевера (далее – система регистрации), состоящая из лазера, четырехсекционного фотодиода, а также системы линз и зеркал.

Лазер и фотодиод снабжены шаговыми двигателями, позволяющими программно управлять их перемещением при юстировке системы регистрации.

Расположенный на верхнем фланце оптический видеомикроскоп с автофокусировкой облегчает процедуру наведения лазера на кантилевер, а также позволяет более точно выбрать место для исследований.



ВНИМАНИЕ! Категорически запрещается снимать верхний фланец СЗМ камеры без предварительной консультации со специалистами НТ-МДТ, во избежание поломки расположенных на нем элементов сканирующего зондового микроскопа.

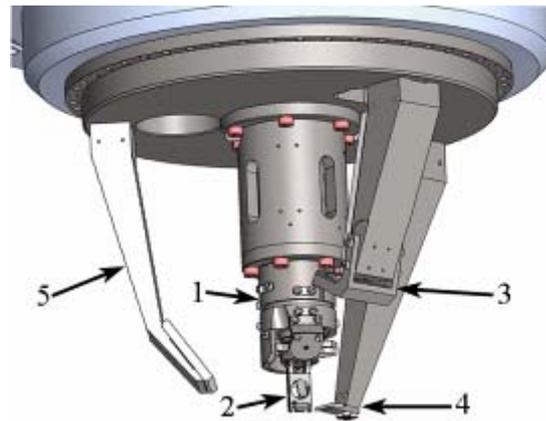


Рис. 2-9. Расположение элементов СЗМ на верхнем фланце СЗМ камеры
1 – сканер; 2 – сменная зондовая головка; 3 – фокусирующая линза,
4 – зеркала системы регистрации; 5 – зеркало системы видеонаблюдения

Сканер 1 снабжен емкостными датчиками перемещения, позволяющими контролировать XYZ перемещения сканера.

Конструкция сканера позволяет использовать сменные зондовые головки. В центральной части сканера имеется шток с расположенным на его конце магнитом (см. поз. 2 на Рис. 2-10). На зондовой головке имеется ответный магнит.

Зондовые головки устанавливаются на фланец 1, расположенный на пьезотрубке сканера и удерживаются на сканере за счет магнитных сил. В рабочем положении между обоими магнитами имеется зазор ~ 1.5 мм.

Захват зондовых головок осуществляется выдвигающимся штоком с расположенным на его конце магнитом 2 (Рис. 2-10). Для правильного позиционирования сменной зондовой головки при захвате, на штоке имеются выступы, а на зондовой головке – соответствующие им выемки (поз. 2 на Рис. 2-11).

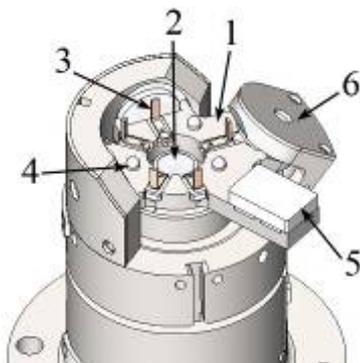


Рис. 2-10
1 – фланец; 2 – магнит;
3 – контакты; 4 – опорный шарик;
5 – зеркало системы регистрации;
6 – датчик z-перемещений сканера

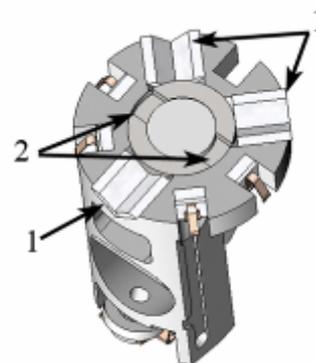


Рис. 2-11. Сменная зондовая головка
1 – поликоровые канавки; 2 – выемки

Для правильной ориентации зондовой головки при установке на сканер, на его фланце имеются опорные шарики 4 (Рис. 2-10), а на фланце зондовой головки – V-образные поликоровые канавки (см. поз. 2 на Рис. 2-12).

АСМ зондовая головка

АСМ зондовая головка предназначена для проведения измерений методами атомно-силовой микроскопии.

Общий вид АСМ зондовой головки показан на Рис. 2-12, Рис. 2-13.

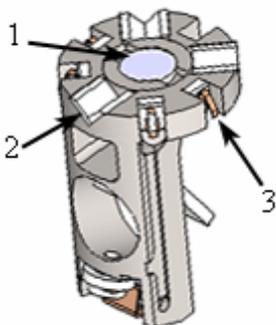


Рис. 2-12. АСМ зондовая головка
1 – магнит; 2 – поликоровые канавки; 3 – пружинные контакты

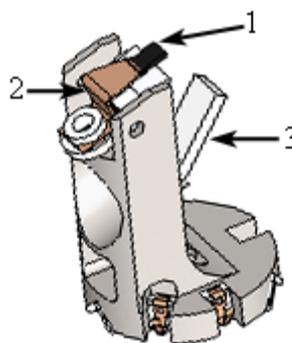


Рис. 2-13. АСМ зондовая головка
1 – поликоровая полочка;
2 – прижимная пружина; 3 – вспомогательное зеркало системы видеонаблюдения

Пружинные контакты (см. поз. 3 на Рис. 2-12) расположенные на зондовой головке, служат для осуществления гальванического контакта с элементами зондовой головки.

Сканер с установленной на нем сменной зондовой головкой показан на Рис. 2-14.

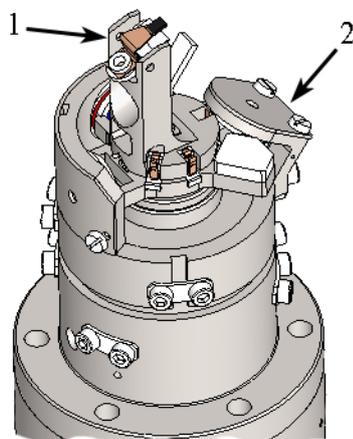


Рис. 2-14. Сканер с установленной АСМ зондовой головкой
1 – зондовая головка; 2 – датчик z-перемещений сканера

Зондовый датчик устанавливается на поликоровую ступенчатую полочку 1 (Рис. 2-13) и прижимается пружиной 2. Под поликоровой полочкой расположен пьезодрайвер, который сообщает кантилеверу колебания заданной частоты при использовании динамических методов измерений.

СТМ зондовая головка

СТМ зондовая головка предназначена для проведения измерений методами сканирующей туннельной микроскопии.

Общий вид СТМ зондовой головки показан на Рис. 2-15, Рис. 2-16.

Зонд устанавливается в держатель зонда 1 (Рис. 2-16).

Пружинные контакты 3 расположенные на зондовой головке, служат для осуществления гальванического контакта с элементами зондовой головки.

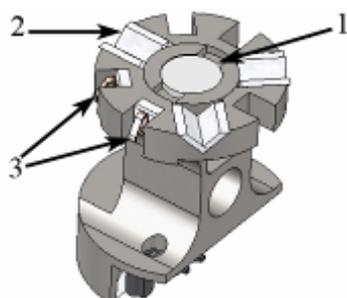


Рис. 2-15. СТМ зондовая головка
1 – магнит; 2 – поликристаллические канавки;
3 – пружинные контакты

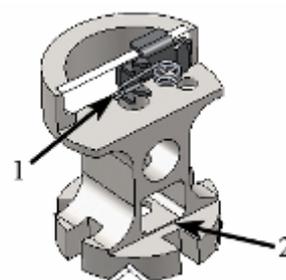


Рис. 2-16. СТМ зондовая головка
1 – держатель зонда; 2 – отверстие для
кронштейна манипулятора

2.4. Система смены зондовых головок

Система смены зондовых головок включает следующие основные узлы (Рис. 2-17):

- Камеру зондов;
- Манипулятор замены зондовых головок (включает систему линейного перемещения и систему захвата зондовых головок);
- Кассету карусельного типа для хранения зондовых головок (карусель);
- Манипулятор установки зондовых головок (расположен на верхнем фланце СЗМ камеры).

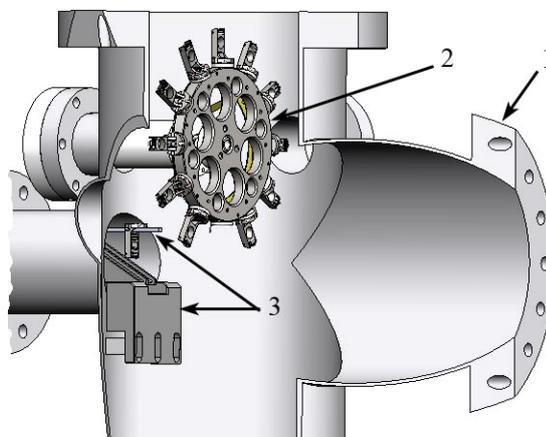


Рис. 2-17. Система смены зондовых головок
1 – камера зондов; 2 – кассета карусельного типа для хранения зондовых головок;
3 – манипулятор замены зондовых головок

Установка сменных зондовых головок в карусельную кассету осуществляется через фланец быстрой загрузки в верхней части камеры.

На карусели (Рис. 2-18) расположены 12 посадочных мест для сменных зондовых головок.

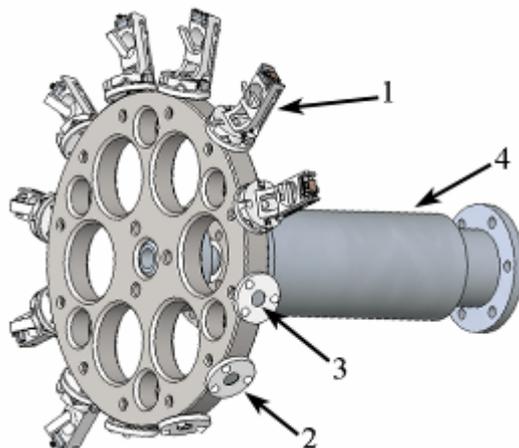


Рис. 2-18. Кассета карусельного типа для хранения сменных зондовых головок
1 – зондовая головка; 2 – посадочное место зондовой головки; 3 – магнит; 4 – корпус шагового двигателя

Вращение карусели обеспечивается шаговым двигателем, расположенном в корпусе 4.

Зондовые головки закрепляются на карусели при помощи магнитов. Для ориентации зондовых головок, на посадочном месте зондовой головки имеется три опорных шарика, а на самой головке – V-образные канавки.

Манипулятор замены зондовых головок предназначен для транспортировки снятых со сканера сменных зондовых головок из СЗМ камеры в камеру зондов, установки их на карусельную кассету, снятия с карусельной кассеты и перемещения в СЗМ камеру к манипулятору установки зондовых головок.

Устройство системы захвата зондовых головок показано на Рис. 2-19. Направляющая 2 перемещается в горизонтальном направлении шаговым двигателем, при этом кронштейн 1 смещается в вертикальном направлении. Захват и установка зондовой головки производится кронштейном 1.

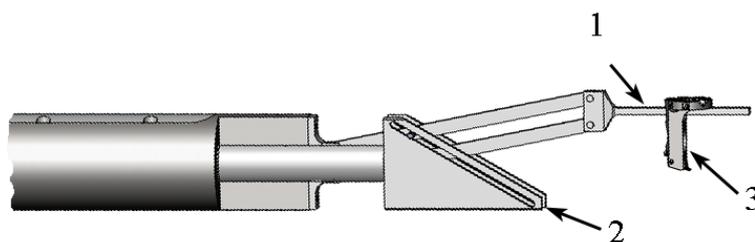


Рис. 2-19. Устройство системы захвата зондовых головок
1 – кронштейн; 2 – направляющая;
3 – сменная зондовая головка

Манипулятор установки зондовых головок расположен на верхнем фланце СЗМ камеры. Основные элементы манипулятора установки зондовых головок показаны на Рис. 2-20.

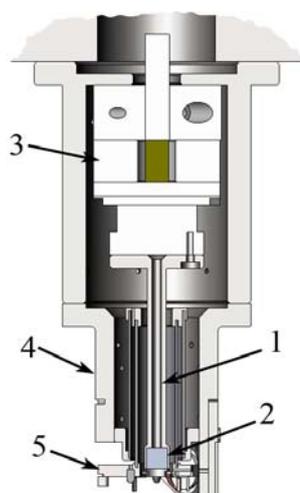


Рис. 2-20. Манипулятор установки зондовых головок
1 – шток; 2 – магнит; 3 – механизм перемещения штока;
4 – сканер; 5 – фланец для установки зондовой головки

Манипулятор осуществляет установку сменных зондовых головок на сканер и представляет собой шток 1 с установленным на конце магнитом 2. Инерционные пьезодвигатели 3 обеспечивают вращение штока, а также его перемещение в вертикальном направлении.

Перемещение зондовой головки в камеру СЗМ осуществляется следующим образом:

- Карусель поворачивается так, чтобы выбранная зондовая головка оказалась в нижней точке, напротив кронштейна. Манипулятор замены зондовых головок перемещает кронштейн таким образом, чтобы кронштейн попал в отверстие на зондовой головке (Рис. 2-21).

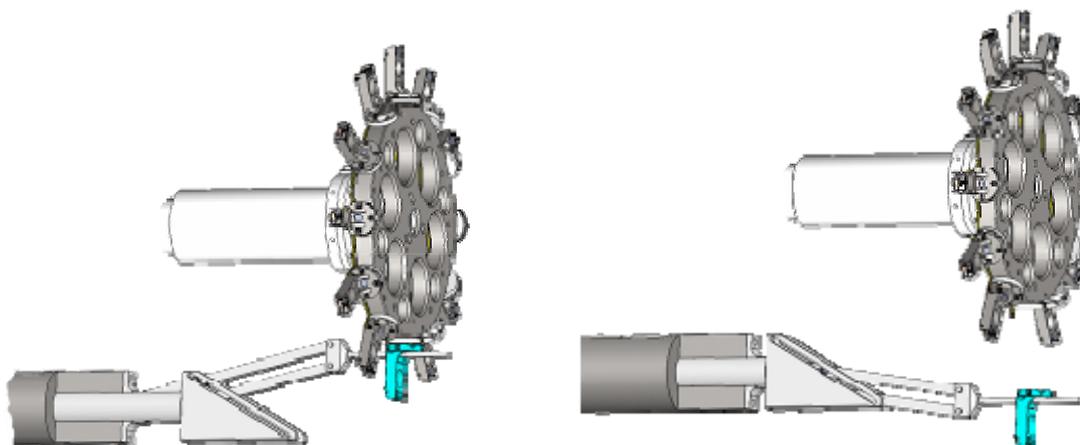


Рис. 2-21. Схема захвата сменных зондовых головок

- Кронштейн перемещается вниз, снимая зондовую головку с карусели. Затем зондовая головка перемещается в СЗМ камеру.
- Шток манипулятора установки зондовых головок выдвигается. Зондовая головка фиксируется на штоке, а манипулятор замены зондовых головок перемещается в обратном направлении в камеру зондов. Шток с зондовой головкой поворачивается на 45° и втягивается. Зондовая головка остается на фланце сканера, удерживаясь за счет действия магнитных сил.

Технические характеристики манипуляторов

Табл. 2-5

Манипулятор замены зондовых головок	
Диапазон перемещения в горизонтальном направлении	800 мм
Диапазон перемещения в вертикальном направлении	75 мм
Манипулятор установки зондовых головок	
диапазон перемещения	12 мм

2.5. Система управления

Блоки питания и управления модулем UHV SPM расположены в специальной стойке – шкафу электроники. Для питания блоков на внутренней стенке стойки установлены блоки розеток.

Состав стойки представлен на Рис. 2-22¹.

¹ В зависимости от конфигурации НТК, количество приборов и вариант их размещения в стойке могут различаться.



Рис. 2-22. Шкаф электроники модуля UHV SPM

СЗМ контроллер

СЗМ контроллер используется для управления сканирующим зондовым микроскопом.

Контроллер координатного стола

Контроллер координатного стола позволяет управлять координатным столом СЗМ камеры.

Блок расширения СЗМ

В блоке расширения расположены контроллеры, управляющие следующими элементами модуля UHV SPM:

- карусель зондовых головок;
- манипулятор замены зондовых головок;
- манипулятор установки зондовых головок, расположенный в сканере;
- настройка положения лазера и фотодиода;
- настройка положения видеомикроскопа.

Универсальный вакуумметр

Универсальный вакуумметр используется для измерения давления в камере загрузки образцов. Контроль вакуума осуществляется датчиком модели ITR 90, позволяющим измерять давление в диапазоне от атмосферного до 10^{-10} мбар.

Контроллер модулей активной виброзащиты

Модули активной виброзащиты используются для подавления фоновых вибраций.

Подробное описание контроллера модулей активной виброзащиты см. в книге “ACTIVE VIBRATION ISOLATION SYSTEM AVI-400SL. Instruction manual”.

Вакуумный контроллер MultiGauge

Контроллер позволяет одновременно управлять несколькими датчиками давления: до 3 высоковакуумных и до 2 низковакуумных.

Данный контроллер управляет следующими датчиками давления: ионизационные датчики Байарда-Альперта установленные в камере СЗМ и камере зондов, низковакуумный датчик откачного поста.

Вентиляторы

Вентиляторы используются для охлаждения приборов, расположенных в шкафу электроники.

3. Правила безопасности



ВНИМАНИЕ! Перед началом работы внимательно изучите настоящий раздел.

- Перед началом работы убедитесь, что комплекс заземлен!
- Не разбирайте самостоятельно никакие части приборов, входящих в состав модуля UHV SPM! Разбирать приборы разрешено только специалистам, сертифицированным компанией «НТ-МДТ».
- Не подключайте к модулю UHV SPM дополнительные устройства без консультации со специалистами компании «НТ-МДТ».
- модуль UHV SPM содержит прецизионные электромеханические элементы, поэтому оберегайте его от ударных нагрузок и сильных механических воздействий.
- Оберегайте модуль UHV SPM от воздействия предельных температур, попадания жидкости.
- Все работы с модулем UHV SPM следует производить в специальной одежде предназначенной для проведения работ в условиях вакуумной гигиены.



ВНИМАНИЕ! Категорически запрещается снимать верхний фланец СЗМ камеры без консультации со специалистами НТ-МДТ во избежание поломки сканирующей измерительной головки.

Электроника

- Перед началом работы установите переключатель напряжения питания на контроллерах и блоке расширения в положение, соответствующее напряжению питания сети (переключение производите только при выключенных приборах!).
- Перед присоединением/отсоединением разъемов, выключите контроллеры и блок расширения. Отсоединение или присоединение разъемов во время работы блоков электроники может привести к повреждению электронной схемы и выходу блока из строя.

4. Условия эксплуатации

Для обеспечения нормальной работы прибора рекомендуется соблюдать следующие условия эксплуатации и размещения:

- Температура окружающей среды: $18 \div 25^{\circ}\text{C}$;
- Дрейф температуры: не более 1°C в час;
- Относительная влажность при температуре окружающей среды $+25^{\circ}\text{C}$: не более $65 \pm 15\%$;
- Атмосферное давление: 760 ± 25 мм. рт. ст.;
- Класс чистоты P8÷P7.
- Помещение должно быть оборудовано системой приточно-вытяжной вентиляции. Степень фильтрации подаваемого воздуха и кратность воздухообмена выбираются в соответствии действующими нормами для данного класса чистых помещений.
- Электропитание модуля UHV SPM должно осуществляться от однофазной сети переменного тока. Параметры электропитания модуля UHV SPM:
 - Напряжение питания сети переменного тока $220\text{ В} (+10\% / -15\%)$;
 - Частота питающего напряжения $50/60$ Гц;
 - Потребляемая мощность 5000 Вт.
- Амплитуда вибраций в полосе частот $1 \div 1000$ Гц не более 0.5 мкм.
- Для получения необходимой виброустойчивости каркасы модуля UHV SPM следует размещать рядом с несущими стенами здания (опорами, балками и т.п.).

5. Подготовка к проведению измерений

Предполагается, что модуль UHV SPM находится в рабочем состоянии:

- Ионные насосы включены;
- Давление в СЗМ камере $10^{-8} \div 10^{-9}$ Па;
- Давление в камере зондов $\sim 10^{-7}$ Па;
- Шиберы, соединяющие СЗМ камеру с модулем RDC и камерой зондов, закрыты.

Подготовка к проведению измерений состоит из следующих основных операций:

1. Установка АСМ зондового датчика (см. п. [5.1](#) на стр. [30](#));
2. Установка зондовых головок в камеру зондов (см. п. [5.3](#) на стр. [33](#));
3. Перегрузка образца в СЗМ камеру (см. п. [5.4](#) на стр. [36](#));
4. Перемещение зондовой головки в СЗМ камеру (см. п. [5.5](#) на стр. [38](#));
5. Настройка оптической системы регистрации отклонений кантилевера (см. п. [5.6](#) на стр. [43](#));
6. Предварительный подвод (см. п. [5.7](#) на стр. [45](#)).



ВНИМАНИЕ! Все операции, связанные с вакуумными камерами следует выполнять только в специальной одежде предназначенной для проведения работ в условиях вакуумной гигиены: перчатки, халат, тапочки, чепчик.

5.1. Установка АСМ зондового датчика

1. Установите зондовую головку фланцем на ровную поверхность.
2. Возьмите зондовый датчик из коробочки пинцетом (Рис. 5-1) с учётом того, что рабочая грань чипа с кантилеверами при установке будет обращена к Вам. Не переворачивайте чип, т. к. в коробочке зондовые датчики лежат остриями вверх.



Рис. 5-1

3. Вторым пинцетом отогните прижимную пружину.
4. Перенесите зондовый датчик на поликоровую полочку и поместите его под прижимную пружину так, чтобы он упирался в выступы на полочке.
5. Опустите прижимную пружину. Положение зондового датчика после установки показано на Рис. 5-2.

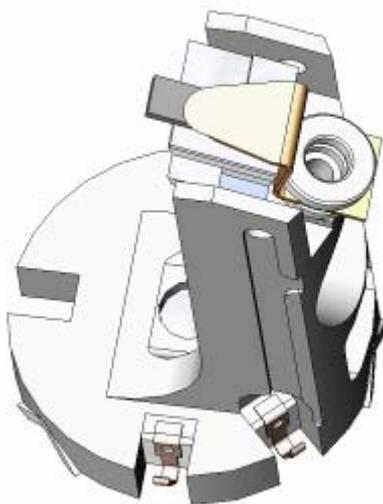


Рис. 5-2. Установка зондового датчика

Аналогично установите зондовые датчики в остальные сменные зондовые головки.

5.2. Установка СТМ зонда

Изготовление зонда

В качестве зонда используется заостренная часть платино-иридиевой (PtIr), платино-родиевой (PtRo) (с содержанием платины около 80%) или вольфрамовой (W) проволоки длиной 8-10 мм и диаметром ≤ 0.5 мм.

Качество остроты зонда является одними из главных факторов, определяющих качество получаемых в СТМ результатов.

Изготовить СТМ зонд можно двумя способами:

- путем обрезки кончика проволоки ножницами (PtIr, PtRo) (приведен ниже);
- с помощью электрохимического травления (W, Pt, PtIr, PtRo).

Самая простая методика приготовления СТМ зонда заключается в обрезке кончика проволоки ножницами. Полученные таким образом зонды имеют радиус кривизны острия менее 10 нм.

Для обрезки проволоки используются ножницы с острыми краями и широкий пинцет с зубчиками на внутренней поверхности, входящие в прилагаемый к микроскопу набор инструментов.



ВНИМАНИЕ! Не используйте ножницы, предназначенные для обрезки проволоки, в других целях.

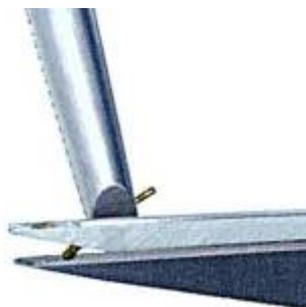


Рис. 5-3

Процедура формирования острия

1. Зажмите проволоку широким пинцетом так, чтобы она выступала за край на 2÷3 мм (Рис. 5-3).
2. Надрежьте проволоку под углом 10÷15 градусов как можно ближе к краю проволоки и одновременно тяните ножницы вдоль оси проволоки, чтобы «оторвать» отрезаемую часть. Это делается для того, чтобы избежать контакта режущих кромок ножниц и непосредственно острия зонда. Фактически, эта методика заострения зонда скорее подразумевает разрывание проволоки в последний момент, чем обрезание ее. В этом случае получается острый скол на конце проволоки (Рис. 5-4).



Рис. 5-4. Форма среза кончика зонда

3. Проверьте форму полученного среза при помощи оптического микроскопа с 200-кратным увеличением (при возможности). Если необходимо, повторите процесс обрезки еще раз.



ВНИМАНИЕ! Не допускайте соприкосновения острия зонда с какими либо поверхностями, во избежание повреждения острия.

Общая длина зонда должна составлять $7\div 9$ мм.

После обрезки проволоки можно прокалить её кончик в пламени спиртовки в течение $1\div 2$ секунд, чтобы удалить органические материалы. Проверьте острие зонда в оптический микроскоп²: участок среза должен быть ярким и не иметь никаких следов сажи или пыли.

Установка зонда



ВНИМАНИЕ! Во время установки избегайте касания заостренного конца зонда с какими-либо поверхностями.

1. Установите зондовую головку фланцем на ровную поверхность.
2. Возьмите в одну руку широкий пинцет, в другую - узкий пинцет с зажатым в нем зондом.
3. Отожмите прижимную пружину широким пинцетом.
4. Вставьте зонд в держатель тупым концом так, чтобы острый конец выступал за край держателя не более чем на $1.5\div 2.5$ мм.
5. Зафиксируйте зонд в держателе, отпустив пружину. Зонд должен прочно фиксироваться в держателе.



ПРИМЕЧАНИЕ. Качество остроты зонда и прочность фиксации зонда в зажиме являются одними из главных факторов, определяющих качество получаемых в СТМ результатов.

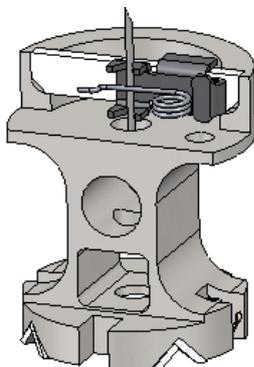


Рис. 5-5. Установка зонда

Аналогично установите зонды в остальные сменные СТМ зондовые головки.

² Эта процедура не является обязательной.

5.3. Установка зондовых головок в камеру зондов

Загрузку сменных зондовых головок в камеру зондов рекомендуется производить при напуске в камеру сухого газообразного азота. Желательно не выходить за пределы 5÷10 минут при вскрытии вакуумного объема. Увеличение времени контакта с атмосферой приводит к необходимости проводить дополнительное обезгаживание камеры.

Управление шиберами осуществляется из программы CLASTER. Подробное описание см. в книге «Кластер нанолокальных технологий».

Исходное состояние:

- Камера СМЗ и камера зондов откачаны до рабочего давления;
- Шибер между камерой зондов и камерой СЗМ закрыт;
- К камере зондов подсоединен откачной пост;
- Магистраль откачного поста откачана, шибер ТМН закрыт.
- К магистрали откачного поста подведен газообразный азот.

Для установки зондовых головок в камеру зондов выполните следующие действия:

1. С помощью программы CLASTER закройте шибер ионного насоса камеры зондов.
2. Если ионизационный вакуумметр включен, выключите его.
Для этого (Рис. 5-6):
 - a. Нажимая кнопку **CHAN** на передней панели контроллера выберите канал, к которому подключен высоковакуумный датчик.
 - b. Нажмите кнопку **EMIS**. Если возможно, визуально убедитесь в том, что в лампе нет свечения.

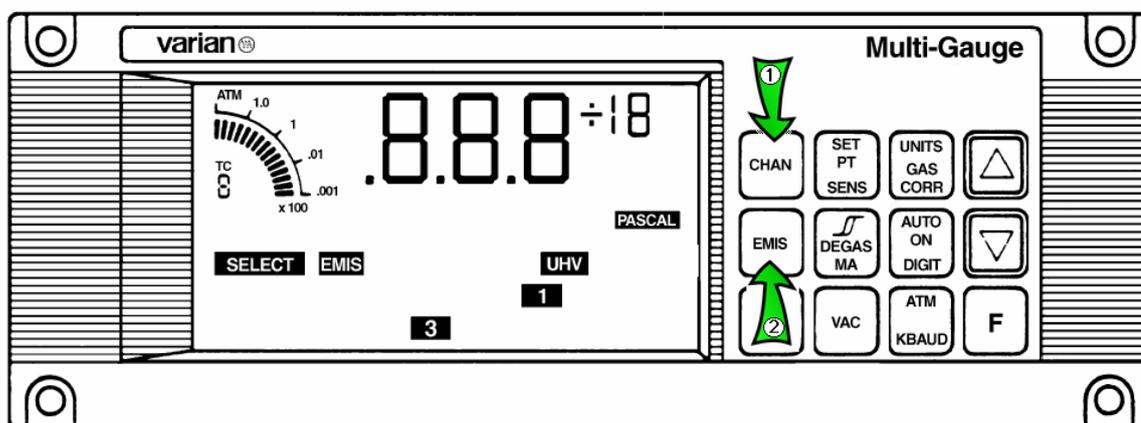


Рис. 5-6. Расположение кнопок выбора канала (1) и отключения высоковакуумного датчика (2) на панели контроллера

3. Проверьте, что шибер, соединяющий камеру зондов и СЗМ камеру, закрыт. При закрытом шибере соответствующий индикатор окрашен в зеленый цвет.
4. Откройте вентиль 1 (Рис. 5-7), соединяющий камеру зондов с откачным постом.

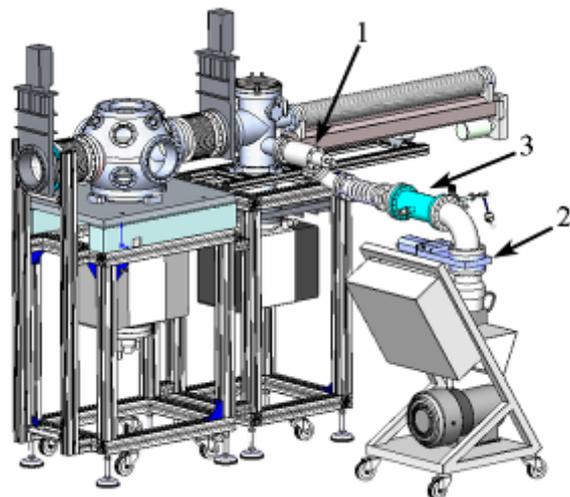


Рис. 5-7. Модуль UHV SPM с откачным постом
1 – вентиль камеры зондов; 2 – шибер откачного поста;
3 – магистраль, соединяющая откачной пост и камеру

5. Откройте клапан на баллоне с осушенным азотом. На редукторе выставьте избыточное давление ~ 0.5 атм.
6. Напуск азота в камеру осуществляется плавным открытием вентиля (поз. 4 на Рис. 5-8), при этом необходимо следить за показаниями мановакуумметра (поз. 5 на Рис. 5-8) – он должен показывать давление не ниже 1 атм. Предохранительный клапан на станции (поз. 7 на Рис. 5-8) должен свистеть, стравливая давление выше 1.1 атм.

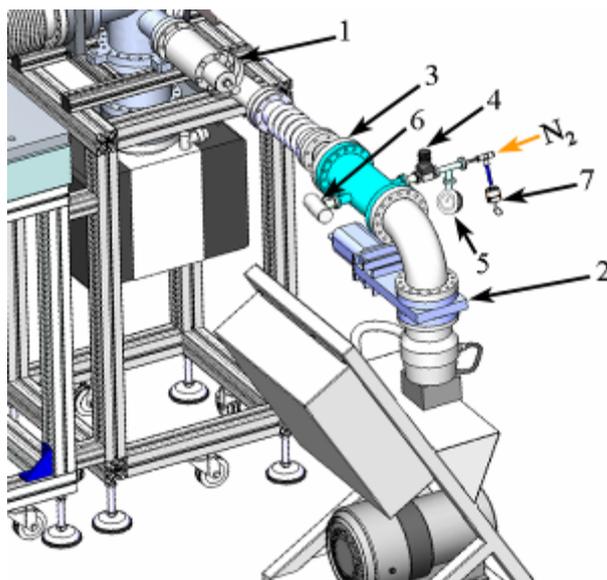


Рис. 5-8. Элементы магистрали откачного поста
1 – вентиль вакуумной камеры; 2 – шибер откачного поста;
3 – магистраль, соединяющая откачной пост и камеру; 4 – вентиль напуска азота;
5 – мановакуумметр; 6 – низковакуумный датчик давления; 7 – предохранительный клапан

7. Следите за показаниями низковакуумного датчика (см. поз. 6 на Рис. 5-8) по контроллеру MultiGauge, расположенному в стойке СЗМ. При достижении атмосферного давления в камере перекройте подачу азота:
 - а. закройте вентиль 1 на камере;
 - б. закройте редуктор и клапан на баллоне с азотом.



ПРИМЕЧАНИЕ. Если камера развакууируется на короткое время, то рекомендуется подавать азот под небольшим избыточным давлением в камеру в течение всего времени развакуумирования. Это позволит существенно снизить скорость адсорбции водной пленки на поверхности камеры, и впоследствии ускорит выход на предельный вакуум.

8. Откройте фланец быстрой загрузки камеры зондов.
9. Установите зондовую головку на карусель (Рис. 5-9) таким образом, чтобы опорные шарики попали в поликоровые канавки на головке.

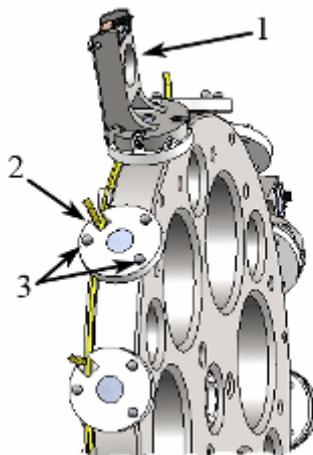


Рис. 5-9. Установка зондовых головок
1 – зондовая головка установлена на карусель;
2 – посадочное место зондовой головки; 3 – опорные шарики

10. Чтобы установить зондовые головки по всему периметру карусели, периодически поворачивайте ее. Управление поворотом карусели осуществляется из программы NANOFAB Extensions. Чтобы повернуть карусель:
 - а. Перейдите на вкладку **Probe transport**, нажав одноименную кнопку. Для управления каруселью предназначены кнопки раздела **Probe wheel** (Рис. 5-10).
 - б. Щелкните на кнопке  или . В результате карусель начнет вращаться. Вращение останавливается кнопкой **Stop**, либо повторным нажатием кнопки, которой было инициировано вращение.

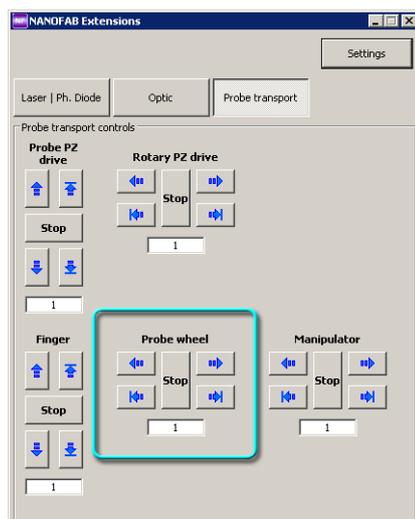


Рис. 5-10

11. После установки всех зондовых головок закройте фланец быстрой загрузки образца.
12. Закройте вентиль напуска азота.
13. Откачайте камеру зондов до рабочего давления ($\sim 10^{-6}$ Па). Процедура откачки приведена в книге «Кластер нанолокальных технологий».

5.4. Перегрузка образца в СЗМ камеру

Начальное положение:

- Образец находится в модуле RDC, напротив порта камеры СЗМ.;
- Координатный стол находится в центральном положении;
- Опорные площадки системы подвода в СЗМ камере находятся в крайнем нижнем положении.

Управление шиберами и транспортировкой образца осуществляется из программы CLASTER. Подробное описание см. в книге «Кластер нанолокальных технологий».

Управление координатным столом осуществляется из программы XYZ stage control. Подробное описание работы с программой приведено в п. [11.1](#) «Управление координатным столом» на стр. [173](#).

Процедура перегрузки образцов:

1. Убедитесь что давление в модуле RDC и в СЗМ камере выровнено.
2. Включите контроллер координатного стола.
3. Запустите программу управления координатным столом с помощью файла **XYZ_Stage.exe**. На экране появится окно программы (Рис. 5-11).

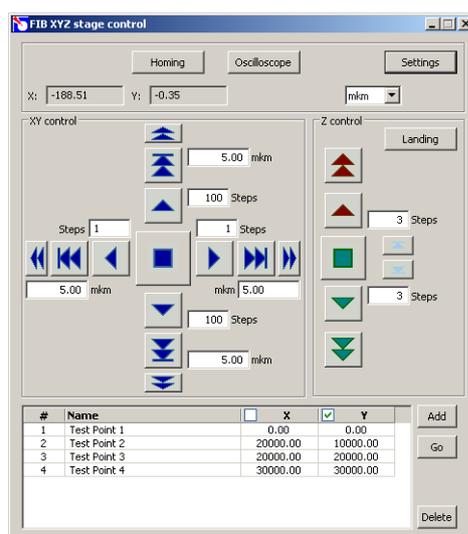


Рис. 5-11

4. Щелкните на кнопке **Homing**. В результате будет выполнен поиск нулевых координат. Координатный стол будет приведен в центральное положение.
5. Откройте шибер, соединяющий модуль RDC и СЗМ камеру.
6. Перейдите в программу CLASTER. Переместите образец в СЗМ камеру. Для этого на панели **RDC Control** установите переключатель в положение **Linear Movement**, затем щелкните на кнопке **OUT**. В результате образец окажется над координатным столом. При этом образец оказывается слегка смещен относительно центра координатного стола.
6. Управляя координатным столом с помощью кнопок панели **XY control**, переместите координатный стол таким образом, чтобы его центр совпадал с центром носителя образца. Рекомендуется запомнить координаты этого положения в таблице программы управления координатным столом. При этом V-образные канавки на носителе образца будут располагаться примерно над опорными шариками платформы.
7. С помощью кнопок ,  панели **Z control**, поднимите платформу координатного стола таким образом, чтобы опорные шарик вошли в V-образные канавки на носителе образца. При необходимости, корректируйте положение платформы в плоскости XY с помощью кнопок панели **XY control**. Поднимайте платформу до тех пор, пока носитель образца слегка не приподнимется, освободив захват манипулятора RDC.
11. Отведите манипулятор в модуль RDC.
12. Закройте шибер, соединяющий модуль RDC с СЗМ камерой.
15. Опустите опорные площадки координатного стола в крайнее нижнее положение, щелкнув на кнопке .

5.5. Перемещение зондовой головки в СЗМ камеру

1. Перейдите в программу управления координатным столом **XYZ stage control**.
2. Переместите платформу позиционирования по обеим координатам максимально близко к модулю RDC, как показано на Рис. 5-12, с помощью кнопок , ,  панели **XY control**.

Для удобства работы, рекомендуется сохранить координаты основных положений координатного стола в таблице. Чтобы добавить текущие координаты в таблицу, щелкните на кнопке **Add**. Изменить содержание ячейки можно, щелкнув на ней мышью и введя новое значение с клавиатуры.

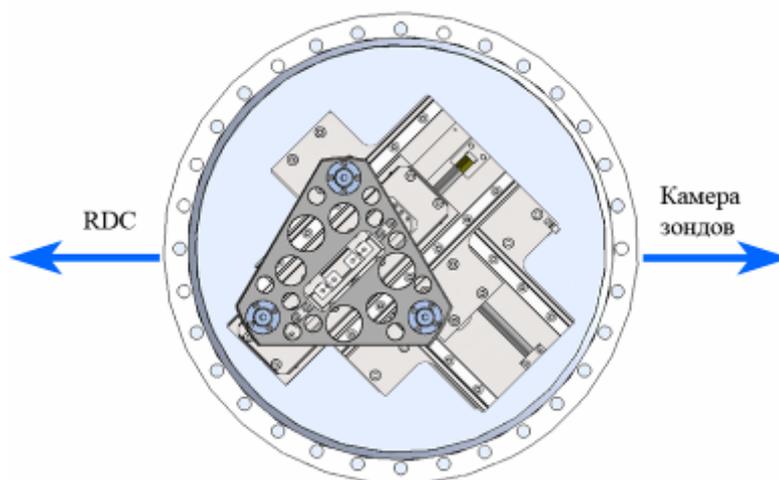


Рис. 5-12. Положение координатного стола перед перегрузкой зондовой головки

3. Запустите программу NANO FAB Extensions.
4. Перейдите на вкладку **Probe transport** (Рис. 5-13).

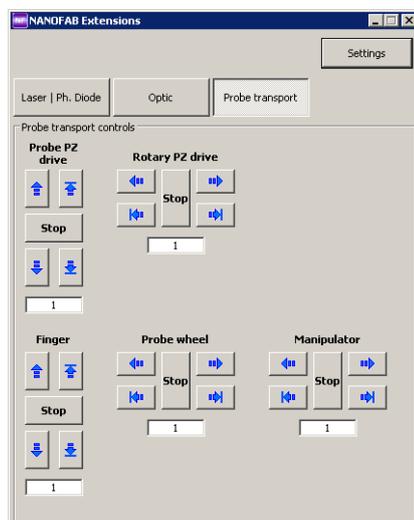


Рис. 5-13. Вкладка **Probe Transport**

- С помощью кнопок панели **Probe wheel** поверните карусель таким образом, чтобы зондовая головка, выбранная для загрузки в СЗМ камеру, оказалась расположена напротив кронштейна манипулятора (Рис. 5-14).

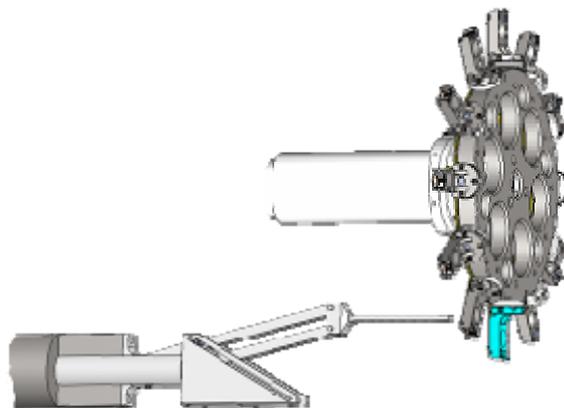


Рис. 5-14. Выбор зондовой головки

- Управляя перемещением манипулятора в горизонтальном направлении (кнопками панели **Manipulator**), переместите его так, чтобы кронштейн оказался на расстоянии 2÷3 мм от края зондовой головки (Рис. 5-15).



*ПРИМЕЧАНИЕ. При управлении манипулятором следует иметь в виду, что остановка горизонтального перемещения манипулятора происходит не мгновенно, а с некоторым отрицательным ускорением (задается в окне **Settings** на вкладке **Probe transport**).*

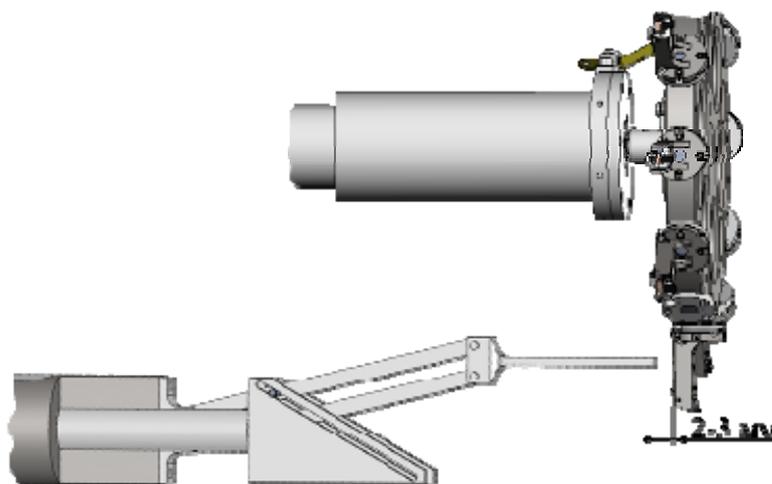


Рис. 5-15

- Переместите кронштейн в вертикальном направлении так, чтобы кромка кронштейна находилась примерно посередине отверстия для кронштейна с помощью кнопок панели **Finger**.

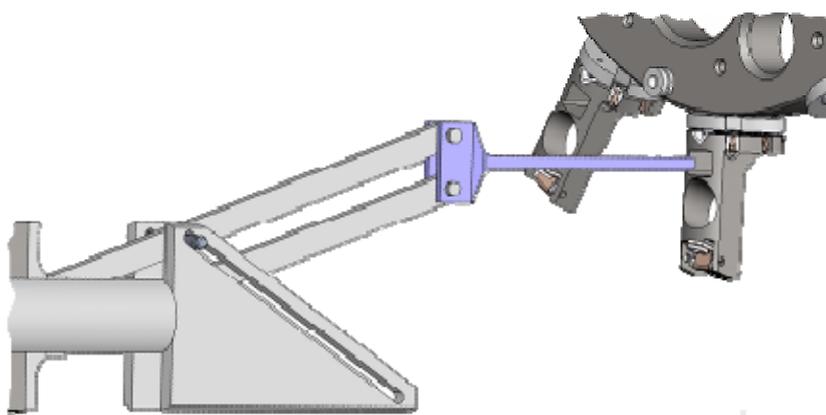


Рис. 5-16

7. Управляя перемещением манипулятора в горизонтальном направлении (кнопками панели **Manipulator**), переместите его так, чтобы кронштейн выступал на расстояние $2 \div 3$ мм за край зондовой головки (Рис. 5-17).

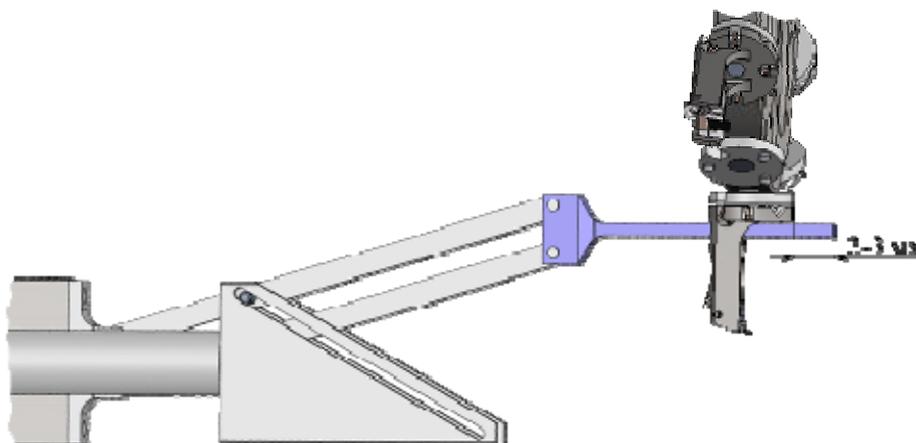


Рис. 5-17

8. Переместите кронштейн вниз с помощью кнопок панели **Finger** так, чтобы снять зондовую головку с карусели. Контролируйте визуально перемещение зондовой головки.
9. После того, как связь зондовой головки с каруселью разомкнется и зондовая головка окажется на кронштейне, остановите движение кронштейна, щелкнув на кнопке **Stop**.
10. Откройте шибер, соединяющий камеру зондов с СЗМ камерой.
11. Переместите зондовую головку в СЗМ камеру, управляя движением манипулятора с помощью кнопок панели **Manipulator**. Остановите манипулятор, когда кончик кронштейна будет находиться на расстоянии примерно $5 \div 10$ мм от сканера (Рис. 5-18). Визуально проконтролируйте относительное положение зондовой головки и сканера. Расстояние между

зондовой головкой и сканером по вертикали должно составлять около 2 мм. При необходимости сместите зондовую головку вниз.

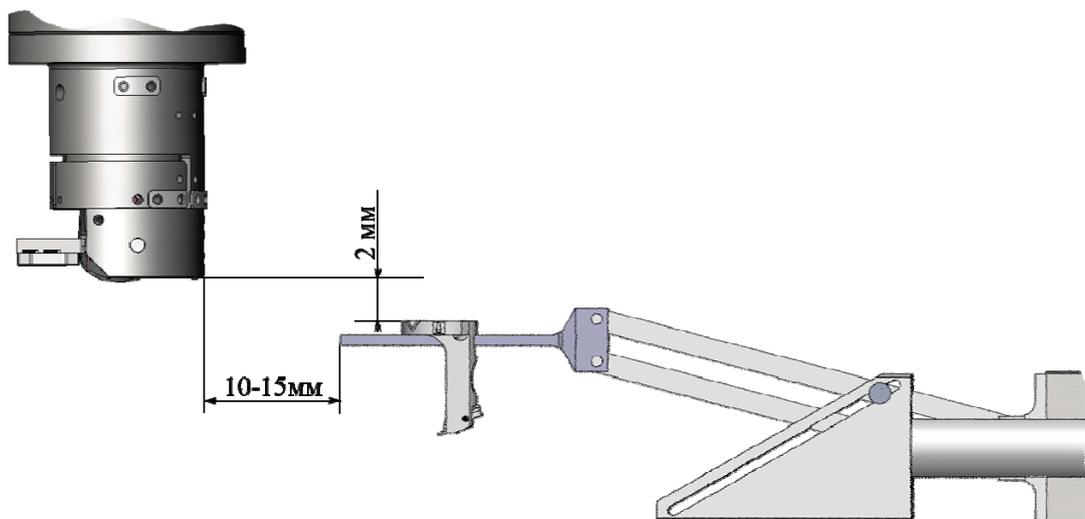


Рис. 5-18

12. Выдвиньте шток манипулятора установки зондовых головок кнопками



панели **Probe PZ drive**.

13. Переместите зондовую головку так, чтобы она оказалась точно под штоком (Рис. 5-19).

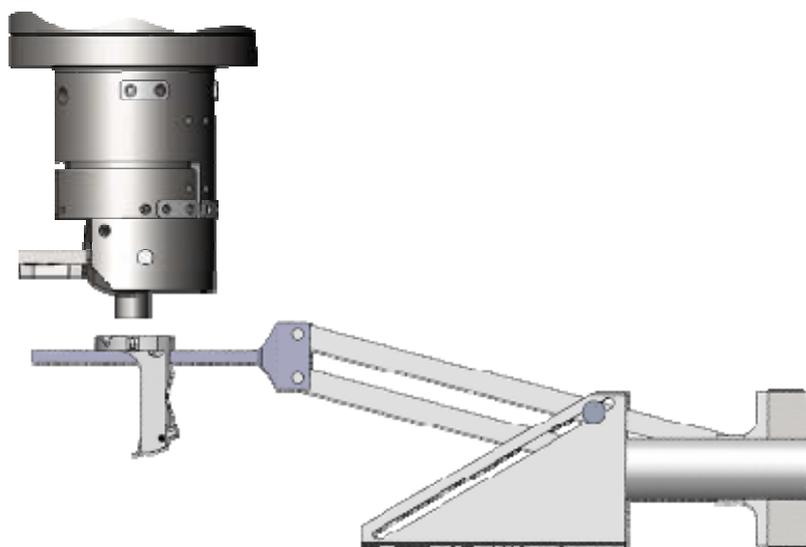


Рис. 5-19

14. Переместите кронштейн вверх до тех пор, пока зондовая головка не зафиксируется на магните штока (Рис. 5-20).

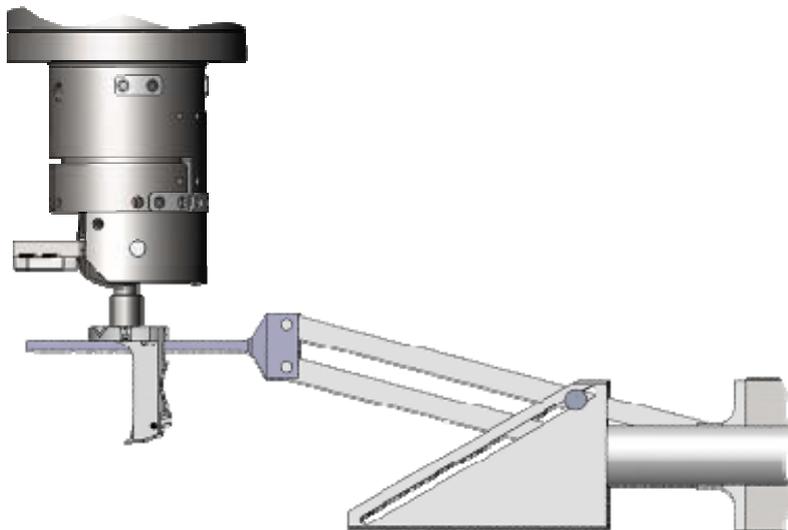


Рис. 5-20

15. Слегка сместите кронштейн манипулятора вниз так, чтобы разомкнуть контакт кронштейна с зондовой головкой.
16. Переместите манипулятор в сторону камеры зондов так, чтобы кронштейн вышел из отверстия в зондовой головке (Рис. 5-21).

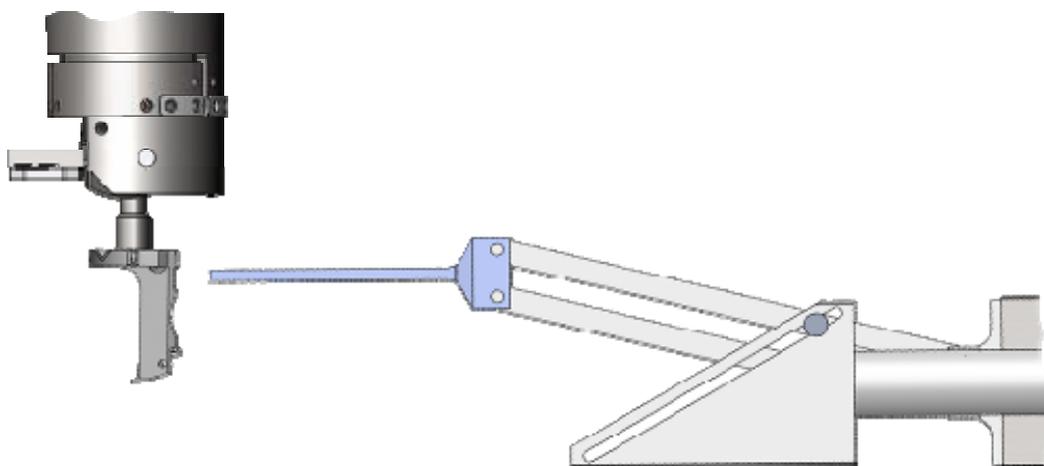


Рис. 5-21

17. Опустите кронштейн так, чтобы он располагался примерно на одном уровне с осью манипулятора (Рис. 5-22).



Рис. 5-22

18. Переместите манипулятор замены зондовых головок в камеру зондов.
19. Закройте шибер, соединяющий камеру зондов с СЗМ камерой.
20. Поверните зондовую головку на 45° по часовой стрелке кнопками  панели **Rotary PZ drive**. 
21. Втяните шток в сканер. В результате зондовая головка должна быть установлена на сканере таким образом, чтобы опорные шарики на фланце сканера попадали в V-образные канавки на фланце зондовой головки, а контакты сканера совпадали с контактами зондовой головки.

5.6. Настройка оптической системы регистрации отклонений кантилевера

1. Включите лазер кнопкой , расположенной справа на панели основных параметров программы Nova. При запуске программы лазер включается автоматически.
2. Настройка положения лазера и фотодиода производится из программы NANOFAB Extensions (Рис. 5-23). Перейдите на вкладку **Laser/Ph.Diode**. Наблюдая положение лазерного пятна с помощью оптического видеомикроскопа, наведите лазерный луч на кантилевер с помощью кнопок панели **Laser**.

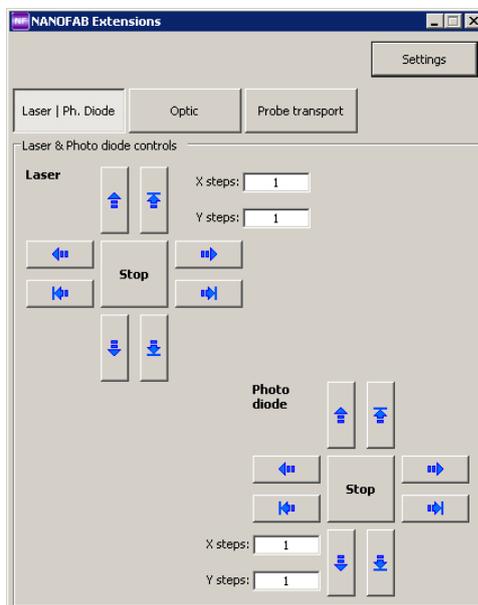


Рис. 5-23. Вкладка **Laser/Ph.Diode** программы NANOFAB Extensions

3. В программе Nova перейдите на вкладку **Aiming** (кнопка  на панели основных операций).

Обычно, как только удалось навести луч лазера на кантилевер, на индикаторе фотодиода появляются некоторые отличные от нуля показания (Рис. 5-24).

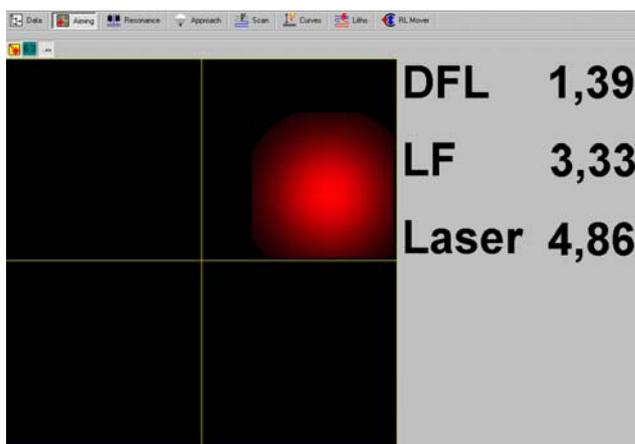


Рис. 5-24

При настройке необходимо так установить фотодиод относительно лазерного луча, чтобы последний, отражаясь от кантилевера, попадал в центральную часть фотодиода, одинаково освещая все четыре сегмента фотодиода.

- С помощью кнопок панели **Photo Diode** выведите световое пятно на индикаторе фотодиода в центр (Рис. 5-25). При этом значения сигналов **DFL** и **LF** должны быть выведены в нуль, величина суммарного сигнала **Laser** должна оставаться достаточно большой.

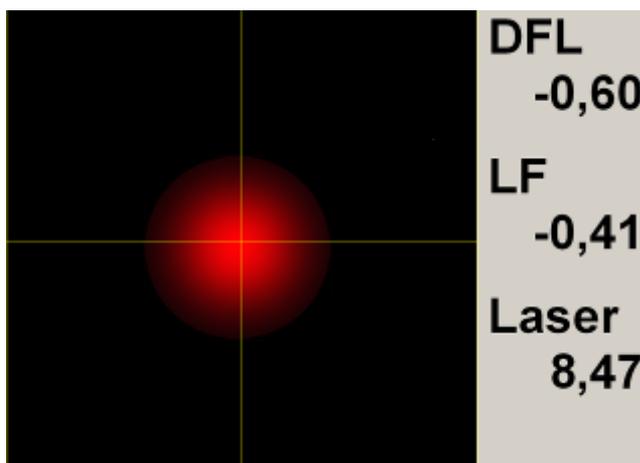


Рис. 5-25

Если какой-либо из этих сигналов при вращении соответствующего винта уменьшается до нуля, и при этом значение **Laser** также уменьшается, то необходимо этот винт вращать в противоположном направлении. При этом сигнал сначала будет увеличиваться, а затем снова уменьшится до нуля, сигнал **Laser** увеличится до прежнего значения, и далее останется на этом же уровне.

- После наведения лазерного луча на кантилевер следует выполнить более точное наведение лазерного луча на кончик кантилевера по величине суммарного сигнала фотодиода. Для этого, слегка перемещая лазерный луч относительно кантилевера, настройтесь на максимальное значение суммарного сигнала фотодиода (сигнал **Laser**). Значение сигнала **Laser** должно находиться в диапазоне 7÷12 нА.

6. Проверьте, что лазерный луч действительно попадает на кантилевер. Характерным признаком того, что лазерный луч попадает на кантилевер, является то, что при небольшом смещении лазерного луча, значение сигнала **Laser** уменьшается.

5.7. Предварительный подвод

1. Перейдите в программу управления координатным столом **XYZ stage control**.

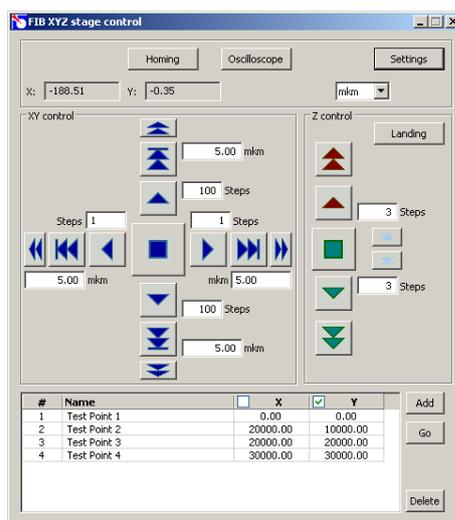


Рис. 5-26. Окно программы управления координатным столом

2. Переместите образец таким образом, чтобы предполагаемая область исследования находилась примерно под сканером, с помощью кнопок управления координатным столом на панели **XY control**.

Описание интерфейса программы управления координатным столом приведено в п. [11.1](#) «Управление координатным столом» на стр. [173](#).

3. Оцените расстояние от поверхности образца до зонда. После предварительного подвода расстояние между зондом и образцом должно составлять 1÷2 мм. Подведите образец к зонду одним из следующих способов:

- Установите в поле ввода для кнопки  количество шагов пьезодвигателя, соответствующее перемещению на нужное расстояние. Щелкните на кнопке , чтобы запустить подвод.
- Щелкните на кнопке . Платформа начнет перемещаться вверх. Когда расстояние между зондом и поверхностью образца уменьшится до 1÷2 мм, остановите подвод, щелкнув на кнопке .



ВНИМАНИЕ! Будьте осторожны! При подводе образца к зонду на слишком маленькое расстояние есть риск повредить зонд.

Подготовка к проведению СЗМ измерений завершена. Описание СЗМ-методов измерений см. в главах [6÷10](#) данного руководства.

6. Контактная Атомно-Силовая Микроскопия

6.1. Метод Постоянной Силы

Работа прибора при измерении рельефа поверхности с использованием Метода Постоянной Силы является основой для работы прибора с применением других контактных методов, таких, например, как Метод Латеральных Сил, Метод Отображения Сопротивления Растекания, Метод Модуляции Силы, Метод Рассогласования.

6.1.1. Подготовка к измерениям

Исходное состояние

Предполагается, что предварительно была выполнена начальная подготовка:

- программа управления **Nova** запущена;
- СЗМ контроллер включен;
- блок расширения включен;
- зондовая головка с зондовым датчиком установлена на сканер;
- система регистрации изгибов кантилевера настроена;
- образец находится в СЗМ камере и подведен к зонду на расстояние $1 \div 2$ мм.

Основные операции при работе с использованием методов контактной микроскопии

Работу по Методу Постоянной Силы можно разделить на следующую последовательность основных операций:

1. Выбор конфигурации (п. [6.1.2](#) на стр. [47](#)).
2. Подвод образца к зонду (п. [6.1.3](#) на стр. [47](#)).
3. Установка рабочего уровня коэффициента усиления обратной связи (п. [6.1.4](#) на стр. [50](#)).
4. Установка параметров сканирования (п. [6.1.5](#) на стр. [52](#)).
5. Сканирование (п. [6.1.6](#) на стр. [55](#)).

Ниже приводится более подробное описание перечисленных выше основных операций.

6.1.2. Выбор конфигурации

Переключите прибор для работы по контактным методам, выбрав **Contact** в меню выбора электронной конфигурации контроллера (Рис. 6-1) на панели основных параметров.

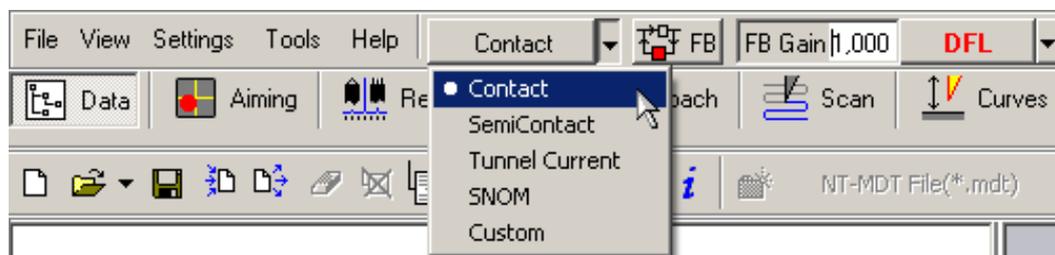


Рис. 6-1. Выбор конфигурации

При выборе конфигурации **Contact** автоматически будут выполнены все переключения в контроллере, необходимые для работы по контактным методам.

6.1.3. Подвод образца к зонду

Для подвода образца к зонду выполните следующие операции:

1. В программе Nova введите значение параметра **Set Point** в поле ввода, расположенном на панели основных параметров (Рис. 6-2).

В качестве начального, рекомендуется установить значение параметра **Set Point** на единицу больше значения сигнала **DFL**: **Set Point=DFL+1**.



Рис. 6-2

Относительно выбора оптимального значения параметра **Set Point** необходимо иметь в виду следующее:

- разность между величиной **Set Point** и начальным уровнем сигнала **DFL** определяет величину взаимодействия острия кантилевера и поверхности образца. Чем больше разность между величиной **Set Point** и начальным уровнем сигнала **DFL**, тем больше величина отклонения кантилевера, тем с большей силой взаимодействуют острие кантилевера и поверхность образца. Таким образом, меняя величину параметра **Set Point** относительно начального уровня сигнала **DFL** можно изменять и устанавливать определенный уровень силы взаимодействия между зондом и поверхностью образца;
- если установить слишком большую разницу между величиной **Set Point** и начальным уровнем **DFL**, что соответствует значительной силе взаимодействия острия кантилевера и поверхности образца, то при

сканировании это может привести к разрушению как зонда, так и исследуемой поверхности;

- при слишком малой величине разницы между **Set Point** и начальным уровнем **DFL**, что соответствует режиму работы в условиях поддержания небольшой по величине силы взаимодействия острия кантилевера и поверхностью образца, работа системы обратной связи может оказаться неустойчивой;
- величина параметра **Set Point** не может быть меньше величины начального уровня сигнала **DFL**.

- Замкните цепь обратной связи, нажав кнопку . В результате Z-секция сканера выдвинется на максимальную величину, что отобразится на индикаторе выдвижения сканера, который находится в нижнем левом углу главного окна программы (Рис. 6-3).



Рис. 6-3. Индикатор выдвижения сканера

- Перейдите в программу управления координатным столом XYZ stage control (Рис. 6-4). Запустите процедуру подвода, щелкнув на кнопке **Landing**.

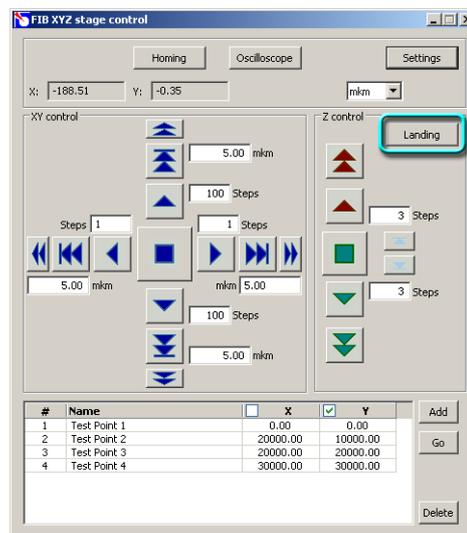


Рис. 6-4. Интерфейс программы XYZ stage control

В процессе подвода следите за изменениями сигнала **DFL** по осциллографу в дополнительном окне программы Nova (открывается кнопкой  в правом верхнем углу главного окна программы), а также за состоянием индикатора выдвижения сканера и ждите окончания процесса подвода.

Через некоторое время, при правильной настройке параметров подвода, процедура подвода закончится и произойдет следующее (Рис. 6-5):



Рис. 6-5. Окончание процесса подвода

- сигнал **DFL** увеличится до значения параметра **Set Point**, обратная связь будет поддерживать **Z**-сканер в положении, при котором сигнал **DFL** равен **Set Point**, причем это положение сканера будет соответствовать примерно половине диапазона выдвижения сканера;
- длина цветной линии индикатора уменьшится и займет некоторое промежуточное положение;
- пьезодвигатели остановятся;
- увеличение сигнала **DFL** до значения параметра **Set Point** будет отображено на зависимости **DFL(t)**, на программном осциллографе.

Возникновение генерации

Может оказаться, что после того, как был выполнен подвод, и произошло увеличение сигнала **DFL** до значения параметра **Set Point**, на зависимости **DFL(t)** наблюдается появление значительной переменной составляющей сигнала **DFL** (Рис. 6-6). Это означает, что имеет место генерация в цепи обратной связи из-за очень большого коэффициента усиления (параметра **FB Gain**). В этом случае необходимо уменьшить величину параметра **FB Gain** до $0.5 \div 0.7$ от порогового. Регулировка параметра **FB Gain** рассматривается ниже, в пункте [6.1.4](#) «Установка рабочего уровня коэффициента усиления обратной связи» на стр. [50](#).

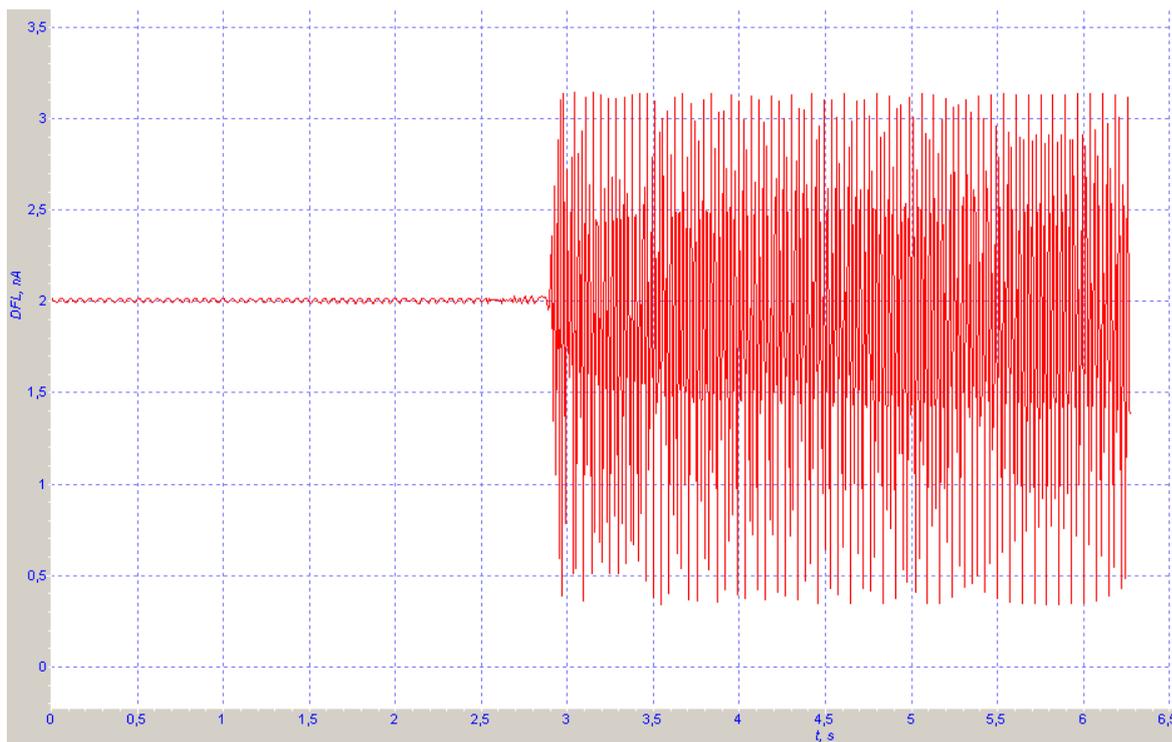


Рис. 6-6. Генерация

6.1.4. Установка рабочего уровня коэффициента усиления обратной связи

Чем больше величина коэффициента усиления (параметр **FB Gain**), тем выше скорость отработки обратной связи. Однако при достаточно большой величине коэффициента усиления (назовем ее пороговой), режим работы обратной связи становится неустойчивым и начинается генерация. Появляется значительная величина переменной составляющей сигнала **DFL** (Рис. 6-7).

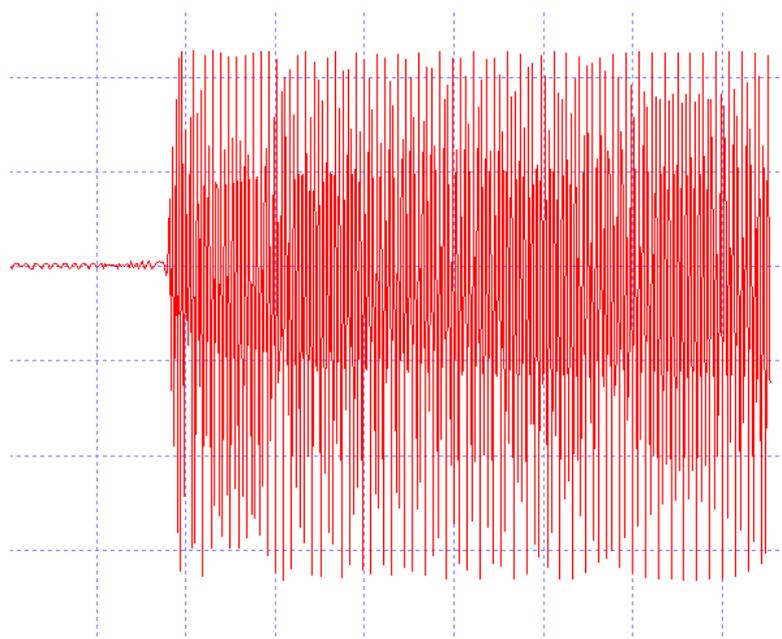
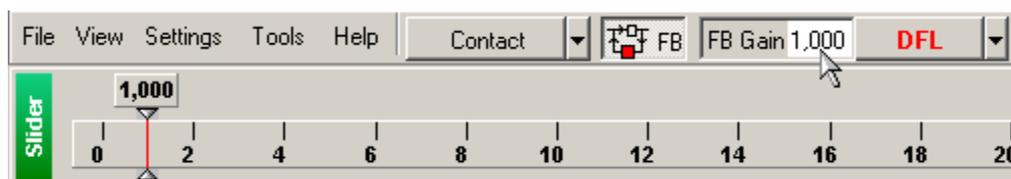


Рис. 6-7. Генерация в цепи обратной связи

Для устойчивой работы рекомендуется устанавливать уровень коэффициента усиления не более $0.5 \div 0.7$ от порогового значения, при котором начинается генерация. Регулировка коэффициента усиления производится в поле ввода **FB Gain**.

Для установки рабочего уровня коэффициента усиления обратной связи:

1. Щелкните дважды на поле ввода параметра **FB Gain** на панели основных параметров, в результате появится ползунок для установки коэффициента обратной связи (Рис. 6-8).

Рис. 6-8. Ползунок для настройки параметра **FB Gain**

2. Увеличивая величину **FB Gain**, следите за уровнем сигнала **DFL** при помощи программного осциллографа.
3. Определите значение коэффициента **FB Gain**, при котором начинается генерация. Начало генерации регистрируется по появлению значительной переменной составляющей сигнала **DFL** (см. Рис. 6-7).
4. Уменьшая параметр **FB Gain**, установите в качестве рабочей величины значение равное $0.5 \div 0.7$ от значения коэффициента усиления **FB Gain**, при котором начинается генерация сигнала **DFL**.

6.1.5. Установка параметров сканирования

Перейдите на вкладку **Scan** (кнопка  на панели основных операций) (Рис. 6-9).



Рис. 6-9. Панель основных операций

В верхней части вкладки **Scan** находится панель управления сканированием (Рис. 6-10).

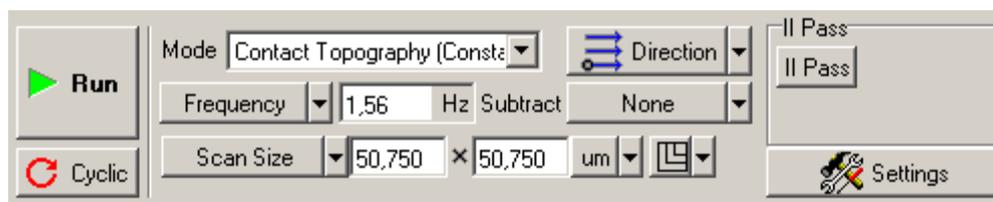


Рис. 6-10. Панель управления вкладки **Scan**

Под ней находится панель отображения 1D-данных сканирования, в которой при сканировании будет построчно отображаться измеряемый сигнал. Ниже находится панель отображения 2D-данных сканирования.

Выбор ACM метода

На панели управления в списке **Mode** (выбор методов сканирования) выберите метод **Contact Topography (Constant Force)** (Рис. 6-11). При этом в контроллере автоматически будут выполнены соответствующие переключения.

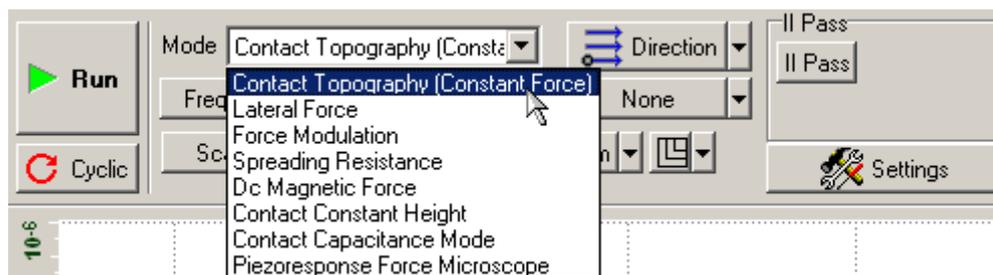


Рис. 6-11. Выбор Метода Постоянной Силы на панели управления вкладки **Scan**

Выбор области сканирования

Рекомендации по выбору начального размера области сканирования:

- если о свойствах поверхности образца имеется некоторая предварительная информация, и есть уверенность в том, что перепад высот ожидаемого рельефа не выходит за пределы диапазона Z-сканера, можно установить максимальное поле сканирования;

- в случае образца, о свойствах поверхности которого ничего не известно, рекомендуется начинать сканирование с области, имеющей небольшие размеры, например, около $0.5 \div 1$ мкм. По результатам сканирования небольшой области можно подобрать и установить оптимальные значения таких параметров, как скорость сканирования, **Set Point**, **FB Gain**. Затем можно изменить область сканирования.

Чтобы изменить размер и выбрать область сканирования выполните следующие действия:

1. Включите опцию изменения размера и выбора области, щелкнув на кнопке  на панели отображения 2D-данных сканирования (Рис. 6-12).

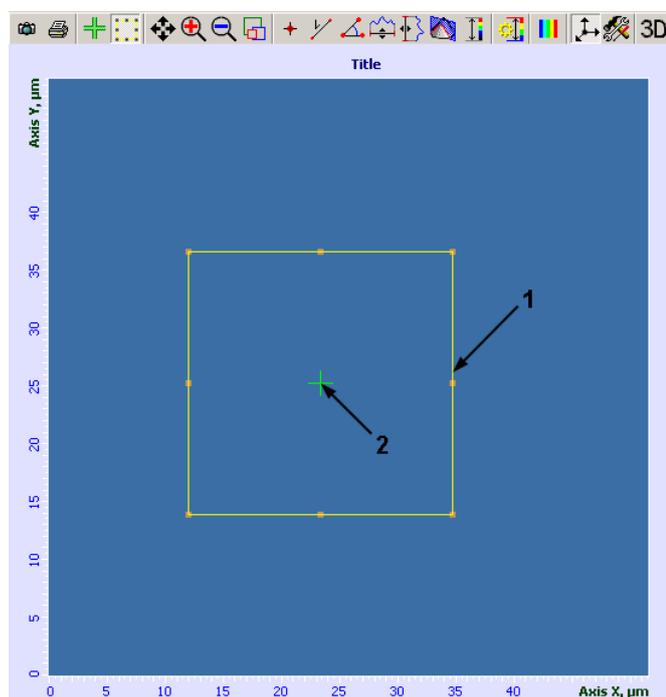


Рис. 6-12. Панель отображения 2D-данных сканирования
1 – границы выбранной области сканирования;
2 – курсор, показывающий положение зонда

2. При помощи мыши измените размер и положение области сканирования (поз. 1 на Рис. 6-12).



*ПРИМЕЧАНИЕ. Изменение размера области сканирования будет автоматически отражаться в полях ввода параметра **Scan Size**.*

3. Щелкните на кнопке . Проверьте, что в пределах выбранной области сканирования зонд всюду достаёт до поверхности и нигде не «врезается» в нее. Для этого нажав левую клавишу мыши и удерживая ее, перемещайте курсор (поз. 2 на Рис. 6-12) в пределах выбранной области сканирования. Перемещение курсора отражает реальное перемещение зонда относительно поверхности образца. Степень выдвигания пьезосканера контролируйте по индикатору в нижней части окна (см. Рис. 6-3).

Установка размера сканированного изображения, числа точек, шага сканирования

Число точек по осям X и Y (**Point Number**), размер сканированного изображения (параметр **Scan Size**) и шаг сканирования (**Step Size**) задаются при помощи кнопки со списком выбора параметра (Рис. 6-13).

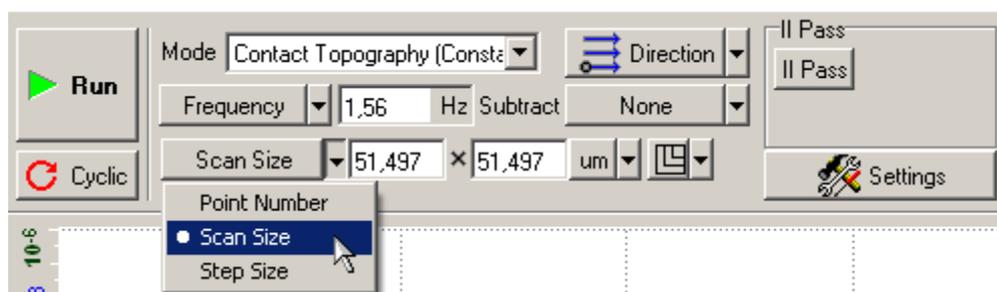


Рис. 6-13

При установке параметров **Point Number**, **Scan Size**, **Step Size** следует иметь ввиду что:

- При изменении **Point Number**: **Scan Size** изменяется;
Step Size не меняется.
- При изменении **Scan Size**: **Step Size** изменяется;
Point Number не меняется.
- При изменении **Step Size**: **Scan Size** изменяется;
Point Number не меняется.

Установка скорости 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 развитый рельеф со значительными перепадами по высоте.

Первоначально рекомендуется установить частоту сканирования строк (параметр **Frequency**) в пределах 0.5÷2 Гц (см. Рис. 6-13).

6.1.6. Сканирование

В качестве примера рассмотрим процесс сканирования образца с прямоугольной решеткой (стандартная решетка TGQ-1, шаг 3 мкм).

Запуск сканирования

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

Для запуска сканирования щелкните на кнопке **Run**, расположенной на панели управления вкладки **Scan** (Рис. 6-14).

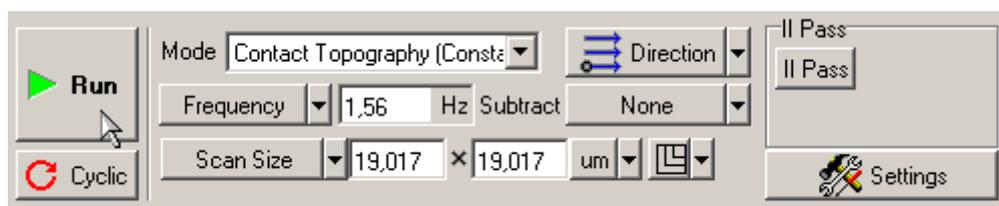


Рис. 6-14. Панель управления вкладки **Scan**

В результате щелчка на кнопке **Run**:

- начнется построчное сканирование поверхности образца и в области отображения 2D-данных сканирования, строчка за строчкой, начнет появляться изображение сканируемой поверхности (Рис. 6-15), в нашем примере изображение прямоугольной решетки;

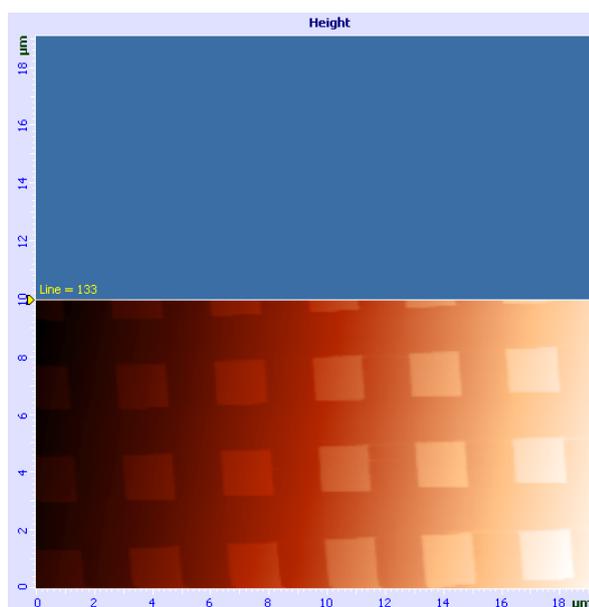


Рис. 6-15. Изображение рельефа поверхности

- на панели отображения 1D-данных при сканировании будет построчно отображаться измеряемый сигнал (Рис. 6-16);

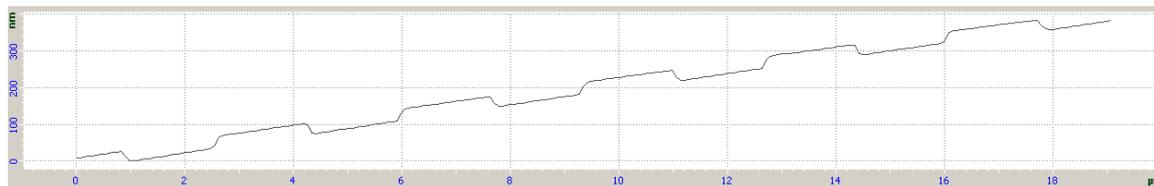


Рис. 6-16. Сигнал Height

- на панели управления вкладки **Scan** некоторые кнопки исчезнут, и появится ряд новых кнопок: **Pause, Restart, Stop** (Рис. 6-17).



Рис. 6-17

Если по какой-либо причине необходимо прекратить сканирование, достаточно щелкнуть на кнопке **Stop** или нажать клавишу <Esc>.

Изменение параметров в процессе сканирования

Вычитание наклона

На приведенном выше примере (см. Рис. 6-15, Рис. 6-16) видно, что образец имеет некоторый наклон по оси X.

Наклон можно вычесть непосредственно в процессе сканирования, используя кнопку **Subtract**. По умолчанию она находится в состоянии **None** (см. Рис. 6-17).

Если щелкнуть на этой кнопке и выбрать из списка **Plane** (Рис. 6-18), то будет выполнено вычитание плоскости, и изображение, которое до этой процедуры имело вид, как на Рис. 6-15 будет иметь вид, как на Рис. 6-19.

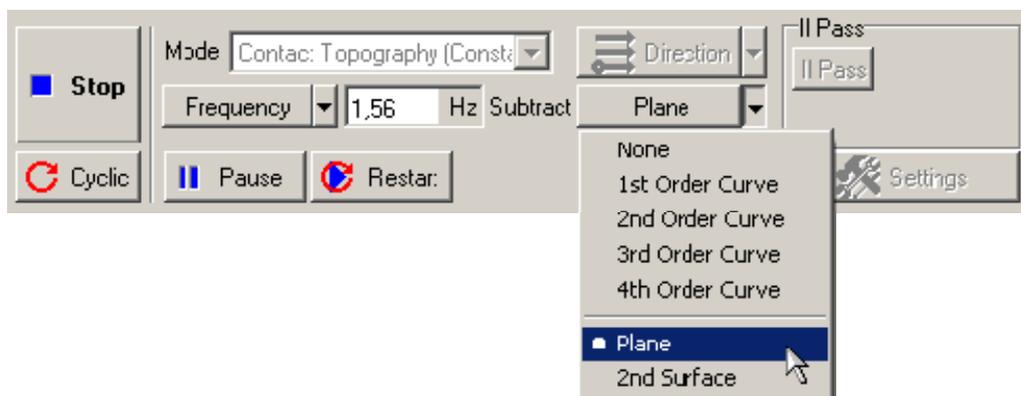


Рис. 6-18

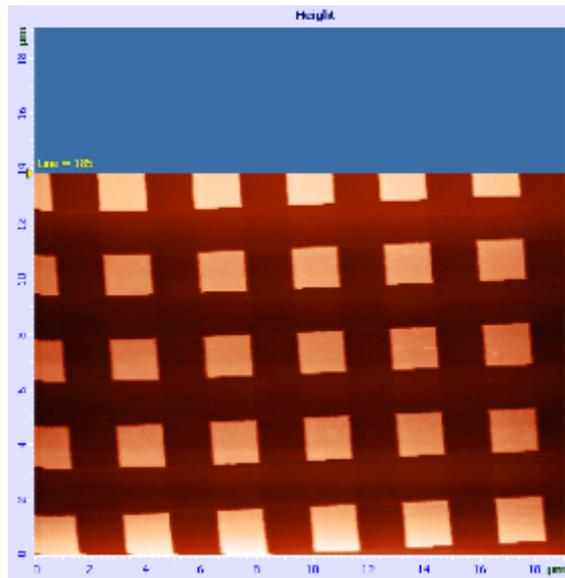
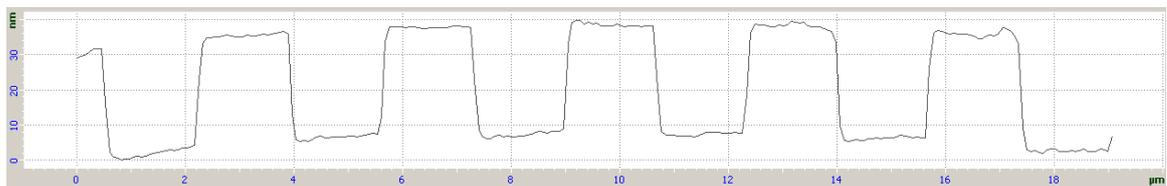


Рис. 6-19. Изображение рельефа поверхности

Соответственно, на панели отображения 1D-данных тоже будет построчно отображаться измеряемый сигнал с учетом вычитания плоскости. Вместо отображаемого сигнала на Рис. 6-16, сигнал будет иметь вид, представленный на Рис. 6-20.

Рис. 6-20. Сигнал **Height**

Подробное описание функции **Subtract** см. в книге «Программное управление СЗМ».



*ПРИМЕЧАНИЕ. Изменения, произведенные со сканированным изображением при помощи функции **Subtract**, не сохраняются в полученных фреймах.*

Настройка параметров в процессе сканирования

Качество получаемого изображения поверхности существенно зависит от таких параметров, как частота сканирования **Frequency** (Рис. 6-21), величина рабочей точки **Set Point** (Рис. 6-22), коэффициент усиления обратной связи **FB Gain** (Рис. 6-22). Любой из этих параметров можно изменять непосредственно в процессе сканирования.

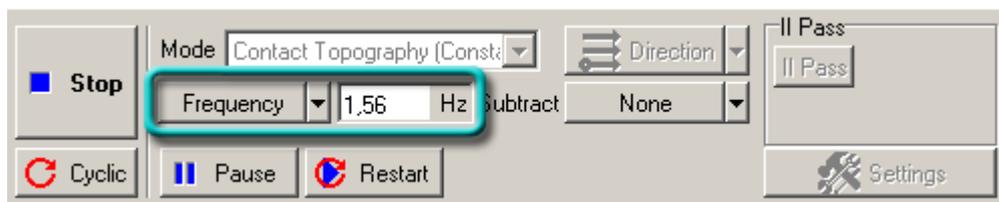


Рис. 6-21



Рис. 6-22

Специально для подстройки параметров сканирования имеется кнопка **Pause**. При включении этой кнопки развертка по медленной оси останавливается, а сканирование вдоль быстрой оси продолжается и происходит вдоль одной и той же линии. Этот режим сканирования можно использовать для подбора оптимальных параметров. При этом можно визуально наблюдать, как изменяется профиль, сканируемой строки, при изменении соответствующего параметра, например: частоты сканирования **Frequency**, величины **Set Point** или коэффициента усиления обратной связи **FB Gain**.

При отключении кнопки **Pause** процесс сканирования продолжится с этой же строки.

Кнопка **Restart** осуществляет повторный запуск сканирования сначала.



ПРИМЕЧАНИЕ. После включения кнопки **Pause** и изменения параметров сканирования рекомендуется начать сканирование сначала, щелкнув по кнопке **Restart**.

Некоторые рекомендации по оптимизации параметров 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 развитый рельеф и значительные перепады по высоте.

Удобно начинать исследовать образец при низкой скорости сканирования, постепенно увеличивая ее до тех пор, пока линия профиля рельефа не начнет искажаться.

Скорость сканирования следует уменьшить, когда не прописывается склон выступа или впадины в направлении сканирования.

При работе с мягкими материалами в сканированном изображении могут возникнуть «затяжки» в направлении сканирования на выступах поверхности. В этом случае рекомендуется уменьшить скорость сканирования, а также уменьшить значение **Set Point** для того, чтобы уменьшить величину воздействия на образец.

6.1.7. Сохранение полученных данных

Для записи полученных данных на жесткий диск выполните следующие действия:

1. В главном меню выберите **File → Save**.
2. В открывшемся диалоговом окне выберите каталог, в котором будут храниться полученные данные (по умолчанию это каталог C:\Program Files\NT-MDT\Nova).
3. Введите название файла и сохраните его с расширением ***.mdt**.



ПРИМЕЧАНИЕ. Сканированное изображение по умолчанию сохраняется в файл *NoNameXX.mdt*, где *XX* – порядковый номер файла в папке *Nova*.

6.1.8. Завершение измерений

1. Отведите образец от зонда на расстояние не менее 2÷3 мм. Для этого:
 - a. Перейдите в программу XYZ stage control;
 - b. Щелкните на кнопке . По достижении нужного расстояния, остановите перемещение кнопкой .
2. Перейдите в программу Nova. Разомкните цепь обратной связи (кнопка  на панели основных параметров).
3. Выключите СЗМ контроллер.
4. Выключите блок расширения.
5. Выключите контроллер координатного стола СЗМ камеры.
6. Выключите виброзащиту.
7. Закройте программу управления.

6.2. Метод Латеральных Сил

6.2.1. Краткая характеристика метода

Метод Латеральных Сил позволяет различать области с различными коэффициентами трения, а также подчеркивать особенности рельефа поверхности. Метод Латеральных Сил может быть полезен при исследовании полупроводников, полимеров, пленочных покрытий, запоминающих сред, при изучении физико-химических свойств поверхности, в частности, химических особенностей (например, загрязнения), трибологических характеристик.

Физическая сущность Метода Латеральных Сил заключается в следующем. При сканировании по Методу Постоянной Силы в направлении, перпендикулярном

продольной оси кантилевера, кроме изгиба кантилевера в нормальном направлении возникает дополнительный торсионный изгиб кантилевера (Рис. 6-23). Он обусловлен моментом силы, действующей на острие зонда.

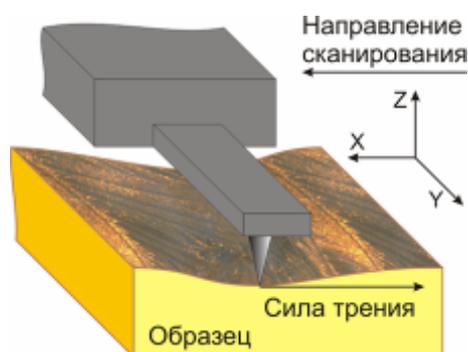


Рис. 6-23

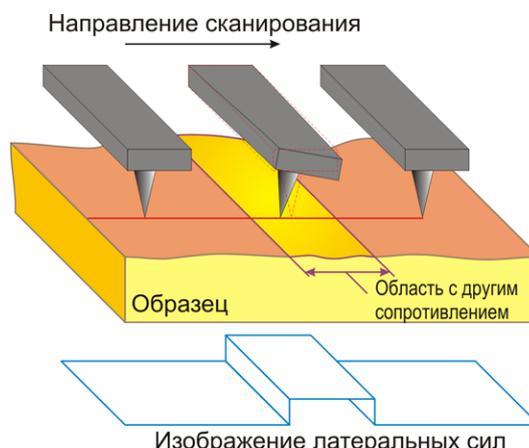


Рис. 6-24

Угол закручивания при малых отклонениях зонда пропорционален латеральной силе. Величина угла закручивания кантилевера измеряется оптической регистрирующей системой микроскопа. Оптическая регистрирующая система формирует сигнал LF , изменение которого пропорционально величине торсионного изгиба кантилевера. Данный сигнал используется для получения изображения локальной силы трения по поверхности образца.

При движении по плоской поверхности, на которой присутствуют участки с разным коэффициентом трения, угол закручивания будет изменяться от участка к участку (Рис. 6-24). Это позволяет говорить об измерении локальной силы трения. Если присутствует развитый рельеф, то такая интерпретация невозможна.

Тем не менее, этот вид измерений позволяет получать изображения, на которых хорошо видны мелкие особенности рельефа. Например, при измерениях латеральных сил легко проводятся измерения параметров кристаллической решетки на слюде и некоторых других слоистых материалах.

6.2.2. Подготовка к измерениям

Метод Латеральных Сил основан на Методе Постоянной Силы, который подробно описан в п. [6.1](#) «Метод Постоянной Силы» на стр. [46](#).

Основные операции при работе по Методу Латеральных Сил

1. Выбор конфигурации (п. [6.1.2](#) на стр. [47](#)).
2. Подвод образца к зонду (п. [6.1.3](#) на стр. [47](#)).
3. Установка рабочего уровня коэффициента усиления обратной связи (п. [6.1.4](#) на стр. [50](#)).
4. Установка параметров сканирования (п. [6.1.5](#) на стр. [52](#)). Выбрать метод: **Lateral Force**.
5. Сканирование (п. [6.1.6](#) на стр. [55](#)).

Основное отличие (от работы по Методу Постоянной Силы) состоит в том, что при выполнении п. [6.1.5](#) «Установка параметров сканирования» (см. стр. [52](#)) необходимо вместо **Contact Topography (Constant Force)** установить **Lateral Force**. Чтобы это сделать необходимо на панели управления вкладки **Scan** в выпадающем меню **Mode** выбрать метод **Lateral Force** (Рис. 6-25). Соответственно, при этом автоматически будут выполнены переключения в приборе, необходимые для реализации выбранного метода.

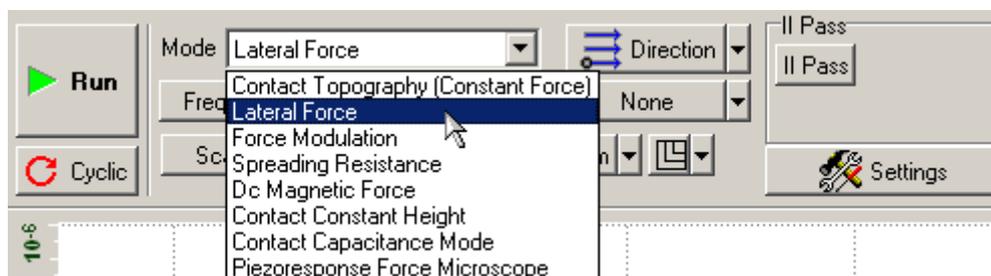


Рис. 6-25. Выбор Метода Латеральных Сил на панели управления вкладки **Scan**

6.2.3. Сканирование

Для запуска процесса сканирования щелкните на кнопке **Run**, находящейся на панели управления вкладки **Scan**:

- начнется построчное сканирование поверхности образца и в области отображения 2D-данных сканирования появятся два изображения: в одном отобразится рельеф поверхности (сигнал **Height**), в другом - распределение латеральных сил (сигнал **LF**) (Рис. 6-26);

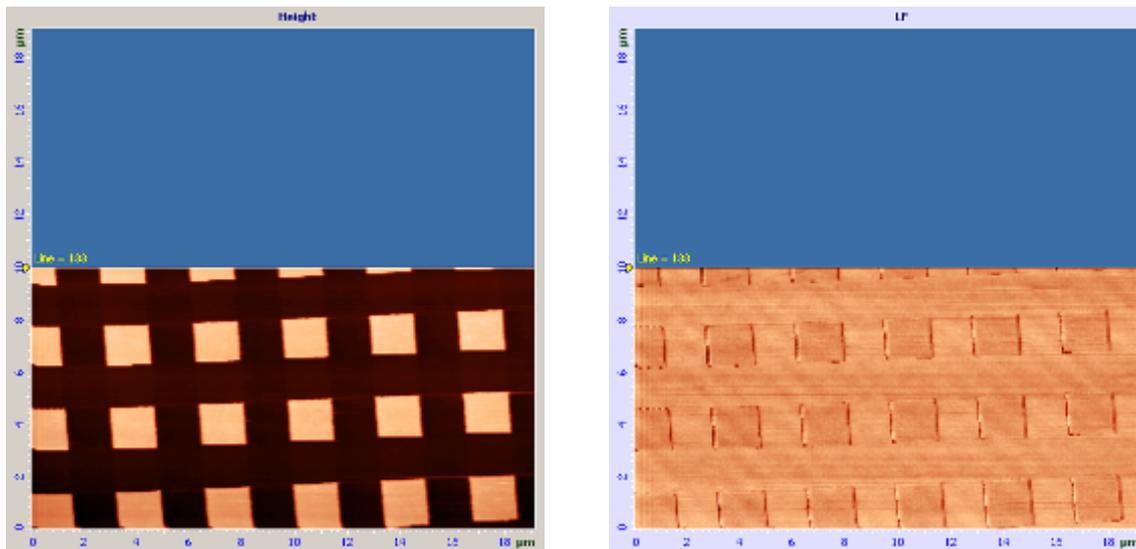


Рис. 6-26. Изображение рельефа и распределения латеральных сил

- на панели отображения 1D-данных будет построчно отображаться измеряемый сигнал выделенного изображения (Рис. 6-27).



Рис. 6-27. Сигнал LF

6.3. Метод Постоянной Высоты

6.3.1. Краткая характеристика метода

В **Методе Постоянной Высоты** кончик зонда находится в контакте с поверхностью. При сканировании закрепленный на чипе конец кантилевера поддерживается на постоянной высоте (сканирование с разомкнутой цепью обратной связи). Таким образом отклонения кантилевера отражают рельеф поверхности исследуемого образца.

Динамика отслеживания поверхности кантилевером при сканировании ограничена частотными свойствами кантилевера, а не обратной связи, как в случае

Метода Постоянной Силы. Резонансные частоты кантилеверов значительно выше характерной частоты обратной связи, которая составляет единицы кГц. Это дает возможность сканировать с более высокими скоростями.

Если предварительно для используемого кантилевера снята зависимость изгиба кантилевера от расстояния между чипом и поверхностью образца (см. Рис. 6-28) (зависимость сигнала **DFL** от расстояния между чипом и поверхностью образца), можно, используя эту зависимость, преобразовать изображение распределения сигнала **DFL** в изображение рельефа поверхности.

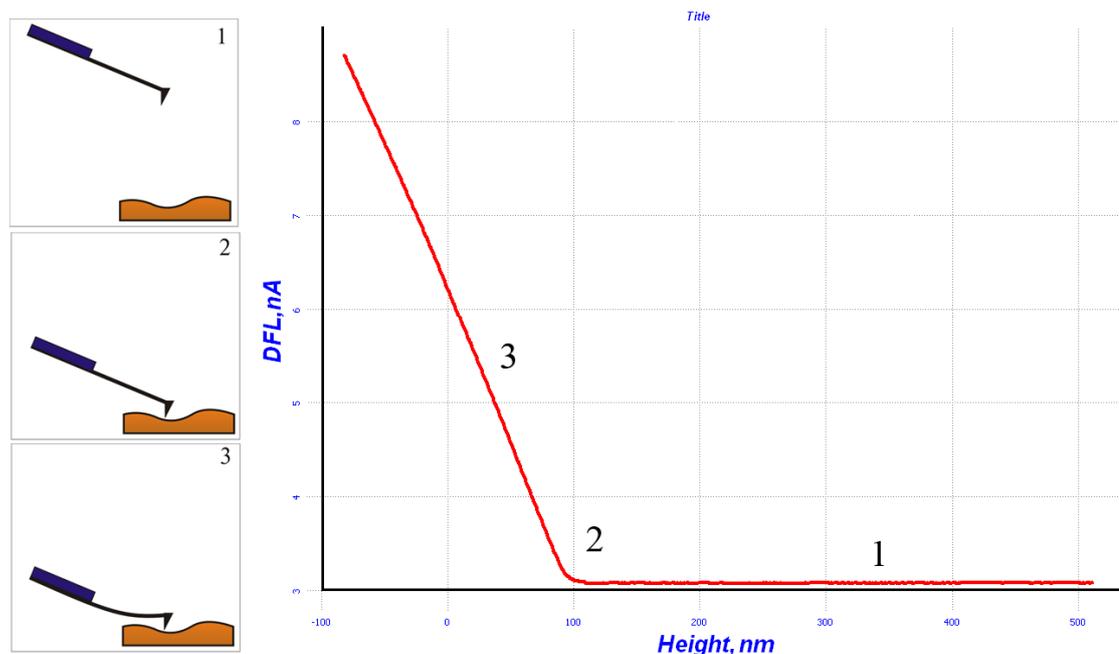


Рис. 6-28

Кроме того, если известны константа жесткости используемого кантилевера и его геометрические размеры, изображение распределения сигнала нормального изгиба кантилевера (сигнала **DFL**) можно преобразовать в изображение распределения локальной силы, действующей на кантилевер.

Однако нужно помнить, что при больших изгибах кантилевера зависимость сигнала **DFL** становится нелинейной. Примерный диапазон линейности зависит от кантилевера: чем короче кантилевер, тем меньше диапазон.

К недостаткам метода относится требование достаточной гладкости поверхности образцов. Кроме того, при исследовании мягких образцов (подобных полимерам, биологическим объектам, ЛБ-пленкам и т.д.) они могут разрушаться, поскольку зонд находится в непосредственном механическом контакте с поверхностью. При сканировании относительно мягких образцов с развитой поверхностью сила давления зонда на поверхность варьируется, одновременно неравномерно прогибается и поверхность образца. В результате полученный рельеф поверхности может быть искажен.

6.3.2. Подготовка к измерениям

Предварительно, перед проведением измерений по Методу Постоянной Высоты, выполните подготовку и проведите измерения рельефа поверхности по Методу Постоянной Силы.

Основные операции при работе по Методу Постоянной Высоты

1. Выбор конфигурации (п. [6.1.2](#) на стр. [47](#)).
2. Подвод образца к зонду (п. [6.1.3](#) на стр. [47](#)).
3. Установка рабочего уровня коэффициента усиления обратной связи (п. [6.1.4](#) на стр. [50](#)).
4. Установка параметров сканирования (п. [6.1.5](#) на стр. [52](#)).
5. Сканирование (п. [6.1.6](#) на стр. [55](#)).

После проведения предварительных измерений рельефа поверхности по Методу Постоянной Силы, произведите настройку параметров для работы по Методу Постоянной Высоты.

6.3.3. Настройка параметров

1. Перейдите на вкладку **Scan** (кнопка **Scan** на панели основных операций) (Рис. 6-29).



Рис. 6-29. Панель основных операций

2. Выберите метод **Contact Constant Height** в меню **Mode** на панели управления вкладки **Scan** (Рис. 6-30).

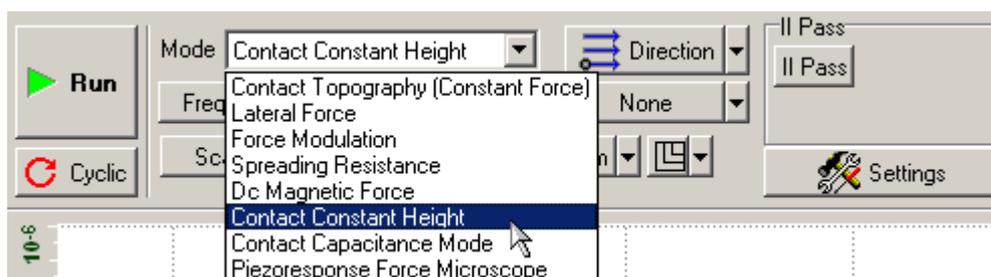


Рис. 6-30. Выбор Метода Постоянной Высоты на панели управления вкладки **Scan**



*ПРИМЕЧАНИЕ. При установке Метода Постоянной Высоты величина параметра **FB Gain** (коэффициент усиления обратной связи) автоматически установится близкой к нулю. Это эквивалентно размыканию обратной связи и фиксации положения закрепленного конца кантилевера на заданной высоте относительно поверхности. Одновременно на вход измерительного канала АЦП подается сигнал **DFL**.*

6.3.4. Сканирование

Для запуска процесса сканирования щелкните на кнопке **Run**, находящейся на панели управления вкладки **Scan**:

- начнется построчное сканирование поверхности образца и в области отображения 2D-данных сканирования, строчка за строчкой, начнет появляться изображение сканируемой поверхности (Рис. 6-31);

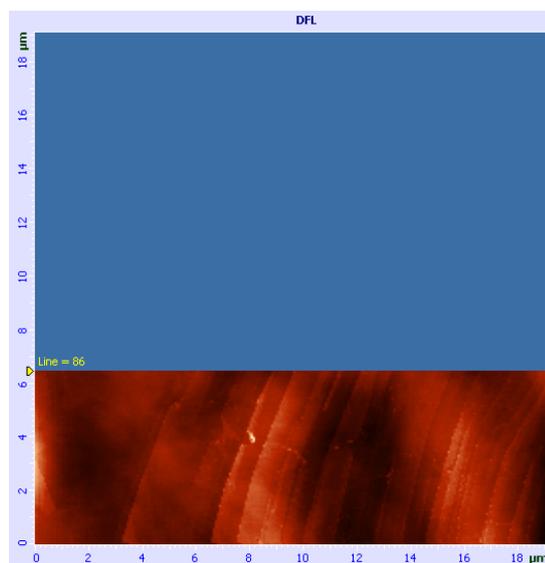


Рис. 6-31. Изображение рельефа поверхности

- на панели отображения 1D-данных при сканировании будет построчно отображаться измеряемый сигнал (Рис. 6-32).



Рис. 6-32. Сигнал DFL

6.4. Отображение Сопротивления Растекания

6.4.1. Краткая характеристика метода

Отображение Сопротивления Растекания является весьма продуктивным АСМ методом, используемым при различных исследованиях, например, при обнаружении дефектов в проводящих и слабо проводящих пленках, характеристики материалов в терминах локального сопротивления и т.д. Отображение Сопротивления Растекания возможно при использовании проводящего зонда, находящегося в контакте с поверхностью образца. К зонду прикладывается напряжение смещения, и проводятся измерения результирующего тока через образец в зависимости от

положения зонда одновременно с получением данных о рельефе по Методу Постоянной Силы. Как легко показать, в предположении постоянного контактного сопротивления зонд-поверхность при заданном смещении величина измеряемого тока пропорциональна локальному сопротивлению исследуемого образца.

Типичными применениями метода являются, например, определение реальных размеров зазора исток-сток МДП-транзистора, глубины залегания р-п перехода, определение распределения концентрации легирующих примесей в полупроводниковых структурах.

6.4.2. Подготовка к измерениям

Отображение Сопротивления Растекания основано на Методе Постоянной Силы, который подробно описан в п. [6.1](#) «Метод Постоянной Силы» на стр. [46](#).

Предварительно, перед проведением измерений Отображения Сопротивления Растекания, выполните подготовку и проведите измерения рельефа поверхности по Методу Постоянной Силы.

Основные операции при работе Отображения Сопротивления Растекания

1. Выбор конфигурации (п. [6.1.2](#) на стр. [47](#)).
2. Подвод образца к зонду (п. [6.1.3](#) на стр. [47](#)).
3. Установка рабочего уровня коэффициента усиления обратной связи (п. [6.1.4](#) на стр. [50](#)).
4. Установка параметров сканирования (п. [6.1.5](#) на стр. [52](#)).
5. Сканирование (п. [6.1.6](#) на стр. [55](#)).

После проведения предварительных измерений рельефа поверхности по Методу Постоянной Силы, произведите настройку параметров для работы Отображения Сопротивления Растекания.

Для проведения измерений используйте зондовые датчики с проводящим покрытием.

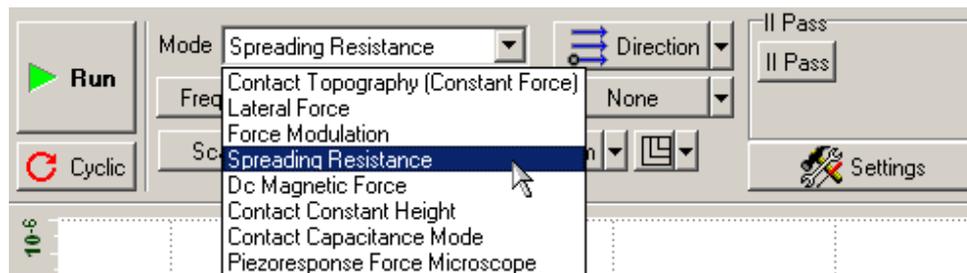
6.4.3. Настройка параметров

1. Перейдите на вкладку **Scan** (кнопка **Scan** на панели основных операций) (Рис. 6-33).

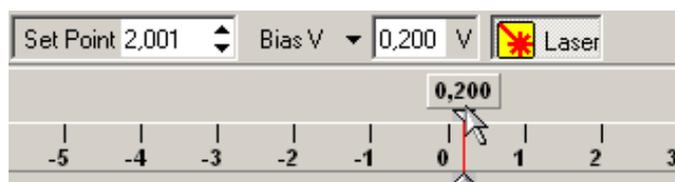


Рис. 6-33. Панель основных операций

2. Выберите метод **Spreading Resistance** в меню **Mode** на панели управления вкладки **Scan** (Рис. 6-34).

Рис. 6-34. Выбор Отображения Сопротивления Растекания на панели управления вкладки **Scan**

3. Откройте область дополнительных операций (кнопка )
4. Включите программный осциллограф, установив в качестве регистрируемого сигнала **lpr low**.
5. Щелкните дважды на поле ввода разности потенциалов **Bias Voltage**, в результате появится ползунок (Рис. 6-35) для установки разности потенциалов между образцом и зондом.

Рис. 6-35. Ползунок для установки параметра **Bias Voltage**

6. Перемещая ползунок, установите, разность потенциалов **Bias Voltage** таким, при котором сигнал **lpr low** на программном осциллографе будет равным $10 \div 15$ nA.

6.4.4. Сканирование

Для запуска процесса сканирования щелкните на кнопке **Run**, находящейся на панели управления вкладки **Scan**:

- начнется построчное сканирование поверхности образца и в области отображения 2D-данных сканирования появятся два изображения: в одном

отобразится рельеф поверхности (сигнал **Height**), в другом – распределение тока растекания (сигнал **Ipr low**);

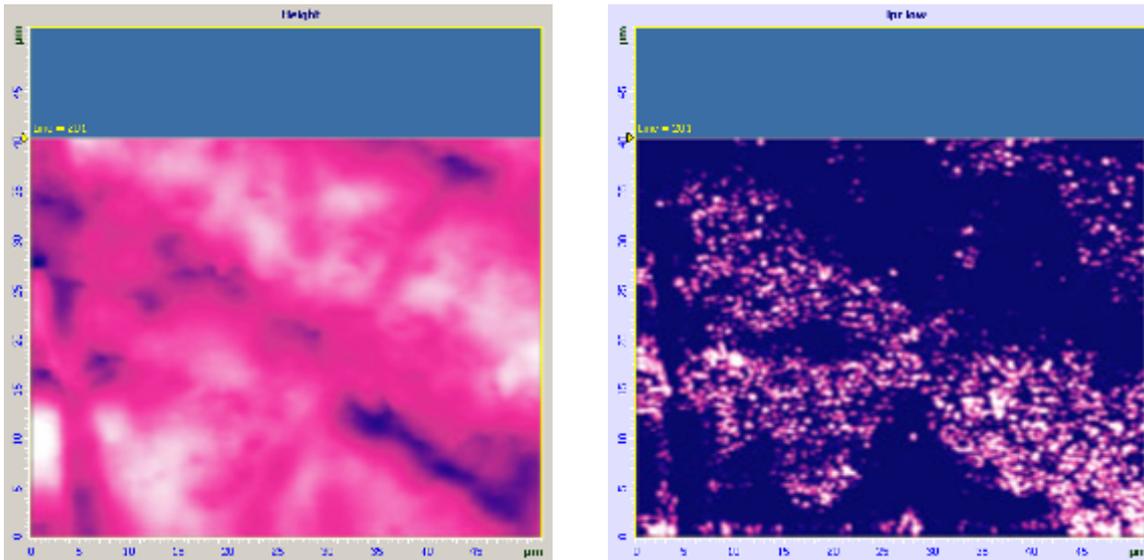


Рис. 6-36. Изображения рельефа и распределение тока растекания



ПРИМЕЧАНИЕ. Светлые области для сигнала **Ipr low** соответствуют большей проводимости и наоборот.

- на панели отображения 1D-данных будет построчно отображаться измеряемый сигнал выделенного изображения (Рис. 6-37).

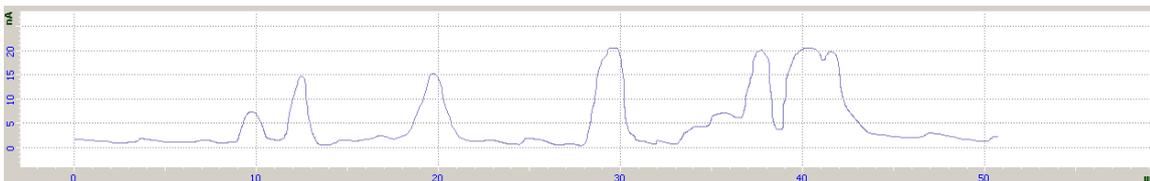


Рис. 6-37. Сигнал Ipr low

6.4.5. Способы улучшения изображения

Если вас не устраивает качество изображения, можно:

- изменить параметр **Set Point** (силу прижима зонда к образцу);
- изменить величину разности потенциалов между зондом и образцом (параметр **Bias Voltage**) (см. Рис. 6-35). При очень большом напряжении возможно локальное окисление поверхности;
- заменить зондовый датчик (с другой жесткостью или типом проводящего покрытия).



ВНИМАНИЕ! При очень сильном прижиге зонда к образцу возможно повреждение проводящего покрытия кантилевера.

6.5. Метод Модуляции Силы

6.5.1. Краткая характеристика метода

Для изучения локальной жесткости используется **Метод Модуляции Силы**. В процессе сканирования на Z-секцию сканера подается дополнительное модулированное напряжение, совершающее вертикальные периодические колебания сканера. В соответствии с локальной жесткостью поверхности образца изменяются величина продавливания образца и изгиб кантилевера. На жестких участках поверхности величина прогибов поверхности от зонда будет маленькой, а величина изгиба кантилевера большой. На мягких же участках глубина прогибов поверхности увеличится, а величина изгиба кантилевера – уменьшится (Рис. 6-38).

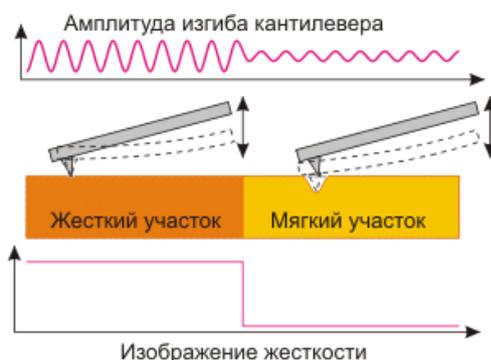


Рис. 6-38

Отслеживание рельефа поверхности образца проводится с использованием среднего изгиба кантилевера в системе обратной связи.

Метод Модуляции Силы широко используется при исследованиях полимеров, полупроводников, биообъектов, в особенности при исследованиях композитов.

6.5.2. Подготовка к измерениям

Метод Модуляции Силы основан на Методе Постоянной Силы, который подробно описан в п. [6.1](#) «Метод Постоянной Силы» на стр. [46](#).

Предварительно, перед проведением измерений по Методу Модуляции Силы, выполните подготовку и проведите измерения рельефа поверхности по Методу Постоянной Силы.

Основные операции при работе по Методу Модуляции Силы

1. Выбор конфигурации (п. [6.1.2](#) на стр. [47](#)).
2. Подвод образца к зонду (п. [6.1.3](#) на стр. [47](#)).
3. Установка рабочего уровня коэффициента усиления обратной связи (п. [6.1.4](#) на стр. [50](#)).
4. Установка параметров сканирования (п. [6.1.5](#) на стр. [52](#)).
5. Сканирование (п. [6.1.6](#) на стр. [55](#)).

После того, как были проведены предварительные измерения рельефа поверхности по Методу Постоянной Силы, необходимо произвести настройку параметров для работы по Методу Модуляции Силы.

6.5.3. Настройка параметров

1. Перейдите на вкладку **Scan** (кнопка **Scan** на панели основных операций) (Рис. 6-39).



Рис. 6-39. Панель основных операций

2. Выберите метод **Force Modulation** в меню **Mode** на панели управления вкладки **Scan** (Рис. 6-40).

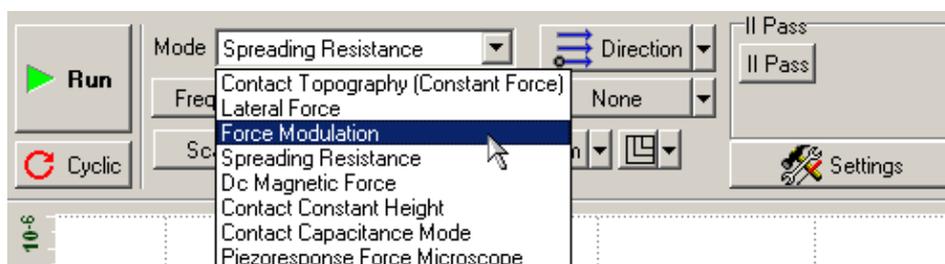


Рис. 6-40. Выбор Метода Модуляции Силы на панели управления вкладки **Scan**



ПРИМЕЧАНИЕ. Программа автоматически подключит переменное напряжение с генератора на Z-секцию сканера, установит границы для поиска резонансной частоты системы (сканер, образец и зонд), переключится на низкочастотный вход синхронного детектора и установит необходимые сигналы для измерения.

Для поиска резонансной частоты сканера выполните следующие действия:

1. Перейдите на вкладку **Resonance** (кнопка **Resonance** на панели основных операций) (Рис. 6-42).



Рис. 6-41. Панель основных операций

2. Снимите флажок **Auto peak find** (Рис. 6-42).

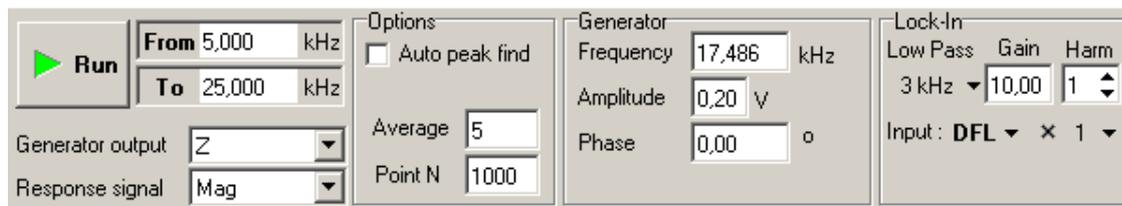


Рис. 6-42. Панель управления вкладки **Resonance**

3. Установите диапазон частот 5÷25 кГц.

4. Запустите процедуру поиска резонансной частоты, щелкнув на кнопке **Run** (при этом кнопка  должна быть нажата).

В результате выполнения процедуры на панели частотных зависимостей будет отображена частотная зависимость колебаний кантилевера (сигнал **Mag**) (Рис. 6-43).

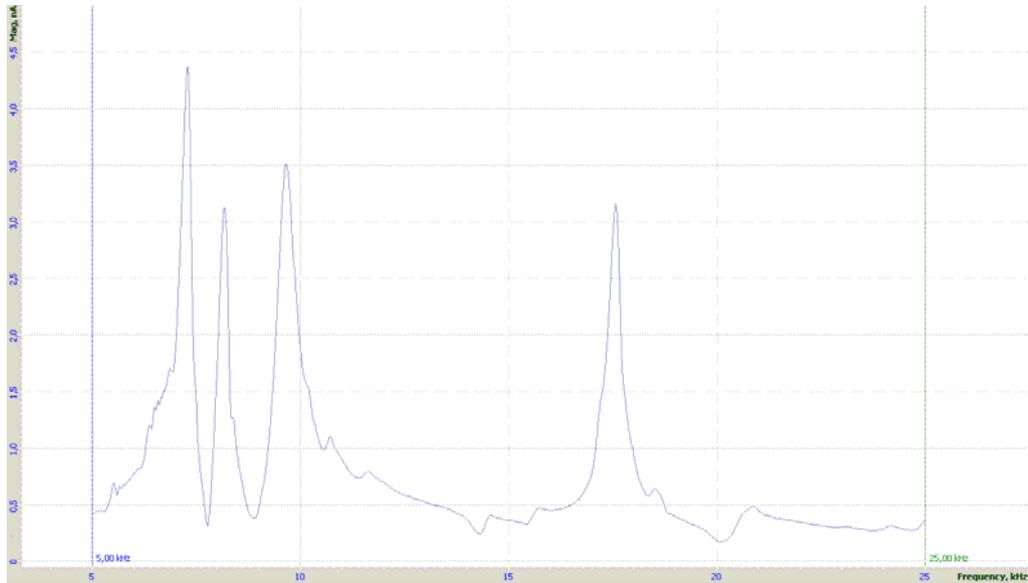


Рис. 6-43

5. Выберите параметр **Frequency** (Рис. 6-44), соответствующий одному из пиков.

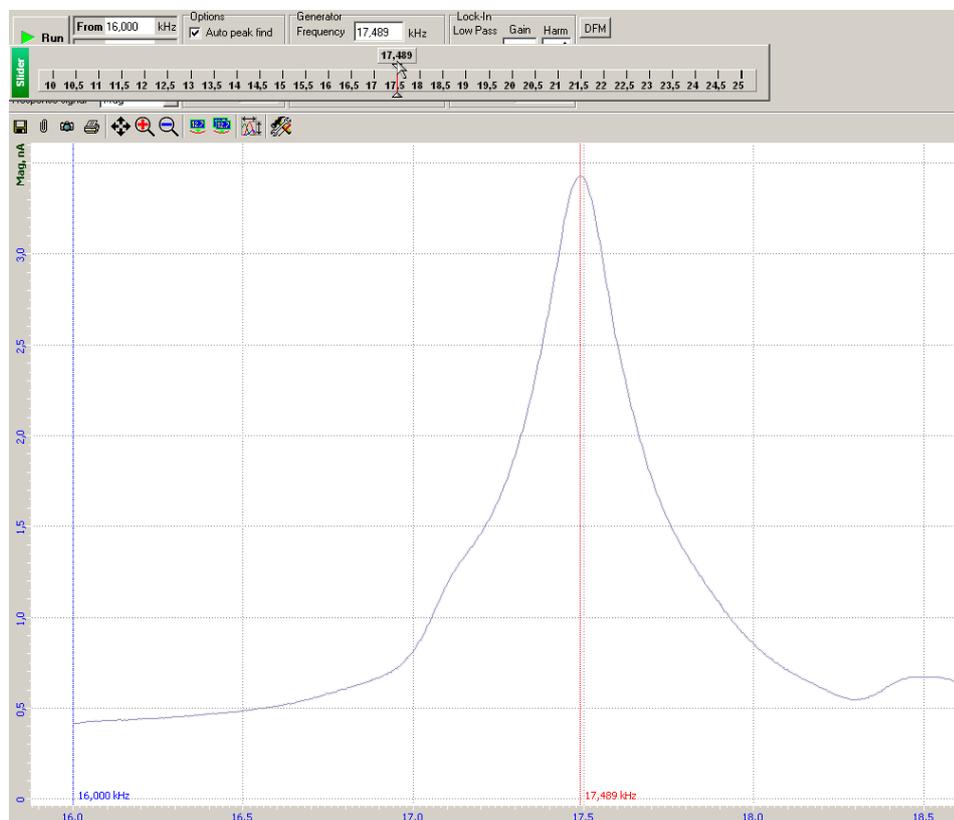


Рис. 6-44

6. Добейтесь, чтобы высота выбранного пика была в пределах 2÷5 нА. Для этого вы можете изменить напряжение генератора (параметр **Amplitude**) (см. Рис. 6-42), или коэффициент усиления в синхронном детекторе (параметр **Gain**) и предусилителе (параметр **Preamplifier**) (см. Рис. 6-42).

6.5.4. Сканирование

Для запуска процесса сканирования щелкните на кнопке **Run**, находящейся на панели управления вкладки **Scan**:

- начнется построчное сканирование поверхности образца и в области отображения 2D-данных сканирования появятся два изображения: в одном отобразится рельеф поверхности (сигнал **Height**), в другом – распределение локальной жесткости (сигнал **Mag**) (Рис. 6-45);

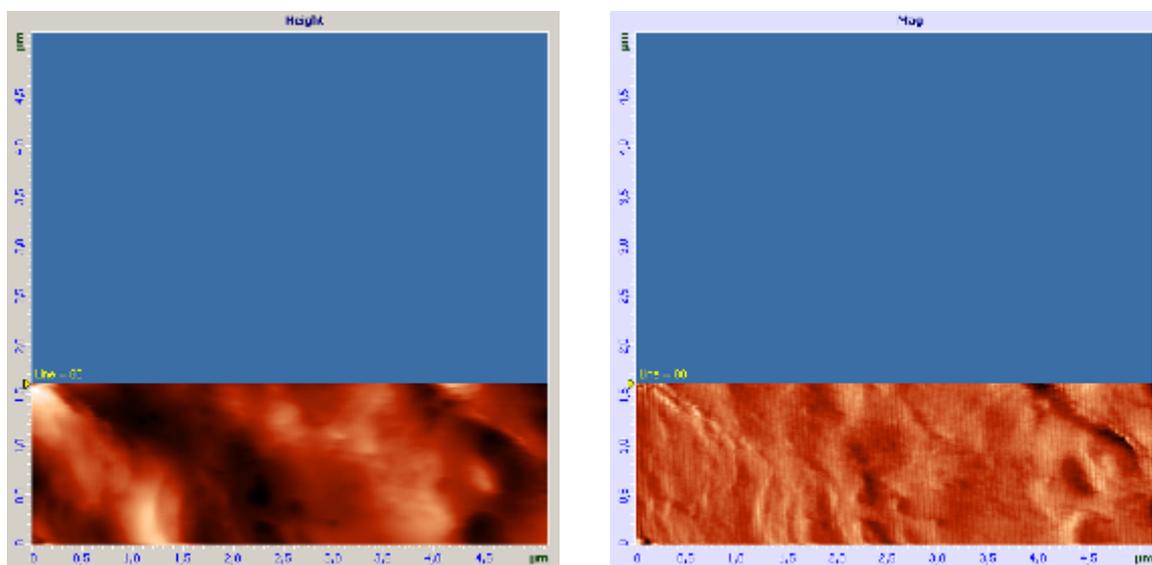


Рис. 6-45. Изображения рельефа и распределения локальной жесткости



ПРИМЕЧАНИЕ. Светлые области для сигнала **Mag** соответствуют большей жесткости и наоборот.

- на панели отображения 1D-данных будет построчно отображаться измеряемый сигнал выделенного изображения (Рис. 6-46).

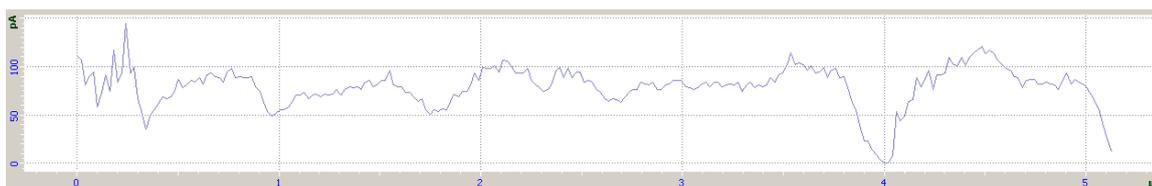


Рис. 6-46. Сигнал **Mag**

6.5.5. Способы улучшения изображения

Если вас не устраивает качество изображения, можно:

- изменить параметр **Set Point** (силу прижима зонда к образцу);
- настроиться на резонансную частоту, соответствующую другому пику;
- изменить напряжение генератора (параметр **Amplitude**) (см. Рис. 6-42), и коэффициент усиления синхронного детектора (параметр **Gain**) и предусилителя (параметр **Preamplifier**) (см. Рис. 6-42);
- заменить зондовый датчик (с другой жесткостью и резонансной частотой).

6.6. Контактный Метод Рассогласования

6.6.1. Краткая характеристика метода

В процессе сканирования в соответствии с рельефом поверхности образца изменяется величина изгиба кантилевера. Следящая система стремится поддержать заданный уровень величины изгиба кантилевера (**Set Point**), точнее, уровень сигнала, связанного с изгибом (в нашем случае это сигнал **DFL**). Однако следящая система не может мгновенно вернуть текущее значение **DFL** к заданному уровню, поскольку обладает некоторой инерционностью (характеризуемой постоянной времени обратной связи).

При сканировании текущее значение сигнала **DFL** (сигнала связанного с изгибом кантилевера) является сигналом рассогласования системы обратной связи и содержит дополнительную информацию о рельефе поверхности. Этот сигнал может быть использован для более точного воспроизведения рельефа. Метод, в котором одновременно с получением изображения рельефа поверхности по Методу Постоянной Силы, производится измерение сигнала рассогласования (в нашем случае сигнала **DFL**), называется **Контактным Методом Рассогласования**.

Контактный Метод Рассогласования можно рассматривать как промежуточный между Методом Постоянной Силы и Методом Постоянной Высоты, если отрегулировать скорость отработки сигнала рассогласования (в нашем случае коэффициент усиления обратной связи) так, чтобы система обратной связи успевала отслеживать плавные изменения рельефа и не успевала отслеживать резкие изменения. Тогда, во время прохождения зондом небольших неоднородностей поверхности образца сканирование будет происходить при почти постоянной длине пьезосканера. В результате на сканированном изображении будут слабо проявляться медленные изменения рельефа и с высоким контрастом - резкие. Это может быть полезно для отыскания мелких неоднородностей на фоне крупных и относительно гладких особенностей рельефа.

6.6.2. Подготовка к измерениям

Контактный Метод Рассогласования основан на Методе Постоянной Силы, который подробно описан в п. 6.1 «Метод Постоянной Силы», на стр. 46.

Предварительно, перед проведением измерений по Контактному Методу Рассогласования, выполните подготовку и проведите измерения рельефа поверхности по Методу Постоянной Силы.

Основные операции при работе по Контактному Методу Рассогласования

1. Выбор конфигурации (п. 6.1.2 на стр. 47).
2. Подвод образца к зонду (п. 6.1.3 на стр. 47).
3. Установка рабочего уровня коэффициента усиления обратной связи (п. 6.1.4 на стр. 50).
4. Установка параметров сканирования (п. 6.1.5 на стр. 52).
5. Сканирование (п. 6.1.6 на стр. 55).

После проведения предварительных измерений рельефа поверхности по Методу Постоянной Силы, необходимо произвести настройку параметров для работы по Контактному Методу Рассогласования.

6.6.3. Настройки параметров

Для проведения измерений по Контактному Методу Рассогласования, включите измерение сигнала **DFL**, выполнив следующие действия:

1. Откройте диалоговое окно **Scan Setup** (Рис. 6-47), щелкнув на кнопке **Settings** на панели управления вкладки **Scan**.

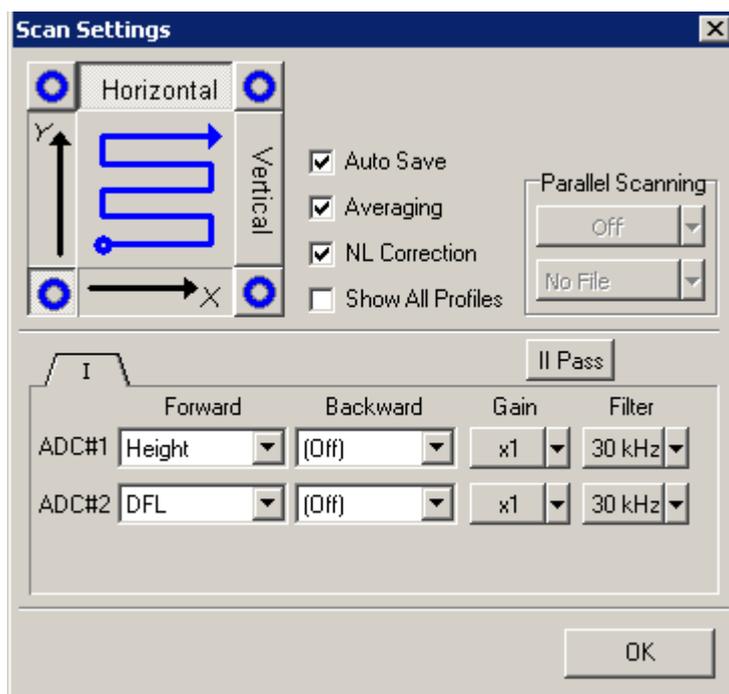


Рис. 6-47. Окно настроек сканирования

- Щелкните мышью на поле ввода сигнала второго канала.
- В открывшемся меню сигналов выберите **DFL**.

6.6.4. Сканирование

Для запуска процесса сканирования щелкните на кнопке **Run**, находящейся на панели управления вкладки **Scan**:

- начнется построчное сканирование поверхности образца и в области отображения 2D-данных сканирования появятся два изображения: в одном отобразится рельеф поверхности (сигнал **Height**), в другом – сигнал рассогласования (сигнал **DFL**) (Рис. 6-48);

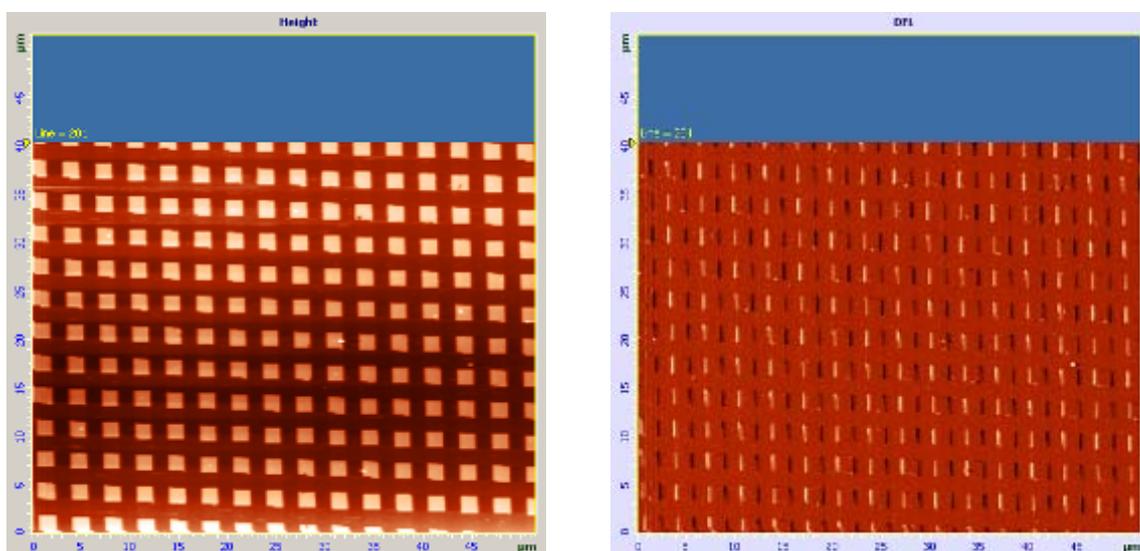


Рис. 6-48. Изображение рельефа и сигнала рассогласования

- на панели отображения 1D-данных будет построчно отображаться измеряемый сигнал выделенного изображения (Рис. 6-49).



Рис. 6-49. Сигнал DFL

7. Полуконтактная Атомно-Силовая Микроскопия

7.1. Полуконтактный Метод

Работа прибора при измерении рельефа поверхности с использованием Полуконтактного Метода является также основой для реализации ряда других методов и методик, связанных с использованием резонансных колебаний кантилевера.

7.1.1. Подготовка к измерениям

Исходное состояние

Предполагается, что предварительно была выполнена начальная подготовка прибора:

- программа управления запущена;
- СЗМ контроллер включен;
- блок расширения включен;
- зондовая головка с зондовым датчиком установлена на сканер;
- система регистрации изгибов кантилевера настроена;
- образец находится в СЗМ камере и подведен к зонду на расстояние $1 \div 2$ мм.

Основные операции при работе с использованием методов полуконтактной микроскопии

Работу по Полуконтактному Методу можно разделить на следующую последовательность основных операций:

1. Выбор конфигурации (п. [7.1.2](#) на стр. [77](#)).
2. Установка рабочей частоты пьезодрайвера (п. [7.1.3](#) на стр. [77](#)).
3. Установка начального уровня сигнала **Mag** (п. [7.1.4](#) на стр. [81](#)).
4. Подвод образца к зонду (п. [7.1.5](#) на стр. [82](#)).
5. Установка рабочего уровня коэффициента усиления обратной связи (п. [7.1.6](#) на стр. [86](#)).
6. Установка параметров сканирования (п. [7.1.7](#) на стр. [87](#)).
7. Сканирование (п. [7.1.8](#) на стр. [91](#)).

Ниже приводится более подробное описание перечисленных выше основных операций.

7.1.2. Выбор конфигурации

Переключите прибор для работы по полуконтактным методам, выбрав **SemiContact** в меню выбора электронной конфигурации прибора (Рис. 7-1) на панели основных параметров.

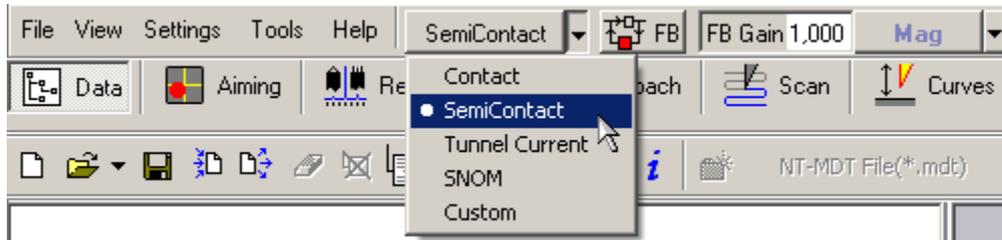


Рис. 7-1. Выбор конфигурации

При выборе конфигурации **SemiContact** автоматически будут выполнены все переключения в контроллере, необходимые для работы по полуконтактным методам.

7.1.3. Установка рабочей частоты пьезодрайвера

Для установки рабочей частоты пьезодрайвера выполните следующие действия:

1. Перейдите на вкладку **Resonance** (кнопка **Resonance** на панели основных операций) (Рис. 7-2).



Рис. 7-2. Панель основных операций

2. Установите флажок **Auto peak find** (Рис. 7-3).
3. Установите значение **Average** = 100.

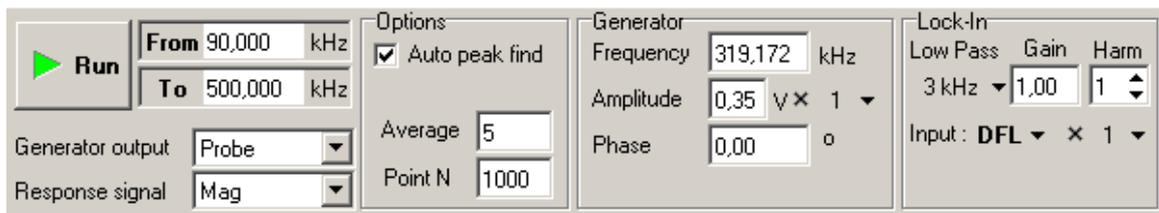


Рис. 7-3. Панель управления вкладки Resonance

4. Установите диапазон частот 90÷500 кГц.
5. Запустите процедуру автоматического поиска резонансной частоты, щелкнув на кнопке **Run**.

В результате выполнения этой процедуры:

- будет измерена частотная зависимость амплитуды колебаний кантилевера (сигнала **Mag**);
- определена резонансная частота кантилевера;

- установлена рабочая частота пьезодрайвера, равная резонансной частоте кантилевера;
- на панели частотных зависимостей будет отображена частотная зависимость сигнала **Mag** вблизи максимума (Рис. 7-4).

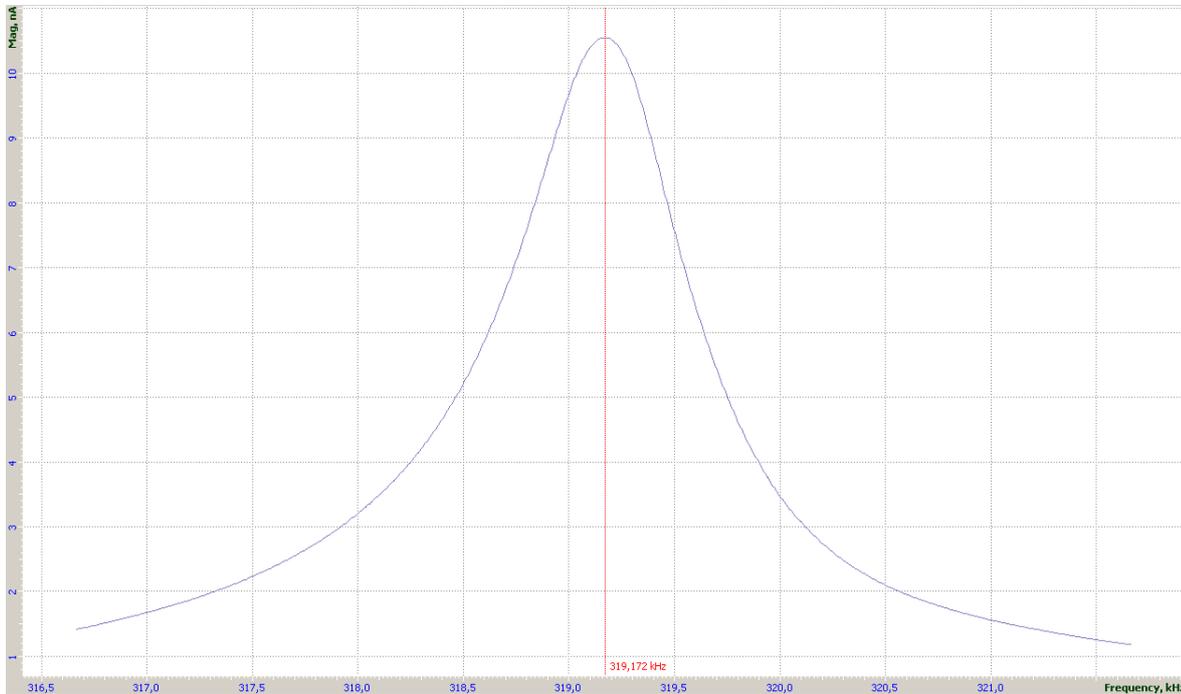


Рис. 7-4

- Обратите внимание на форму резонансной кривой, особенно в области ее пика. Если вид полученной зависимости (особенно в области пика) примерно соответствует зависимости, приведенной в качестве примера на Рис. 7-4, то можно считать, что автоматическая настройка прошла успешно. В этом случае можно перейти к выполнению следующей операции (к п. [7.1.4](#) «Установка начального уровня сигнала **Mag**» на стр. [81](#)).

Обычно, в большинстве случаев автоматическая настройка проходит успешно, и резонансная кривая имеет достаточно хорошую форму.

Особые случаи

Может оказаться, что после выполнения процедуры автоматической установки частоты, резонансная кривая, отображаемая на осциллографе, имеет искаженную форму пика. Эти искажения могут быть различными, например, резонансный пик может быть уширен как на Рис. 7-5 или иметь несколько локальных максимумов как на Рис. 7-9.

Искажения могут быть связаны, например, с тем, что кантилевер имеет слишком большую амплитуду колебаний (установлена слишком большая величина напряжения генератора), или установлен слишком большой коэффициент усиления (параметр **Gain** синхронного усилителя, параметр **Amp Gain** предусилителя) или оба из перечисленных факторов одновременно.

1. Пик резонансной кривой имеет искаженную форму, и при этом значения в области максимума превышают 35÷40 единиц.

Если пик резонансной кривой имеет искаженную форму, и при этом значения в области максимума превышают 35÷40 единиц (Рис. 7-5), то выполните следующие действия:

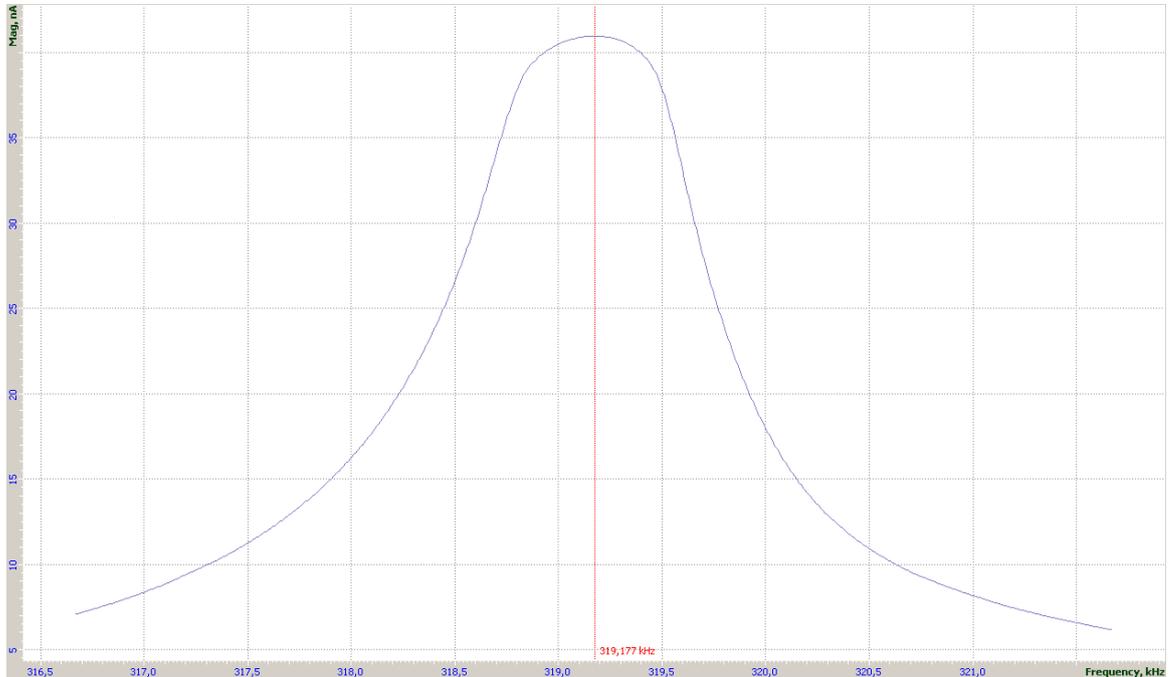


Рис. 7-5

2. Щелкните дважды на поле ввода коэффициента усиления синхронного детектора **Gain**, в результате появится ползунок (Рис. 7-6).

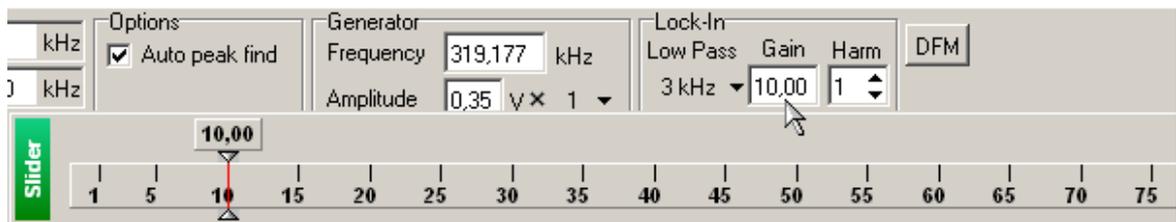


Рис. 7-6

3. Измените величину сигнала **Mag** до 20÷25 единиц, уменьшая величину параметра **Gain** при помощи ползунка. Контролируйте величину сигнала **Mag** по показаниям на панели основных параметров (Рис. 7-7).



Рис. 7-7

4. После уменьшения сигнала **Mag** до 20÷25 единиц повторно запустите процедуру автоматического поиска резонансной частоты, щелкнув на кнопке **Run**.

- Если искажения формы резонансного пика исчезли, то переходите к следующей операции (к п. 7.1.4 «Установка начального уровня сигнала **Mag**» на стр. 81), в противном случае повторите действия 1-3 или переустановите зондовый датчик.

Также можно изменить коэффициент усиления предусилителя (Рис. 7-8) (параметр **Preamplifier** может иметь два значения: 1 или 10).

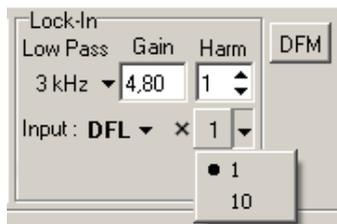


Рис. 7-8

- Резонансный пик имеет искаженную форму, и при этом значения в области максимума менее $35 \div 40$ единиц.

Если резонансный пик имеет искаженную форму, и при этом значения в области максимума менее $35 \div 40$ единиц (Рис. 7-9), то выполните следующие действия:

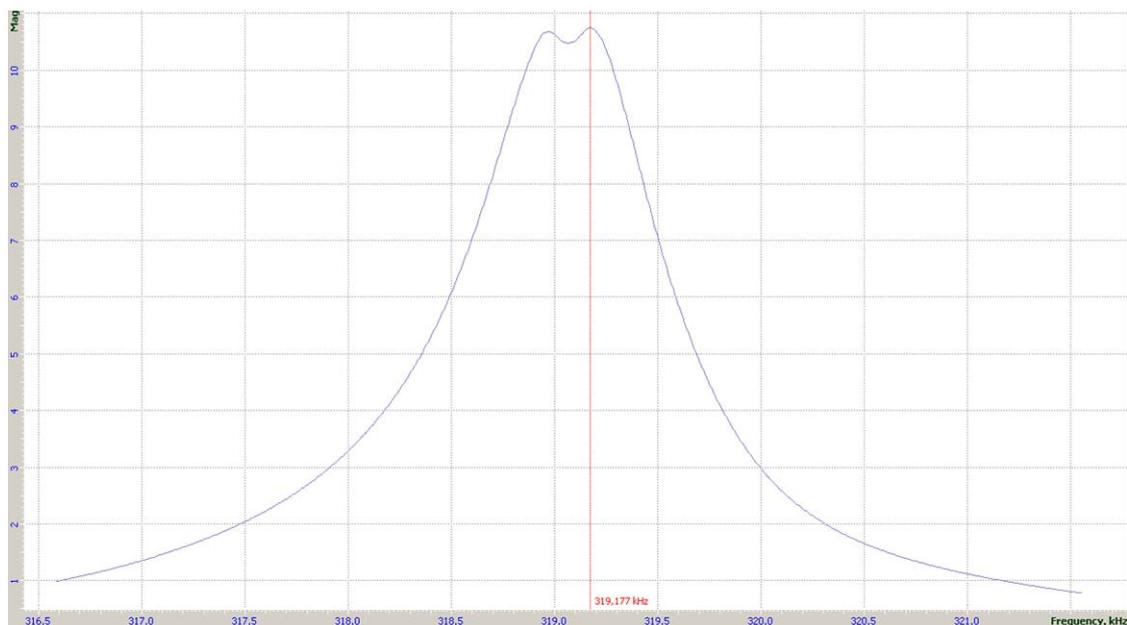


Рис. 7-9

- Щелкните дважды на поле ввода величины напряжения генератора **Amplitude**, в результате появится ползунок (Рис. 7-10).

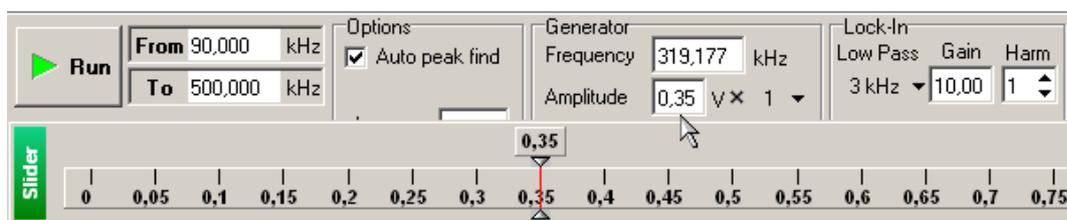


Рис. 7-10

8. Уменьшите величину параметра **Amplitude** при помощи ползунка.
9. После уменьшения сигнала, повторно запустите процедуру автоматического поиска резонансной частоты, щелкнув на кнопке **Run**.
10. Если искажения формы резонансного пика исчезли, то переходите к следующей операции (к п. 7.1.4 «Установка начального уровня сигнала **Mag**» на стр. 81), в противном случае повторите действия 1-3 или переустановите зондовый датчик.

7.1.4. Установка начального уровня сигнала **Mag**

Начальный уровень сигнала **Mag** рекомендуется установить в интервале $2 \div 5$ нА.

Установка уровня сигнала **Mag** производится путем регулировки напряжения генератора. Для этого выполните следующие действия:

1. Щелкните дважды на поле ввода амплитуды выходного сигнала генератора **Amplitude**, в результате появится ползунок (Рис. 7-11) (диапазон изменения напряжения $0 \div 1$ В).

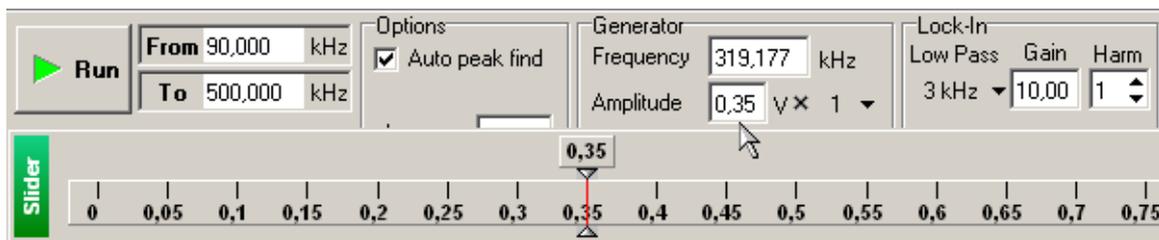


Рис. 7-11

2. Установите величину сигнала **Mag** равной $2 \div 5$ нА, изменяя величину параметра **Amplitude** при помощи ползунка. Контролируйте величину сигнала **Mag** по показаниям на панели основных параметров (Рис. 7-12).



Рис. 7-12

3. При необходимости переключите коэффициент усиления амплитуды выходного сигнала генератора (множитель может принимать одно значение коэффициента из трех: **0.1**, **1**, **10**) (Рис. 7-13).

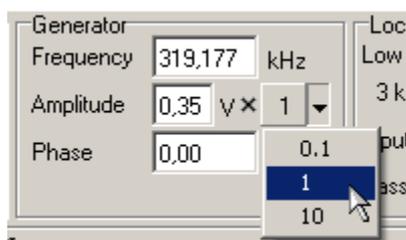


Рис. 7-13

**ПРИМЕЧАНИЕ:**

- Уровень сигнала **Mag** можно регулировать, изменяя коэффициенты усиления синхронного усилителя (параметр **Gain**) и предусилителя (параметр **Preamplifier**);
- Если регулировать уровень сигнала **Mag** посредством изменения коэффициента усиления синхронного усилителя и предусилителя при фиксированном напряжении генератора (параметр **Amplitude**), то амплитуда колебаний кантилевера будет оставаться фиксированной;
- Напротив, если регулировать уровень сигнала **Mag** посредством изменения напряжения генератора при фиксированном коэффициенте усиления синхронного усилителя и предусилителя, то амплитуда колебаний кантилевера будет изменяться.

7.1.5. Подвод образца к зонду

1. В программе Nova введите значение параметра **Set Point** в поле ввода, расположенном на панели основных параметров (Рис. 7-14).

В качестве начального, рекомендуется установить значение параметра **Set Point** равным: половине величины сигнала **Mag** (т.е. **Set Point=Mag/2**).

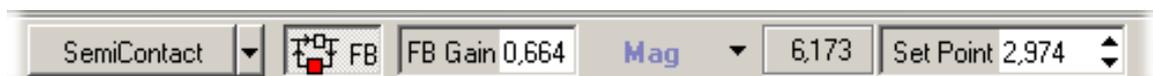


Рис. 7-14

Относительно выбора оптимального значения параметра **Set Point** необходимо иметь в виду следующее:

- разность между величиной **Set Point** и начальным уровнем сигнала **Mag** определяет величину взаимодействия острия кантилевера и поверхности образца. Чем больше разность между величиной **Set Point** и начальным уровнем сигнала **Mag**, тем меньше амплитуда колебаний кантилевера, тем с большей силой взаимодействуют острие кантилевера и поверхность образца. Таким образом, меняя величину параметра **Set Point** относительно начального уровня сигнала **Mag** можно изменять и устанавливать определенный уровень силы взаимодействия между зондом и поверхностью образца;
- если установить слишком большую разницу между величиной **Set Point** и начальным уровнем **Mag**, что соответствует значительной силе взаимодействия острия кантилевера и поверхности образца, то при сканировании это может привести к разрушению как зонда, так и исследуемой поверхности;
- при слишком малой величине разницы между **Set Point** и начальным уровнем **Mag**, что соответствует режиму работы в условиях поддержания небольшой по величине силы взаимодействия острия кантилевера и

поверхностью образца, работа системы обратной связи может оказаться неустойчивой;

- величина параметра **Set Point** не может быть больше величины начального уровня сигнала **Mag**.

- Замкните цепь обратной связи, нажав кнопку . В результате Z-секция сканера выдвинется на максимальную величину, что отобразится на индикаторе выдвижения сканера, который находится в нижнем левом углу главного окна программы (Рис. 7-15).



Рис. 7-15. Индикатор выдвижения сканера

- Перейдите в программу управления координатным столом XYZ stage control (Рис. 7-16). Запустите процедуру подвода, щелкнув на кнопке **Landing**.

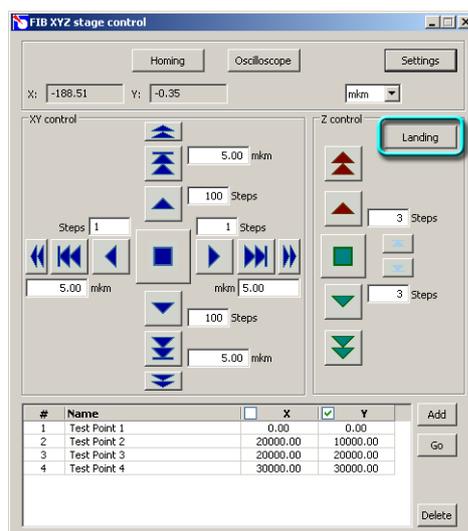


Рис. 7-16. Интерфейс программы XYZ stage control

В процессе подвода следите за изменениями сигнала **Mag** по программному осциллографу программы Nova, за состоянием индикатора выдвижения сканера и ждите окончания процесса подвода.

Через некоторое время, при правильной настройке параметров подвода, процедура подвода закончится и произойдет следующее (Рис. 7-17):

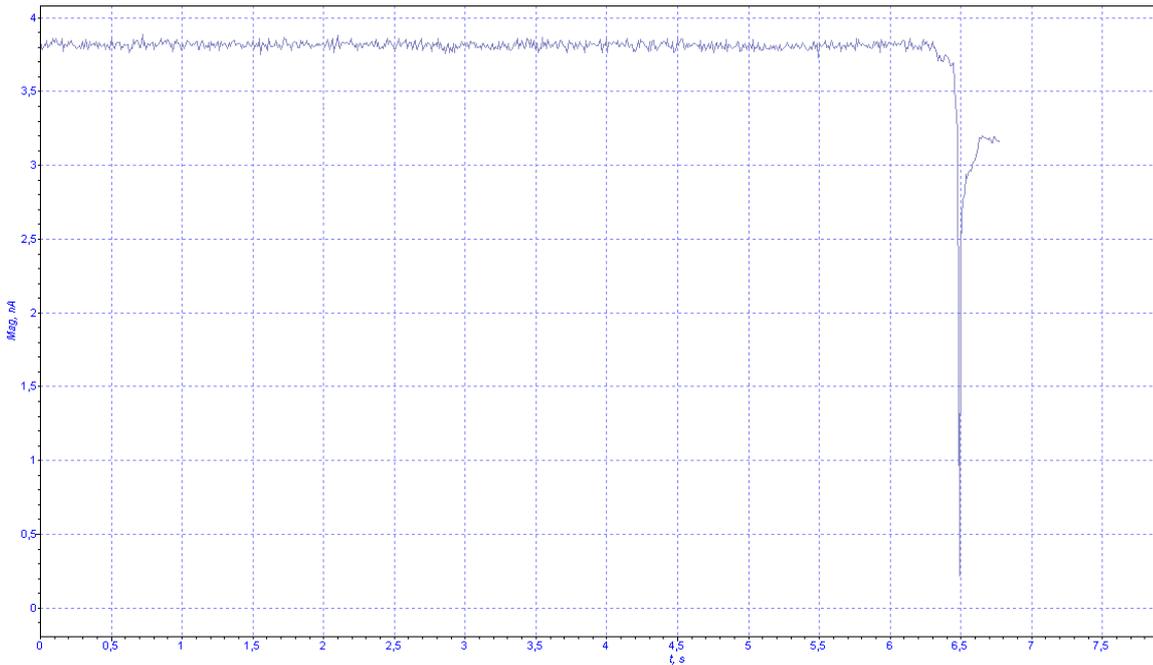


Рис. 7-17. Окончание процесса подвода

- сигнал **Mag** уменьшится до значения параметра **Set Point**, обратная связь будет поддерживать Z-сканер в положении, при котором сигнал **Mag** равен **Set Point**, причем это положение сканера будет соответствовать примерно половине диапазона выдвигания сканера;
- длина линии индикатора уменьшится и займет некоторое промежуточное положение;
- пьезодвигатели остановятся;
- уменьшение сигнала **Mag** до значения параметра **Set Point** будет отображено на зависимости **Mag(t)**, на программном осциллографе.

Возникновение генерации

Может оказаться, что после того, как был выполнен подвод, и произошло уменьшение сигнала **Mag** до значения параметра **Set Point**, на зависимости **Mag(t)** наблюдается появление значительной переменной составляющей сигнала **Mag** (Рис. 7-18). Это означает, что имеет место генерация в цепи обратной связи из-за очень большого коэффициента усиления (параметр **FB Gain**). В этом случае необходимо уменьшить величину параметра **FB Gain** до $0.5 \div 0.7$ от порогового. Регулировка параметра **FB Gain** рассматривается ниже, в пункте [7.1.6](#) «Установка рабочего уровня коэффициента усиления обратной связи» на стр. [86](#).

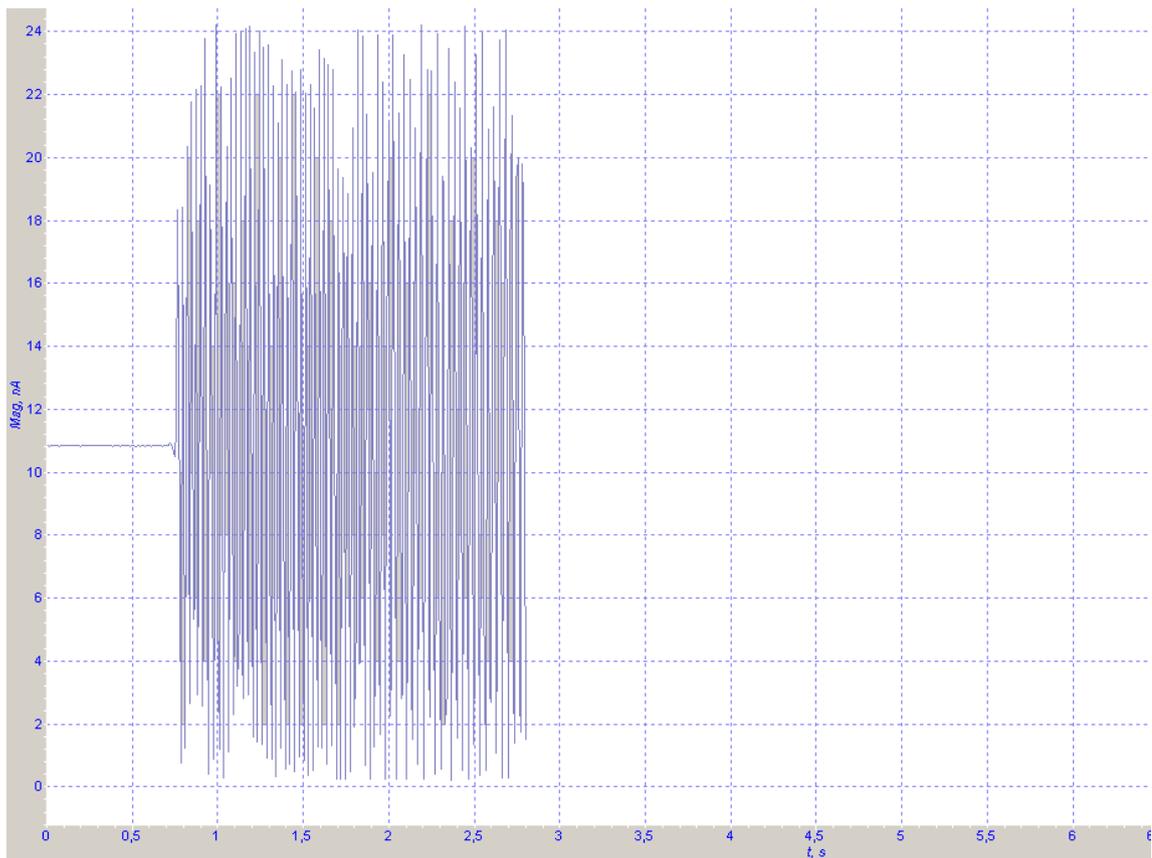


Рис. 7-18. Генерация

Если после уменьшения параметра **FB Gain** до значения 0.3 и ниже устранить генерацию не удалось, то выполните следующие действия:

1. Разомкните цепь обратной связи, отжав кнопку .
2. Уменьшите сигнал **Mag** на 20÷50 %, изменяя коэффициент усиления синхронного усилителя (параметр **Gain**) и предусилителя (параметр **Preamplifier**).
3. Увеличьте напряжение генератора (параметр **Amplitude**) доведя значение сигнала **Mag** до 2÷5 нА.
4. Замкните цепь обратной связи, нажав кнопку .
5. Если генерация исчезла, переходите к следующей операции (к п. [7.1.7](#) «Установка параметров сканирования» на стр. [87](#)), в противном случае повторите действия 1–4.

7.1.6. Установка рабочего уровня коэффициента усиления обратной связи

Чем больше величина коэффициента усиления (параметр **FB Gain**), тем выше скорость отработки обратной связи. Однако при достаточно большой величине коэффициента усиления (назовем ее пороговой), режим работы обратной связи становится неустойчивым и начинается генерация. Появляется значительная величина переменной составляющей сигнала **Mag** (см. Рис. 7-19).

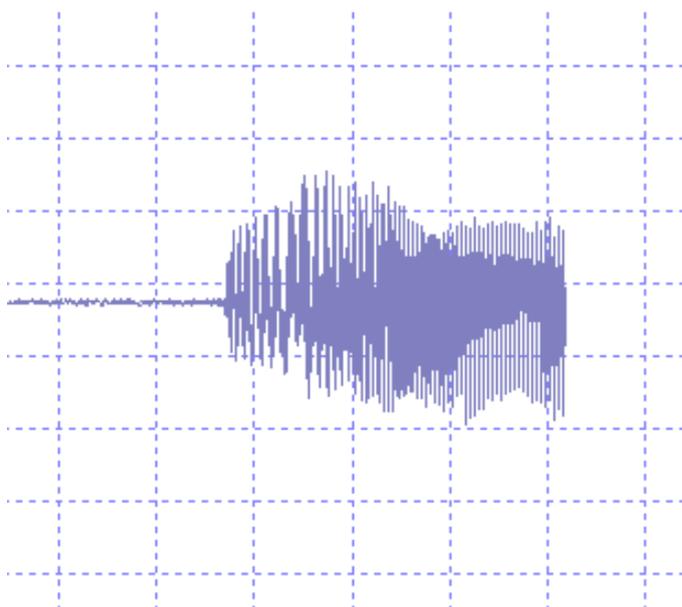


Рис. 7-19. Генерация в системе обратной связи

Для устойчивой работы рекомендуется устанавливать уровень коэффициента усиления не более $0.5 \div 0.7$ от порогового значения, при котором начинается генерация. Регулировка коэффициента усиления производится в поле ввода **FB Gain**.

Для установки рабочего уровня коэффициента усиления обратной связи:

- Щелкните дважды на поле ввода параметра **FB Gain** на панели основных параметров, в результате появится ползунок для установки коэффициента обратной связи (Рис. 7-20).

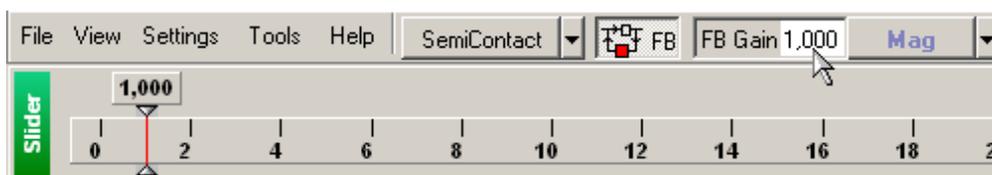


Рис. 7-20. Ползунок настройки параметра FB Gain

- Увеличивая величину **FB Gain**, следите за уровнем сигнала **Mag** при помощи программного осциллографа.

3. Определите значение коэффициента **FB Gain**, при котором начинается генерация. Начало генерации регистрируется по появлению значительной переменной составляющей сигнала **Mag** (см. Рис. 7-19).
4. Уменьшая параметр **FB Gain**, установите в качестве рабочей величины значение равное $0.5 \div 0.7$ от значения коэффициента усиления **FB Gain**, при котором начинается генерация сигнала **Mag**.



*ПРИМЕЧАНИЕ. Не рекомендуется устанавливать значение **FB Gain** меньше 0.1, так как при этом измеряемый сигнал будет менее информативен.*

7.1.7. Установка параметров сканирования

Перейдите на вкладку **Scan** (кнопка **Scan** на панели основных операций) (Рис. 7-21).



Рис. 7-21. Панель основных параметров

В верхней части вкладки **Scan** находится панель управления сканированием (Рис. 7-22).

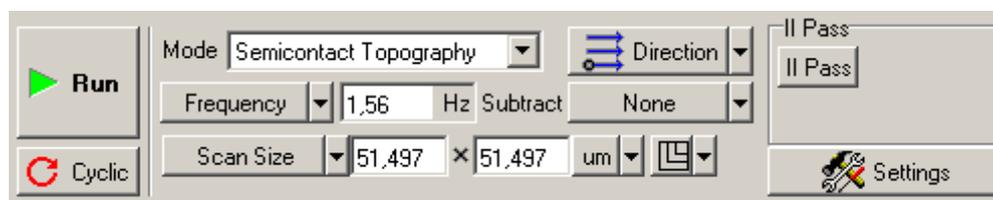


Рис. 7-22. Панель управления вкладки Scan

Под ней находится панель отображения 1D-данных сканирования, в которой при сканировании будет построчно отображаться измеряемый сигнал. Ниже находится панель отображения 2D-данных сканирования.

Установка АСМ метода

На панели управления в списке **Mode** (выбор методов сканирования) выберите метод **Semiconduct Topography** (Рис. 7-23). При этом в приборе автоматически будут выполнены соответствующие переключения.

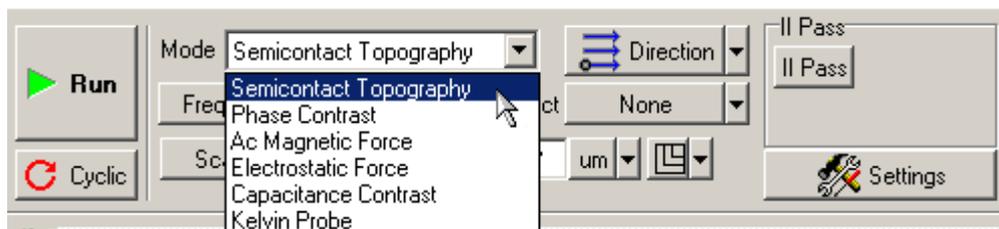


Рис. 7-23. Выбор Полуконтактного Метода на панели управления вкладки **Scan**

Выбор области сканирования

Рекомендации по выбору начального размера области сканирования:

- если о свойствах поверхности образца имеется некоторая предварительная информация, и есть уверенность в том, что перепад высот ожидаемого рельефа не выходит за пределы диапазона Z-сканера, можно установить максимальное поле сканирования;
- в случае образца, о свойствах поверхности которого ничего не известно, рекомендуется начинать сканирование с области, имеющей небольшие размеры, например, около $0.5 \div 1$ мкм. По результатам сканирования небольшой области можно подобрать и установить оптимальные значения таких параметров, как скорость сканирования, **Set Point**, **FB Gain**. Затем можно изменить область сканирования.

Чтобы изменить размер и выбрать область сканирования в пределах максимально возможной, выполните следующие действия:

1. Включите опцию изменения размера и выбора области, щелкнув на кнопке  на панели отображения 2D-данных сканирования (Рис. 7-24).

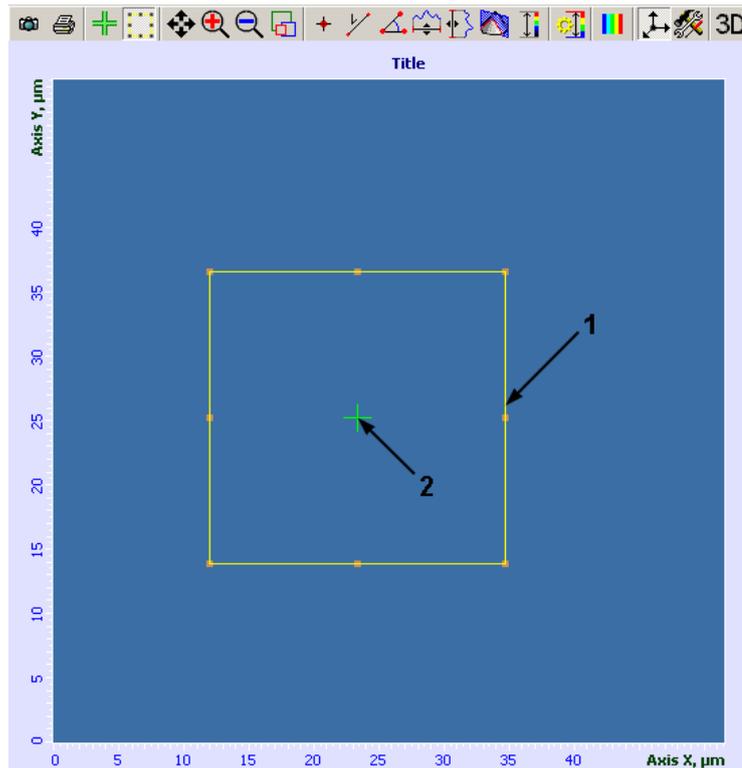


Рис. 7-24. Панель отображения 2D-данных сканирования
 1 – границы выбранной области сканирования;
 2 – курсор, показывающий положение зонда

2. При помощи мыши измените размер и положение области сканирования (поз. 1 на Рис. 7-24).



ПРИМЕЧАНИЕ. Изменение размера области сканирования будет автоматически отражаться в полях ввода параметра **Scan Size**.

3. Щелкните на кнопке . Проверьте, что в пределах выбранной области сканирования зонд всюду достает до поверхности и нигде не «врезается» в нее. Для этого нажав левую клавишу мыши и удерживая ее, перемещайте курсор (поз. 2 на Рис. 7-24) в пределах выбранной области сканирования. Перемещение курсора отражает реальное перемещение зонда относительно поверхности образца. Степень выдвигения пьезосканера контролируйте по индикатору в нижней части окна (см. Рис. 7-15).

Установка размера сканированного изображения, числа точек, шага сканирования

Число точек по осям X и Y (**Point Number**), размер сканированного изображения (параметр **Scan Size**) и шаг сканирования (**Step Size**) задаются при помощи кнопки с выпадающим списком выбора параметра (Рис. 7-25).

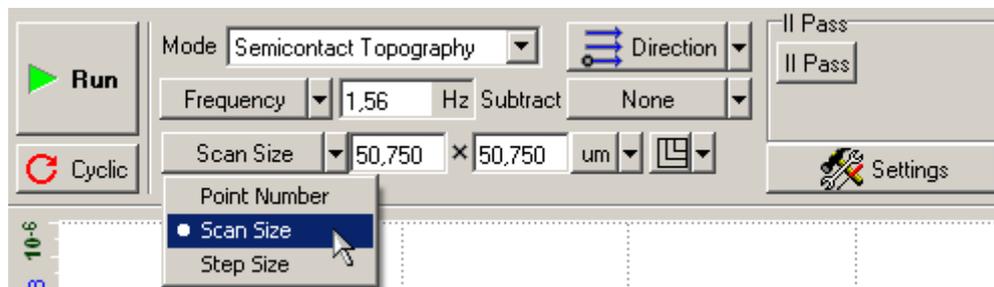


Рис. 7-25

При установке параметров **Point Number**, **Scan Size**, **Step Size** следует иметь ввиду что:

- При изменении **Point Number**: **Scan Size** изменяется;
Step Size не меняется.
- При изменении **Scan Size**: **Step Size** изменяется;
Point Number не меняется.
- При изменении **Step Size**: **Scan Size** изменяется;
Point Number не меняется.

Установка скорости 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 развитый рельеф со значительными перепадами по высоте.

Первоначально рекомендуется установить частоту сканирования строк (параметр **Frequency**) в пределах 0.1÷0.7 Гц (см. Рис. 7-25).

7.1.8. Сканирование

В качестве примера рассмотрим процесс сканирования образца с прямоугольной решеткой (стандартная решетка TGQ-1, шаг 3 мкм).

Запуск сканирования

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

Для запуска сканирования щелкните на кнопке **Run**, расположенной на панели управления вкладки **Scan** (Рис. 7-26).

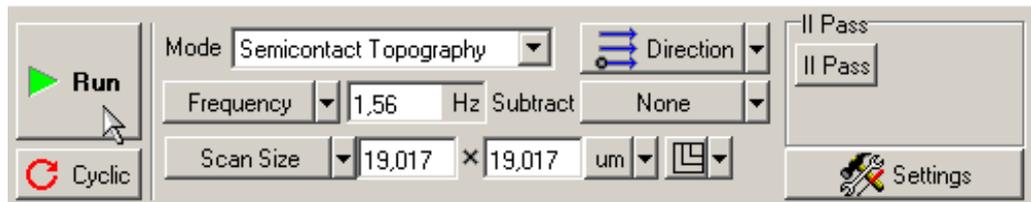


Рис. 7-26

В результате щелчка на кнопке **Run**:

- начнется построчное сканирование поверхности образца и в области отображения 2D-данных сканирования, строчка за строчкой, начнет появляться изображение сканируемой поверхности (Рис. 7-27);

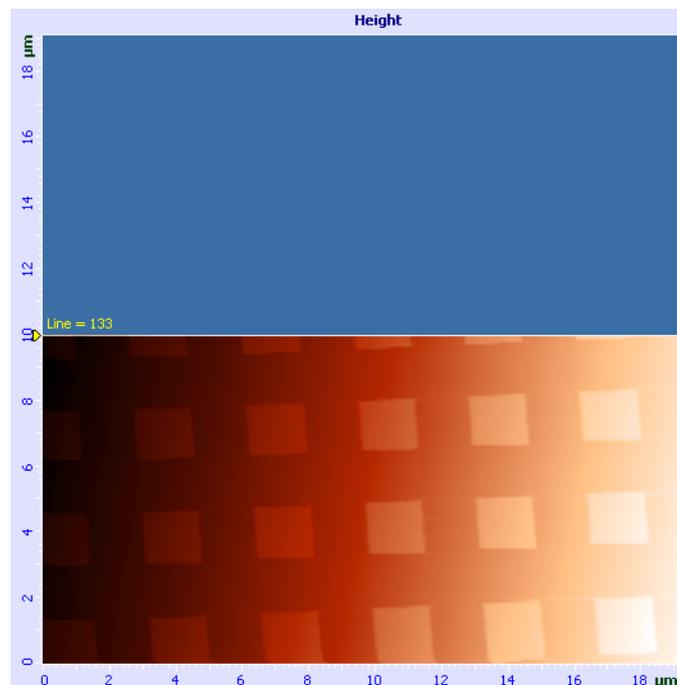


Рис. 7-27. Изображение рельефа поверхности

- на панели отображения 1D-данных при сканировании будет построчно отображаться измеряемый сигнал (Рис. 7-28);



Рис. 7-28. Сигнал Height

- на панели управления вкладки **Scan** некоторые кнопки исчезнут, и появится ряд новых кнопок: **Pause**, **Restart**, **Stop** (Рис. 7-29).

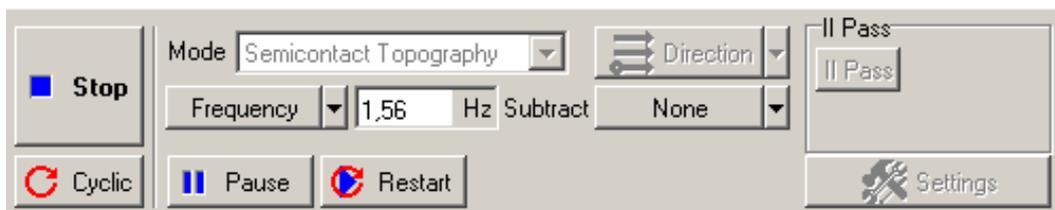


Рис. 7-29

Если по какой-либо причине необходимо прекратить сканирование, достаточно щелкнуть на кнопке **Stop** или нажать клавишу <Esc>.

Изменение параметров в процессе сканирования

Вычитание наклона

На приведенном выше примере (см. Рис. 7-27, Рис. 7-28) видно, что образец имеет некоторый наклон по оси X.

Наклон можно вычесть непосредственно в процессе сканирования, используя кнопку **Subtract**. По умолчанию она находится в состоянии **None** (Рис. 7-29).

Если щелкнуть на этой кнопке и выбрать из списка **Plane** (Рис. 7-30), то будет выполнено вычитание плоскости, и изображение, которое до этой процедуры имело вид, как на Рис. 7-27, будет иметь вид, как на Рис. 7-31.

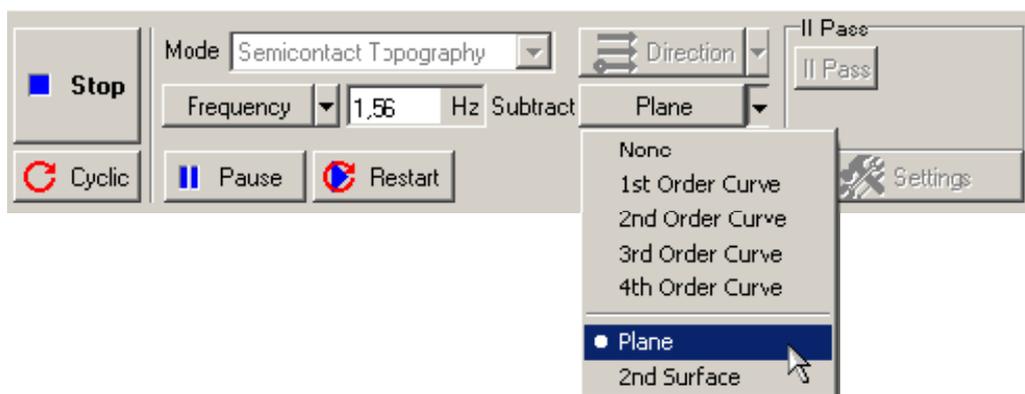


Рис. 7-30

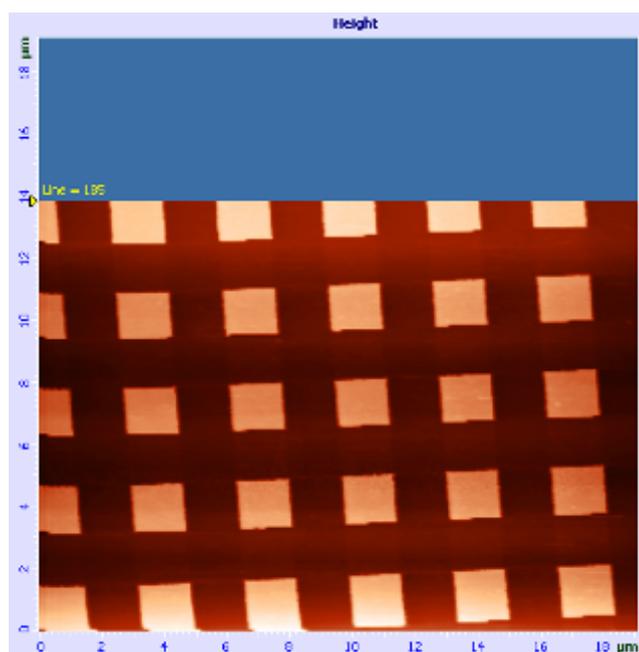


Рис. 7-31. Изображение рельефа поверхности

Соответственно, на панели отображения 1D-данных тоже будет построчно отображаться измеряемый сигнал с учетом вычитания плоскости. Вместо отображаемого сигнала на Рис. 7-28, сигнал будет иметь вид, представленный на Рис. 7-32.

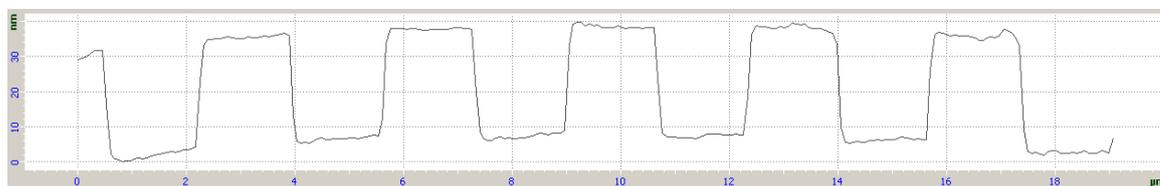


Рис. 7-32. Сигнал Height

Остальные функции **Subtract** см. в книге «Программное обеспечение для СЗМ», часть 1.



*ПРИМЕЧАНИЕ. Изменения, произведенные со сканированным изображением при помощи функции **Subtract**, не сохраняются в полученных фреймах.*

Настройка параметров в процессе сканирования

Качество получаемого изображения поверхности существенно зависит от таких параметров, как частота сканирования **Frequency** (Рис. 7-33), величина рабочей точки **Set Point** (Рис. 7-34), коэффициент усиления обратной связи **FB Gain** (Рис. 7-34). Любой из этих параметров можно изменять непосредственно в процессе сканирования.

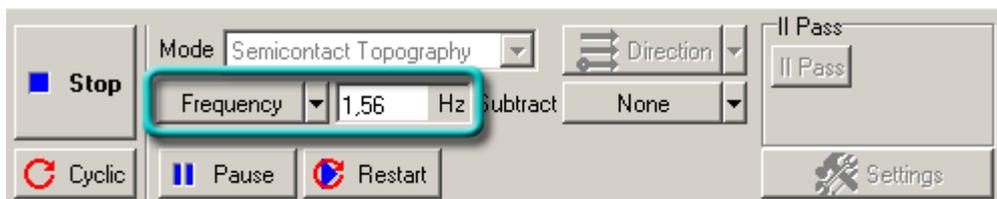


Рис. 7-33



Рис. 7-34

Специально для подстройки параметров сканирования имеется кнопка **Pause**. При щелчке на этой кнопке развертка по медленной оси останавливается, а сканирование вдоль быстрой оси продолжается и происходит вдоль одной и той же линии. Этот режим сканирования можно использовать для подбора оптимальных параметров. При этом можно визуально наблюдать, как изменяется профиль сканируемой строки при изменении соответствующего параметра, например: частоты сканирования **Frequency**, величины **Set Point** или коэффициента усиления обратной связи **FB Gain**.

Кнопка **Restart** осуществляет повторный запуск сканирования.

Некоторые рекомендации по оптимизации параметров 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 развитый рельеф и значительные перепады по высоте.

Удобно начинать исследовать образец при низкой скорости сканирования, постепенно увеличивая ее до тех пор, пока линия профиля рельефа не начнет искажаться.

Скорость сканирования следует уменьшить, когда не прописывается склон выступа или впадины в направлении сканирования.

При работе с мягкими материалами в сканированном изображении могут возникнуть «затяжки» в направлении сканирования на выступах поверхности. В этом случае рекомендуется уменьшить скорость сканирования, а также увеличить значение **Set Point** для того, чтобы уменьшить величину воздействия на образец.

7.1.9. Сохранение полученных данных

Для записи полученных данных на жесткий диск выполните следующие действия:

1. В главном меню выберите **File → Save**.
2. В открывшемся диалоговом окне выберите каталог, в котором будут храниться полученные данные (по умолчанию это каталог C:\Program Files\NT-MDT\Nova).
3. Введите название файла и сохраните его с расширением ***.mdt**.



ПРИМЕЧАНИЕ. Сканированное изображение по умолчанию сохраняется в файл **NoNameXX.mdt**, где **XX** – порядковый номер файла в папке **Nova**.

7.1.10. Завершение измерений

1. Отведите образец от зонда на расстояние не менее 2÷3 мм. Для этого:
 - a. Перейдите в программу XYZ stage control;
 - b. Щелкните на кнопке . По достижении нужного расстояния, остановите перемещение кнопкой .
2. Перейдите в программу Nova. Разомкните цепь обратной связи (кнопка  на панели основных параметров).
3. Выключите СЗМ контроллер.
4. Выключите блоки расширения.
5. Выключите контроллер координатного стола.
6. Выключите виброзащиту.
7. Закройте программу управления.

7.2. Полуконтактный Метод Рассогласования

7.2.1. Краткая характеристика метода

При работе по Полуконтактному Методу при сканировании в соответствии с рельефом поверхности образца возникает отклонение текущей величины амплитуды колебаний кантилевера. Следящая система стремится поддержать заданный уровень амплитуды колебаний кантилевера (**Set Point**), точнее, уровень сигнала, связанного с амплитудой (в нашем случае это сигнал **Mag**). Однако следящая система не может мгновенно вернуть текущее значение **Mag** к рабочему уровню, поскольку обладает некоторой инерционностью (характеризуемой постоянной времени системы обратной связи).

При сканировании текущее значение сигнала **Mag** (сигнала, связанного с амплитудой колебаний кантилевера) является сигналом рассогласования системы обратной связи и содержит дополнительную информацию о рельефе поверхности. Этот сигнал может быть использован для более точного воспроизведения рельефа. Метод, в котором одновременно с получением изображения рельефа поверхности по Полуконтактному Методу, производится измерение сигнала рассогласования (в нашем случае сигнала **Mag**), называется **Полуконтактным Методом Рассогласования**.

Полуконтактный Метод Рассогласования, аналогично Контактному Методу Рассогласования, можно рассматривать как промежуточный между Методом Постоянной Силы и Методом Постоянной Высоты, если отрегулировать скорость отработки сигнала рассогласования (в нашем случае коэффициент усиления обратной связи) так, чтобы система обратной связи успевала отслеживать плавные изменения рельефа и не успевала отслеживать резкие изменения. Тогда во время прохождения зондом небольших неоднородностей поверхности образца сканирование будет происходить при почти постоянной длине пьезосканера. В результате на сканированном изображении будут слабо проявляться медленные изменения рельефа и с высоким контрастом – резкие. Это может быть полезно для отыскания мелких неоднородностей на фоне крупных и относительно гладких особенностей рельефа.

7.2.2. Подготовка к измерениям

Полуконтактный Метод Рассогласования основан на Полуконтактном Методом, который подробно описан в п. [7.1](#) «Полуконтактный Метод» на стр. [76](#).

Предварительно, перед проведением измерений по Полуконтактному Методу Рассогласования, выполните подготовку и проведите измерения рельефа поверхности по Полуконтактному Методу.

Основные операции при работе по Полуконтактному Методу Рассогласования

1. Выбор конфигурации (п. [7.1.2](#) на стр. [77](#)).
2. Установка рабочей частоты пьезодрайвера (п. [7.1.3](#) на стр. [77](#)).
3. Установка начального уровня сигнала **Mag** (п. [7.1.4](#) на стр. [81](#)).
4. Подвод образца к зонду (п. [7.1.5](#) на стр. [82](#)).
5. Установка рабочего уровня коэффициента усиления обратной связи (п. [7.1.6](#) на стр. [86](#)).
6. Установка параметров сканирования (п. [7.1.7](#) на стр. [87](#)).
7. Сканирование (п. [7.1.8](#) на стр. [91](#)).

После того, как были проведены предварительные измерения рельефа поверхности по Полуконтактному Методу, необходимо произвести настройку параметров для работы по Полуконтактному Методу Рассогласования.

7.2.3. Настройка параметров

Для проведения измерений по Полуконтактному Методу Рассогласования, включите измерение сигнала **Mag** на вход второго измерительного канала, выполнив следующие действия:

1. Откройте диалоговое окно **Scan Setup** (Рис. 7-35) щелкнув на кнопке **Settings** на панели управления вкладки **Scan**.

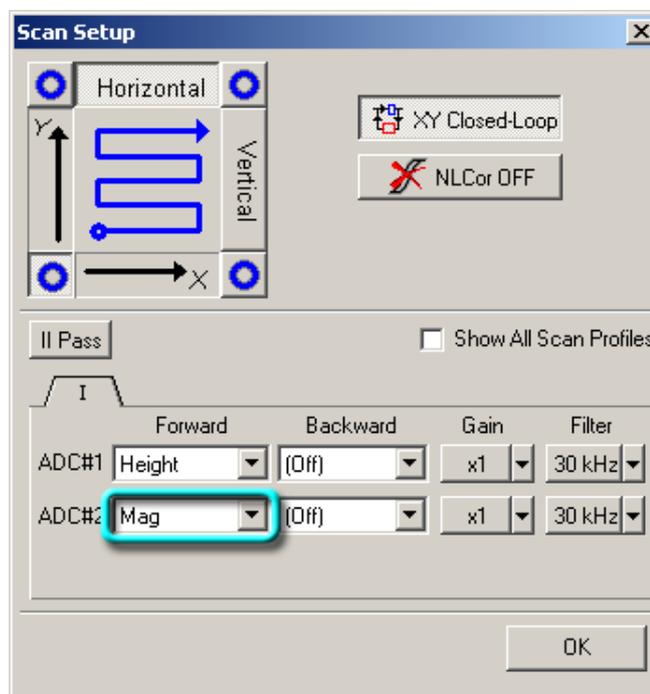


Рис. 7-35. Окно настроек сканирования

2. Щелкните мышью на поле ввода сигнала второго канала.
3. В открывшемся меню сигналов выберите **Mag**.

7.2.4. Сканирование

Для запуска процесса сканирования щелкните на кнопке **Run**, находящейся на панели управления вкладки **Scan**:

- начнется построчное сканирование поверхности образца и в области отображения 2D-данных сканирования появятся два изображения: в одном отобразится рельеф поверхности (сигнал **Height**), в другом – сигнал рассогласования (сигнал **Mag**) (Рис. 7-36);

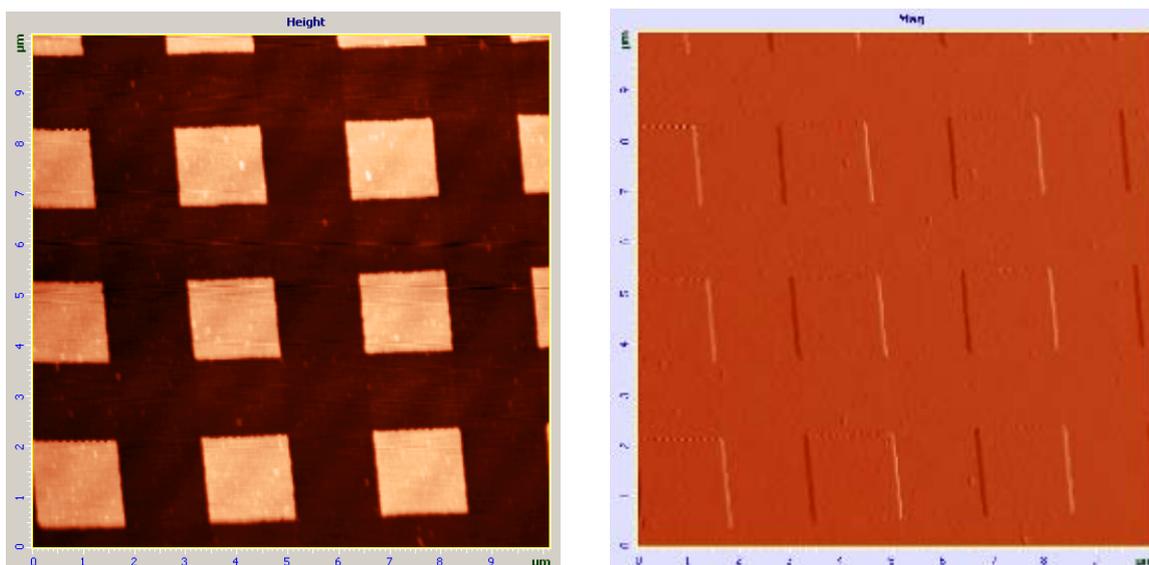


Рис. 7-36. Изображение рельефа и сигнала рассогласования (решетка TGQ-1)

- на панели отображения 1D-данных будет построчно отображаться измеряемый сигнал выделенного изображения (Рис. 7-37).

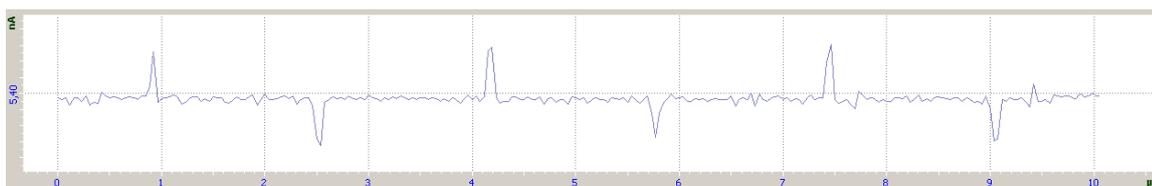


Рис. 7-37. Сигнал Mag

7.3. Метод Отображения Фазы

7.3.1. Краткая характеристика метода

В процессе сканирования по Полуконтактному Методу, когда колеблющийся кончик зонда касается поверхности образца, он испытывает взаимодействие отталкивающих, адгезионных, капиллярных и других сил. Одновременно регистрируется изменение не только амплитуды колебаний кантилевера, но и сдвиг фазы. Если поверхность образца является неоднородной по своим свойствам, соответствующим будет и фазовый сдвиг (Рис. 7-38).

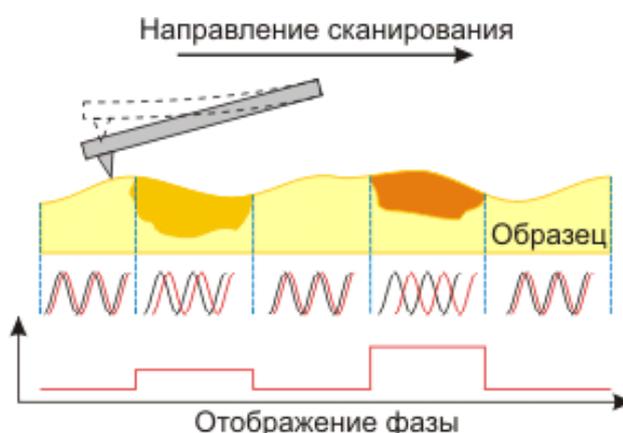


Рис. 7-38

Распределение фазового сдвига по поверхности будет отражать распределение характеристик материала образца.

Метод Отображения Фазы позволяет получать ценную информацию в широкой области применений, в некоторых случаях отображая неочевидные контрасты свойств материалов. Этот метод используется, например, для исследований биологических объектов, образцов с магнитными и электрическими характеристиками, а также для ряда других применений

7.3.2. Подготовка к измерениям

Предварительно, перед проведением измерений по Методу Отображения Фазы, выполните подготовку и проведите измерения рельефа поверхности по Полуконтактному Методу.

Основные операции при работе по Методу Отображения Фазы

1. Выбор конфигурации (п. [7.1.2](#) на стр. [77](#)).
2. Установка рабочей частоты пьезодрайвера (п. [7.1.3](#) на стр. [77](#)).
3. Установка начального уровня сигнала **Mag** (п. [7.1.4](#) на стр. [81](#)).
4. Подвод образца к зонду (п. [7.1.5](#) на стр. [82](#)).

5. Установка рабочего уровня коэффициента усиления обратной связи (п. [7.1.6](#) на стр. [86](#)).
6. Установка параметров сканирования (п. [7.1.7](#) на стр. [87](#)).
7. Сканирование (п. [7.1.8](#) на стр. [91](#)).

После того, как были проведены предварительные измерения рельефа поверхности по Полуконтактному Методу, необходимо произвести настройку параметров для работы по Методу Отображения Фазы.

7.3.3. Настройка параметров

На панели управления в списке **Mode** (выбор методов сканирования) выберите метод **Phase Contrast** (Рис. 7-39). При этом в приборе автоматически будут выполнены соответствующие переключения.

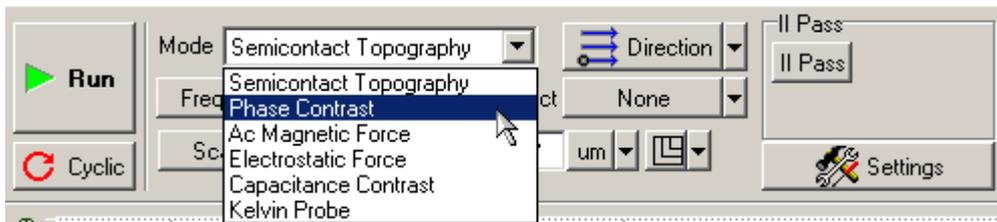


Рис. 7-39. Выбор Метода Отображения Фазы на панели управления вкладки Scan

При необходимости установки начальной фазы вручную выполните следующие действия:

1. Откройте область дополнительных операций (кнопка  в правом верхнем углу экрана).
2. Выберите сигнал **Phase** в программном осциллографе (Рис. 7-40).

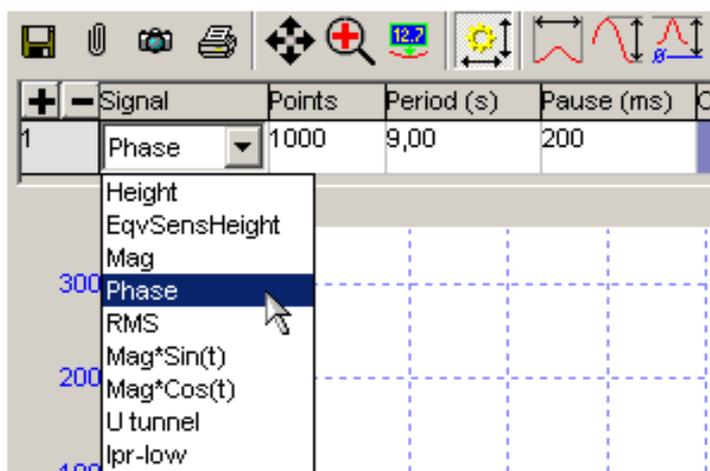


Рис. 7-40

Сигнал **Phase** меняется в пределах от 0 до 180 градусов, в зависимости от начальной фазы генератора, которая меняется в пределах от 0 до 360 градусов.

3. Перейдите на вкладку **Resonance** и, изменяя параметр **Phase** (Рис. 7-41) (начальная фаза генератора), установите значение измеряемой фазы в осциллографе примерно в середине ее диапазона (Рис. 7-42). Не рекомендуется устанавливать ее значение вблизи границ, то есть вблизи 0 или 180 градусов. В этом случае все возможные изменения измеряемой фазы будут одного знака.

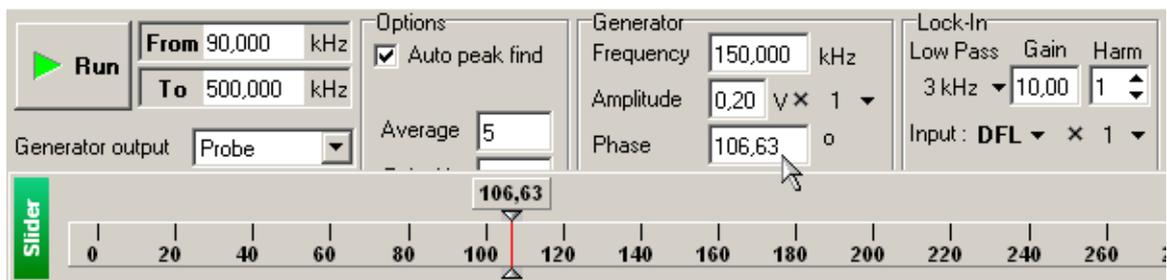


Рис. 7-41

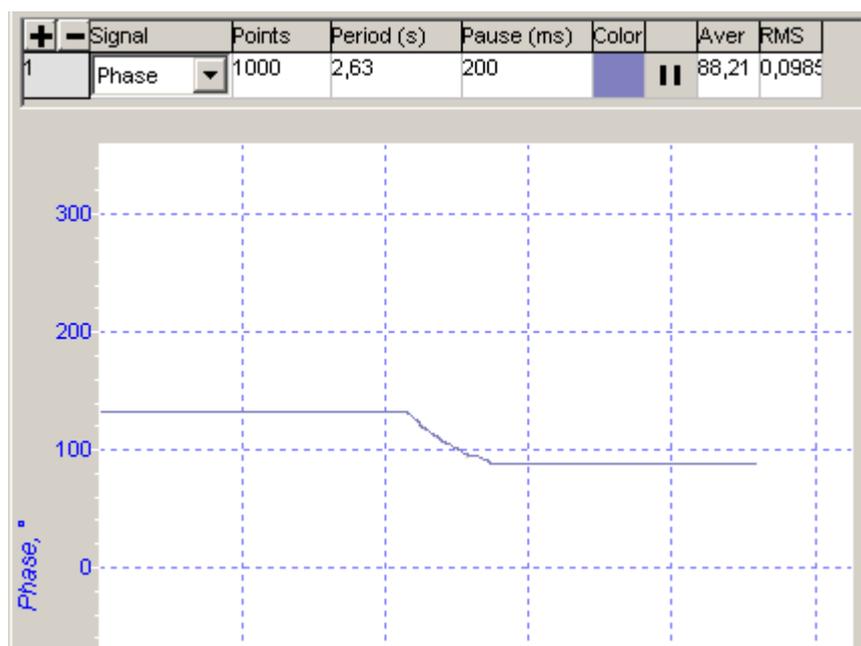


Рис. 7-42

7.3.4. Сканирование

Для запуска процесса сканирования щелкните на кнопке **Run**, находящейся на панели управления вкладки **Scan**:

- начнется построчное сканирование поверхности образца и в области отображения 2D-данных сканирования появятся два изображения: на одном отобразится рельеф поверхности (сигнал **Height**), на другом – распределение фазы (сигнал **Phase**) (Рис. 7-43);

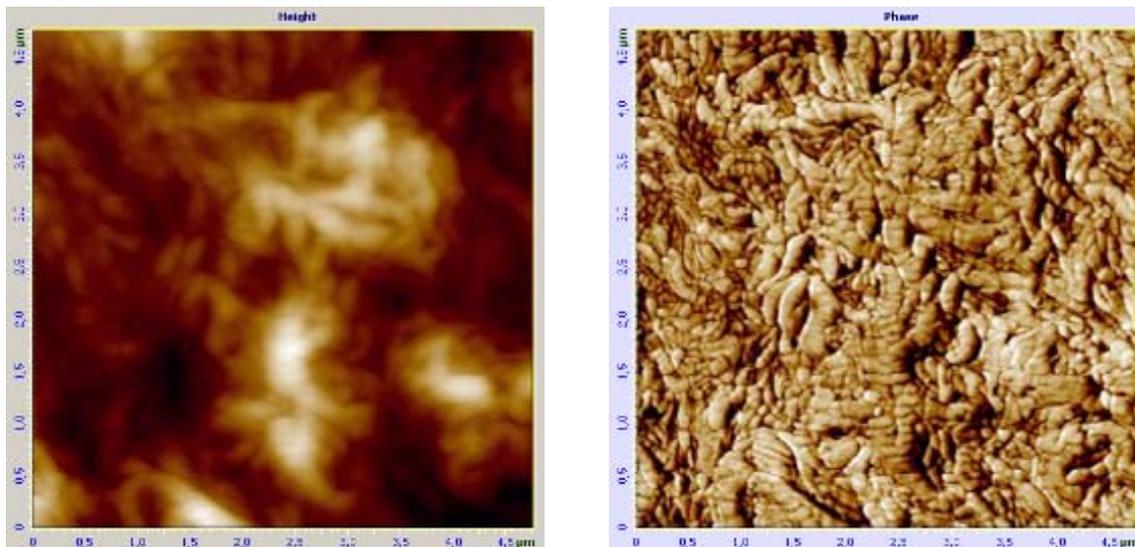


Рис. 7-43. Изображения рельефа и фазы полиэтилена

- на панели отображения 1D-данных будет построчно отображаться измеряемый сигнал выделенного изображения (Рис. 7-44).



Рис. 7-44. Сигнал Phase

7.3.5. Способы улучшения изображения

Если Вас не устраивает качество изображения, можно:

- изменить параметр **Set Point** (силу прижима зонда к образцу);
- изменить начальную фазу генератора (параметр **Phase**);
- изменить коэффициент обратной связи (параметр **FB Gain**);
- заменить зондовый датчик (с другой жесткостью и резонансной частотой).

8. АСМ спектроскопии

8.1. Введение

В данном разделе рассматриваются процедуры снятия спектроскопических зависимостей.

Перед проведением спектроскопических измерений рекомендуется выполнить обзорное сканирование.

Процедура проведения измерений для разных видов спектроскопий примерно одинакова. В данном разделе в качестве примера детально рассматривается одна из методик – Силовая спектроскопия **DFL(Height)**. В разделах, посвященных другим спектроскопическим методикам, приводится общее описание процедуры с комментариями особенностей выполнения отдельных операций.

8.2. Силовая спектроскопия (DFL(Height))

При силовой спектроскопии снимается зависимость величины изгиба кантилевера от степени выдвижения z-пьезотрубки сканера, т.е. зависимость **DFL(Height)**.

После касания зондом поверхности, изменение напряжения подаваемого на z-обкладку сканера (сигнал **Height**) вызывает пропорциональное изменение сигнала **DFL**. Используя зависимость **DFL(Height)** и, зная жесткость кантилевера, можно вычислить силы, действующие на зонд в точке измерения, в том числе и силу адгезии.

При проведении силовой спектроскопии следует использовать контактные зондовые датчики.

8.2.1. Основные операции

К выполнению спектроскопических измерений можно приступать после того, как зонд подведен к образцу по контактному методу (см. п. [6.1](#) «Метод Постоянной Силы» на стр. [46](#)).

Основные операции:

1. Переход на вкладку спектроскопии (п. [8.2.2](#) на стр. [104](#)).
2. Выбор измеряемой зависимости, т.е. выбор аргумента и функции (п. [8.2.3](#) на стр. [104](#)).
3. Выбор точек спектроскопии (п. [8.2.4](#) на стр. [107](#)).
4. Запуск измерений (п. [8.2.5](#) на стр. [109](#)).
5. Просмотр данных спектроскопии и работа с ними (п. [8.2.6](#) на стр. [110](#)).
6. Вычисление силы адгезии (п. [8.2.7](#) на стр. [112](#)).

Ниже приводится более подробное описание перечисленных выше основных операций.

8.2.2. Переход на вкладку спектроскопии

Перейдите на вкладку **Curves** (кнопка  **Curves** на панели основных операций) (Рис. 8-1).

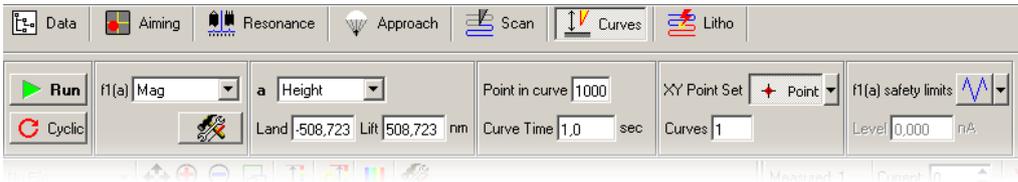


Рис. 8-1. Панель управления вкладки **Curves**

8.2.3. Выбор измеряемой зависимости

1. Выберите аргумент зависимости в раскрывающемся списке **a** на панели управления (см. Рис. 8-2). В рассматриваемом примере аргументом является сигнал **Height**.



Рис. 8-2



ПРИМЕЧАНИЕ.

При проведении спектроскопических измерений в качестве аргумента зависимости может быть выбран один из следующих сигналов:

- Height** – параметр, соответствующий изменению длины пьезотрубки сканера в направлении Z;
- Set Point** – параметр обратной связи, определяющий величину входного сигнала цепи обратной связи, поддерживаемого при работающей обратной связи;
- Bias Voltage** – напряжение смещения, подаваемое либо на зонд, либо на образец в зависимости от типа прибора и настроек схемы.

2. В раскрывающемся списке **f1(a)** выберите сигнал, соответствующий измеряемой величине. В рассматриваемом примере измеряемым сигналом является **DFL** (Рис. 8-3).

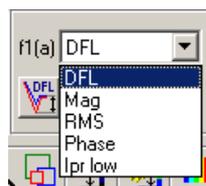


Рис. 8-3



ПРИМЕЧАНИЕ. Для каждого аргумента **a**, и для каждой группы методов имеется свой набор сигналов, которые можно использовать в качестве измеряемого сигнала **f1(a)**.

3. В полях ввода **Land**, **Lift** установите интервал изменения аргумента (Рис. 8-4).



Рис. 8-4

Отсчет значений производится от текущего положения пьезосканера.

Land (по абсолютной величине) – это расстояние, на которое пьезосканер увеличит свою длину, то есть приблизит образец к зонду.

Lift – это расстояние, на которое пьезосканер уменьшит свою длину, т.е. отодвинет образец от зонда.

Для первого измерения рекомендуется установить значение **Land** = 0.



ПРИМЕЧАНИЕ. Изменение величины **Height** происходит по следующей схеме (Рис. 8-5):

- 1) кривая 1 – величина **Height** резким скачком достигает максимального значения, указанного в поле **Lift**;
- 2) кривая 2 – линейно уменьшается до значения, указанного в поле **Land**;
- 3) кривая 3 – линейно возрастает до значения, указанного в поле **Lift**;
- 4) кривая 4 – величина **Height** возвращается к исходному значению.

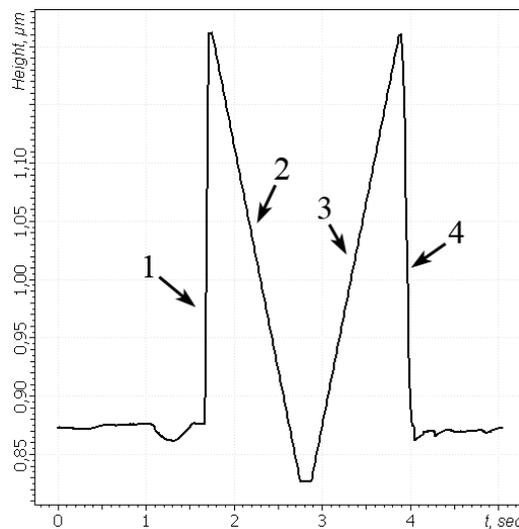


Рис. 8-5

4. На панели управления задайте значения числа точек в кривой (параметр **Point in curve**) и времени снятия зависимости (параметр **Curve Time**). Рекомендуемое значение **Point in curve** – 1000. Рекомендуемое значение **Curve Time** составляет 1÷5 секунд.

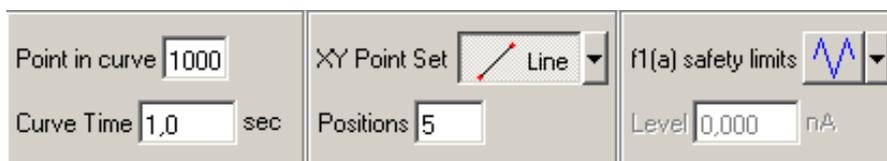


Рис. 8-6

5. При необходимости, установите пределы измерения сигнала (параметр **f1(a) safety limits**).



ПРИМЕЧАНИЕ. В случае, когда силовая спектроскопия **DFL(Height)** проводится зондовым датчиком, предназначенным для контактных методик, ограничивающее значение (параметр **Level**) следует устанавливать таким, чтобы оно было на 5-10 нА больше, чем значение **Set Point**. В случае, когда измерения проводятся зондовым датчиком, предназначенным для полуконтактных методик, ограничивающее значение следует устанавливать таким, чтобы оно было на 3-5 нА больше значения **Set Point**.

Рекомендации по повышению качества измерений

Поскольку пьезокерамика обладает инерционностью, реальное перемещение пьезосканера не соответствует изменению величины **Height**. Реальное значение можно получить, если использовать измерительную головку с датчиками перемещения. Замыкание цепи обратной связи по Z-датчику производится кнопкой  (Рис. 8-7).



Рис. 8-7. Цепь обратной связи по Z-датчику перемещения замкнута

8.2.4. Выбор точек спектроскопии

В программе существует возможность «привязать» данные спектроскопических измерений к сканированному изображению поверхности. Для этого в раскрывающемся списке **Select Frame** (Рис. 8-8) выберите необходимый фрейм. В результате в области отображения 2D-данных появится выбранное сканированное изображение.

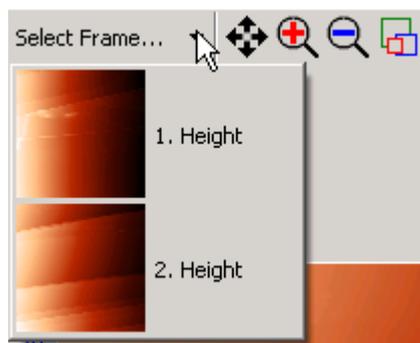


Рис. 8-8

Спектроскопические измерения можно проводить:

- в одной точке;
- в нескольких точках, лежащих на одной линии;
- по узлам сетки.

В рассматриваемом примере измерения будут проводиться в одной точке.

Ниже приведены процедуры установки координат точек проведения спектроскопии для каждого из режимов.

Спектроскопия в одной точке

В этом режиме будет производиться заданное количество измерений выбранной зависимости в одной точке поверхности:

1. В списке выбора **XY Point Set** выберите режим **Point** (Рис. 8-9).

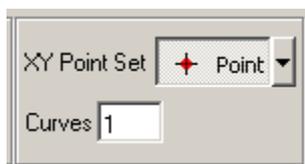


Рис. 8-9

2. Установите положение точки проведения спектроскопии, щелкнув левой клавишей мыши в выбранном месте поля сканирования.
3. Задайте требуемое количество измерений в поле ввода **Curves**.

Спектроскопия в нескольких точках, лежащих на одной линии

В этом режиме производятся последовательные измерения зависимости в точках поверхности, лежащих на выбранном отрезке прямой.

1. В поле выбора **XY Point Set** выберите режим **Line** (Рис. 8-10).

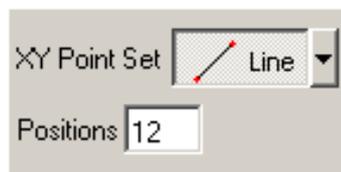


Рис. 8-10

2. На области отображения 2D-данных сканирования установите положение линии, по которой будут проводиться измерения (Рис. 8-11). Для этого проведите линию курсором при нажатых клавише <Ctrl> и левой клавише мыши; либо измените положение уже проведенной линии с помощью мыши.

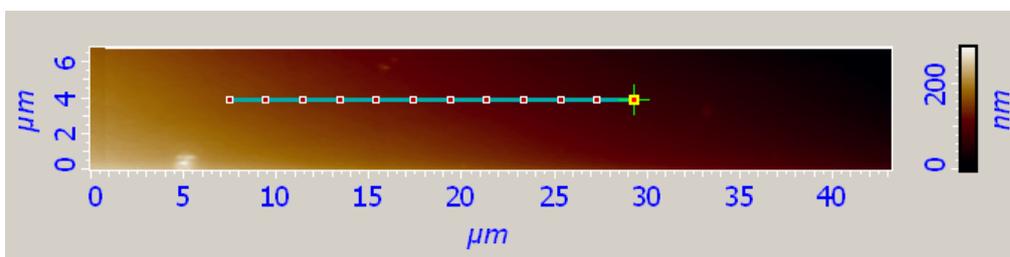


Рис. 8-11

3. Задайте число точек, в которых будут проводиться измерения, в поле ввода **Positions**.

Спектроскопия по узлам сетки

В этом режиме производятся последовательные измерения зависимости в узлах выбранной сетки.

1. В раскрывающемся списке **XY Point Set** выберите **Grid** (Рис. 8-12).

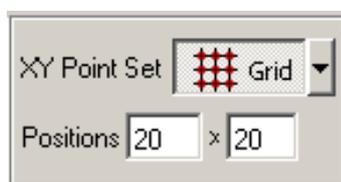


Рис. 8-12

По умолчанию размер сетки устанавливается равным размеру сканированного изображения.

2. Удерживая нажатой клавишу <Ctrl>, с помощью мыши задайте размер и положение сетки (Рис. 8-13). Изменить размер и положение уже заданной сетки можно стандартным образом с помощью мыши.

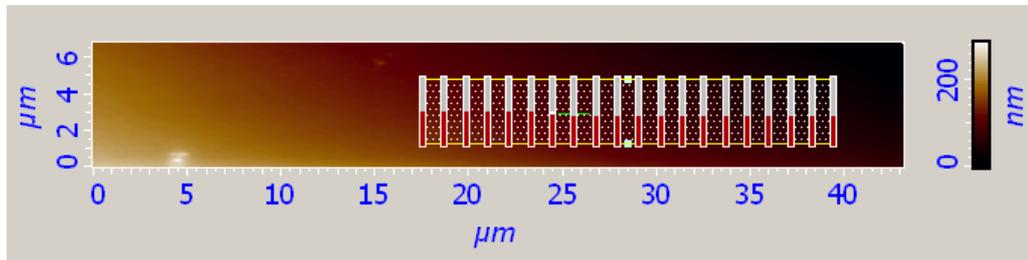


Рис. 8-13

3. В полях ввода **Positions** (Рис. 8-12) задайте число узлов сетки вдоль осей X и Y.

8.2.5. Запуск измерений

Для запуска процесса измерений щелкните на кнопке **Run** слева на панели управления (Рис. 8-14).



Рис. 8-14

При проведении спектроскопии в нескольких точках, точка, в которой в данный момент находится зонд, обозначается крестом.

Чтобы прервать процесс измерений, нажмите клавишу <Esc> или кнопку **Stop** (Рис. 8-15).



Рис. 8-15

8.2.6. Просмотр данных спектроскопии

Результаты спектроскопических измерений будут отображены на графике (Рис. 8-16). В рассматриваемом примере была измерена зависимость **DFL(Height)** в точке.

Если измерения проводились несколько раз или в нескольких точках, отображается набор таких графиков, представленный в виде двумерной карты (Рис. 8-17). Каждый сегмент соответствует измерению в одной точке. В приведенном примере измерения проводились по сетке из 25 точек.

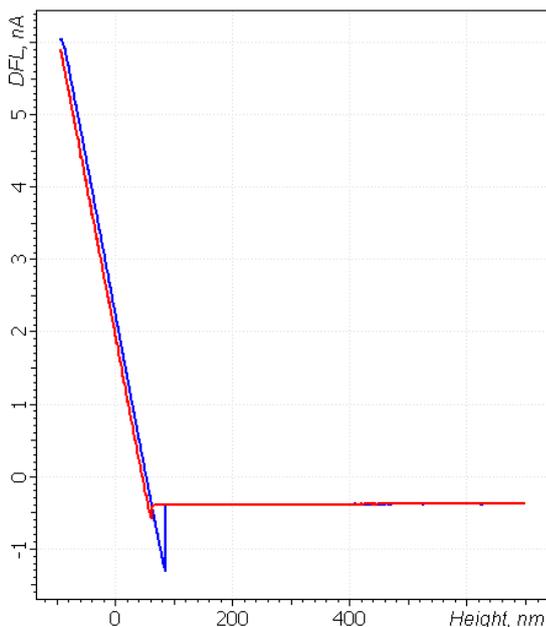


Рис. 8-16. Зависимость DFL(Height) в точке

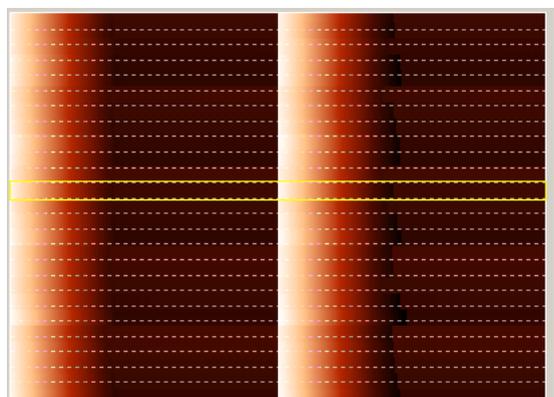


Рис. 8-17. Двумерная карта, при проведении измерений в нескольких точках

Кривые на Рис. 8-16 соответствуют зависимостям, полученным при изменении аргумента от максимального значения до минимального (кривая красного цвета) и от минимального до максимального (кривая синего цвета).



ПРИМЕЧАНИЕ. В случае, когда аргументом является **Height**, кривые называются кривой подвода (красная) и отвода (синяя).



ПРИМЕЧАНИЕ. Кнопка  позволяет отобразить на графике одну из кривых или обе сразу.

Фрейм спектроскопии автоматически прикрепляется к файлу данных. Чтобы сохранить данные спектроскопии в виде отдельного текстового файла, щелкните на кнопке  на панели инструментов области фрейма спектроскопии (Рис. 8-18).



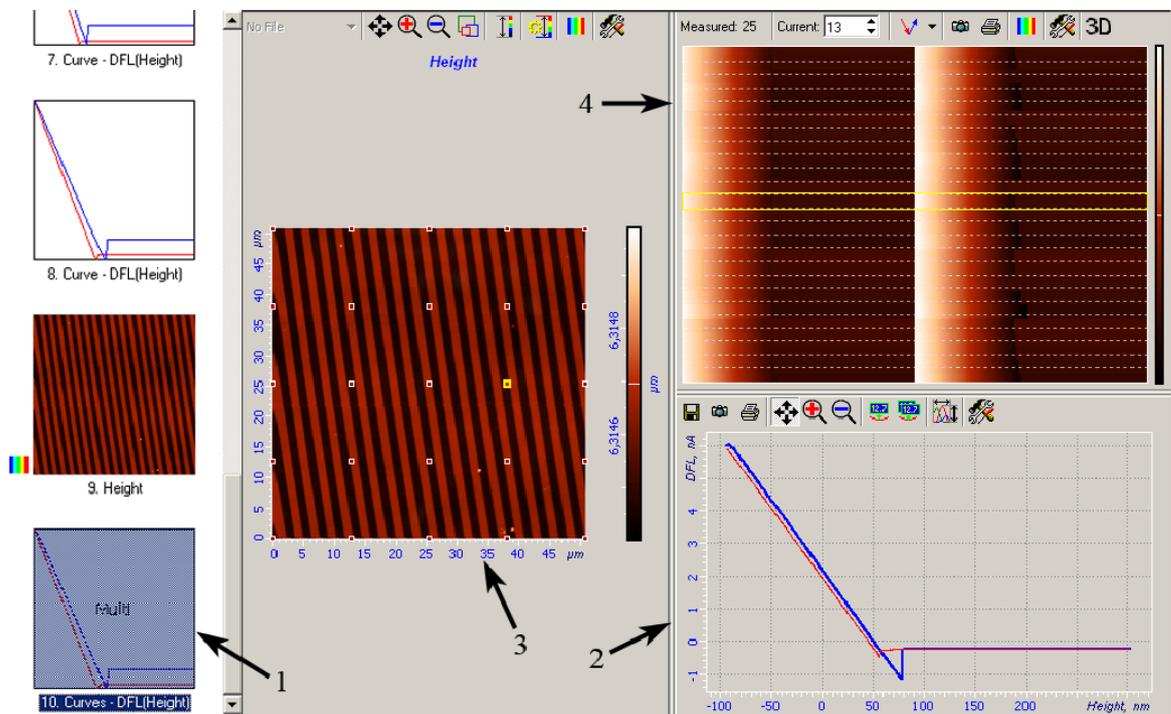
Рис. 8-18. Панель инструментов

Полученные данные можно просмотреть на вкладке **Data**, произвести анализ и обработку изображений с помощью программного модуля обработки изображений (см. книгу «Программное обеспечение для СЗМ», часть 2).

Если при снятии спектроскопических зависимостей был выбран какой-либо скан, то в дальнейшем можно посмотреть в какой точке была снята данная спектроскопическая зависимость.

Для этого:

1. Перейдите на вкладку **Data**.
2. Выберите нужный фрейм спектроскопии (поз.1 на Рис. 8-19).

Рис. 8-19. Вкладка **Data**

- 1 – выбор фрейма спектроскопии; 2 – фрейм спектроскопии;
3 – изображение поверхности; 4 – двумерная карта

3. При этом в области просмотра и редактирования фрейма откроется выбранный фрейм спектроскопии 2, а также фрейм сканированного изображения поверхности 3, к которому данный фрейм спектроскопии был «привязан».
4. Если спектроскопия проводилась в нескольких точках, то, перемещаясь между сегментами двумерной карты 4, на изображении поверхности можно видеть в какой точке (выделяется желтым) проводились измерения.

8.2.7. Вычисление силы адгезии

В контактных методиках при удалении зонда от образца существенное воздействие на кантилевер оказывают силы адгезии. Эти силы обуславливают изгиб кантилевера перед отрывом от поверхности. То есть при уменьшении длины z-сканера сигнал **DFL** сначала уменьшается до величины меньшей, чем величина **DFL** на значительном расстоянии от поверхности, а потом скачком достигает величины, соответствующей свободному состоянию, образуя характерный «носик» (Рис. 8-20).

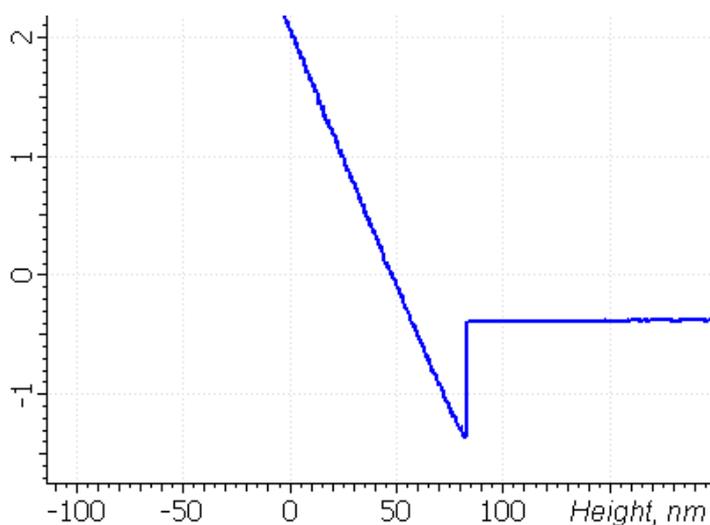


Рис. 8-20

Значение силы адгезии можно вычислить, считая линейной зависимость силы от смещения зонда относительно поверхности образца по оси *Z*.

По закону Гука:

$$F = k \times \Delta \text{Height} \tag{1}$$

где **k** – жесткость кантилевера (см. паспортные данные).

Для вычисления силы адгезии измерьте значение ΔHeight . Для этого нажмите кнопку  (**Pair Markers**) и затем с помощью мыши установите два маркера на наклонном участке кривой, как показано на Рис. 8-21.

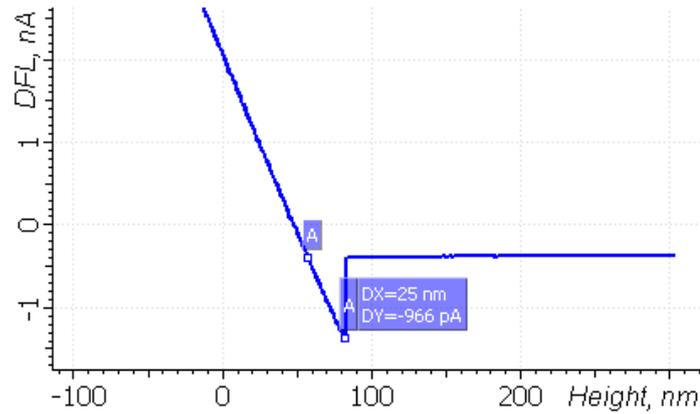


Рис. 8-21

Измеренные с помощью маркеров значения **DX** и **DY** равны соответственно ΔHeight и ΔDFL . В рассматриваемом примере $\Delta \text{Height} = 25 \text{ нм}$.

В данном случае жесткость кантилевера $\sim 0.03 \text{ Н/м}$. Таким образом, величина силы адгезии в точке спектроскопии равна:

$$F = 0.03 \text{ Н/м} \times 25 \text{ нм} \approx 0.8 \text{ нН} \quad (2)$$

Аналогичным образом можно вычислить силу, действующую на зонд (и на образец) во время сканирования.

Например, вычислим силу, действующую на зонд при сканировании Методом Постоянной Силы с параметром **Set Point** = 2 нА. Этой силе соответствует величина ΔHeight , измеренная как показано на Рис. 8-22. Положение первого маркера соответствует значению **Set Point**; положение второго маркера соответствует уровню сигнала **DFL** для кантилевера непосредственно перед отрывом от поверхности образца.

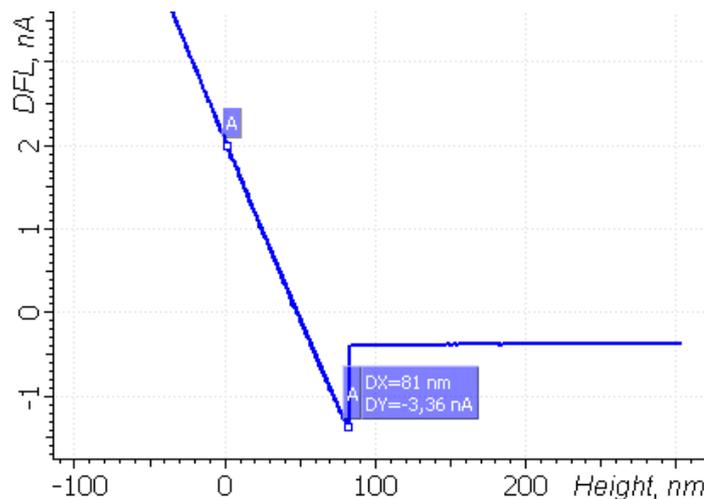


Рис. 8-22

В данном примере при проведении измерений по Методу Постоянной Силы с параметром **Set Point** = 2 нА поддерживается постоянная сила прижатия:

$$F = 0.03 \text{ Н/м} \times 81 \text{ нм} \approx 2.4 \text{ нН}. \quad (3)$$

8.3. Токовая спектроскопия (*Ipr-low*(Bias Voltage))

При токовой спектроскопии измеряется зависимость тока, протекающего через зонд (сигнал **Ipr-low**) от величины напряжения между зондом и образцом (параметр **Bias Voltage**). Очевидно, что токовые измерения имеют смысл лишь для проводящих образцов.

К выполнению спектроскопических измерений можно приступить после того, как образец подведен к зонду по контактному методу (см. п. 6.1 «Метод Постоянной Силы» на стр. 46).

8.3.1. Подготовка и проведение измерений

Процедуры подготовки и проведения измерений аналогичны процедурам, рассмотренным в п. 8.2 Силовая спектроскопия (DFL(Height)) на стр. 103. Поэтому ниже приведен только краткий алгоритм. Более подробно рассмотрены только те шаги, которые отличны от стандартного алгоритма.

1. Проверьте, что в списке выбора конфигурации контроллера установлена группа методов **Contact** (Рис. 8-23).



Рис. 8-23

2. Выполните конфигурирование блок-схемы прибора для проведения измерений по электрическим методам. Для этого:

- a. Перейдите на вкладку **Scan** (кнопка  Scan на панели основных операций).

- b. В списке **Mode** выберите метод **Spreading Resistance** (Рис. 8-24).

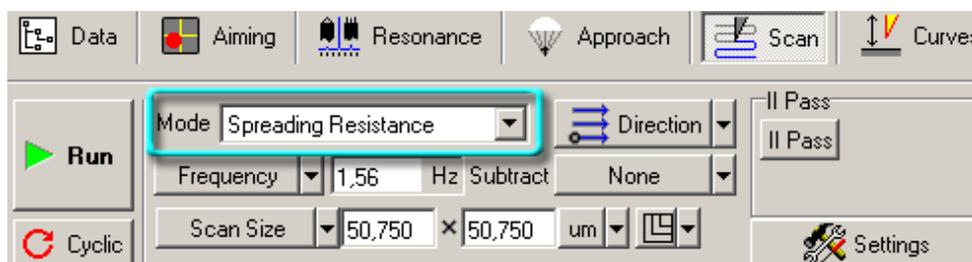


Рис. 8-24

При этом на блок-схеме будут выполнены соответствующие переключения (Рис. 8-25):

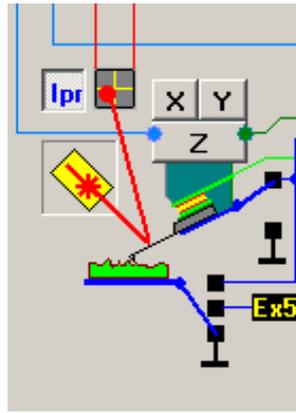


Рис. 8-25 Положение ключей

1. Перейдите на вкладку спектроскопии (кнопка  на панели основных операций).
2. На панели управления в раскрывающемся списке **a** выберите значение **Bias Voltage**; в раскрывающемся списке **f1(a)** выберите сигнал **lpr-low** (Рис. 8-26).

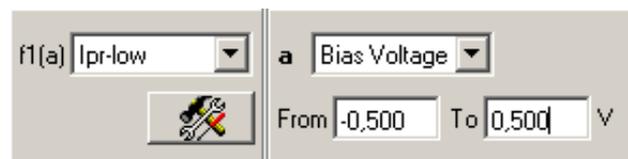


Рис. 8-26

3. Установите интервал изменения аргумента (значения **From... To...**).
4. Задайте число точек в кривой и время снятия зависимости (Рис. 8-27). Рекомендуемое время снятия зависимости **Curve Time** – 1 секунда.

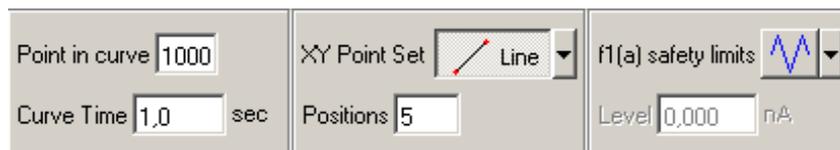


Рис. 8-27

5. Выберите режим проведения спектроскопии (в точке, по линии, по сетке) (Рис. 8-28).

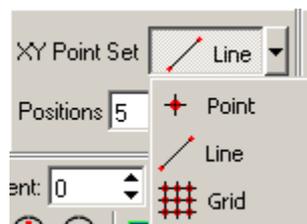


Рис. 8-28

6. Задайте точки проведения спектроскопии.
7. Запустите процесс измерений кнопкой **Run**.

8.3.2. Просмотр данных спектроскопии

Результаты спектроскопических измерений будут отображены на графике (Рис. 8-29). В рассматриваемом примере была измерена зависимость **Ipr-low(Bias Voltage)** в точке. Если измерения проводились несколько раз или в нескольких точках, отображается набор таких графиков, представленный в виде двумерной карты.

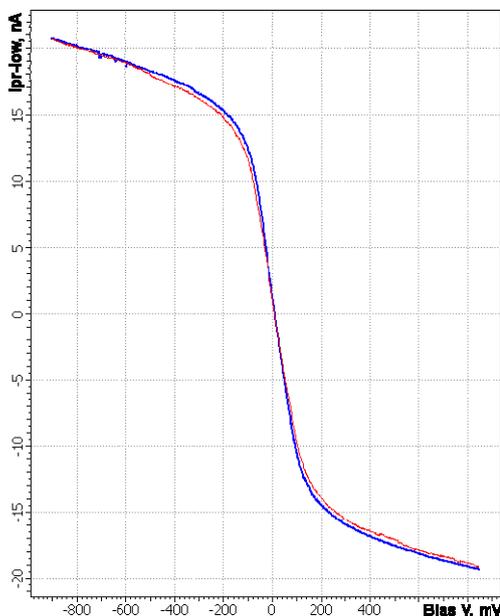


Рис. 8-29

Кривые соответствуют зависимостям, полученным при изменении аргумента от максимального значения до минимального (кривая красного цвета) и от минимального до максимального (кривая синего цвета).



ПРИМЕЧАНИЕ. Кнопка  позволяет отображать на графике одну из кривых или обе сразу.

Фрейм спектроскопии автоматически прикрепляется к файлу данных. Чтобы сохранить данные спектроскопии в виде отдельного текстового файла, щелкните на кнопке  на панели инструментов области фрейма спектроскопии (Рис. 8-30).

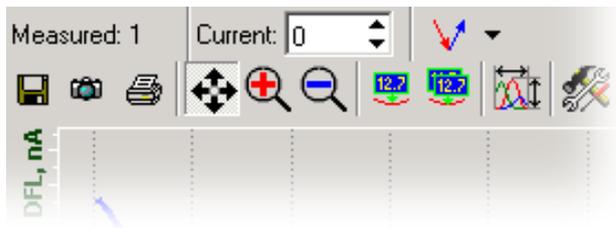


Рис. 8-30. Панель инструментов

Полученные данные можно просмотреть на вкладке **Data**, а также произвести анализ и обработку изображений с помощью программного модуля обработки изображений (см. книгу «Программное обеспечение для СЗМ», часть 2).

8.4. Амплитудная спектроскопия (Mag(Height))

При амплитудной спектроскопии измеряется зависимость амплитуды колебаний кантилевера от степени выдвижения z-трубки сканера, т.е. зависимость **Mag(Height)**.

Mag – сигнал, пропорциональный амплитуде колебаний кантилевера. **Height** – параметр, характеризующий изменение длины z-трубки сканера.

Используя зависимость амплитуды от расстояния, на которое выдвинута пьезотрубка сканера, можно произвести калибровку амплитуды колебаний кантилевера.

К выполнению спектроскопических измерений можно приступить после того, как образец подведен к зонду по полуконтактному методу (см. п. [7.1](#) «Полуконтактный Метод» на стр. [76](#)).

8.4.1. Подготовка и проведение измерений

Процедуры подготовки и проведения измерений аналогичны процедурам, рассмотренным в п. [8.2](#) «Силовая спектроскопия (DFL(Height))» на стр. [103](#). Поэтому ниже приведен только краткий алгоритм. Более подробно рассмотрены только те шаги, которые отличны от стандартного алгоритма.

Для проведения измерений выполните следующие действия:

1. Проверьте, что в списке выбора конфигурации контроллера установлен **SemiContact** (Рис. 8-31).



Рис. 8-31

2. Перейдите на вкладку спектроскопии (кнопка  на панели основных операций).
3. На панели управления в раскрывающемся списке **a** выберите значение **Height**; в раскрывающемся списке **f1(a)** выберите сигнал **Mag** (Рис. 8-32).

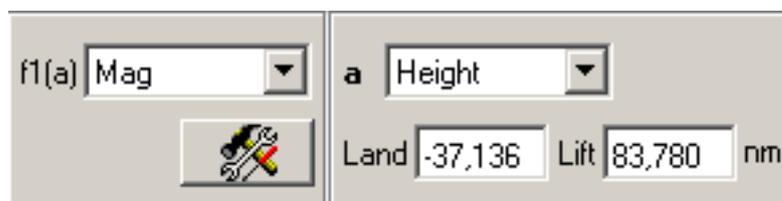


Рис. 8-32

4. Установите интервал изменения аргумента (значения **Land... Lift**). Отсчет значений производится от текущего положения пьезосканера.

5. Задайте число точек в кривой и время снятия зависимости (Рис. 8-33).

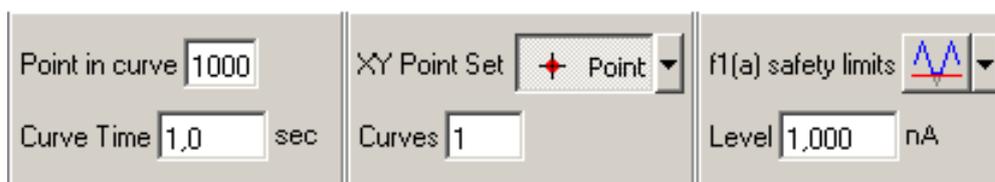


Рис. 8-33



ПРИМЕЧАНИЕ. При проведении амплитудной спектроскопии важно ограничивать минимальное значение **Mag** (параметр **Land**), чтобы избежать сильных воздействий на зонд и образец. Следует установить минимальное значение **Mag** на уровне 10% от значения **Mag** для отведенного от поверхности зонда (при обычных настройках величина **Level** составляет 0.5÷2 нА). При таких параметрах ограничивающих пределов можно устанавливать любой интервал изменений параметра **Height** без угрозы повредить образец, кантилевер или сканер.

6. Выберите способ проведения спектроскопии (в точке, по линии, по сетке) (Рис. 8-34).

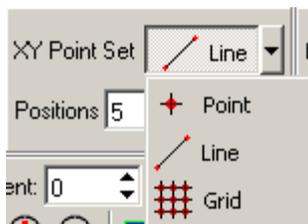


Рис. 8-34

7. Задайте точки проведения спектроскопии.
8. Запустите процесс измерений кнопкой  **Run**.

8.4.2. Просмотр данных спектроскопии

Результаты спектроскопических измерений отображаются на графике (Рис. 8-35). В рассматриваемом примере была измерена зависимость **Mag(Height)** в точке. Если спектроскопия проводилась несколько раз или в нескольких точках, отображается набор таких графиков, представленный в виде двумерной карты.

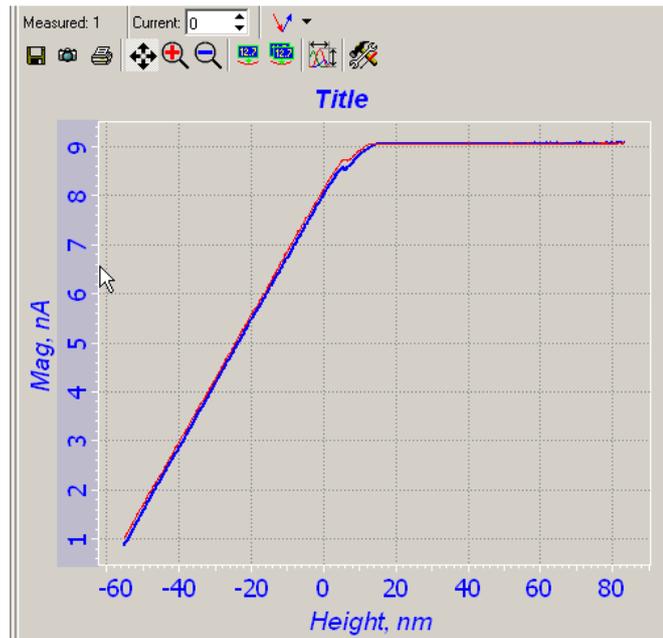


Рис. 8-35

Кривые соответствуют зависимостям, полученным при изменении аргумента от максимального значения до минимального (кривая красного цвета), и от минимального до максимального (кривая синего цвета).



ПРИМЕЧАНИЕ. В случае, когда аргументом является **Height**, кривые называются кривой подвода (красная) и отвода (синяя).



ПРИМЕЧАНИЕ. Кнопка  позволяет отображать на графике одну из кривых или обе сразу.

Фрейм спектроскопии автоматически прикрепляется к файлу данных. Чтобы сохранить данные спектроскопии в виде отдельного текстового файла, щелкните на кнопке  на панели инструментов области фрейма спектроскопии (Рис. 8-36).



Рис. 8-36. Панель инструментов

Полученные данные можно просмотреть на вкладке **Data**, произвести анализ и обработку изображений с помощью программного модуля обработки изображений (см. книгу «Программное обеспечение для СЗМ», часть 2).

8.4.3. Калибровка амплитуды колебаний кантилевера

По результатам измерения зависимости **Mag(Height)** можно выполнить калибровку амплитуды колебаний кантилевера.

Возможность калибровки амплитуды колебаний кантилевера основана на следующем предположении. В полуконтактном методе, когда зонд уже начинает «постукивать» по поверхности образца, при дальнейшем удлинении z-трубки сканера происходит ограничение амплитуды колебаний кантилевера. Предполагается, что величина уменьшения амплитуды колебаний равна изменению длины z-трубки сканера (Δ Height):

$$\Delta \text{ Амплитуды} = \Delta \text{ Height} \quad (1)$$

Это предположение является справедливым, если добротность системы довольно велика и если образец является абсолютно твердым. В случае использования стандартных зондовых датчиков, предназначенных для работы по полуконтактным методам, и твердых образцов, это предположение очень близко к действительности. И тогда интервал Δ Height, соответствующий изменению сигнала **Mag** от исходного уровня (равного величине **Set Point**) до нуля, будет равен амплитуде колебаний кантилевера.

Как видно из результатов спектроскопии, на наклонной части кривой имеется область линейной зависимости величин **Mag** и **Height**:

$$\Delta \text{ Height} = K \times \Delta \text{ Mag} \quad (2)$$

где K – коэффициент пропорциональности.

Для вычисления коэффициента калибровки измерьте величины Δ Mag и Δ Height. Для этого нажмите кнопку  (**Pair Markers**) и затем с помощью мыши установите два маркера на наклонном участке кривой (Рис. 8-37). Измеренные с помощью маркеров значения **DX** и **DY** равны соответственно Δ Height и Δ Mag.

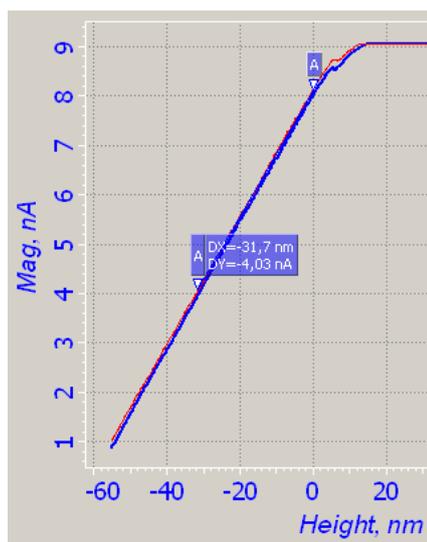


Рис. 8-37

Таким образом, из выражения (2) получаем, что коэффициент пропорциональности, связывающий амплитуду колебания кантилевера и значение сигнала **Mag**, равен:

$$K = \Delta \text{Height} / \Delta \text{Mag} = DX / DY = 31.7 / 4 = 7.93 \text{ [нм/нА]} \quad (3)$$

Реальную амплитуду колебаний кантилевера можно вычислить по следующей формуле:

$$\text{Амплитуда} = K \times \text{Mag} \quad (4)$$

В рассматриваемом примере, при сканировании с параметром **Set Point** = 8 нА, амплитуда колебаний кантилевера составляет примерно 64 нм.



ПРИМЕЧАНИЕ. Отметим, что реальная амплитуда колебаний зонда не зависит от параметра **Gain**, устанавливаемого в блоке параметров **Lock-In** блок-схемы прибора (вкладка **Scheme** на панели дополнительных операций). В то же время, коэффициент пропорциональности **K** зависит от этого параметра. То есть при изменении настроек **Lock-In** схемы, изменится и коэффициент пересчета. А, следовательно, калибровку сигнала амплитуды необходимо будет провести еще раз.

8.5. Фазовая спектроскопия (Phase(Height))

При фазовой спектроскопии измеряется зависимость фазы колебаний кантилевера от степени выдвижения z-пьезотрубки сканера, т.е. зависимость **Phase(Height)**.

Используя зависимость фазы от расстояния, на которое выдвинута пьезотрубка, можно сделать вывод о стабильности или, напротив, нестабильности выбранного метода измерений и подобрать оптимальные параметры проведения измерений.

К выполнению спектроскопических измерений можно приступить после того, как образец подведен к зонду по полуконтактному методу (см. п. [7.1](#) «Полуконтактный Метод» на стр. [76](#)).

8.5.1. Подготовка и проведение измерений

Процедуры подготовки и проведения измерений аналогичны процедурам, рассмотренным в п. [8.2](#) (стр. [103](#)). Поэтому ниже приведен только краткий алгоритм. Более подробно рассмотрены только те шаги, которые отличны от стандартного алгоритма.

Для проведения измерений выполните следующие действия:

1. Проверьте, что в списке выбора конфигурации контроллера установлен **SemiContact** (Рис. 8-38).



Рис. 8-38

2. Перейдите на вкладку спектроскопии (кнопка  на панели основных операций).
3. На панели управления в раскрывающемся списке **a** выберите значение **Height**; в раскрывающемся списке **f1(a)** выберите сигнал **Phase** (Рис. 8-39).



Рис. 8-39

4. Установите интервал изменения аргумента (значения **Land... Lift**). Отсчет значений производится от текущего положения пьезосканера.



ПРИМЕЧАНИЕ. В качестве минимального значения аргумента (параметр **Land**) рекомендуется выбрать величину **Height** соответствующую амплитуде колебаний в 10-20% от значения **Mag** при отведенном от поверхности образца зонде (Рис. 8-40). Для этого предварительно необходимо получить зависимость **Mag(Height)** (см. п. 8.4 Амплитудная спектроскопия (**Mag(Height)**) на стр. 117). В приведенном примере это значение составляет **Height** ~ -50 нА.

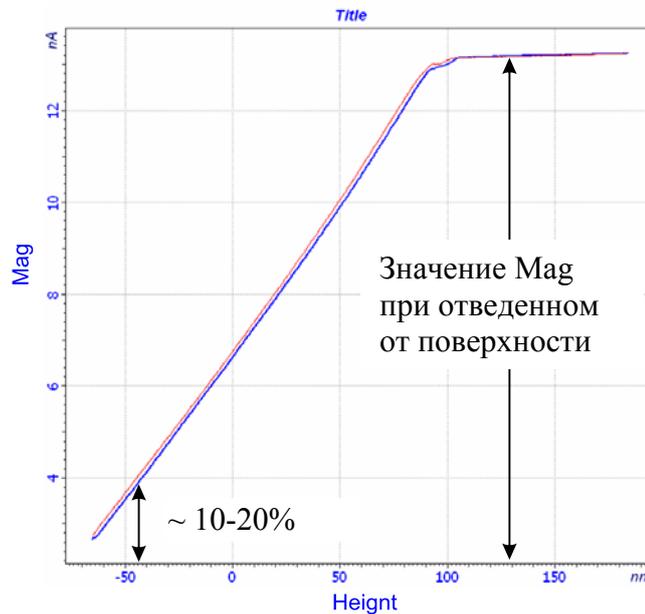


Рис. 8-40

5. Задайте число точек в кривой и время снятия зависимости (Рис. 8-41).

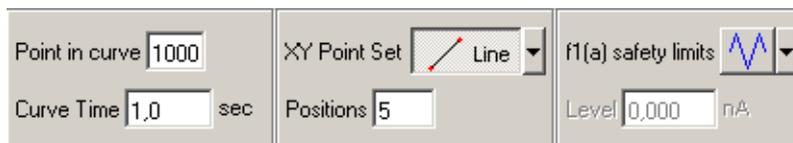


Рис. 8-41

6. Выберите режим проведения спектроскопии (в точке, по линии, по сетке) (Рис. 8-34).

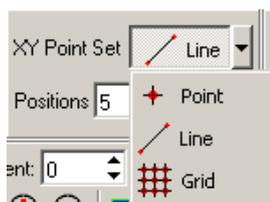
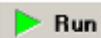


Рис. 8-42

7. Задайте точки проведения спектроскопии.
8. Запустите процесс измерений кнопкой .

8.5.2. Просмотр и анализ данных спектроскопии

Результаты спектроскопических измерений отображаются на графике (Рис. 8-43). В рассматриваемом примере была измерена зависимость **Phase(Height)** в точке. Если спектроскопия проводилась несколько раз или в нескольких точках, отображается набор таких графиков, представленный в виде двумерной карты.

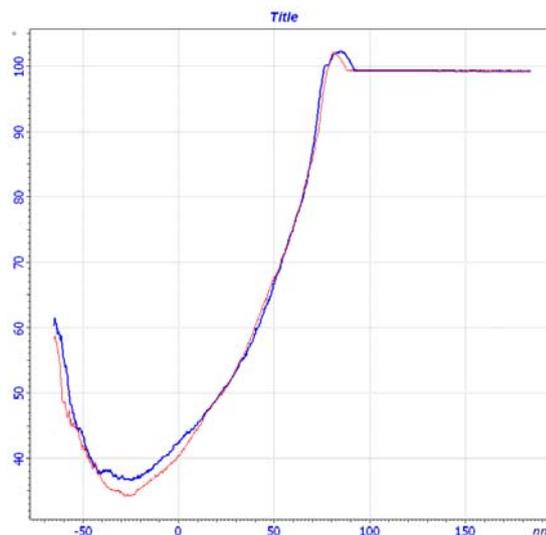


Рис. 8-43

Кривые соответствуют зависимостям, полученным при изменении аргумента от максимального значения до минимального (кривая красного цвета) и от минимального до максимального (кривая синего цвета).



ПРИМЕЧАНИЕ. В случае, когда аргументом является **Height**, кривые называются кривой подвода (красная) и отвода (синяя).



ПРИМЕЧАНИЕ. Кнопка  позволяет отображать на графике одну из кривых или обе сразу.

По виду кривой зависимости **Phase(Height)** можно сделать вывод о стабильности или, напротив, – нестабильности выбранного режима. К примеру, на Рис. 8-43 приведена зависимость без гистерезисов. Такой вид кривой соответствует стабильному режиму.

На Рис. 8-44 приведена характерная фазовая спектроскопия нестабильного режима. На ней четко различим гистерезис. Добиться стабильного режима можно, изменяя реальную амплитуду раскачки кантилевера, т.е. напряжения, подаваемого с генератора на пьезодрайвер (параметр **Amplitude**).

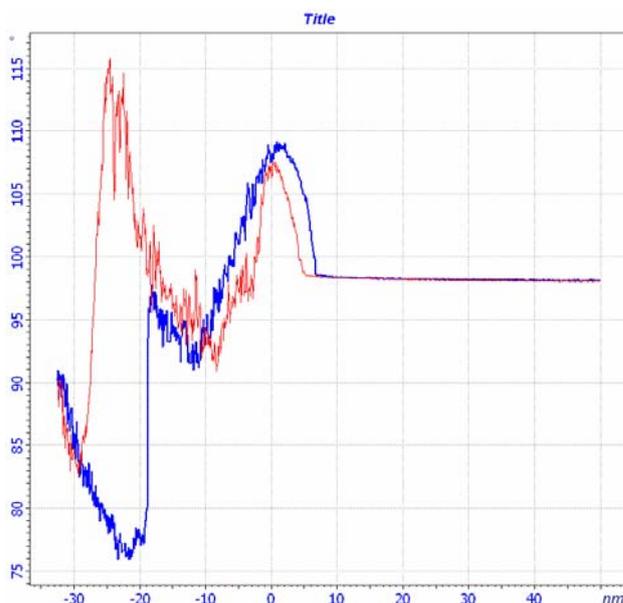


Рис. 8-44

Фрейм спектроскопии автоматически прикрепляется к файлу данных. Чтобы сохранить данные спектроскопии в виде отдельного текстового файла, щелкните на кнопке  на панели инструментов области фрейма спектроскопии (Рис. 8-45).

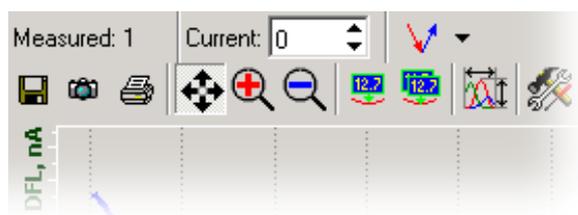


Рис. 8-45. Панель инструментов

Полученные данные можно просмотреть на вкладке **Data**, произвести анализ и обработку изображений с помощью программного модуля обработки изображений (см. книгу «Программное обеспечение для СЗМ», часть 2).

9. Многопроходные методы

9.1. Введение

Данный раздел рассчитан на пользователя, имеющего опыт проведения измерений на приборах компании «НТ-МДТ» по методам контактной и полуконтактной атомно-силовой микроскопии.

Многопроходные методы обычно используются в задачах, где помимо рельефа поверхности образца необходимо определять также и иные характеристики, при этом необходимо исключить влияние на них рельефа поверхности. При сканировании строки производится следующая процедура. На первом проходе сканируемой строки получаем рельеф поверхности с применением контактного или полуконтактного методов. На втором проходе проводим измерения электрических сил или потенциалов, магнитных полей, диссипаций, распределений емкости и т.д. Для исключения влияния рельефа поверхности на результаты измерений на втором проходе зондовый датчик отодвигается от поверхности на расстояние dZ и движется по траектории, повторяющей рельеф образца. Расстояние dZ подбирается таким образом, чтобы между колеблющимся зондом и образцом оставалось достаточное расстояние, исключающее влияние рельефа на получаемый результат. Но это расстояние не должно быть очень большим, так как в этом случае уменьшается измеряемый сигнал и ухудшается латеральное разрешение. В некоторых случаях может быть необходимым и третий проход для исключения влияния не только рельефа, но и поверхностного электрического поля.

9.2. Магнитная Силовая Микроскопия

9.2.1. Краткая характеристика метода

Магнитная Силовая Микроскопия (МСМ) позволяет получить изображение пространственного распределения магнитных сил по поверхности образца. МСМ позволяет изучать характеристики магнитных носителей, магнитную структуру магнетиков, достигая при этом субмикронного разрешения, магнитные поля токовых шин и пр. Наиболее важной задачей является минимизация влияния рельефа на изображение распределения магнитных сил по поверхности образца. Для решения этой задачи магнитные измерения осуществляются с помощью двухпроходного метода.

В процессе сканирования производится следующая процедура. На первом проходе сканируемой строки определяется рельеф по полуконтактному методу (Рис. 9-1).

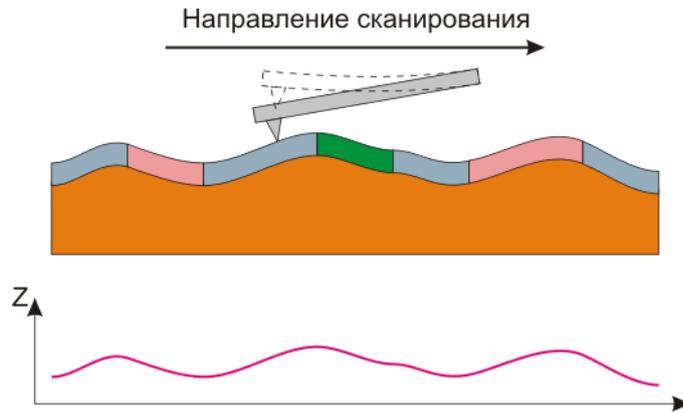


Рис. 9-1. Первый проход
Получение рельефа поверхности

Затем зондовый датчик отводится от поверхности образца на расстояние dZ . На втором проходе той же строки датчик движется над поверхностью по траектории, повторяющей рельеф поверхности (Рис. 9-2). Т.е. во время второго прохода расстояние между сканируемой поверхностью и зондовым датчиком поддерживается постоянным. Это расстояние должно быть достаточно большим, чтобы исключить влияние рельефа поверхности. В этом случае зонд подвергается воздействию только далекодействующих сил, основной вклад в которые осуществляется магнитными силами образца. Но расстояние dZ не должно быть чрезмерно большим, так как в этом случае уменьшается измеряемый сигнал и ухудшается латеральное разрешение.

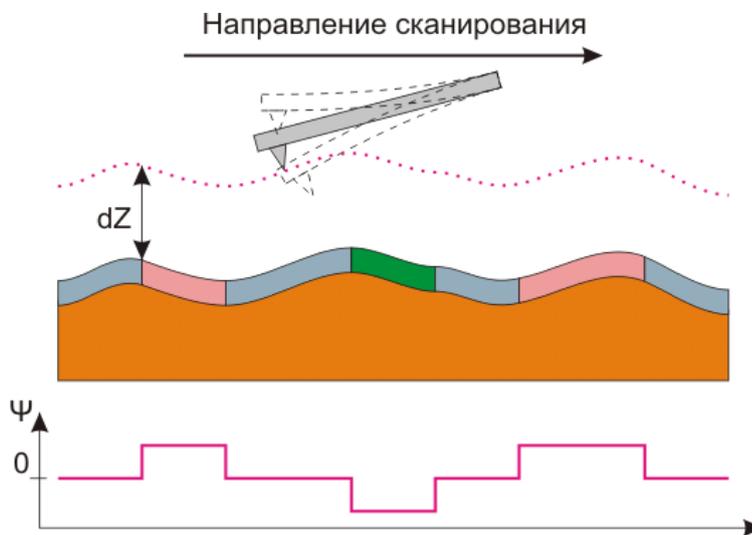


Рис. 9-2. Второй проход
 Ψ – сдвиг фазы

Во время второго прохода с помощью пьезодрайвера зонд приводится в колебательное состояние на резонансной частоте. Посредством регистрации изменений фазы колебаний зонда формируется изображение распределения z -составляющей градиента магнитных сил по поверхности образца.

9.2.2. Подготовка к измерениям

Основные операции при работе по методу Магнитной Силовой Микроскопии

МСМ реализуется при использовании магнитных зондовых датчиков. Магнитные зондовые датчики чаще всего представляют собой стандартные кремниевые зондовые датчики, с покрытыми тонкой магнитной пленкой зондами.

Операции для подготовки прибора и проведения измерений по методу МСМ в основном аналогичны операциям, проводимым по Полуконтактному Методу, подробно описанному в п. 7.1 «Полуконтактный Метод» на стр. 76. Ниже приведена последовательность основных операций, подробно описаны особенности настроек прибора и проведения измерений по методу МСМ.

Для примера работы по методу МСМ используем в качестве образца магнитный жесткий диск.

Работу по методу МСМ можно разделить на следующую последовательность основных операций:

1. Подготовка к работе (см. часть 2, глава 1 «Подготовка к проведению СЗМ измерений»).
2. Предварительное сканирование образца по Полуконтактному Методу (см. 7.1 на стр. 76).
3. Установка параметров сканирования во втором проходе (см. п. 9.2.3 на стр. 128).
4. Сканирование (см. п. 9.2.4 на стр. 129).
5. Сохранение полученных данных (см. п. 7.1.9 на стр. 95).
6. Завершение измерений (см. п. 7.1.10 на стр. 95).



ПРИМЕЧАНИЕ. При длительном хранении магнитных зондовых датчиков, датчики могут размагнититься. Перед использованием датчики необходимо намагнитить при помощи постоянного магнита.

Исходное состояние

Предполагается, что предварительно была выполнена начальная подготовка прибора:

- программа управления запущена;
- СЗМ контроллер включен;
- блок расширения включен;
- зондовая головка с магнитным зондовым датчиком установлена на сканер;
- оптическая система регистрации изгибов кантилевера настроена;
- образец находится в СЗМ камере;
- образец подведен к зонду на расстояние $1 \div 2$ мм.

Подробное описание перечисленных выше действий см. в части 2, главе 1 «Подготовка к проведению СЗМ измерений».

Произведите предварительное сканирование образца по Полуконтактному Методу (подробное описание см. п. 7.1 «Полуконтактный Метод» на стр. 76) и выберите область для МСМ измерений.

9.2.3. Установка параметров сканирования

Установки параметров сканирования в методе МСМ отличаются от описанных в Полуконтактном Методе (п. 7.1.7 «Установка параметров сканирования» на стр. 87) только выбираемым методом сканирования и установками сканирования на втором проходе. Все остальные установки остаются такими же.

Выбор метода МСМ

На панели управления в списке **Mode** (выбор методов сканирования) выберите метод **AC Magnetic Force** (Рис. 9-3). При этом будет активизирована панель **II Pass** для настройки параметров на втором проходе.

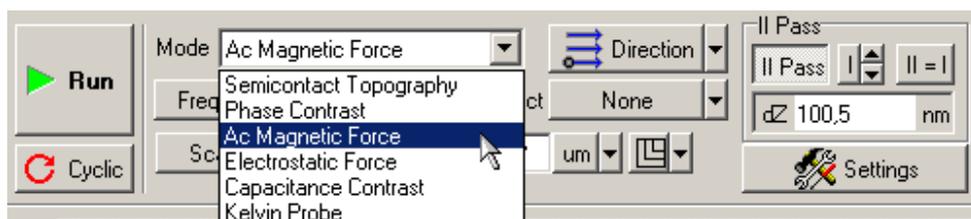


Рис. 9-3. Выбор Магнитной Силовой Микроскопии на панели управления вкладки **Scan**

Выбор фазового детектора

1. Откройте область дополнительных операций, щелкнув на кнопке  в правом верхнем углу Главного окна программы.
2. Перейдите на вкладку **Scheme**.
3. На панели детекторов из раскрывающегося списка выберите фазовый детектор (Рис. 9-4).

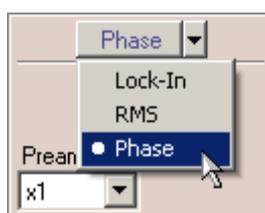


Рис. 9-4

4. Установите коэффициент предварительного усиления фазового детектора (параметр **Preamplifier**) равный 10.

9.2.4. Сканирование

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

Для запуска сканирования щелкните на кнопке **Run**, расположенной на панели управления вкладки **Scan** (Рис. 9-5).

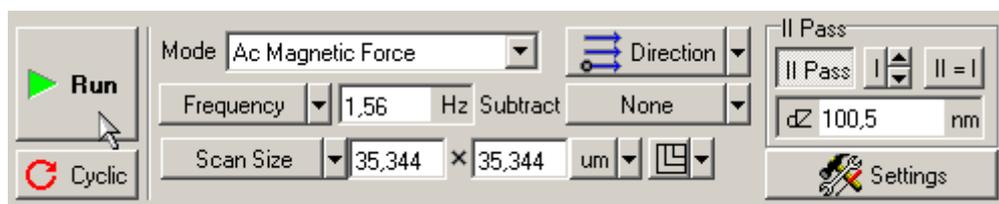


Рис. 9-5

После запуска процесса сканирования:

- начнется построчное сканирование поверхности образца и в области отображения 2D-данных сканирования появятся два изображения: в одном отобразится рельеф поверхности (сигнал **Height**), в другом – отображение распределения z-составляющей градиента магнитных сил по поверхности образца (сигнал **Phase**) (Рис. 9-6);

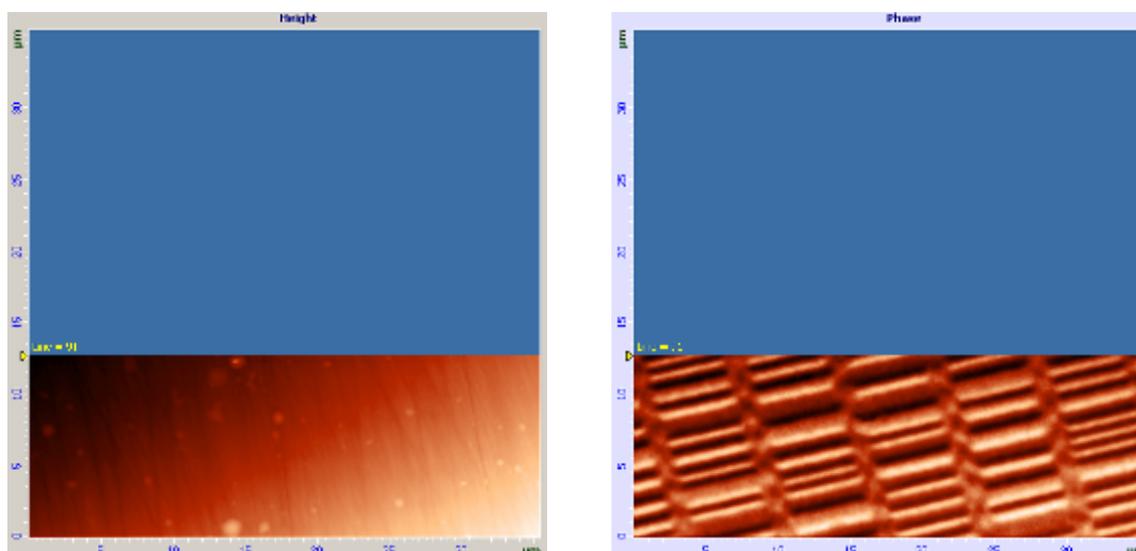


Рис. 9-6. Изображение рельефа и пространственного распределения z-составляющей градиента магнитных сил на поверхности магнитного жесткого диска

- на панели отображения 1D-данных будет построчно отображаться измеряемый сигнал, выбранный в области отображения 2D-данных (Рис. 9-7);



Рис. 9-7. Сигнал **Phase**

- на панели управления вкладки **Scan** некоторые кнопки исчезнут, и появится ряд новых кнопок: **Pause, Restart, Stop** (Рис. 9-8).

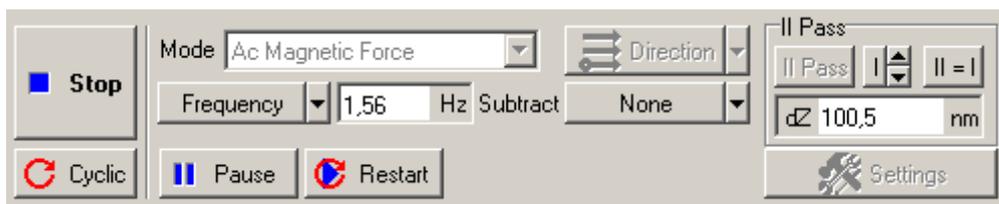


Рис. 9-8. Панель управления вкладки **Scan** во время сканирования

Если по какой-либо причине необходимо прекратить сканирование, достаточно щелкнуть на кнопке **Stop** или нажать клавишу <Esc>.

Способы улучшения изображения

При выборе метода МСМ автоматически устанавливаются необходимые параметры для второго прохода. При необходимости коррекции параметров второго прохода выполните следующие действия:

1. Установите один из переключателей в положение «второй проход», как показано на (Рис. 9-9).

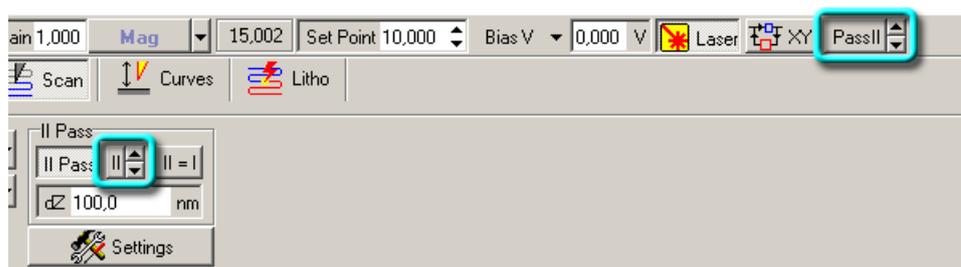


Рис. 9-9. Переключатели настроек первого и второго проходов

2. Измените при необходимости амплитуду выходного сигнала генератора (параметр **Amp**), коэффициент предварительного усиления фазового детектора (параметр **Preamplifier**) (Рис. 9-10).

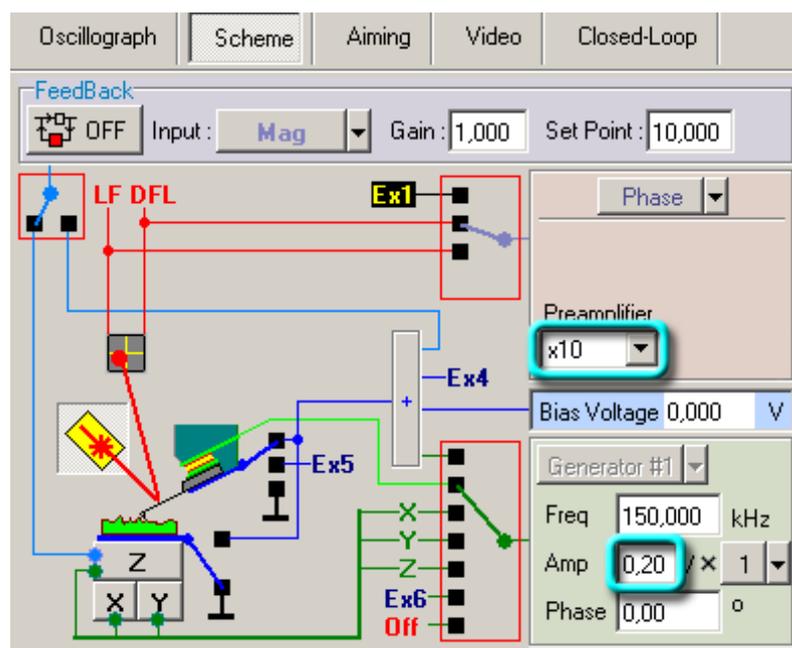


Рис. 9-10. Вкладка Scheme



ПРИМЕЧАНИЕ. На втором проходе обратная связь по Z отключена, т.к. Z отслеживается автоматически по результатам первого прохода.

Во время сканирования, для получения наилучшего качества получаемого изображения, можно подбирать следующие параметры:

- dZ** расстояние, на которое отводится зонд во время сканирования на втором проходе. Чем больше **dZ**, тем меньше влияние рельефа поверхности на результаты измерений, проводимых на втором проходе. В то же время, с ростом высоты уменьшается чувствительность метода. В поле ввода **dZ** на панели **II Pass** (см. Рис. 9-8) установите желаемую высоту подъема зонда (опускания образца).
- Amp** величина выходного сигнала генератора. Уменьшение величины сигнала генератора и, соответственно, амплитуды колебаний зонда, приводит к увеличению разрешения метода, но, с другой стороны, ухудшается отношение сигнал/шум. Для изменения параметра **Amp** во время сканирования откройте область дополнительных операций и перейдите на вкладку **Scheme** (см. Рис. 9-10). В поле ввода **Amp** установите желаемую величину амплитуды.

Контролировать качество получаемого изображения можно в области отображения 2D-данных сканирования (Рис. 9-6).

Все остальные настройки и изменения параметров в процессе сканирования подробно описаны в п. [7.1.8](#) «Сканирование» на стр. [91](#).

9.3. Электростатическая Силовая Микроскопия

9.3.1. Краткая характеристика метода

Электростатическая Силовая Микроскопия (ЭСМ) является эффективным средством для исследования распределения электрического поля и зарядов по поверхности образца с субмикронным разрешением. Изображения, полученные с помощью этой методики, интерпретируются как пространственное распределение z -составляющей градиента электрического поля по поверхности образца. Для исключения влияния рельефа поверхности на результаты исследования используется двухпроходная методика.

В процессе сканирования производится следующая процедура. На первом проходе сканируемой строки определяется рельеф поверхности по полуконтактному методу (Рис. 9-11).

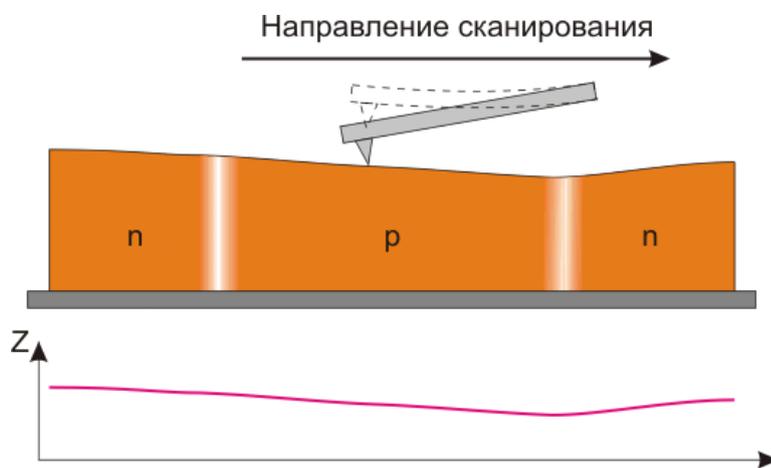


Рис. 9-11. Первый проход
Получение рельефа поверхности

На втором проходе зонд отводится от поверхности образца на расстояние dZ . С помощью пьезодрайвера зонд приводится в колебательное состояние на резонансной частоте, между зондом и образцом подается постоянное напряжение смещения U_0 , и осуществляется повторное сканирование. Зондовый датчик движется над поверхностью по траектории, повторяющей рельеф поверхности образца (Рис. 9-12). Посредством регистрации изменений фазы колебаний зонда формируется изображение распределения z -составляющей градиента электрического поля по поверхности образца.

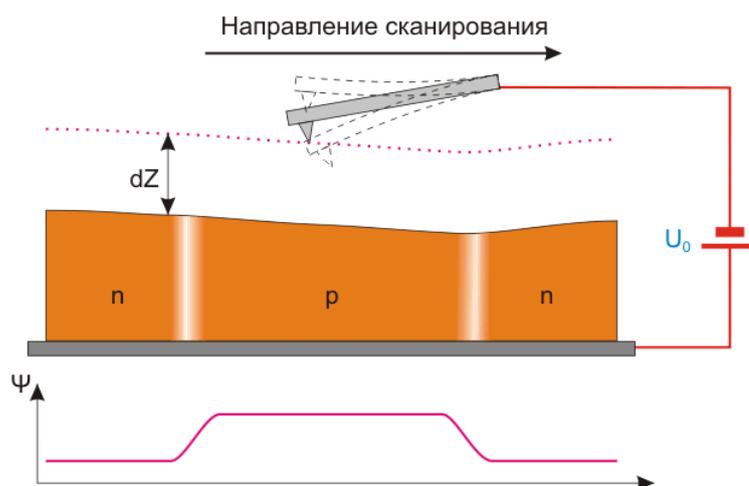


Рис. 9-12. Второй проход
 Ψ – сдвиг фазы

Во время второго прохода расстояние между сканируемой поверхностью и зондовым датчиком поддерживается постоянным. Это расстояние должно быть достаточно большим, чтобы исключить влияние рельефа. В таком случае зонд подвергается воздействию только дальнедействующих сил, основной вклад в которые осуществляется электрическими свойствами образца. Но расстояние dZ не должно быть чрезмерно большим, так как в этом случае уменьшается измеряемый сигнал и ухудшается латеральное разрешение.

9.3.2. Подготовка к измерениям

Основные операции при работе по методу Электростатической Силовой Микроскопии

В качестве зондовых датчиков используются стандартные проводящие зондовые датчики для полуконтактных методов.

Операции для подготовки прибора и проведения измерений по методу ЭСМ в основном аналогичны операциям, проводимым по Полуконтактному Методу, подробно описанному в п. 7.1 «Полуконтактный Метод» на стр. 76. Ниже приведена последовательность основных операций, подробно описаны особенности настроек прибора и проведения измерений по методу ЭСМ.

Для примера работы по методу ЭСМ используем образец GaAs.

Работу по методу ЭСМ можно разделить на следующую последовательность основных операций:

1. Подготовка к работе (см. часть 2, глава 1 «Подготовка к проведению СЗМ измерений» 1).
2. Предварительное сканирование образца по Полуконтактному Методу (см. часть 3, п. 7.1 на стр. 76).
3. Установка параметров сканирования во втором проходе (см. п. 9.3.3 на стр. 134).

4. Сканирование (см. п. [9.3.4](#) на стр. [135](#)).
5. Сохранение полученных данных (см. п. [7.1.9](#) на стр. [95](#)).
6. Завершение измерений (см. п. [7.1.10](#) на стр. [95](#)).

Исходное состояние

Предполагается, что предварительно была выполнена начальная подготовка прибора:

- программа управления запущена;
- СЗМ контроллер включен;
- блок расширения включен;
- зондовая головка с зондовым датчиком установлена на сканер;
- оптическая система регистрации изгибов кантилевера настроена;
- образец находится в СЗМ камере;
- образец подведен к зонду на расстояние 1÷2 мм.

Подробное описание перечисленных выше действий см. в части 2, глава 1 «Подготовка к проведению СЗМ измерений».

Произведите предварительное сканирование образца по Полуконтактному Методу (подробное описание см. [7.1](#) «Полуконтактный Метод» на стр. [76](#)) и выберите область для ЭСМ измерений.

9.3.3. Установка параметров сканирования

Установки параметров сканирования в методе ЭСМ отличаются от описанных в Полуконтактном Методе (п. [7.1.7](#) «Установка параметров сканирования» на стр. [87](#)) только выбираемым методом сканирования и установками сканирования на втором проходе. Все остальные установки остаются такими же.

Выбор метода ЭСМ

На панели управления в списке **Mode** (выбор методов сканирования) выберите метод **Electrostatic Force** (Рис. 9-13). При этом будет активизирована панель **II Pass** для настройки параметров на втором проходе.

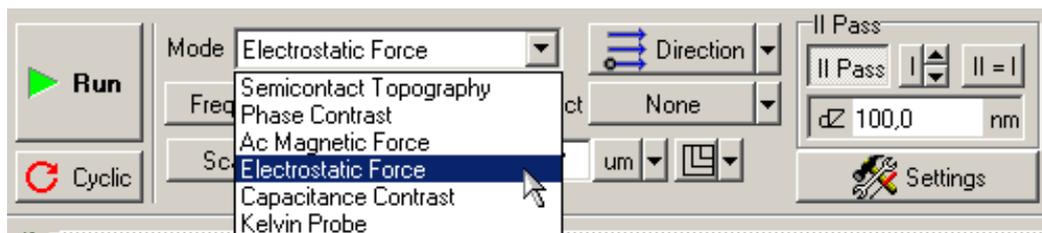


Рис. 9-13. Выбор Электростатической Силовой Микроскопии на панели управления вкладки Scan

9.3.4. Сканирование

Запуск сканирования

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

Для запуска сканирования щелкните на кнопке **Run**, расположенной на панели управления вкладки **Scan** (Рис. 9-14).

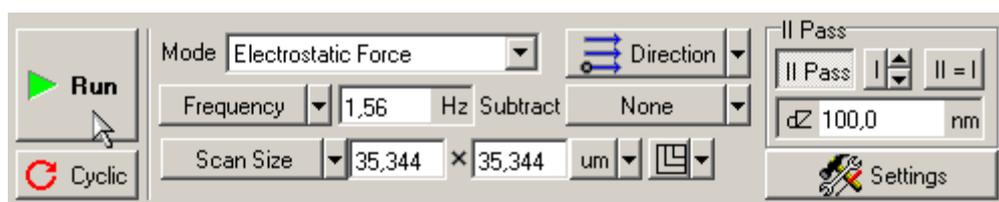


Рис. 9-14

После запуска процесса сканирования:

- начнется построчное сканирование поверхности образца и в области отображения 2D-данных сканирования появятся два изображения: в одном отобразится рельеф поверхности (сигнал **Height**), в другом – отображение распределения z-составляющей градиента электрического поля по поверхности образца (сигнал **Phase**) (Рис. 9-15);

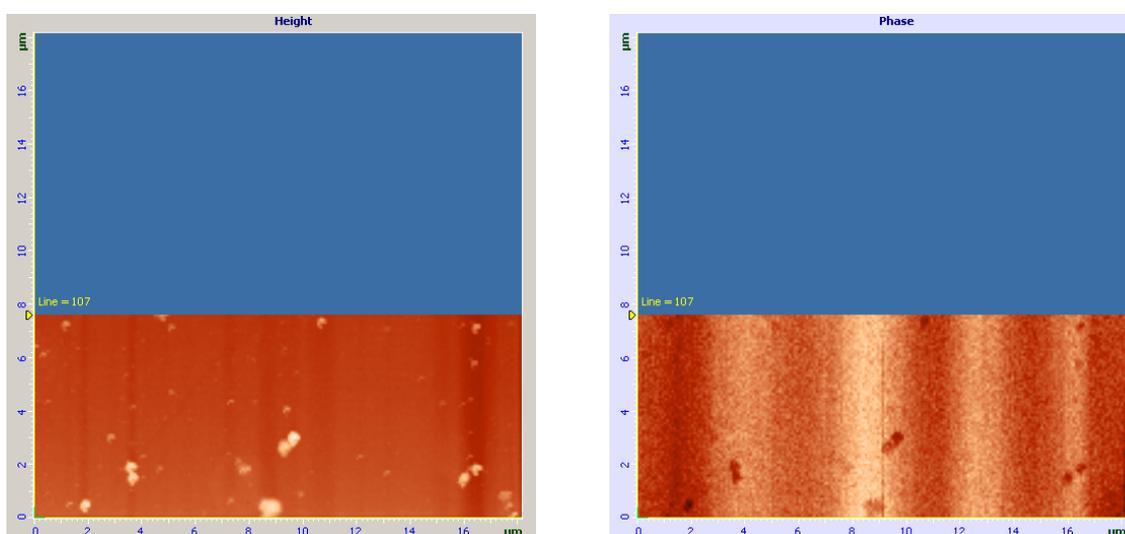


Рис. 9-15. Изображение рельефа и пространственного распределения z-составляющей градиента электрического потенциала по поверхности GaAs

- на панели отображения 1D-данных будет построчно отображаться измеряемый сигнал, выбранный в области отображения 2D-данных (Рис. 9-16);



Рис. 9-16. Сигнал Phase

- на панели управления вкладки **Scan** некоторые кнопки исчезнут, и появится ряд новых кнопок: **Pause, Restart, Stop** (Рис. 9-17).

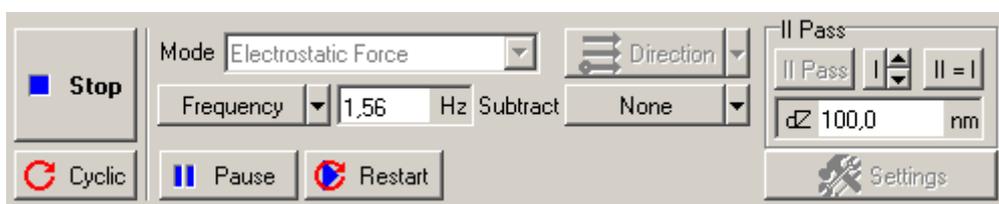


Рис. 9-17. Панель управления вкладки **Scan** во время сканирования

Если по какой-либо причине необходимо прекратить сканирование, достаточно щелкнуть на кнопке **Stop** или нажать клавишу <Esc>.

Способы улучшения изображения

При выборе метода ЭСМ автоматически устанавливаются необходимые параметры для второго прохода. При необходимости коррекции параметров второго прохода выполните следующие действия:

1. Установите один из переключателей в положение «второй проход», как показано на Рис. 9-18.

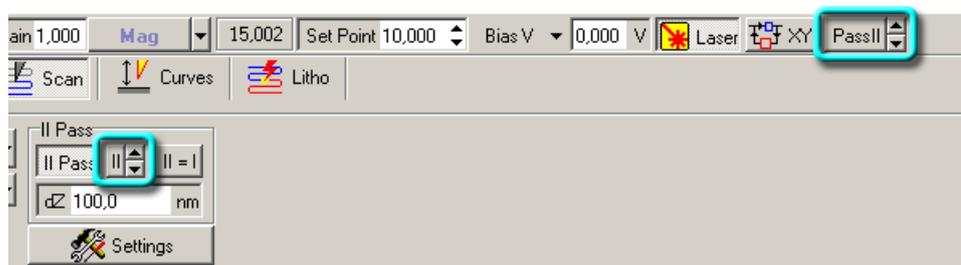
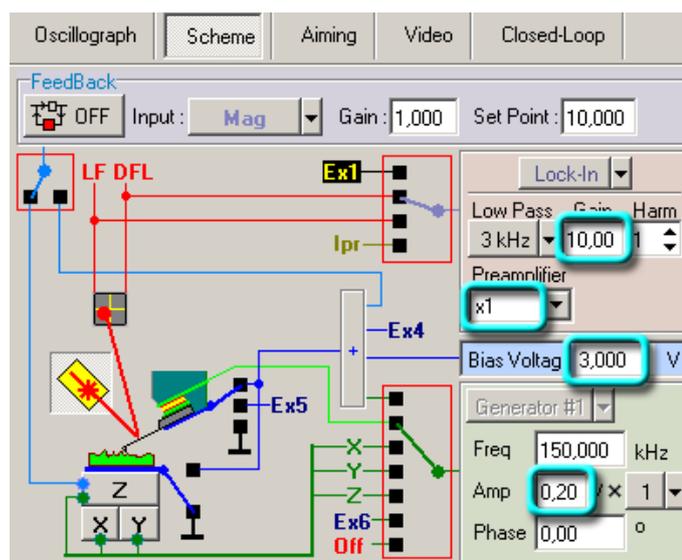


Рис. 9-18. Переключатели настроек первого и второго проходов

2. Измените при необходимости амплитуду выходного сигнала генератора (параметр **Amp**), коэффициенты усиления синхронного детектора (параметр **Gain**) и предусилителя (параметр **Preamplifier**), напряжение смещения (параметр **Bias Voltage**) (Рис. 9-19).

Рис. 9-19. Вкладка **Scheme**

ПРИМЕЧАНИЕ. На втором проходе обратная связь по *Z* отключена, т.к. *Z* отслеживается автоматически по результатам первого прохода.

Во время сканирования, для получения наилучшего качества получаемого изображения, можно подбирать следующие параметры:

dZ расстояние, на которое отводится зонд во время сканирования на втором проходе. Чем больше **dZ**, тем меньше влияние рельефа поверхности на результаты измерений, проводимых на втором проходе. В то же время, с ростом высоты уменьшается чувствительность метода. В поле ввода **dZ** на панели **II Pass** (см. Рис. 9-17) установите желаемую высоту подъема зонда (опускания образца).

Amp величина выходного сигнала генератора. Уменьшение величины сигнала генератора и, соответственно, амплитуды колебаний зонда, приводит к увеличению разрешения метода, но, с другой стороны, ухудшается отношение сигнал/шум. Для изменения параметра **Amp** во время сканирования откройте область дополнительных операций и перейдите на вкладку **Scheme** (см. Рис. 9-19). В поле ввода **Amp** установите желаемую величину амплитуды.

Bias Voltage изменяя знак и величину напряжения смещения возможно влиять на характер проявления поверхностного потенциала на втором проходе. Для изменения параметра **Bias Voltage** выберите второй проход сканирования (кнопка **Pass II** на панели основных параметров). В поле ввода **Bias Voltage** (см. Рис. 9-19) установите желаемую величину напряжения смещения.

Контролировать качество получаемого изображения можно в области отображения 2D-данных сканирования (Рис. 9-15).

Все остальные настройки и изменения параметров в процессе сканирования подробно описаны в п. 7.1.8 «Сканирование» на стр. 91.

9.4. Метод Зонда Кельвина

9.4.1. Краткая характеристика метода

Метод Зонда Кельвина (МЗК) позволяет изучать распределение поверхностного потенциала по образцу. Для этого в процессе сканирования необходимо поддерживать амплитуду колебаний зонда, раскачиваемого электрическим полем на частоте своего механического резонанса, равной нулю, путем изменения постоянного напряжения смещения U_0 .

При работе по МЗК значение переменной составляющей напряжения смещения $U_1 \cdot \sin(\omega t)$ должно быть достаточно большим для возбуждения колебаний зонда. Частота переменного электрического поля выбирается равной резонансной частоте зондового датчика.

Если при каком-то значении постоянного напряжения амплитуда колебаний становится равной нулю, значит это напряжение U_0 равно поверхностному потенциалу в этой точке. Для исключения влияния рельефа поверхности на результаты исследования используется двухпроходная методика.

В процессе сканирования производится следующая процедура. На первом проходе сканируемой строки определяется рельеф по полуконтактному методу (Рис. 9-20).

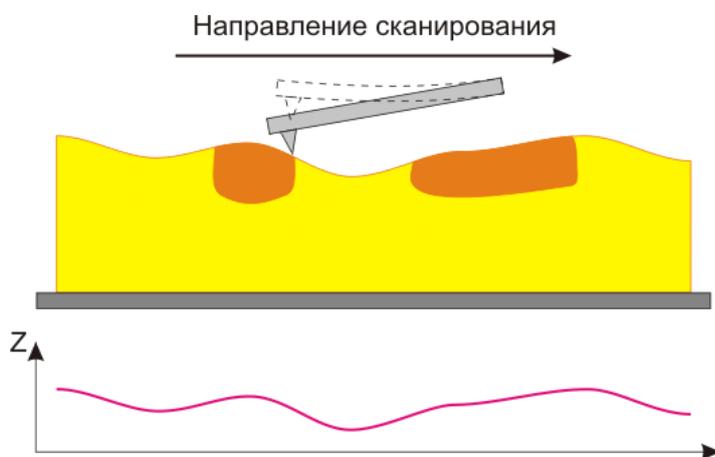


Рис. 9-20. Первый проход
Получение рельефа поверхности

На втором проходе зонд отводится от поверхности образца на расстояние dZ . На зонд подается переменное напряжение $U_1 \cdot \sin(\omega t)$, раскачивающее зонд на частоте ω , равной резонансной частоте зонда. Изменением величины постоянного напряжения смещения $U_0(x, y)$ с использованием цепи обратной связи поддерживается равной нулю амплитуда колебания зонда. Зондовый датчик движется над поверхностью по траектории, повторяющей рельеф образца (Рис. 9-21).

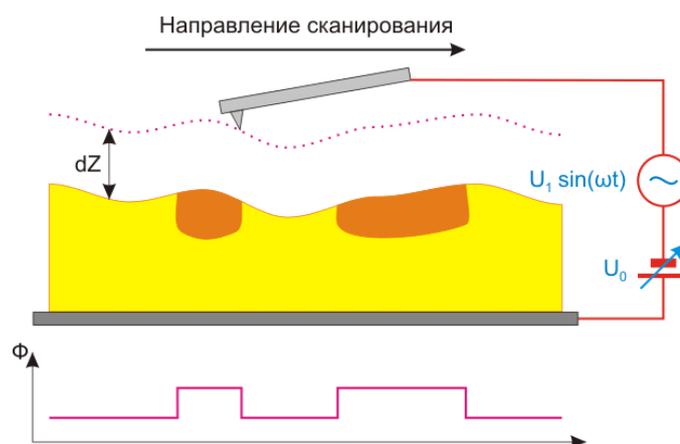


Рис. 9-21. Второй проход
 Φ – поверхностный потенциал

Во время второго прохода расстояние между сканируемой поверхностью и зондовым датчиком поддерживается постоянным. Это расстояние должно быть достаточно большим, чтобы исключить влияние рельефа. В таком случае зонд подвергается воздействию только дальнедействующих сил, основной вклад в которые осуществляется электрическими свойствами образца. Но расстояние dZ не должно быть чрезмерно большим, так как в этом случае уменьшается измеряемый сигнал и ухудшается латеральное разрешение.

9.4.2. Подготовка к измерениям

Основные операции при работе по Методу Зонда Кельвина

В качестве зондовых датчиков используются стандартные проводящие зондовые датчики для полуконтактных методов.

Операции для подготовки прибора и проведения измерений по методу МЗК в основном аналогичны операциям, проводимым по Полуконтактному Методу, подробно описанному в п. 7.1 «Полуконтактный Метод» на стр. 76. Ниже приведена последовательность основных операций, подробно описаны особенности настроек прибора и проведения измерений по методу МЗК.

Для примера работы по методу МЗК используем двухкомпонентную ЛБ пленку.

Работу по методу МЗК можно разделить на следующую последовательность основных операций:

1. Подготовка к работе (см. часть 2, глава 1 «Подготовка к проведению СЗМ измерений»).
2. Предварительное сканирование образца по Полуконтактному Методу (см. часть 3, п. 7.1 на стр. 76).
3. Установка параметров сканирования во втором проходе (см. п. 9.4.3 на стр. 140).
4. Сканирование (см. п. 9.4.4 на стр. 141).
5. Сохранение полученных данных (см. п. 7.1.9 на стр. 95).
6. Завершение измерений (см. п. 7.1.10 на стр. 95).

Исходное состояние

Предполагается, что предварительно была выполнена начальная подготовка прибора:

- программа управления запущена;
- прибор включен;
- проводящий зондовый датчик установлен;
- оптическая система регистрации изгибов кантилевера настроена;
- образец установлен;
- измерительная головка установлена;
- образец подведен к зонду на расстояние 1÷2 мм.

Подробное описание перечисленных выше действий см. в части 2, глава 1 «Подготовка к проведению СЗМ измерений».

Произведите предварительное сканирование образца по Полуконтактному Методу (подробное описание см. п. [7.1](#) «Полуконтактный Метод» на стр. [76](#)) и выберите область для МЗК измерений.

9.4.3. Установка параметров сканирования

Установки параметров сканирования в методе МЗК отличаются от описанных в Полуконтактном Методе (п. [7.1.7](#) «Установка параметров сканирования» на стр. [87](#)) только выбираемым методом сканирования и установками сканирования на втором проходе. Все остальные установки остаются такими же.

Выбор МЗК

На панели управления в списке **Mode** (выбор методов сканирования) выберите метод **Kelvin Probe** (Рис. 9-22). При этом будет активизирована панель **II Pass** для настройки параметров на втором проходе.

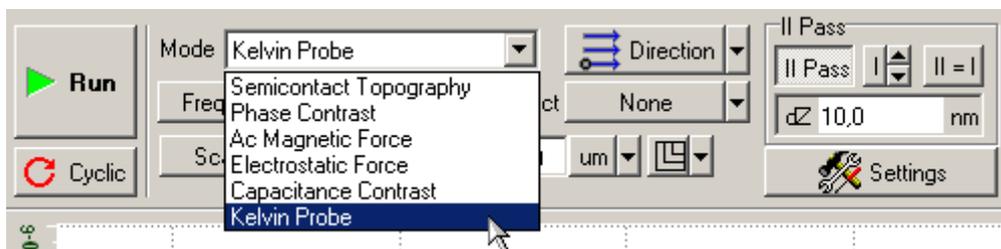


Рис. 9-22. Выбор Метода Зонда Кельвина на панели управления вкладки Scan

Запустится система диагностирования прибора. Через несколько секунд появится сообщение с текущим значением поверхностного потенциала (Рис. 9-23).

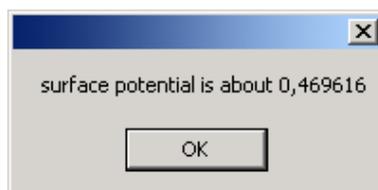


Рис. 9-23. Диалоговое окно с текущим значением поверхностного потенциала

Закройте диалоговое окно, щелкнув на кнопке **OK**. Прибор готов к работе.

9.4.4. Сканирование

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

Для запуска сканирования щелкните на кнопке **Run**, расположенной на панели управления вкладки **Scan** (Рис. 9-24).

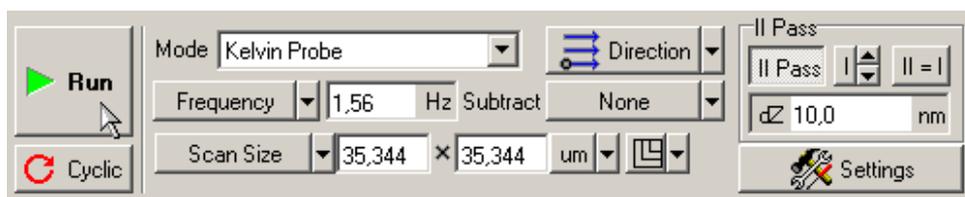


Рис. 9-24

После запуска процесса сканирования:

- начнется построчное сканирование поверхности образца и в области отображения 2D-данных сканирования появятся два изображения: в одном отобразится рельеф поверхности (сигнал **Height**), в другом – отображение распределения z-составляющей градиента поверхностного потенциала по образцу (сигнал **Surface Potential**) (Рис. 9-25);

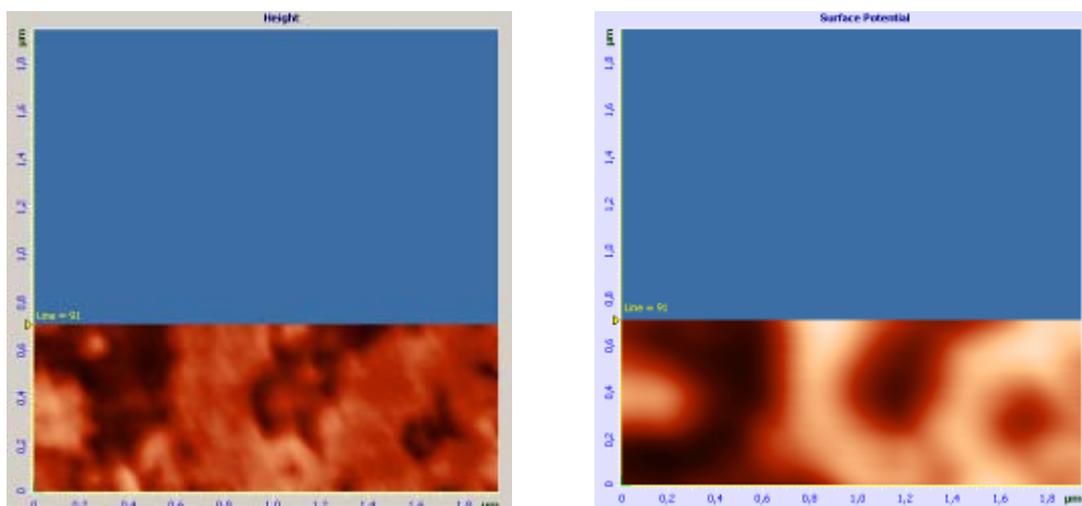


Рис. 9-25. Изображение рельефа и пространственного распределения поверхностного потенциала по поверхности двухкомпонентной ЛБ пленки

- на панели отображения 1D-данных будет построчно отображаться измеряемый сигнал, выбранный в области отображения 2D-данных (Рис. 9-26);

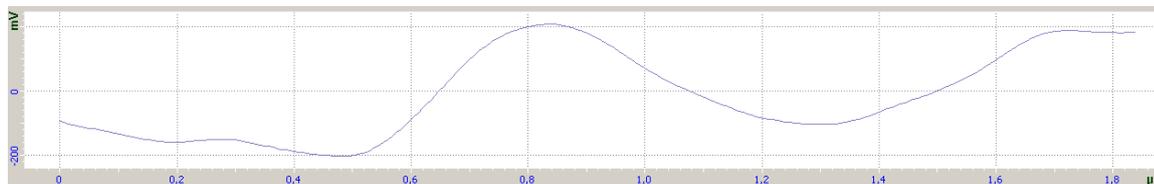


Рис. 9-26. Сигнал Surface Potential

- на панели управления вкладки **Scan** некоторые кнопки исчезнут, и появится ряд новых кнопок: **Pause, Restart, Stop** (Рис. 9-27).

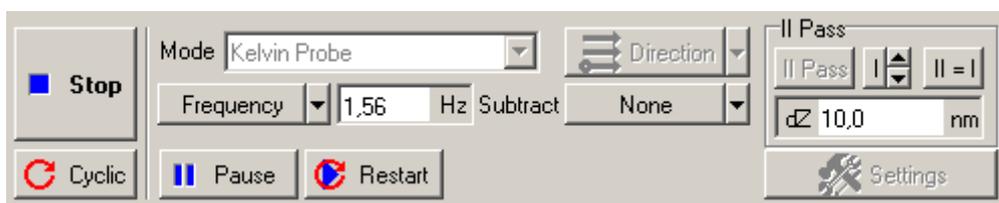


Рис. 9-27. Панель управления вкладки **Scan** во время сканирования

Если по какой-либо причине необходимо прекратить сканирование, достаточно щелкнуть на кнопке **Stop** или нажать клавишу <Esc>.

Способы улучшения изображения

При выборе метода МЗК автоматически устанавливаются необходимые параметры для второго прохода. При необходимости коррекции параметров второго прохода выполните следующие действия:

1. Установите один из переключателей в положение «второй проход», как показано на (Рис. 9-28).

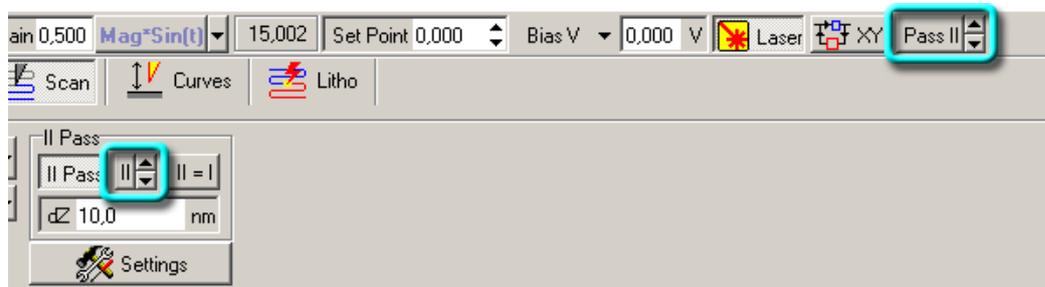
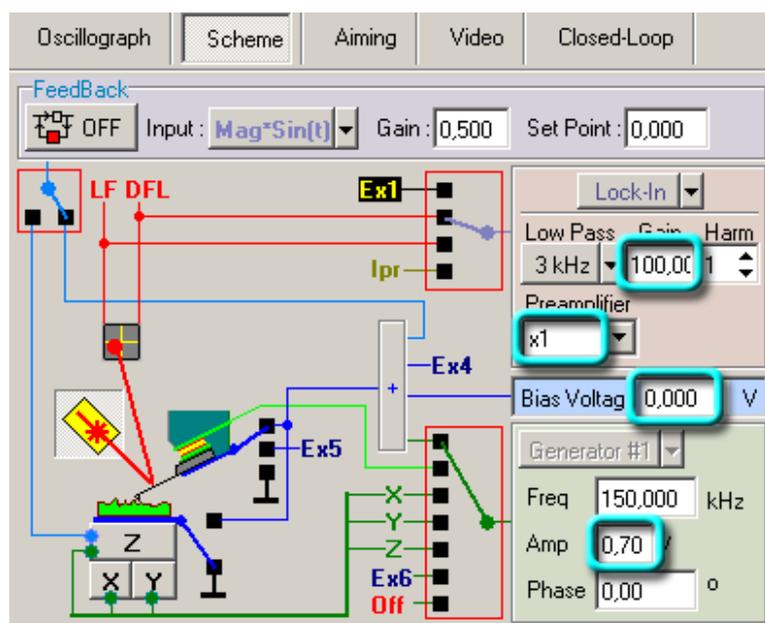


Рис. 9-28. Переключатели настроек первого и второго проходов

2. Измените при необходимости амплитуду выходного сигнала генератора (параметр **Amp**), коэффициенты усиления синхронного детектора (параметр **Gain**) и предусилителя (параметр **Preamplifier**), напряжение смещения (параметр **Bias Voltage**) (Рис. 9-29).

Рис. 9-29. Вкладка **Scheme**

ПРИМЕЧАНИЕ. На втором проходе обратная связь по Z отключена, т.к. Z отслеживается автоматически по результатам первого прохода.

Во время сканирования, для получения наилучшего качества получаемого изображения, можно подбирать следующие параметры:

- dZ** расстояние, на которое отводится зонд во время сканирования на втором проходе. Чем больше **dZ**, тем меньше влияние рельефа поверхности на результаты измерений, проводимых на втором проходе. В то же время, с ростом высоты уменьшается чувствительность метода. В поле ввода **dZ** на панели управления (см. Рис. 9-27) установите желаемую высоту подъема зонда (опускания образца).
- Amp** величина выходного сигнала генератора. Уменьшение величины сигнала генератора и, соответственно, амплитуды колебаний зонда, приводит к увеличению разрешения метода, но, с другой стороны, ухудшается отношение сигнал/шум. Для изменения параметра **Amp** во время сканирования откройте область дополнительных операций и перейдите на вкладку **Scheme** (см. Рис. 9-29). В поле ввода **Amp** установите желаемую величину амплитуды.

Контролировать качество получаемого изображения можно в области отображения 2D-данных сканирования (Рис. 9-25).

Все остальные настройки и изменения параметров в процессе сканирования подробно описаны в п. [7.1.8](#) «Сканирование» на стр. [91](#).

9.5. Сканирующая Емкостная Микроскопия

9.5.1. Краткая характеристика метода

Сканирующая Емкостная Микроскопия (СЕМ) предназначена для исследования распределения поверхностной емкости по образцу. С помощью СЕМ можно изучать локальные диэлектрические свойства приповерхностных слоев образца. Например, распределения легирующих примесей в полупроводниках с ионной имплантацией. Для исключения влияния рельефа поверхности на результаты исследования используется двухпроходная методика.

В процессе сканирования производится следующая процедура. На первом проходе снимается изображение рельефа по полуконтактному методу (Рис. 9-30).

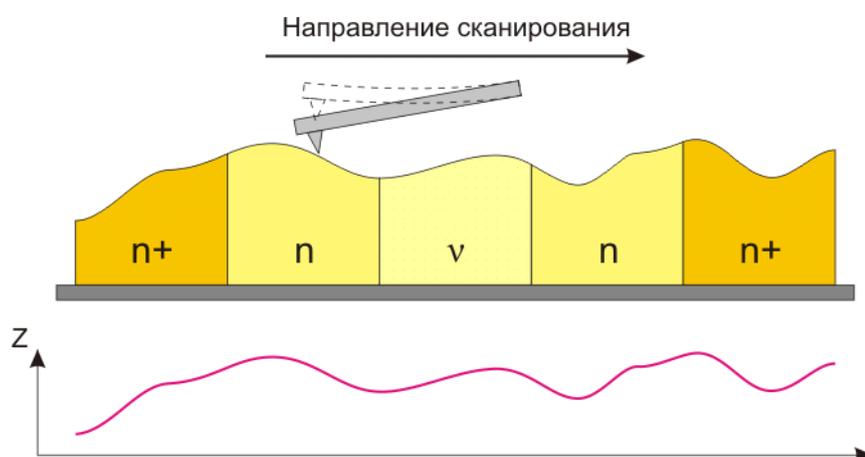


Рис. 9-30. Первый проход.
Получение рельефа поверхности

Затем зондовый датчик отводится от поверхности на расстояние dZ , между зондом и образцом подается напряжение смещения U_0 , переменное напряжение $U_1 \cdot \sin(\omega t)$, и осуществляется повторное сканирование. Для увеличения колебаний зонда на второй гармонике частота ω выбирается равной половине резонансной частоты зондового датчика. На втором проходе датчик движется над поверхностью по траектории, повторяющей рельеф образца (Рис. 9-31). Поскольку в процессе сканирования локальное расстояние между зондовым датчиком и поверхностью в каждой точке постоянно, изменения амплитуды колебаний зонда на частоте 2ω будут связаны с изменением емкости системы зонд-образец.

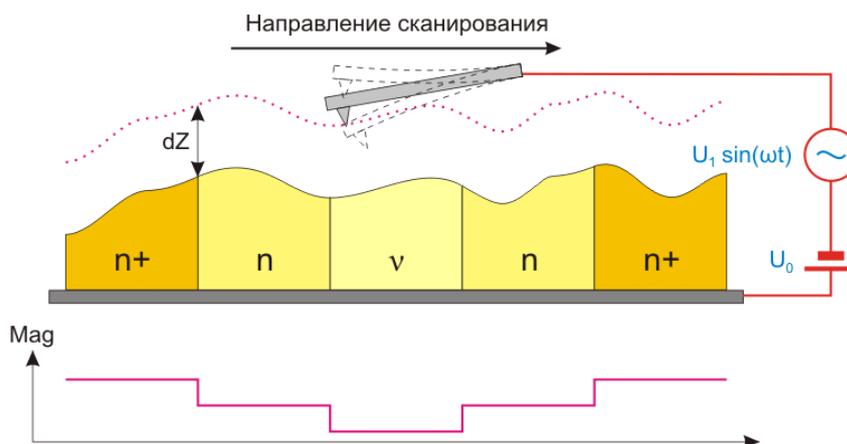


Рис. 9-31. Второй проход
Mag – токовый сигнал пропорциональный амплитуде колебаний зонда

Во время второго прохода расстояние между сканируемой поверхностью и зондовым датчиком поддерживается постоянным. Это расстояние должно быть достаточно большим, чтобы исключить влияние рельефа. В таком случае зонд подвергается воздействию только дальнедействующих сил, основной вклад в которые осуществляется емкостными свойствами образца. Но расстояние dZ не должно быть чрезмерно большим, так как в этом случае уменьшается измеряемый сигнал и ухудшается латеральное разрешение.

9.5.2. Подготовка к измерениям

Основные операции при работе по методу Сканирующей Емкостной Микроскопии

В качестве зондовых датчиков используются стандартные проводящие зондовые датчики для полуконтактных методов.

Операции для подготовки прибора и проведения измерений по методу СЕМ в основном аналогичны операциям, проводимым по Полуконтактному Методу, подробно описанному в части 3, п. 3.1 «Полуконтактный Метод». Ниже приведена последовательность основных операций, подробно описаны особенности настроек прибора и проведения измерений по методу СЕМ.

Для примера работы по методу СЕМ используем интегральную микросхему.

Работу по методу СЕМ можно разделить на следующую последовательность основных операций:

1. Подготовка к работе (см. часть 3. главу 1).
2. Предварительное сканирование образца по Полуконтактному Методу (см. часть 3, п. 3.1).
3. Установка параметров сканирования во втором проходе (см. п. [9.5.3](#) на стр. [146](#)).
4. Сканирование (см. п. [9.5.4](#) на стр. [147](#)).
5. Сохранение полученных данных (см. п. [7.1.9](#) на стр. [95](#)).
6. Завершение измерений (см. п. [7.1.10](#) на стр. [95](#)).

Исходное состояние

Предполагается, что предварительно была выполнена начальная подготовка прибора:

- программа управления запущена;
- прибор включен;
- проводящий зондовый датчик установлен;
- оптическая система регистрации изгибов кантилевера настроена;
- образец установлен;
- измерительная головка установлена;
- образец подведен к зонду на расстояние 1÷2 мм.

Подробное описание перечисленных выше действий см. в части 2, глава 1 «Подготовка к проведению СЗМ измерений».

Произведите предварительное сканирование образца по Полуконтактному Методу (подробное описание см. подробное описание см. п. 7.1 «Полуконтактный Метод» на стр. 76) и выберите область для СЕМ измерений.

9.5.3. Установка параметров сканирования

Установки параметров сканирования в методе СЕМ отличаются от описанных в Полуконтактном Методе (п. 7.1.7 «Установка параметров сканирования» на стр. 87) только выбираемым методом сканирования и установками сканирования на втором проходе. Все остальные установки остаются такими же.

Выбор метода СЕМ

На панели управления в списке **Mode** (выбор методов сканирования) выберите метод **Capacitance Contrast** (Рис. 9-32). При этом будет активизирована панель **II Pass** для настройки параметров на втором проходе.

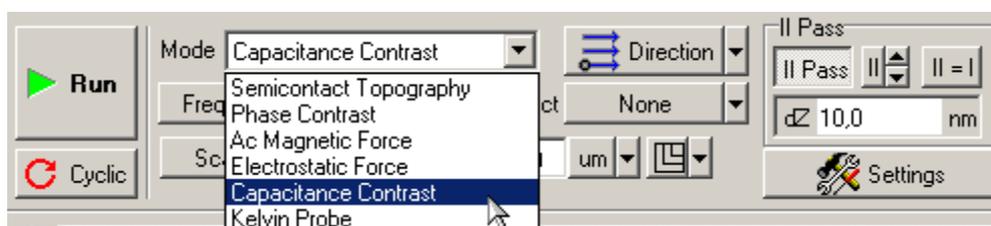


Рис. 9-32. Выбор Сканирующей Емкостной Микроскопии на панели управления вкладки Scan

9.5.4. Сканирование

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

Для запуска сканирования щелкните на кнопке **Run**, расположенной на панели управления вкладки **Scan** (Рис. 9-33).

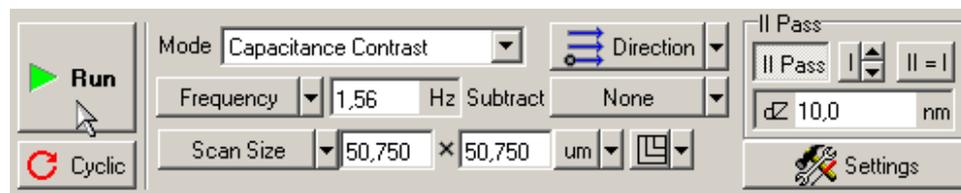


Рис. 9-33

После запуска процесса сканирования:

- начнется построчное сканирование поверхности образца и в области отображения 2D-данных сканирования появятся два изображения: в одном отобразится рельеф поверхности (сигнал **Height**), в другом – отображение распределения z-составляющей градиента поверхностной емкости по образцу (сигнал **Mag**) (Рис. 9-34);

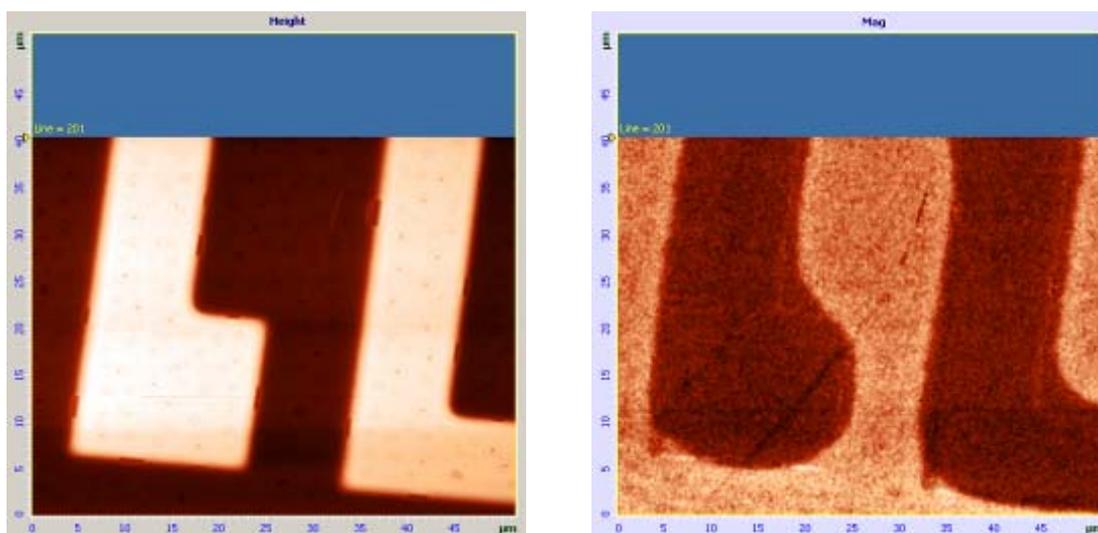


Рис. 9-34. Изображение рельефа и пространственного распределения поверхностной емкости по поверхности интегральной схемы

- на панели отображения 1D-данных будет построчно отображаться измеряемый сигнал, выбранный в области отображения 2D-данных (Рис. 9-35);

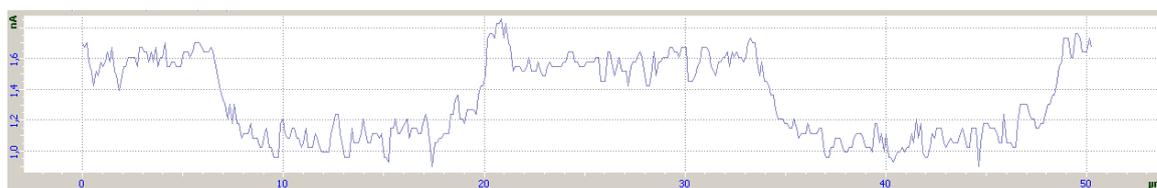


Рис. 9-35. Сигнал Mag

- на панели управления вкладки **Scan** некоторые кнопки исчезнут, и появится ряд новых кнопок: **Pause**, **Restart**, **Stop** (Рис. 9-36).

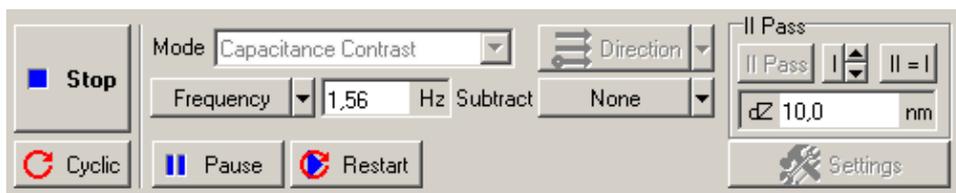


Рис. 9-36. Панель управления вкладки Scan во время сканирования

Если по какой-либо причине необходимо прекратить сканирование, достаточно щелкнуть на кнопке **Stop** или нажать клавишу <Esc>.

Способы улучшения изображения

При выборе метода СЕМ автоматически устанавливаются необходимые параметры для второго прохода. При необходимости коррекции параметров второго прохода выполните следующие действия:

1. Установите один из переключателей в положение «второй проход», как показано на (Рис. 9-37).

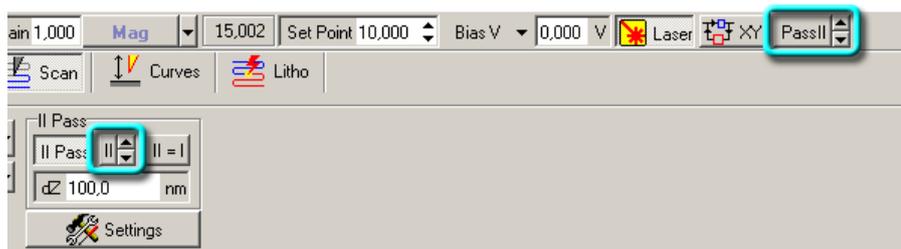


Рис. 9-37. Переключатели настроек первого и второго проходов

2. Измените при необходимости амплитуду выходного сигнала генератора (параметр **Amp**), коэффициенты усиления синхронного детектора (параметр **Gain**) и предусилителя (параметр **Preamplifier**), напряжение смещения (параметр **Bias Voltage**) (Рис. 9-38).

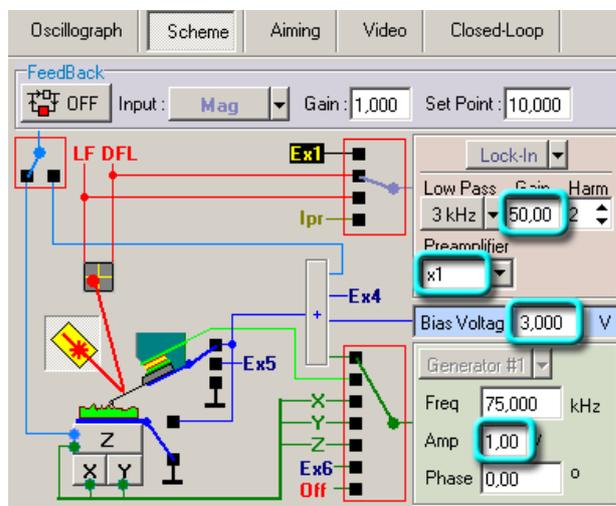
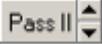


Рис. 9-38. Вкладка Scheme



ПРИМЕЧАНИЕ. На втором проходе обратная связь по Z отключена, т.к. Z отслеживается автоматически по результатам первого прохода.

Во время сканирования, для получения наилучшего качества получаемого изображения, можно подбирать следующие параметры:

- dZ** расстояние, на которое отводится зонд во время сканирования на втором проходе. Чем больше **dZ**, тем меньше влияние рельефа поверхности на результаты измерений, проводимых на втором проходе. В то же время, с ростом высоты уменьшается чувствительность метода. В поле ввода **dZ** на панели управления (см. Рис. 9-36) установите желаемую высоту подъема зонда (опускания образца).
- Amp** величина выходного сигнала генератора. Уменьшение величины сигнала генератора и, соответственно, амплитуды колебаний зонда приводит к увеличению разрешения метода, но, с другой стороны, ухудшается отношение сигнал/шум. Для изменения параметра **Amp** во время сканирования откройте область дополнительных операций и перейдите на вкладку **Scheme** (см. Рис. 9-38). В поле ввода **Amp** установите желаемую величину амплитуды.
- Bias Voltage** изменяя знак и величину напряжения смещения возможно выявлять участки с различным типом проводимости, а так же изменять контраст между ними. Для изменения параметра **Bias Voltage** выберите второй проход сканирования (кнопка  на панели основных параметров). В поле ввода **Bias Voltage** (см. Рис. 9-38) установите желаемую величину напряжения смещения.

Контролировать качество получаемого изображения можно в области отображения 2D-данных сканирования (Рис. 9-34).

Все остальные настройки и изменения параметров в процессе сканирования подробно описаны в п. [7.1.8](#) «Сканирование» на стр. [91](#).

10. Сканирующая туннельная микроскопия

10.1. Метод Постоянного Тока

Метод Постоянного Тока предполагает поддержание в процессе сканирования постоянной величины туннельного тока с помощью системы обратной связи. При этом сигнал обратной связи, подаваемый на сканер для вертикального смещения, отражает рельеф поверхности.

При работе методами сканирующей туннельной микроскопии для поддержания обратной связи используются два сигнала:

- Iprlow** – сигнал, пропорциональный величине туннельного тока, протекающего через зонд. Используется для поддержания обратной связи при подводе образца к зонду;
- Iprlog** – сигнал, пропорциональный логарифму от величины туннельного тока, протекающего через зонд. Используется для поддержания обратной связи при сканировании.

10.1.1. Подготовка к измерениям

Исходное состояние

Предполагается, что предварительно была выполнена начальная подготовка:

- программа управления **Nova** запущена;
- СЗМ контроллер включен;
- блок расширения включен;
- зондовая головка с зондом установлена на сканер;
- образец находится в СЗМ камере и подведен к зонду на расстояние $1 \div 2$ мм.

Основные операции при работе с использованием методов сканирующей туннельной микроскопии

Работу по Методу Постоянного Тока можно разделить на следующую последовательность основных операций:

1. Подвод образца к зонду (см. п. [10.2.1](#) на стр. [151](#)).
2. Установка рабочего уровня коэффициента усиления обратной связи (см. п. [10.2.2](#) на стр. [154](#)).
3. Переключение сигнала обратной связи (см. п. [10.2.3](#) на стр. [155](#)).
4. Установка параметров сканирования (см. п. [10.2.4](#) на стр. [156](#)).
5. Сканирование (см. п. [10.2.5](#) на стр. [159](#)).
7. Сохранение полученных данных (см. п. [10.2.6](#) на стр. [162](#)).
8. Завершение работы (см. п. [10.2.7](#) на стр. [163](#)).

10.2. Переключение прибора для работы по СТМ методам

Чтобы переключить прибор для работы методами туннельной микроскопии щелкните на кнопке выбора электронной конфигурации контроллера и в открывшемся меню выберите **Tunnel Current** (Рис. 10-1).

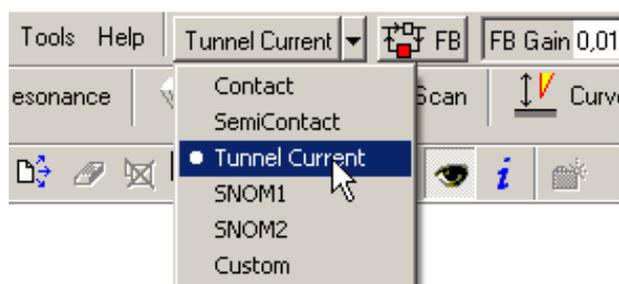


Рис. 10-1

При установке значения **Tunnel Current** автоматически будут выполнены все переключения в приборе, необходимые для измерений методами туннельной микроскопии: на вход обратной связи включается сигнал **IprLog**, генератор устанавливается в положение **Off**, постоянное напряжение **Bias V** подается на образец.

10.2.1. Подвод образца к зонду

Для подвода образца к зонду выполните следующие операции:

1. Перейдите на вкладку **NanoFab** (кнопка  на панели основных операций).
2. Установите значение параметра **Bias V** равным 0.1 В как показано на Рис. 10-2.
3. Установите **IprLow** в качестве входного сигнала обратной связи (Рис. 10-2).



Рис. 10-2

4. Введите значение параметра **Set Point** в поле ввода, расположенном на панели основных параметров (Рис. 10-2).

В качестве начального, рекомендуется установить значение параметра **Set Point** равным 0.1 нА.

Относительно выбора оптимального значения параметра Set Point необходимо иметь в виду следующее:

- Значение параметра **Set Point** определяет величину туннельного тока между зондом и поверхностью образца.

- Чем больше величина **Set Point**, тем больше величина туннельного тока, тем сильнее взаимодействие поверхности образца и острия зонда. Таким образом, меняя величину параметра **Set Point**, можно изменять и устанавливать определенный уровень силы взаимодействия между зондом и поверхностью. И, соответственно, можно получать изображения рельефа поверхности при определенных уровнях взаимодействия между зондом и поверхностью.
 - Если установить слишком большое значение **Set Point**, что соответствует значительному туннельному току между острием и поверхностью образца, то при сканировании это может привести к разрушению как зонда, так и исследуемой поверхности.
 - При слишком малой величине **Set Point** работа системы обратной связи может оказаться неустойчивой.
5. Замкните цепь обратной связи, нажав кнопку . В результате Z-секция сканера выдвинется на максимальную величину, что отобразится на индикаторе выдвижения сканера, который находится в нижнем левом углу главного окна программы (Рис. 10-3).



Рис. 10-3. Индикатор выдвижения сканера

6. Перейдите в программу управления координатным столом **XYZ stage control**. Запустите процедуру подвода, щелкнув на кнопке **Landing**.
- Включатся пьезодвигатели, которые начнут перемещать образец по направлению к зонду.
- В процессе подвода следите за изменениями сигнала **IprLow** по осциллографу на панели дополнительных операций (открывается кнопкой  в правом верхнем углу главного окна программы), а также за состоянием индикатора выдвижения сканера и ждите окончания процесса подвода.
- Через некоторое время, при правильной настройке параметров подвода, подвод закончится и произойдет следующее:
- сигнал **IprLow** увеличится до значения параметра **Set Point**. Обратная связь будет поддерживать Z-сканер в положении, при котором сигнал **IprLow** равен **Set Point**, причем это положение будет соответствовать примерно половине диапазона выдвижения сканера;
 - длина цветной полосы индикатора уменьшится и займет некоторое промежуточное положение (Рис. 10-4);
 - пьезодвигатели остановаются;
 - увеличение сигнала **IprLow** до значения параметра **Set Point** будет отображено на зависимости **IprLow(t)** в программном осциллографе;

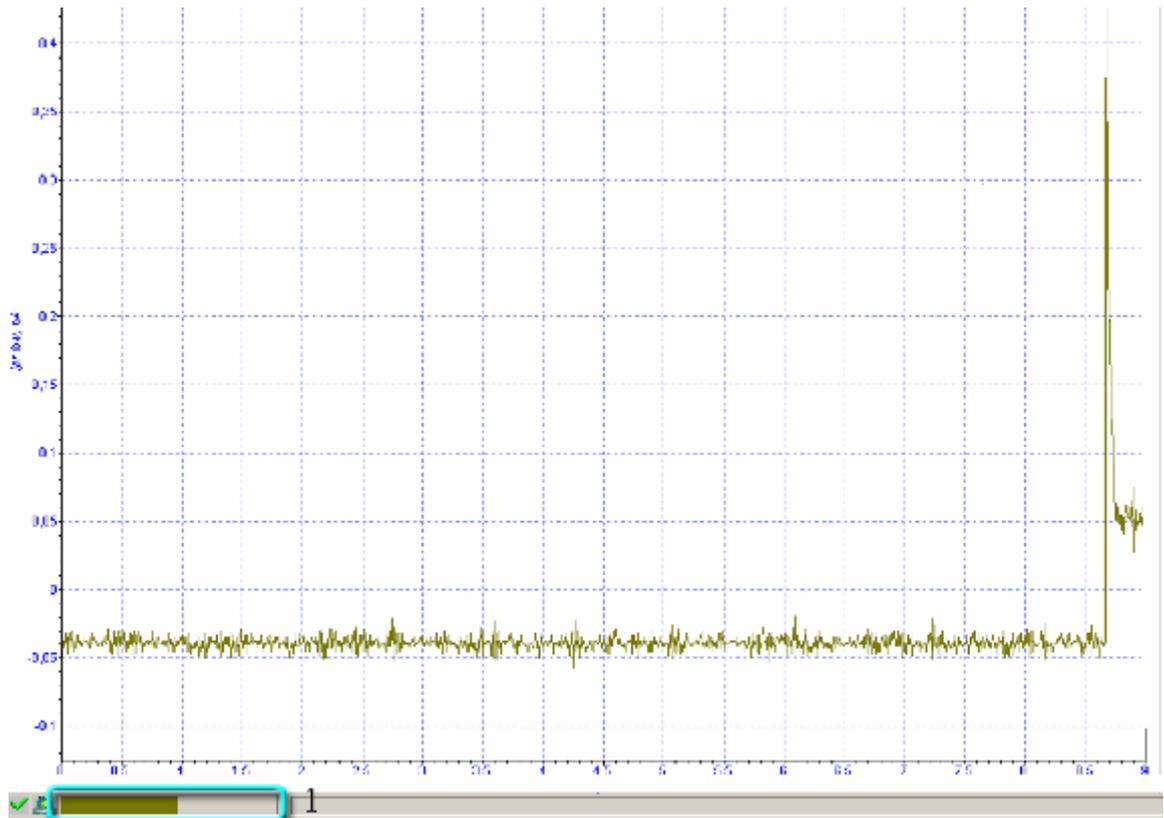


Рис. 10-4. Окончание процесса подвода
1 – индикатор выдвижения сканера

Возникновение генерации

Может оказаться, что после того как был выполнен подвод, и произошло увеличение сигнала **IprLow** до значения параметра **Set Point**, на зависимости **IprLow(t)** наблюдается значительное увеличение переменной составляющей сигнала **IprLow** (например, как это показано на Рис. 10-5). Это означает, что имеет место генерация в системе обратной связи из-за слишком большого коэффициента усиления (параметр **FB Gain**). В этом случае необходимо уменьшить величину параметра **FB Gain** до $0.5 \div 0.7$ от порогового. Регулировка параметра **FB Gain** рассматривается ниже, в п. [10.2.2](#) «Установка рабочего уровня коэффициента усиления обратной связи» на стр. [154](#).

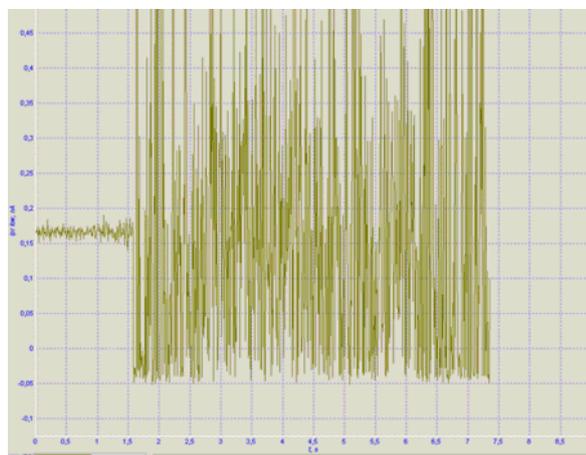


Рис. 10-5

10.2.2. Установка рабочего уровня коэффициента усиления обратной связи

Чем больше величина коэффициента усиления (параметр **FB Gain**), тем выше скорость отработки обратной связи. Однако, при достаточно большой величине коэффициента усиления (назовем ее пороговой), режим работы системы обратной связи становится неустойчивым, амплитуда сигнала **IprLow** значительно увеличивается, т.е. начинается «генерация».

Для устойчивой работы рекомендуется устанавливать уровень коэффициента усиления не более $0.6 \div 0.7$ от порогового значения, при котором начинается генерация.

Для установки рабочего уровня коэффициента усиления обратной связи:

1. Дважды щелкните левой клавишей мыши в поле ввода параметра **FB Gain** на панели основных операций (Рис. 10-6). С помощью появившегося бегунка увеличивайте величину **FB Gain**, следя за уровнем сигнала **IprLow** при помощи программного осциллографа.



*ПРИМЕЧАНИЕ. Те же замечания применимы и к сигналу **IprLog**.*

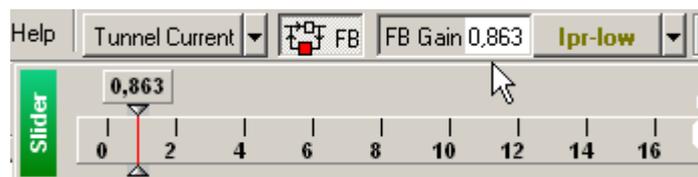


Рис. 10-6

2. Определите значение коэффициента **FB Gain**, при котором начинается генерация.

Начало генерации регистрируется по резкому увеличению переменной составляющей сигнала **IprLow** (Рис. 10-7).

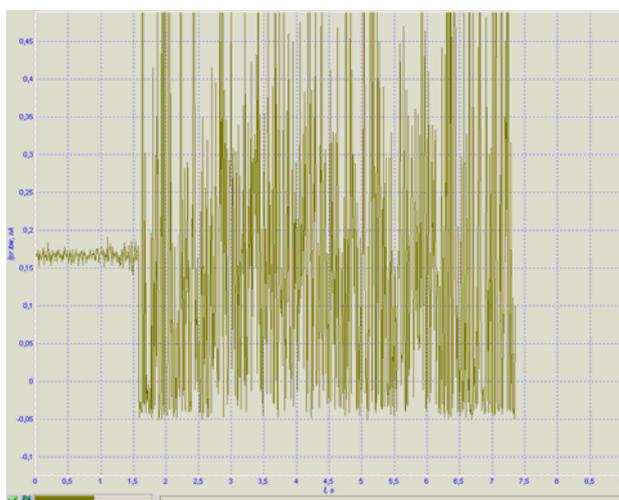


Рис. 10-7

3. Уменьшая параметр **FB Gain**, установите в качестве рабочей величины значение равное $0.6 \div 0.7$ от значения **FB Gain**, при котором начинается генерация сигнала **lprLow**.

10.2.3. Переключение сигнала обратной связи

Поддержание обратной связи возможно по одному из двух входных сигналов: **lprLow** или **lprLog**. По умолчанию при подводе образца к зонду используется сигнал **lprLow**; при сканировании используется сигнал **lprLog**. Переключение осуществляется автоматически.

Чтобы вручную переключить входной сигнал обратной связи (например, при сканировании слабопроводящих образцов лучше использовать сигнал **lprLow**), выполните следующие действия:

1. Разомкните обратную связь (кнопка  не нажата) (Рис. 10-8).



Рис. 10-8

2. Измените входной сигнал обратной связи (Рис. 10-9).

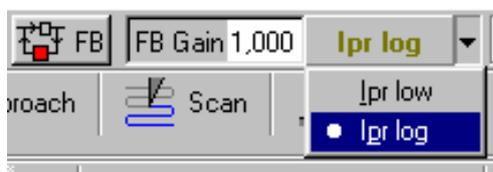


Рис. 10-9

3. Установите значение параметра **Set Point** равным:
 - 1 нА для сигнала **lprLog** (Рис. 10-10);
 - 0.1 нА для сигнала **lprLow**.



Рис. 10-10

4. Замкните обратную связь, нажав кнопку  (Рис. 10-11).



Рис. 10-11

10.2.4. Установка параметров сканирования

Перейдите на вкладку **Scan**, щелкнув на кнопке **Scan** на панели основных операций.

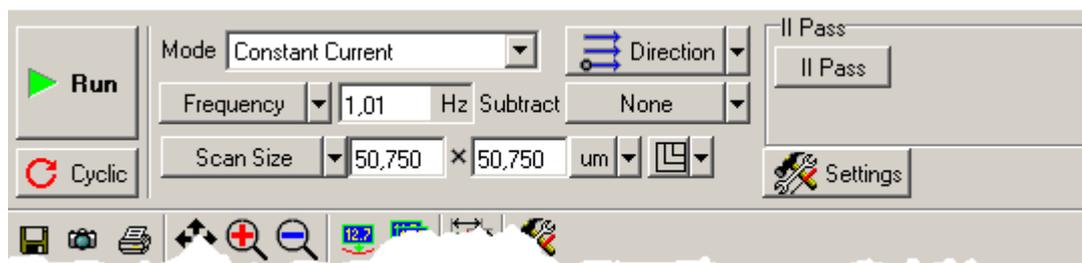


Рис. 10-12

В верхней части вкладки **Scan** находится панель управления параметрами сканирования (Рис. 10-12). Под ней расположена панель отображения 1D-данных сканирования, в которой при сканировании будет построчно отображаться измеряемый сигнал. Ниже находится панель отображения 2D-данных сканирования.

Выбор СЗМ метода

Для установки рабочего СЗМ метода щелкните на поле **Mode** и в открывшемся списке (Рис. 10-13) выберите **Constant Current**. При этом в приборе автоматически будут выполнены соответствующие переключения.

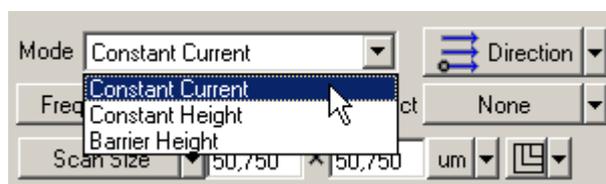


Рис. 10-13

Выбор области сканирования

Рекомендации по выбору начального размера области сканирования:

- Если о свойствах поверхности образца имеется некоторая предварительная информация, и есть уверенность в том, что перепад высот ожидаемого рельефа не выходит за пределы z-диапазона сканера, можно установить максимальное поле сканирования.
- В случае образца, о свойствах поверхности которого ничего не известно, рекомендуется начинать сканирование с области, имеющей небольшие размеры, например, около $0.5 \div 1$ мкм. По результатам сканирования небольшой области можно подобрать и установить оптимальные значения таких параметров, как скорость сканирования, **Set Point**, **FB Gain**. Затем можно изменить область сканирования.

По умолчанию, устанавливается максимальный для данного сканера размер области сканирования (параметр **Scan Size**).

Чтобы изменить размер и выбрать область сканирования в пределах максимально возможной, выполните следующие действия:

1. На панели инструментов области просмотра сканированных изображений (Рис. 6-12) щелкните на кнопке  изменения размера и положения области сканирования.
2. При помощи мыши измените размер и положение области сканирования (поз. 1 на Рис. 6-12).



ПРИМЕЧАНИЕ. Изменение размера области сканирования будет автоматически отражаться в полях ввода параметра **Scan Size** (Рис. 10-12).

3. Щелкните на кнопке . Проверьте, что в пределах выбранной области сканирования зонд всюду достает до поверхности и нигде не «врезается» в нее. Для этого нажав левую клавишу мыши и удерживая ее, перемещайте курсор (поз. 2 на Рис. 6-12) в пределах выбранной области сканирования. Перемещение курсора отражает реальное перемещение зонда относительно поверхности образца. Степень выдвигания пьезосканера контролируйте по индикатору в нижней части окна программы.

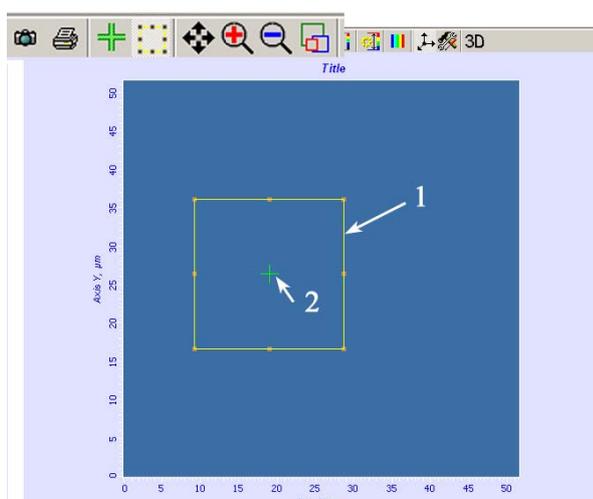


Рис. 10-14. Область просмотра сканированных изображений
1 – границы выбранной области сканирования;
2 – курсор, показывающий положение зонда

Выбор области сканирования завершен.

Число точек по осям X и Y (параметр **Point Number**), размер сканированного изображения (параметр **Scan Size**) и шаг сканирования (**Step Size**) задаются при помощи кнопки со списком выбора параметра (Рис. 10-15), и расположенных рядом полей ввода, в которых отображается текущее значение установленного параметра.

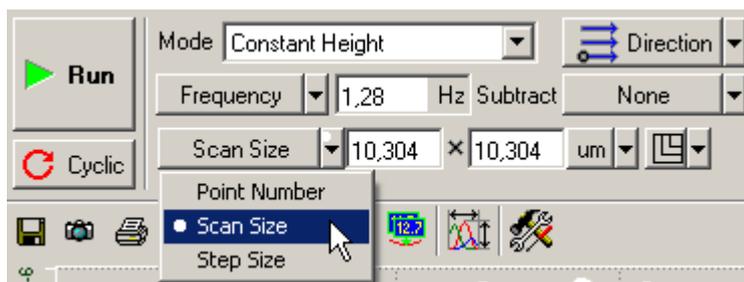


Рис. 10-15

Изменить значение параметра можно одним из приведенных ниже способов:

- дважды щелкните на соответствующем поле ввода и, при помощи появившегося бегунка, установите необходимое значение параметра.
- введите необходимое значение в поле ввода с клавиатуры.

При установке параметров **Point Number**, **Scan Size**, **Step Size** следует иметь ввиду что:

- При изменении **Point Number**: **Scan Size** изменяется;
Step Size не меняется.
- При изменении **Scan Size**: **Step Size** изменяется;
Point Number не меняется.
- При изменении **Step Size**: **Scan Size** изменяется;
Point Number не меняется.

Установка скорости 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 развитый рельеф со значительными перепадами по высоте.

Рекомендуется установить частоту сканирования строк (параметр **Frequency**) в пределах 0.5÷2 Гц. Частота сканирования автоматически устанавливается в пределах этого диапазона при загрузке программы.

Кнопка выбора временного параметра находится во второй строке панели управления вкладки **Scan**. На ней отображается выбранный параметр (на примере на Рис. 10-16 это **Frequency**).

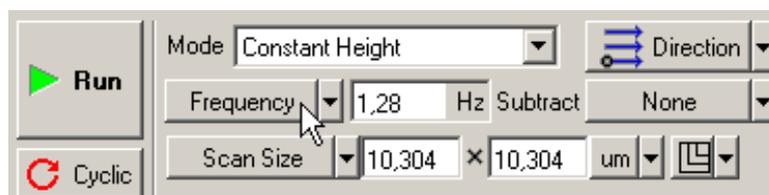


Рис. 10-16

Рядом с кнопкой выбора находится поле ввода, в котором отображается текущее значение установленного параметра.

10.2.5. Сканирование

В качестве примера рассмотрим процесс сканирования образца высокоориентированного пиролиитического графита (ВОПГ).

Запуск сканирования

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

Для запуска сканирования щелкните на кнопке **Run**, расположенной слева на панели управления вкладки **Scan**.

После нажатия кнопки **Run**:

- Начнется построчное сканирование зондом поверхности образца и в отображения 2D-данных сканирования, строчка за строчкой, начнет появляться изображение сканируемой поверхности (Рис. 10-17), на нашем примере изображение поверхности графита;

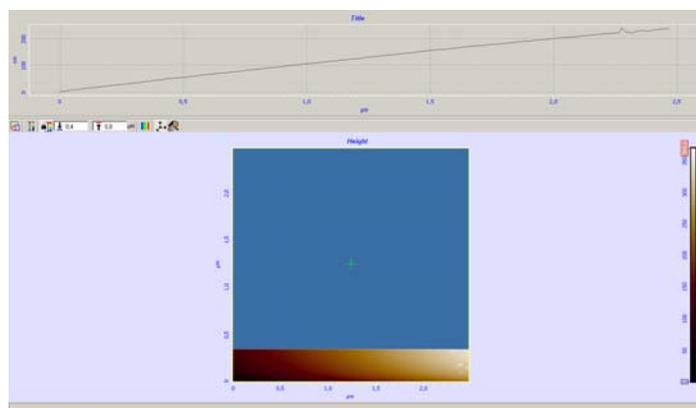


Рис. 10-17

- На панели отображения 1D-данных будут отображаться поочередно линии профиля рельефа сканируемой поверхности (Рис. 10-17);
- На панели управления вкладки **Scan** некоторые кнопки исчезнут, и появится ряд новых кнопок (Рис. 10-18): **Pause**, **Restart**, **Stop**.

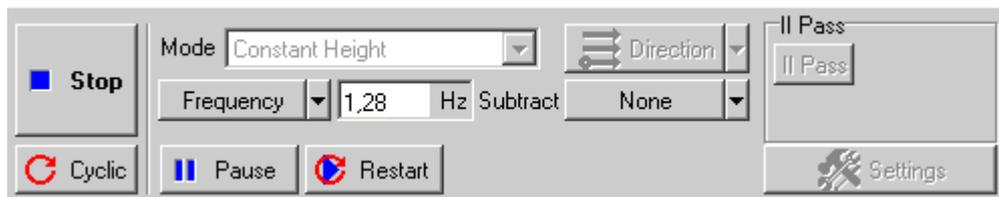


Рис. 10-18

Если по какой-либо причине необходимо прекратить сканирование, достаточно щелкнуть на кнопке **Stop** или нажать клавишу <Esc>.

Изменение параметров в процессе сканирования

Вычитание наклона

На приведенном выше примере (Рис. 10-17) видно, что образец имеет некоторый наклон по оси X.

Наклон можно вычесть непосредственно в процессе сканирования (т.е. в режиме on-line), используя кнопку **Subtract**. По умолчанию она находится в состоянии **None** (Рис. 10-19).

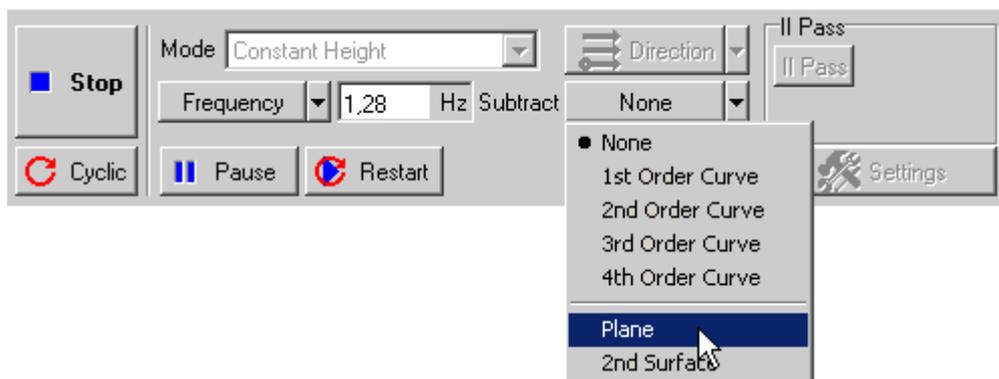


Рис. 10-19

Если щелкнуть на этой кнопке и в раскрывшемся списке выбрать **Plane**, то будет выполнено вычитание плоскости. Изображение, которое до этой процедуры имело вид, как на Рис. 10-17 будет иметь вид примерно, как на Рис. 10-20. На осциллографе текущая строка профиля сканирования также будет отображаться с учетом вычитания наклона.

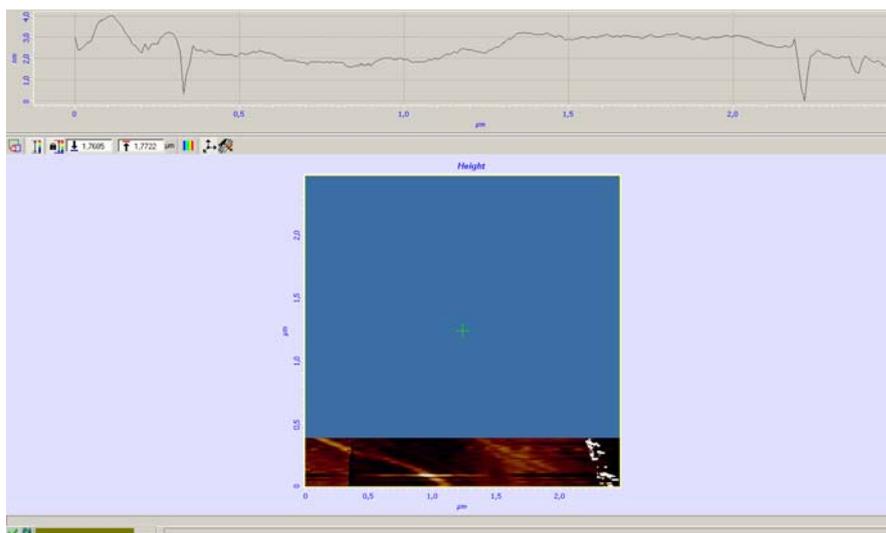


Рис. 10-20

Остальные функции **Subtract** см. в книге «Программное обеспечение для СЗМ», часть 1.

На Рис. 10-21 приведен пример сканированного изображения после вычитания плоскости.

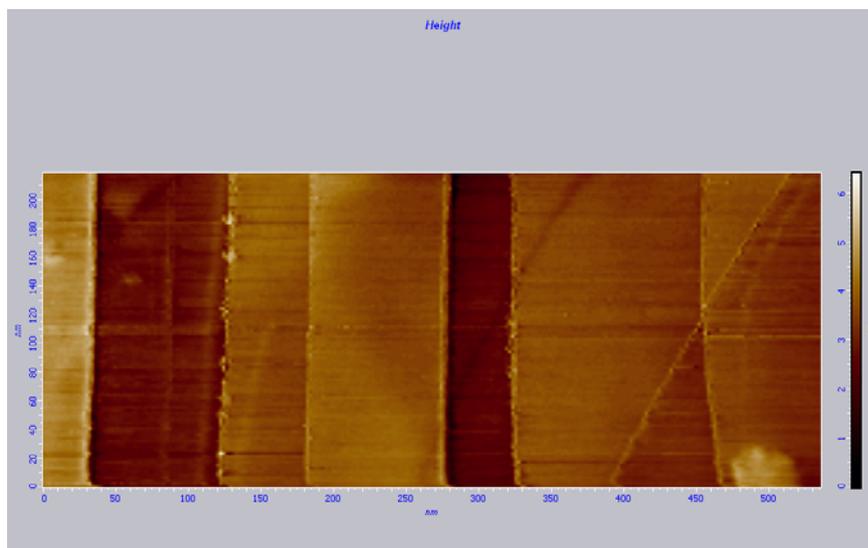


Рис. 10-21. Пример сканированного изображения



*ПРИМЕЧАНИЕ. Изменения, произведенные со сканированным изображением при помощи функции **Subtract**, не сохраняются в полученных фреймах.*

Настройка параметров сканирования

Качество получаемого изображения поверхности существенно зависит от таких параметров, как частота сканирования **Frequency**, величина рабочей точки **Set Point**, коэффициент усиления обратной связи **FB Gain**, величина постоянного напряжения **BV**. Любой из этих параметров можно изменять непосредственно в процессе сканирования.

При подборе параметров сканирования следует помнить, что одними из главных факторов, определяющих качество получаемых в СТМ результатов, являются острота зонда и прочность фиксации зонда в зажиме.

Некоторые рекомендации по оптимизации параметров 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.

Удобно начинать исследовать образец при низкой скорости сканирования, постепенно увеличивая ее до тех пор, пока линия профиля рельефа не начнет искажаться: это значение **Frequency** следует немного уменьшить, чтобы получить хорошее изображение.

10.2.6. Сохранение полученных данных

После завершения сканирования поверхности образца, полученные данные изображения поверхности хранятся в оперативной памяти. Каждому сканированному изображению поверхности соответствует отдельный фрейм. Нумерация фреймов соответствует порядку их получения.

Для записи полученных данных на жесткий диск выполните следующие действия:

1. В главном меню выберите **File** → **Save**.
2. В открывшемся диалоговом окне выберите каталог, в котором будут храниться полученные данные (по умолчанию это каталог C:\Program Files\NT-MDT\Nova).
3. Введите название файла и сохраните его с расширением ***.mdt**.



*ПРИМЕЧАНИЕ. Сканированное изображение по умолчанию сохраняется в файл **NoNameXX.mdt**, где **XX** – порядковый номер файла в папке **Nova**.*

Если данные не были сохранены, то при выходе из программы управления они будут потеряны.

10.2.7. Завершение работы

Для выключения микроскопа выполните следующие действия:

1. Отведите образец от зонда на расстояние не менее 2÷3 мм. Для этого:
 - a. Перейдите в программу XYZ stage control;
 - b. Щелкните на кнопке . По достижении нужного расстояния, остановите перемещение кнопкой .
2. Перейдите в программу Nova. Разомкните цепь обратной связи (кнопка  не нажата).
3. Выключите СЗМ контроллер.
4. Выключите блоки расширения.
5. Выключите контроллер координатного стола СЗМ камеры.
6. Выключите виброзащиту.
7. Закройте программу управления.

10.3. Метод Постоянной Высоты. Получение атомарного разрешения на графите

При использовании Метода Постоянной Высоты зонд перемещается только в плоскости, так что изменения тока между острием зонда и поверхностью образца отражают рельеф поверхности.



ВНИМАНИЕ! При использовании Метода Постоянной Высоты ("летающей иглы") можно сканировать только очень гладкие поверхности безо всяких наклонов, т.к. обратная связь во время сканирования практически отключается. Поэтому зонд может «врезаться» в образец, если поверхность образца не достаточно гладкая.

Предварительно, должна быть выполнена подготовка и проведены измерения рельефа поверхности по Методу Постоянного Тока (см. п. [10.1](#) на стр. [150](#)):

- выбрана конфигурация **Tunnel Current**;
- выполнен подвод образца к зонду;
- установлен рабочий уровень коэффициента усиления обратной связи;
- выбран метод измерения **Constant Current**;
- выбраны и установлены параметры сканирования (размер скана, число точек, скорость);
- выполнено сканирование, получено изображение рельефа поверхности, выполнена настройка параметров сканирования.

Работа по Методу Постоянной Высоты будет рассмотрена на примере получения атомарного разрешения при сканировании образца высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ).

Установка параметров сканирования:

1. Перейдите на вкладку **SCAN** (кнопка **Scan** на панели основных операций).
2. В раскрывающемся списке **Mode** выберите метод **Constant Height** (Рис. 10-22).

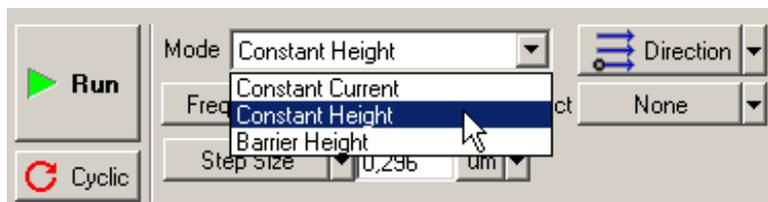


Рис. 10-22

При этом автоматически будут выполнены переключения в приборе, необходимые для реализации выбранной методики, а именно:

- коэффициент усиления обратной связи уменьшится до 0.01;
- в качестве отображаемого при сканировании сигнала будет выбран сигнал **IprLow**. В этом можно убедиться, щелкнув на кнопке  **Settings**, которая открывает диалоговое окно **Scan Settings** (Рис. 10-23).

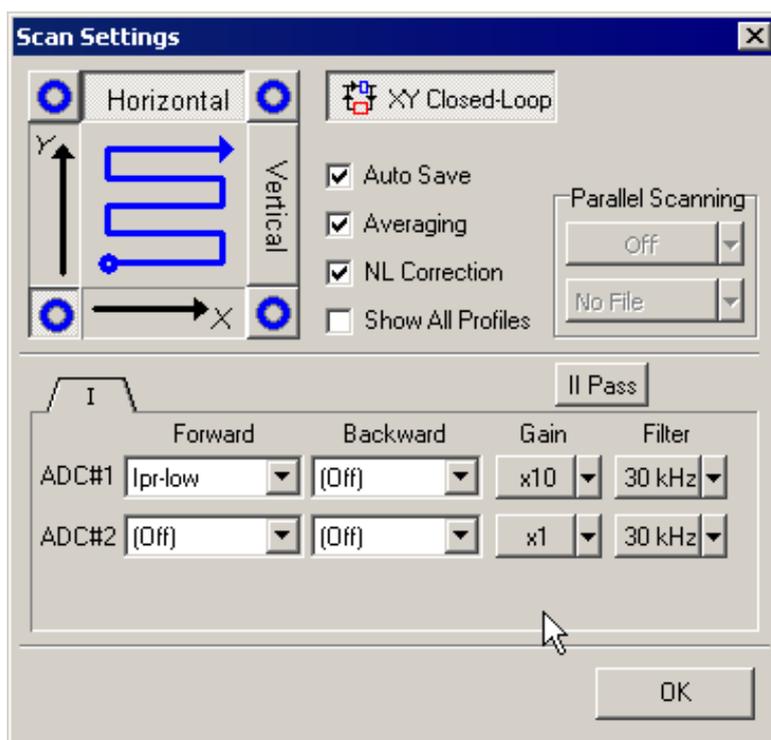


Рис. 10-23



ПРИМЕЧАНИЕ. При обратном переключении для измерений по методу постоянного тока (**Constant Current**), не забудьте увеличить коэффициент усиления обратной связи **FB Gain**, так как автоматически ему не будет присвоено прежнее значение.

3. На панели управления параметрами сканирования установите следующие параметры (Рис. 10-24, Рис. 10-25):
 - число точек сканирования (**Point Number**) равным 128;
 - шаг сканирования (**Step Size**) равным $0.2 \div 0.5$ А;
 - максимальную скорость сканирования;
 - вычитание плоскости **Plane**.



ПРИМЕЧАНИЕ. Значения минимального шага и максимальной скорости сканирования могут отличаться для разных приборов.



Рис. 10-24



Рис. 10-25



ПРИМЕЧАНИЕ. Линейные размеры области сканирования не должны превышать нескольких нанометров.

4. Установите коэффициент усиления АЦП равным 10. Для этого:
 - a. Зайдите в меню настроек  ;
 - b. В появившемся диалоговом окне в раскрывающемся списке кнопки **Gain** выберите коэффициент **x10** (Рис. 10-26).

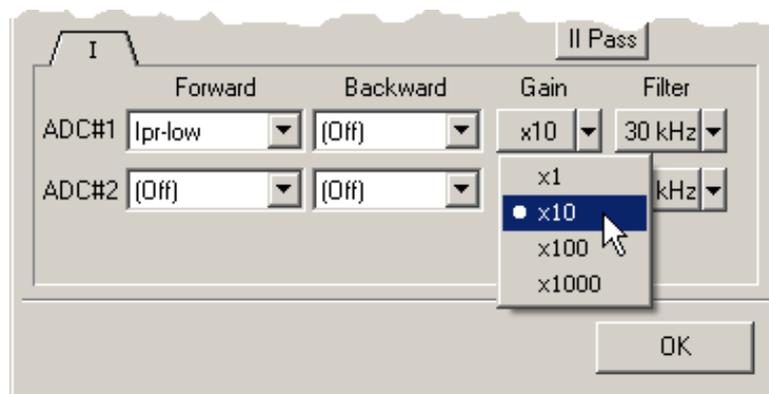


Рис. 10-26

5. Выберите плоский участок поверхности на предыдущем сканированном изображении. Для этого:
 - a. На панели инструментов окна просмотра сканированных изображений щелкните на кнопке выбора области сканирования (Рис. 10-27). Выберите в раскрывающемся списке пункт **Active Frame**. При этом сканированное изображение будет занимать всю возможную область выбора сканирования.

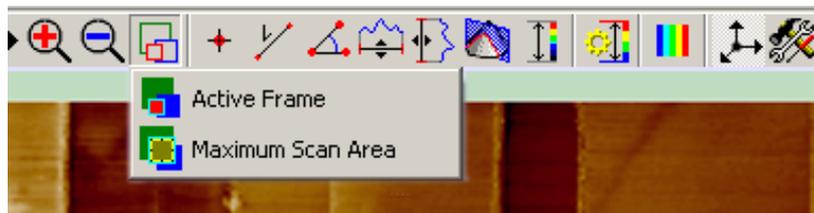


Рис. 10-27

- b. Щелкните на кнопке  изменения размера и положения области сканирования.
 - c. В области последнего отсканированного изображения, желательно вблизи центра, выберите ровный и плоский участок, перемещая рамку выбора области сканирования и изменяя ее размеры (Рис. 10-28).

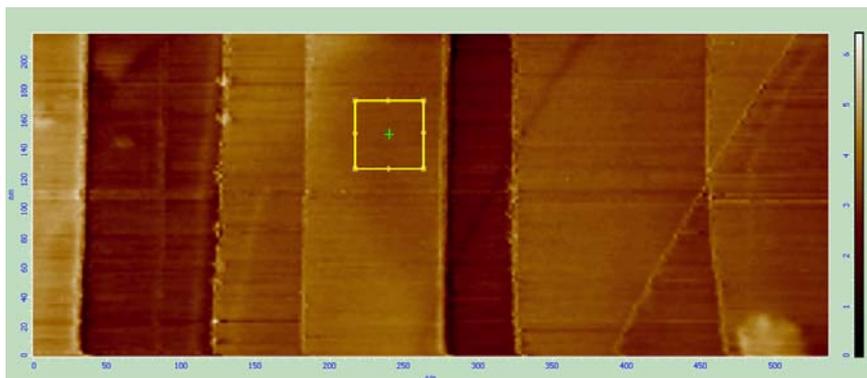


Рис. 10-28

6. Для запуска сканирования щелкните на кнопке **RUN**.

Для получения лучшего результата попробуйте изменить параметры **Step Size**, **Scan Rate**, **Point Number**, **Set Point**, **FB Gain**.

На Рис. 10-29 приведен пример изображения поверхности пиролитического графита (ВОПГ) с атомарным разрешением, полученного с помощью СТМ.

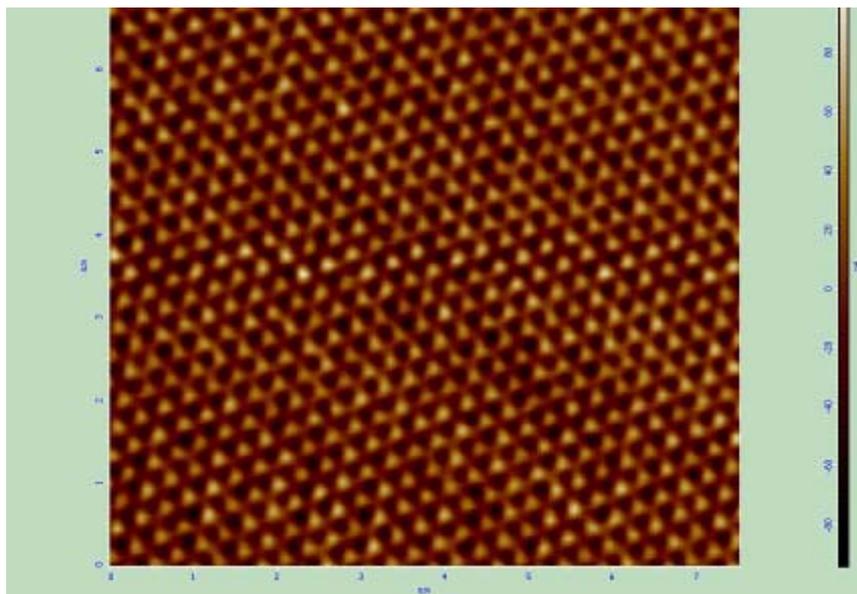


Рис. 10-29. Изображение поверхности ВОПГ

10.4. СТМ Спектроскопии

10.4.1. I(V) спектроскопия

Процедура $I(V)$ спектроскопии состоит в получении вольт-амперных характеристик (ВАХ) туннельного перехода зонд-образец.

Перед проведением $I(V)$ спектроскопии предварительно необходимо провести СТМ измерения рельефа исследуемого участка (см. п. 10.1 «Метод Постоянного Тока» на стр. 150).

1. По окончании сканирования перейдите на вкладку **Curves** (кнопка  Curves на панели основных операций).

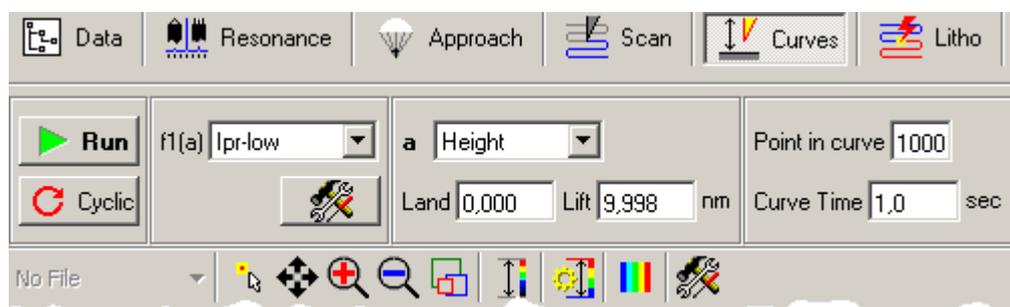


Рис. 10-30

2. На панели управления вкладки **Curves** выберите в качестве изменяемого параметра (параметр **a** на Рис. 10-31) – **Biase Voltage**, а в качестве измеряемого сигнала (параметр **f1(a)**) – **Ipr Low**.

- Установите диапазон изменения напряжения (параметры: **From**, **To**) от -1 В до +1 В.

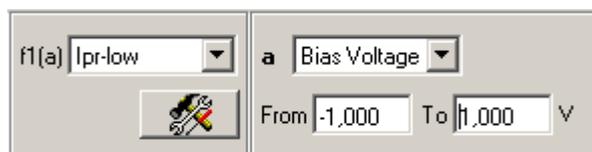


Рис. 10-31

- Курсором выберите на изображении поверхности точку, в которой предполагается провести измерения.
- Щелкните на кнопке **Run**.

По завершении измерений появится дополнительное окно, в котором отобразится измеренная характеристика. Примерный вид зависимости показан на рисунке Рис. 10-32.

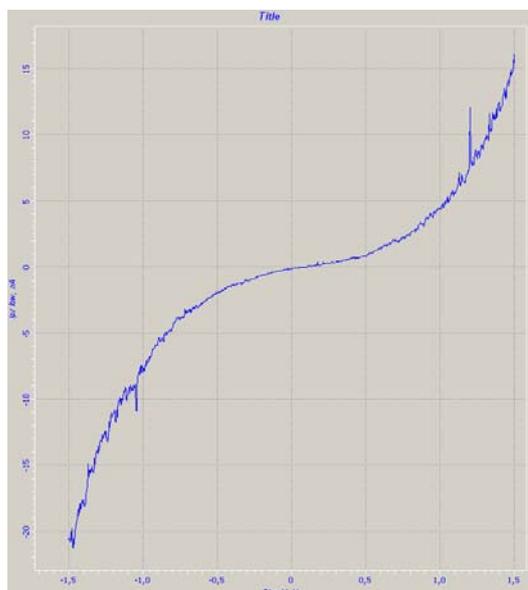


Рис. 10-32

]Подробное описание кнопок вкладки **Curve** можно найти в книге «Программное обеспечение для СЗМ», часть 1.

10.4.2. Модуляционная методика. Отображение Работы Выхода

Barrier Height или **dI/dZ** спектроскопия - отображение локальной высоты потенциального барьера электронов (работы выхода).

Перед тем как измерять **dI/dZ**, проведите измерения рельефа поверхности (см. п. [10.1](#) «Метод Постоянного Тока» на стр. [150](#)). Подберите параметры сканирования так, чтобы получить изображение как можно лучшего качества.

Процедура измерений методом **dI/dZ** спектроскопии состоит из следующих основных операций:

1. Измерение рельефа поверхности (см. п. [10.1](#) «Метод Постоянного Тока» на стр. [150](#)).
2. Установка СЗМ метода.
3. Установка рабочей частоты пьезогенератора.
4. Сканирование.

10.4.2.1. Установка СЗМ метода

1. Перейдите на вкладку **Scan** (кнопка **Scan** на панели основных операций).
2. В раскрывающемся списке **Mode** выберите метод **Barrier Height**.

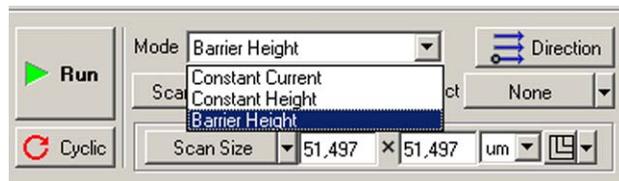


Рис. 10-33

3. На схеме прибора подключите выход генератора к Z-обкладке сканера (Рис. 10-34).

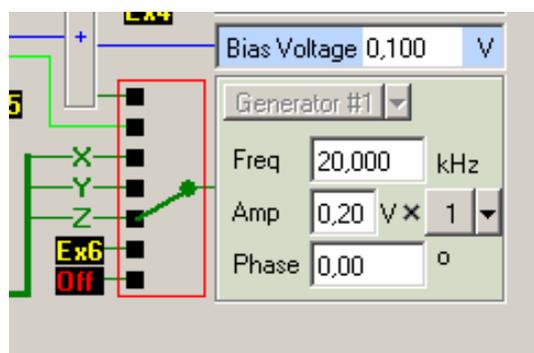


Рис. 10-34

- В диалоговом окне **Scan Settings** (вызывается кнопкой ) , в качестве отображаемых при сканировании на прямом проходе сигналов выберите **Height** и **Mag** (пропорционален локальной высоте потенциального барьера) (Рис. 10-35).

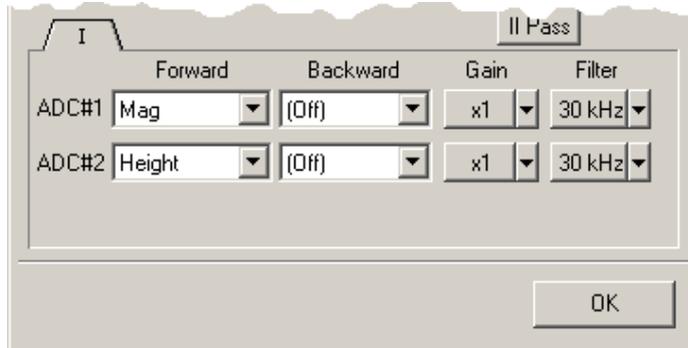


Рис. 10-35

- Переведите переключатель входа синхронного детектора на измерение тока, для этого:
 - Откройте панель **Дополнительных операций**, щелкнув на кнопке  в правом верхнем углу главного окна программы управления.
 - Откройте схему прибора (вкладка **Scheme**).
 - Установите переключатель входа синхронного детектора в положение **Ipr** (Рис. 10-36).

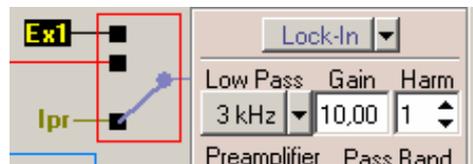


Рис. 10-36

10.4.2.2. Установка рабочей частоты пьезогенератора

- Перейдите на вкладку **Resonance** (Рис. 10-37).
- Сбросьте флажок **Auto peak find**.
- Установите диапазон изменения частоты генератора (поля ввода **From**, **To**) от 19 до 23 кГц.
- Установите переключатель фильтра **Low Pass** на значение 100 Гц.

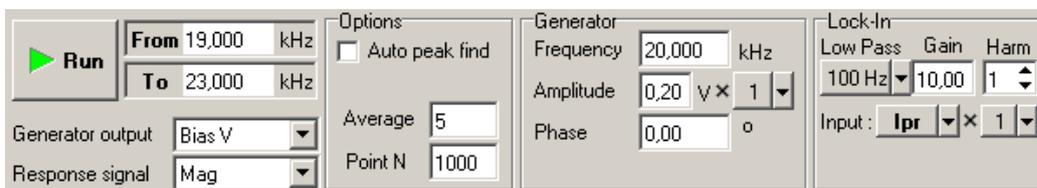


Рис. 10-37

5. Щелкните на кнопке **Run**.

В окне осциллографа отобразится резонансная кривая, имеющая вид как на Рис. 10-38.



Рис. 10-38

6. Настройте частоту генератора на любой из пиков.

7. Изменяя напряжение генератора (параметр **Amplitude**) и наблюдая за изменением сигнала **Mag** на осциллографе в области дополнительных операций, выставьте величину измеряемого сигнала **Mag** равной $2\div 5$ нА (Рис. 10-39).

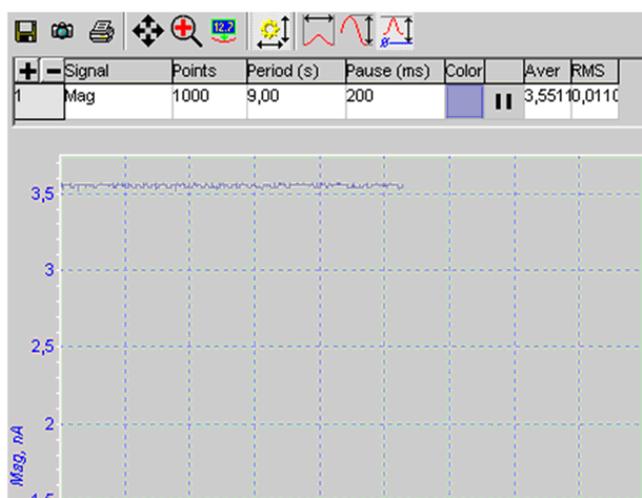


Рис. 10-39

Если при максимальном значении параметра **Amplitude** сигнал **Mag** меньше $2\div 5$ нА, усилить измеряемый сигнал можно, изменив параметр **Gain** синхронного детектора.

10.4.2.3. Сканирование

1. Перейдите на вкладку **Scan** (кнопка  Scan на панели основных операций).
2. Запустите сканирование, щелкнув на кнопке **Run**.

Следует обратить внимание на то, что величина измеряемого сигнала dI/dZ определяется не только локальной высотой потенциального барьера, но и локальной жесткостью образца - для относительно "мягких" образцов изменение величины туннельного зазора dZ_{eff} оказывается меньше величины смещения кончика зонда dZ , что особенно сказывается на близких расстояниях.

На Рис. 10-40 приведены изображение поверхности пиролитического графита (окно **Height**) и изменение сигнала **Mag**, пропорционального величине работы выхода для данной поверхности, полученные одновременно.

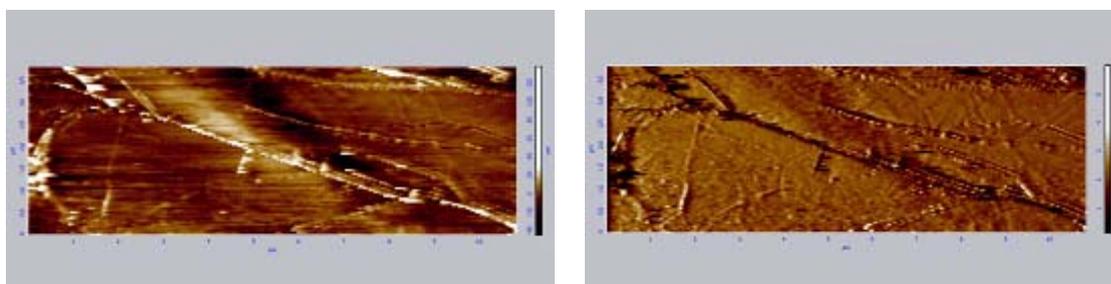


Рис. 10-40. Изображение поверхности пиролитического графита (слева) и изменение сигнала Mag (справа)

11. Дополнительные операции

11.1. Управление координатным столом

Управление координатными столами НТК осуществляется из программы XYZ stage control.

Запуск программы управления координатным столом

1. Включите контроллер координатного стола.
2. Запустите программу управления координатным столом одним из следующих способов:
 - с помощью файла **XYZ_Stage.exe**.
 - с помощью ярлыка на рабочем столе.

После успешного запуска на экране появится окно программы управления XYZ stage control (Рис. 11-1).

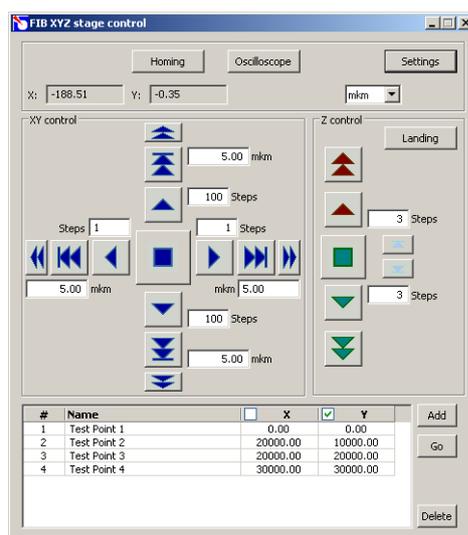


Рис. 11-1. Окно программы управления XYZ stage control

Координаты текущего положения платформы координатного стола отображаются в полях **X**, **Y** в верхней части окна программы. Отображаются только координаты по которым имеются датчики перемещения.

При включении контроллера, за нулевые координаты принимаются координаты текущего положения платформы координатного стола. Чтобы выполнить поиск нулевой координаты, следует нажать кнопку **Homing**. При поиске нулевых координат следует иметь ввиду что, по окончании поиска, платформа не будет приведена в точку с нулевыми координатами.

Управлять перемещением образца в плоскости XY можно двумя способами:

- с помощью кнопок панели **XY Control**;
- выбором нужной точки из таблицы.

Параметры, определяющие скорость перемещения образца по каждой из координат (частота и амплитуда управляющего напряжения) задаются в диалоговом окне **XYZ Stage settings** (см. стр. 178). При перемещении образца в нужную точку, сначала движение осуществляется непрерывно, затем, когда расстояние до нужной координаты становится меньше 50 мкм, начинается пошаговое перемещение в нужном направлении: образец перемещается на один шаг пьезопривода, текущая координата сравнивается с заданной; если заданная координата не достигнута, делается еще шаг.

Остановить перемещение образца можно одним из следующих способов:

– кнопкой ;

– кнопкой, которой было инициализировано перемещение.

Если запущено перемещение по двум направлениям, то кнопка  останавливает перемещение сразу по обоим направлениям. Если необходимо остановить перемещение в одном направлении, используйте кнопку, которой было инициализировано движение в этом направлении.

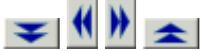
Аналогичным образом осуществляется управление перемещением в вертикальном направлении. Параметры, определяющие скорость перемещения образца в вертикальном направлении (частота и амплитуда управляющего напряжения) задаются в диалоговом окне **XYZ Stage settings** (см. стр. 178). Параметры задаются независимо для каждого из двух пьезоприводов, отвечающих за вертикальное перемещение платформы, и подбираются таким образом, чтобы их работа была синхронной.

В нижней части окна программы расположена таблица, в которой можно сохранить координаты основных положений координатного стола. Работа с таблицей координат будет описана ниже (см. стр. 176).

В Табл. 11-1 приведено описание кнопок программы управления координатным столом.

Табл. 11-1. Элементы управления окна **XYZ stage control**

Homing	<p>Запускает поиск нулевой координаты.</p> <p>Каждый раз при включении контроллера координатного стола за нулевую координату принимается координата текущего положения платформы позиционирования. Чтобы установить платформу в центральное положение, следует нажать кнопку Homing.</p> <p>Остановить поиск нулевой координаты можно повторным нажатием кнопки Homing.</p>
Oscilloscope	Открывает окно программного осциллографа (см. Рис. 11-2).
X, Y	<p>Координаты текущего положения платформы позиционирования. Выбор единиц измерения, в которых отображаются координаты, осуществляется в списке расположенном справа от координат.</p>

Settings	Открывает диалоговое окно XYZ Stage Settings , в котором задаются параметры управления координатным столом (см. Рис. 11-3).
XY Control	Панель управления перемещением платформы позиционирования в плоскости XY.
	Запускают перемещение платформы позиционирования в выбранном направлении на расстояние, соответствующее числу шагов указанному в поле ввода для каждой из кнопок.
	Запускают перемещение платформы позиционирования в выбранном направлении на расстояние, указанное в поле ввода для каждой из кнопок.
	<p>Запускают перемещение платформы позиционирования в выбранном направлении. Движение платформы осуществляется непрерывно до остановки пользователем, либо до достижения конечного положения.</p> <p>Остановить перемещение можно:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Повторным нажатием кнопки, которой было инициализировано движение; – Кнопкой . <p> ПРИМЕЧАНИЕ. Если нажать клавишу <Ctrl> и затем кнопку запуска перемещения  ,  ,  или  , то в левом верхнем углу панели XY Control отображается скорость перемещения платформы в данном направлении. В этом случае по достижении конечного положения двигатели не отключаются.</p>
	Останавливает перемещение платформы в плоскости XY.
Z-control	Панель управления перемещением платформы позиционирования в вертикальном направлении.
Landing	Запускает автоматизированный подвод образца к зонду. Параметры подвода (частота и амплитуда управляющего напряжения, определяющие скорость и шаг подвода) задаются в диалоговом окне XYZ Stage settings (см. стр. 178). Параметры задаются независимо для каждого из двух пьезоприводов, отвечающих за вертикальное перемещение платформы, и подбираются таким образом, чтобы их работа была синхронной.

	Запускает перемещение платформы позиционирования вверх. Движение осуществляется до остановки пользователем. Остановить перемещение можно: <ul style="list-style-type: none"> – Повторным нажатием кнопки, которой было инициализировано движение; – Кнопкой .
	Запускает перемещение платформы позиционирования вниз. Движение осуществляется до остановки пользователем.
	Запускает перемещение платформы позиционирования вверх на расстояние, соответствующее числу шагов указанному в поле ввода.
	Запускает перемещение платформы позиционирования вниз на расстояние, соответствующее числу шагов указанному в поле ввода.
	Останавливает вертикальное перемещение платформы.
	Перемещает платформу позиционирования вверх на расстояние, соответствующее одному шагу пьезоприводов.
	Перемещает платформу позиционирования вниз на расстояние, соответствующее одному шагу пьезоприводов.
Add	Добавляет в таблицу новую строку с координатами текущего положения координатного стола.
Go	Приводит координатный стол в выбранную точку. Движение осуществляется только по координате, отмеченной флажком.
Delete	Удаляет выделенные строки из таблицы.

Создание и редактирование таблицы координат

Чтобы занести в таблицу новую строку щелкните на кнопке **Add**. В результате будет создана строка с именем вида: **Point number №**, где **№** – номер создаваемой строки по порядку.

В графы **X**, **Y** будут занесены координаты текущего положения платформы. Координаты заносятся в таблицу в текущих единицах измерения, выбранных в поле в верхней части окна программы. При смене единиц измерения, значения ячеек таблицы пересчитываются.

Содержание ячеек таблицы можно редактировать. Для этого дважды щелкните мышью на нужной ячейке и введите нужно значение с клавиатуры.



ПРИМЕЧАНИЕ. При редактировании координат точек следует иметь ввиду, что координаты нужно задавать в текущих единицах измерения.

Чтобы удалить строки таблицы, выделите их с помощью мыши и щелкните на кнопке **Delete**. С нажатой клавишей <Shift> можно выделить несколько строк по порядку. С нажатой клавишей <Ctrl> можно выделить несколько строк в произвольном порядке.

Программный осциллограф

Программный осциллограф (Рис. 11-2) открывается кнопкой **Oscilloscope** главного окна программы **XYZ Stage control**.

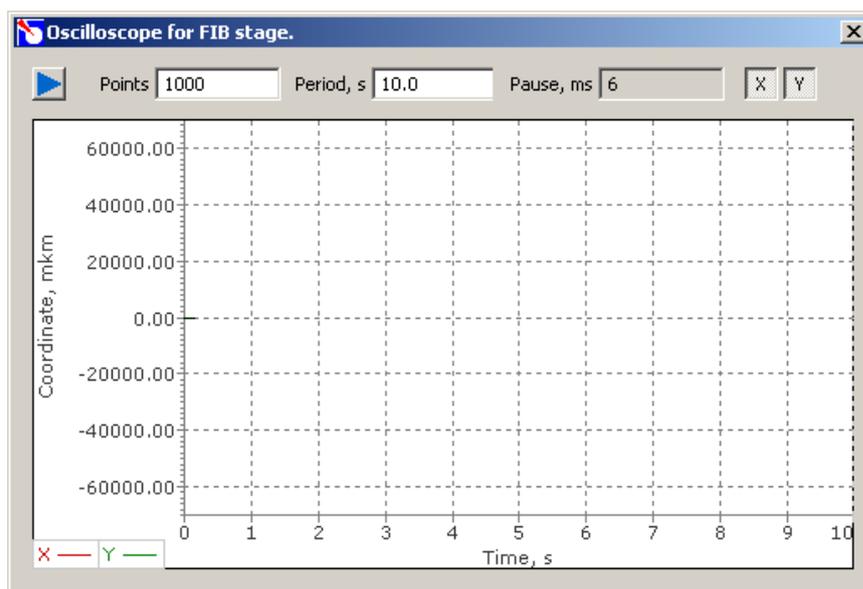


Рис. 11-2. Программный осциллограф

Осциллограф предназначен для отображения текущих координат платформы координатного стола. По оси Ox отображается время, по оси Oy – положение центра платформы позиционирования относительно нулевой точки по каждой из координат. Выбор отображаемого сигнала осуществляется нажатием соответствующей кнопки (X, Y) в правой части панели управления осциллографа. Осциллограф позволяет одновременно отобразить сигналы по обеим координатам.

Красным цветом отображается X-координата.

Зеленым цветом отображается Y-координата.

Табл. 11-2. Элементы панели управления программным осциллографом

	Запуск/остановка отображения сигнала
Points	Количество точек, в которых за период будут проводиться измерения.
Period	Период измерений, в секундах.
Pause	Рассчитываемое значение паузы между измерениями.
	Нажатием кнопки включается отображение X-координаты (красная линия).
	Нажатием кнопки включается отображение Y-координаты (зеленая линия).

Смещение и масштабирование изображения

Чтобы сместить изображение по оси ординат, поместите курсор мыши слева от оси ординат, и затем прокрутите колесико мыши в нужном направлении.

Чтобы изменить масштаб по оси ординат, поместите курсор мыши в любое место в области отображения графика и затем прокрутите колесико мыши в нужном направлении.

Диалоговое окно XYZ Stage settings

Диалоговое окно **XYZ Stage settings** (Рис. 11-3) открывается кнопкой **Settings** главного окна программы **XYZ Stage control**.

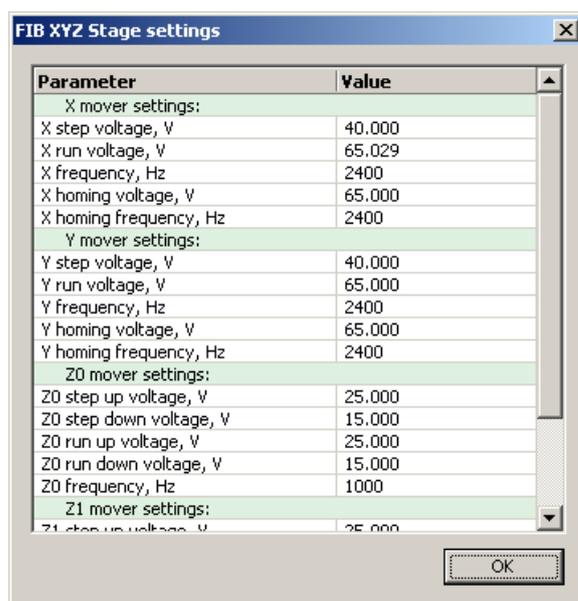


Рис. 11-3. Диалоговое окно **XYZ stage settings**

В диалоговом окне задаются параметры, определяющие скорость перемещения платформы позиционирования по каждой из координат.

Step voltage – амплитуда управляющего сигнала. Определяет величину шага пьезодвигателя при перемещении на заданное количество шагов, либо на один шаг (для Z).

Run voltage – амплитуда управляющего сигнала. Определяет величину шага пьезодвигателя при перемещении на заданное расстояние, либо при движении до остановки пользователем.

Frequency – частота управляющего напряжения. Определяет частоту отработки шагов пьезодвигателя.

Homing voltage – амплитуда сигнала, подаваемого на пьезодвигатель при поиске нулевой координаты. Определяет величину шага пьезодвигателя.

Homing frequency – частота сигнала, подаваемого на пьезодвигатель при поиске нулевой координаты. Определяет частоту отработки шагов пьезодвигателя при поиске нулевой координаты.

Step up voltage – амплитуда сигнала, подаваемого на пьезодвигатель при движении вверх. Определяет величину шага пьезодвигателя.

Step down voltage – амплитуда сигнала, подаваемого на пьезодвигатель при движении вниз. Определяет величину шага пьезодвигателя.

Значения параметров можно редактировать. Для этого дважды щелкните мышью в нужной ячейке и введите значение с клавиатуры.

Значения параметров сохраняются в ini-файле и автоматически устанавливаются при следующем запуске программы.

11.2. Замена зондового датчика

1. Откройте программу управления координатным столом XYZ stage control.
2. Опустите опорные площадки координатного стола в крайнее нижнее положение, щелкнув на кнопке  на панели **Z control** (Рис. 11-1).
3. Переместите платформу позиционирования по обеим координатам максимально близко к загрузочной камере с помощью кнопок , , ,  панели **XY control**. Положение платформы показано на Рис. 11-4.

Для удобства работы, рекомендуется сохранить координаты основных положений координатного стола в таблице. Чтобы добавить текущие координаты в таблицу, щелкните на кнопке **Add**. Изменить содержание ячейки можно, щелкнув на ней мышью и введя новое значение с клавиатуры.

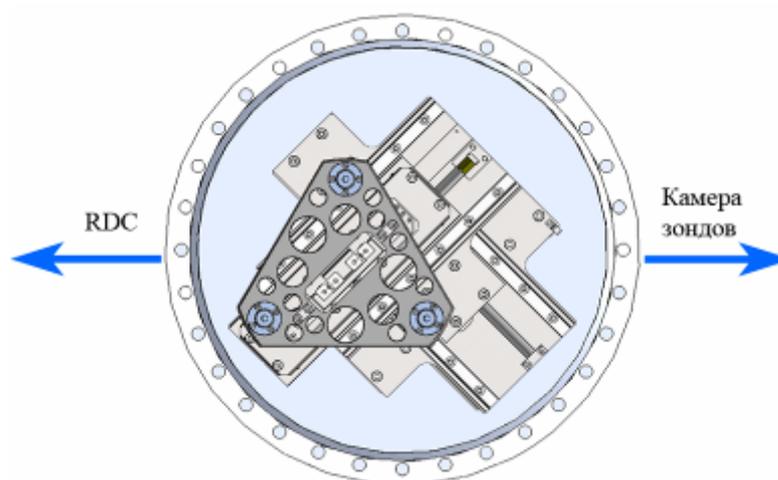


Рис. 11-4. Положение платформы позиционирования перед перегрузкой зондовой головки

4. Откройте программу NANOFAB Extensions.
5. Выдвиньте шток манипулятора установки зондовых головок в крайнее нижнее положение. Для этого перейдите на вкладку **Probe transport** и щелкните на кнопке  панели **Probe PZ drive** (Рис. 11-5).

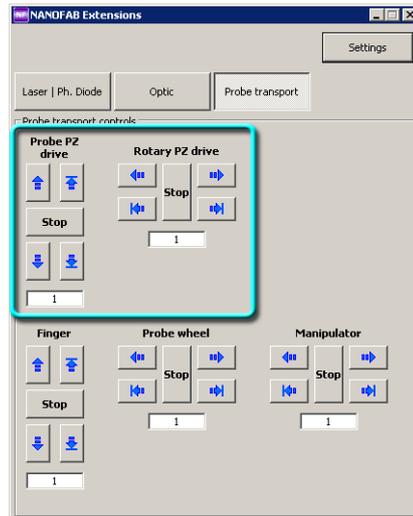


Рис. 11-5. Управление манипулятором установки зондовых головок

- Поверните зондовую головку на 45° против часовой стрелки с помощью кнопок панели **Rotary PZ drive**. После поворота зондовая головка должна быть повернута в сторону камеры зондов как показано на Рис. 11-6.

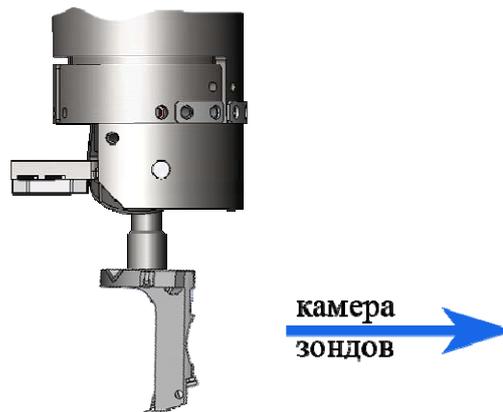


Рис. 11-6

- Откройте шибер, соединяющий камеру зондов и СЗМ камеру.
- Переместите манипулятор зонда в СЗМ камеру, управляя движением манипулятором с помощью кнопок панели **Manipulator**. Остановите манипулятор, когда кончик кронштейна будет находиться на расстоянии примерно $5 \div 10$ мм от края зондовой головки. Визуально проконтролируйте относительное положение зондовой головки и сканера.
- Управляя движением манипулятором с помощью джойстика, подведите кронштейн манипулятора к зондовой головке так, чтобы кронштейн оказался на расстоянии ~ 5 мм от края зондовой головки (Рис. 11-7).

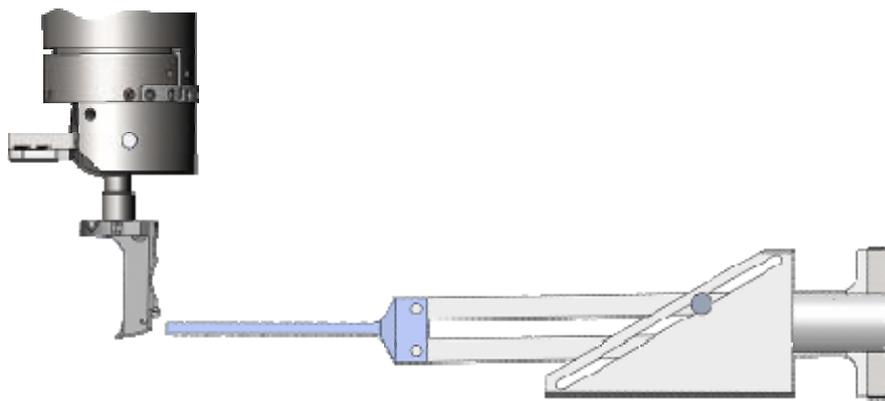


Рис. 11-7

10. Выставьте положение кронштейна по высоте так, чтобы кромка кронштейна оказалась напротив центра отверстия в зондовой головке (Рис. 11-8). Управление кронштейном производится с помощью кнопок панели **Finger**.

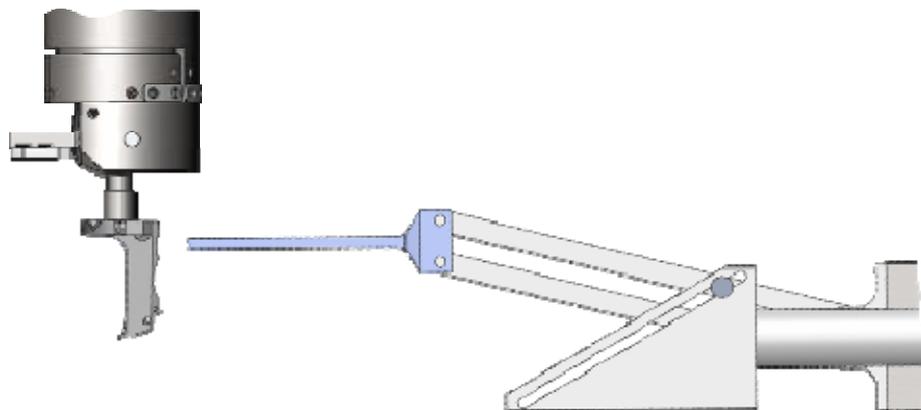


Рис. 11-8

11. Управляя перемещением манипулятора в горизонтальном направлении с помощью кнопок панели **Manipulator**, переместите кронштейн так, чтобы его край выступал за край зондовой головки на 2÷4 мм (Рис. 11-9).

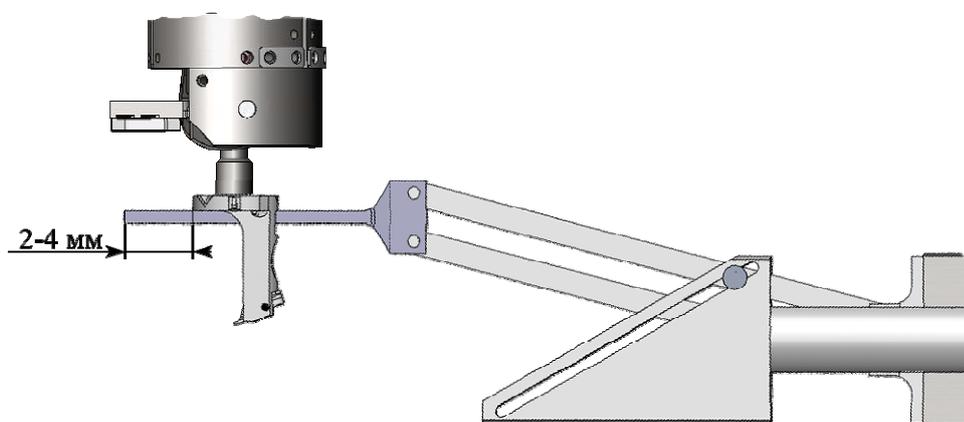


Рис. 11-9

12. Переместите кронштейн вниз до размыкания контакта зондовой головки со штоком (Рис. 11-10).

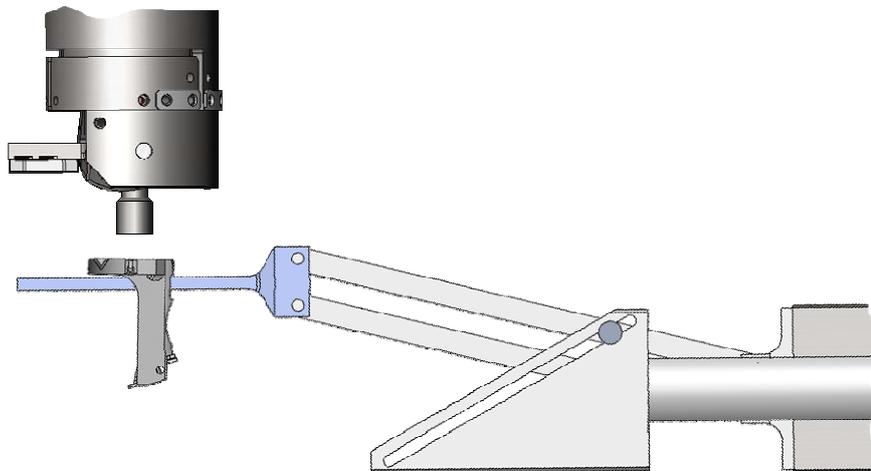


Рис. 11-10

13. Переместите манипулятор в сторону камеры зондов на расстояние ~ 50 мм.
 14. Опустите кронштейн манипулятора в среднее положение (Рис. 11-11). Это нужно для того, чтобы не задеть зондовой головкой за карусель.

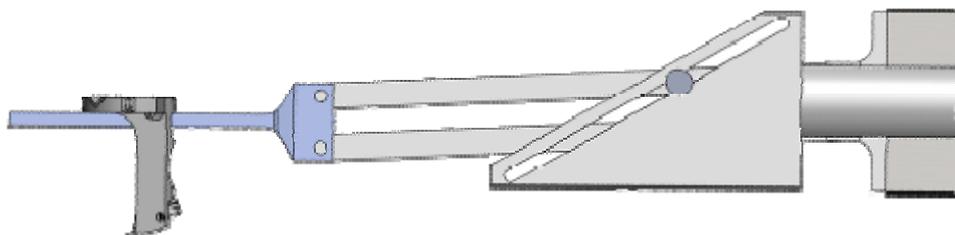


Рис. 11-11

15. Переместите зондовую головку в камеру зондов.
 16. Закройте шибер, соединяющий камеру зондов с СЗМ камерой (управление шиберами осуществляется из программы CLASTER).
 17. Наблюдая положение зондовой головки в смотровое окно, перемещайте манипулятор до тех пор, пока зондовая головка не окажется под посадочным местом на карусели (Рис. 11-12).

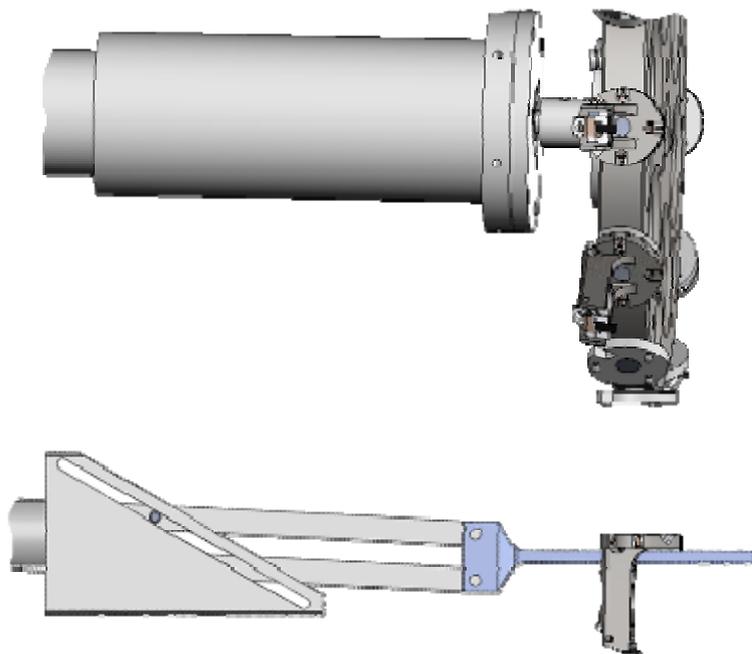


Рис. 11-12

18. Переместите кронштейн манипулятора вверх до тех пор, пока опорные шарики на карусели не попадут в V-образные канавки на фланце зондовой головки.
19. Когда кронштейн окажется посередине отверстия в зондовой головке, остановите движение кронштейна кнопкой **Stop**.
20. Отведите манипулятор в крайнее положение до его остановки (Рис. 11-13).

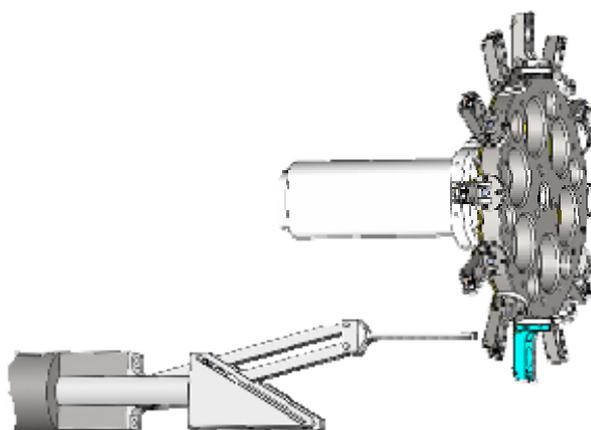


Рис. 11-13

Приложения

1. Система управления

Система управления СЗМ модулем содержит следующие элементы:

- СЗМ контроллер (см. п. 1.1 на стр. 184);
- Блок расширения (см. п. 1.2 на стр. 187);
- Компьютер (см. п. 1.3 на стр. 188);
- Контроллер координатного стола (см. п. 1.4 на стр. 188).

1.1. СЗМ контроллер

Управление СЗМ контроллером осуществляется из программы Nova.

Общий вид задней панели СЗМ контроллера представлен на Рис. 1-1.

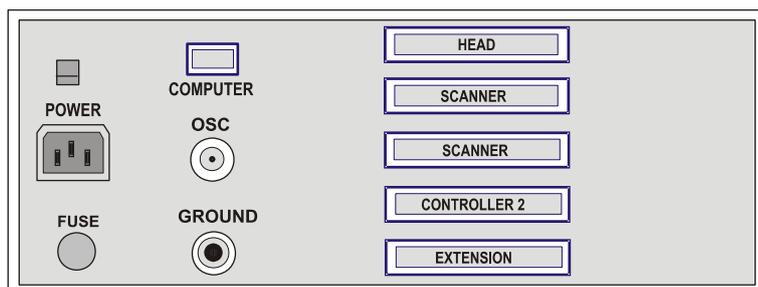


Рис. 1-1. Задняя панель СЗМ контроллера

Разъемы СЗМ контроллера

POWER	– разъем для подключения к сети;
FUSE	– предохранитель.
COMPUTER	– разъем для подключения кабеля интерфейсной платы;
OSC	– BNC-разъем для подключения внешнего осциллографа;
GROUND	– клемма заземления;
HEAD	– разъем для подключения базового блока;
SCANNER	– два равнозначных разъема для подключения сканеров;
CONTROLLER 2	– разъем для подключения базового блока;
EXTENSION	– разъем для подключения внешних устройств;

В верхнем левом углу панели располагается переключатель напряжения питания 110/220 В.



ВНИМАНИЕ! Контроллер можно подключать к сети 110/220 В (50–60 Гц), предварительно установив переключатели номиналов напряжения в позицию, соответствующую напряжению Вашей сети. Несоблюдение этого условия может привести к повреждению электронных элементов.

Табл. 1-1. Технические характеристики СЗМ контроллера

Параметр	Значение
Характеристики электропитания	
Напряжение питания переключаемое	110/220 В
Потребляемая мощность, не более	80 Вт
Получение до 4 изображений за одно сканирование с разрешением до 1000×1000 точек каждое	
3 АЦП: 2 АЦП измерение сигналов, одно АЦП - поддержание обратной связи	16 разрядный АЦП с усилителем перед АЦП 1х, 10х, 100х, 1000х, программно управляемые низкочастотные фильтры 100Hz, 300Hz, 1kHz, 3kHz, 10kHz, 30kHz (для 2-х АЦП)
Мультиплексирование внешних входов	
Число внешних входов	5 (Ex1, Ex2, Ex3, Ex20, Ex21)
В т.ч. внешние входы с возможностью подачи на синхронный детектор	1 (Ex1)
Чувствительность синхронного детектора по фазе	0.01 градуса в полосе 1 кГц
Чувствительность фазового детектора	PHASE1 – 0.04 градуса, PHASE2 – 0.04 градуса
Напряжение для управления сканером по XYZ	От -150V to +150V
ЦАП	Три составных ЦАП для управления X, Y, Z. Один 16–битный ЦАП для управления Bias Voltage, один 12–битный ЦАП для внешнего выхода, управляемого пользователем.
Шум RMS по XY в полосе 1000 Гц	0.4 ppm RMS (0.2 mV RMS)
Шум RMS по Z в полосе 1000 Гц	0.4 ppm RMS (0.2 mV RMS)

Integrated demodulator for X,Y,Z capacitive sensors	
Open/Closed-loop mode for X,Y control	
Диапазон установок частоты генератора	DC – 5 МГц
Полоса пропускания канала регистрации Deflection	1 кГц – 5 МГц
Полоса пропускания канала регистрации Lateral Force	1 кГц – 5 МГц
Полоса пропускания канала Bias Voltage	DC-500 кГц
Возможность подавать модуляцию	на зонд (внешний выход), высоковольтные каналы X,Y, Z, Bias Voltage, внешний выход (2),
10–входовая программно управляемая система обратной связи.	
Фазовый детектор	
RMS–детектор	
Число генераторов для осуществления модуляции	2
Число дополнительных генераторов для синхронного детектора	2
Максимальная емкость нагрузки по Z	100 нФ
Максимальная емкость нагрузки по XY	50 нФ
Выходы управления шаговым двигателем	Два ЦАП, напряжение 20 В от максимума к максимуму, максимальный ток 130 мА
Дополнительные цифровые входы-выходы	6
Идентификация узлов прибора, опрос и управление медленными устройствами (шина I2C)	
Габариты	445x160x500 мм ³
Вес	16 кг

1.2. Блок расширения СЗМ

Управление блоком расширения осуществляется из программы Nova.

Общий вид задней панели блока расширения представлен на Рис. 1-2.

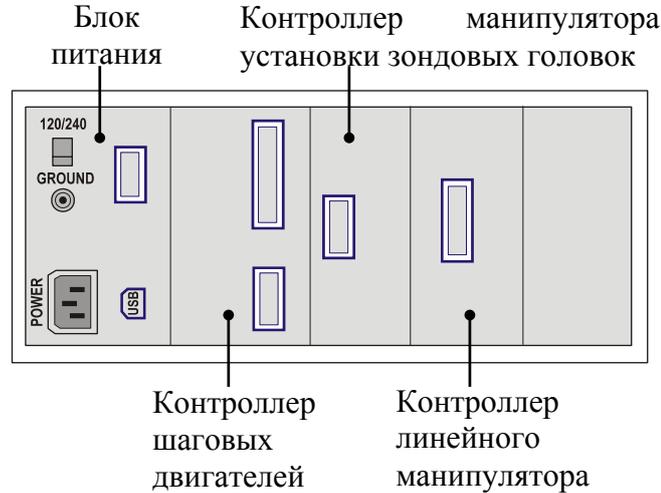


Рис. 1-2. Задняя панель блока расширения

Блок питания

- 120/240** – переключатель напряжения питания;
- POWER** – подключение к сети питания;
- GROUND** – клемма заземления;
- USB** – разъем для соединения с СЗМ контроллером;

Блок управления шаговыми двигателями

Предназначен для управления шаговыми двигателями устройств, расположенных на верхнем фланце камеры СЗМ (отвечают за перемещение лазера, фотодиода, оптического микроскопа), а также шаговыми двигателями, управляющими каруселью зондов и кронштейном захвата зондовых головок.

Блок управления манипулятором установки зондовых головок

Управляет манипулятором установки зондовых головок

Блок управления линейным манипулятором

Управляет шаговыми двигателями линейного перемещения манипулятора замены зондовых головок.



ВНИМАНИЕ! Блок расширения можно подключать к сети 110/220 В (50÷60 Гц), предварительно установив переключатель номиналов напряжения в позицию, соответствующую напряжению Вашей сети. Несоблюдение этого условия может привести к повреждению электронных элементов.

1.3. Компьютер

Характеристики компьютера³ электроники управления:

- Процессор Pentium IV, 2400 МГц, материнская плата MSI;
- Жесткий диск 80 Гбайт;
- 512-1024 MB RAM;
- видеокарта – NVIDIA Geforce 2/3;
- DVD–RW дисковод;
- Операционная система Windows XP.

Программное обеспечение для управления модулем UHV SPM:

- Программа Nova. Предназначена для управления СЗМ и обработки изображений.
- Программа XYZ stage control. Предназначена для управления координатными столами.
- Программа NANOFAB Extensions. Предназначена для управления положением лазера и фотодиода, оптического видеомикроскопа, каруселью зондов, манипуляторами замены и установки зондовых головок.

1.4. Контроллер координатного стола

Контроллер координатного стола выполняет следующие функции:

- управление пьезодвигателями координатного стола (4 канала);
- считывание данных о положении платформы позиционирования координатного стола по координатам X, Y, Z (3 канала) с датчиков положения RENISHAW.

Общий вид задней панели контроллера координатного стола представлен на Рис. 1-3.

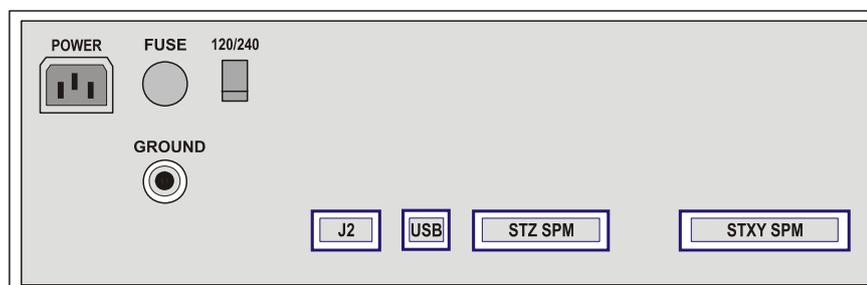


Рис. 1-3. Задняя панель контроллера координатного стола

³ В связи с динамичным развитием компьютерной техники, спецификация компьютера может быть изменена без уведомления заказчика.

POWER	- разъем для подключения к сети;
FUSE	- предохранитель 2А;
GROUND	- клемма заземления;
120/240	- переключатель напряжения питания;
J2	- технологический разъем для настройки контроллера;
USB	- разъем для подключения к USB порту компьютера;
STZ SPM	- управление Z приводами координатного стола;
STXY SPM	- управление XY приводами координатного стола.

Табл. 1-2. Технические характеристики контроллера координатного стола

Параметр	Значение
Характеристики электропитания	
Напряжение питания переключаемое	110/220 В
Максимальная потребляемая мощность	170 Вт
Выходные характеристики	
Количество управляющих каналов	4
Напряжение	0÷70 В на канал
Емкость пьезодвигателя	≤ 0.5 мкФ на канал
Частота (в зависимости от амплитуды подаваемого напряжения)	1÷4 кГц

2. Сканеры с датчиками перемещения

2.1. Введение

Сканер является, пожалуй, вторым по важности (после зондового датчика) элементом Сканирующего Зондового Микроскопа. Изготавливается он обычно из пьезокерамических трубок и содержит X, Y и Z секции, обеспечивающие, при приложении к ним электрического напряжения, перемещение зонда и/или образца по соответствующим осям (направлениям). Одной из самых важных характеристик сканера является точность перемещения. Индикатором перемещения сканера по данной оси, в некоторой степени, может служить величина текущего значения электрического напряжения, подаваемого на соответствующую секцию сканера. Однако связь величины напряжения с величиной перемещения неоднозначна, поскольку для пьезокерамических материалов характерны большой крип и гистерезис.

Существуют программные алгоритмы коррекции паразитных влияний этих свойств пьезокерамики, однако обычно удается добиться немногого. Любое непериодическое перемещение зонда в плоскости XY (например, при осуществлении векторной литографии) не может быть выполнено без заметных погрешностей. Перемещение зонда по оси Z, осуществляемое с использованием обратной связи по взаимодействию зонд-образец, которое должно отслеживать рельеф поверхности образца, не может быть измерено без заметных искажений. С приемлемой точностью удается лишь производить измерения латеральных размеров объектов при осуществлении простого сканирования поверхности образца.

Серьезно улучшить метрологические характеристики Зондового Микроскопа позволяет использование датчиков перемещений сканера. Точность измерений во многих важных случаях улучшается на порядок. Существенно уменьшаются нелинейность перемещений сканера и дрейфы взаимного положения зонда и образца. Становится возможным проведение таких тонких операций, как векторная литография и наноманипуляции. Рельеф поверхности образца отображается без заметных искажений по оси Z (следует признать, однако, что при сканировании больших участков поверхности может наблюдаться некоторая неплоскостность полученного сканированного изображения). Возможность точно задавать перемещение сканера не только в плоскости XY, но и по оси Z, позволяет существенно улучшить результаты измерений в двухпроходных методиках и при проведении спектроскопических измерений ($F(z)$).

В наших приборах используются емкостные датчики перемещений сканеров. Одна из обкладок плоского конденсатора датчика закреплена на свободном конце сканера, положение второй обкладки фиксировано. При перемещениях сканера меняется зазор между обкладками конденсатора, при этом на выходе подключенной к конденсатору электронной схемы генерируется напряжение, величина которого обратно пропорциональна емкости конденсатора. Таким образом, если пренебречь краевыми эффектами и непараллельностью обкладок конденсатора, выходное напряжение можно полагать пропорциональным величине зазора, т.е. перемещению сканера по соответствующей оси.

Емкостной датчик сам по себе является достаточно точным устройством измерения перемещений. Заявляемые производителями датчиков характерные величины нелинейности (при определенных ограничениях на условия использования) составляют $\sim 0.01\%$ от номинального измеряемого диапазона. Однако при встраивании датчиков в конкретную систему позиционирования неизбежно возникает проблема неидеальности связи между точкой, где находится зонд, и положением подвижной обкладки датчика. Могут возникать паразитные вращения обкладок датчиков, малые дополнительные смещения зонда или образца (например, вследствие термодрейфа), которые датчики не регистрируют. Все это часто приводит к заметному ухудшению свойств системы по сравнению с тем, что можно было бы ожидать от использования датчиков. Поэтому величины нелинейности сканеров, заявляемые производителями СЗМ с емкостными датчиками, обычно составляют не менее 0.1% .

При использовании сканеров с датчиками перемещений следует помнить, что кроме обратной связи по Z (**FB**), контролирующей силу взаимодействия между зондом и образцом, есть еще обратная связь по осям X и Y (**XY Closed-Loop**). В случае сканирования зондом параметры обратной связи по X и Y обычно не требуют подстройки. Однако при сканировании образцом масса образца вместе с держателем может меняться в широких пределах. При заданной величине коэффициента усиления в цепи обратной связи с увеличением массы образца система становится менее устойчивой, что в итоге приводит к возбуждению системы обратной связи. Процедура настройки величины коэффициента усиления в цепи обратной связи описана ниже.

2.2. Принцип работы

Использование емкостных датчиков перемещения позволяет скомпенсировать нелинейность перемещения сканера. Емкостные датчики используются как в сканирующих измерительных головках, так и в сменных сканерах.

На Рис. 2-1 изображена принципиальная схема работы сканера с X, Y датчиками. Сигнал с датчика сравнивается с задаваемым программно в процессе сканирования значением. При наличии рассогласования разностный сигнал усиливается и подается на соответствующую секцию сканера, вызывая перемещение, соответствующее заданному значению. Таким образом, осуществляются перемещения сканера в плоскости XY. При этом влияние крипа и гистерезиса компенсируется.

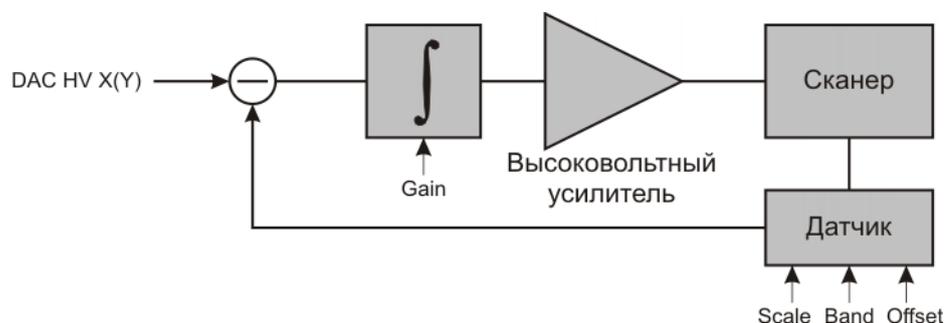


Рис. 2-1. Принципиальная схема работы сканера с емкостными датчиками (для X, Y датчиков)

Сигнал с Z-датчика используется при измерении рельефа и при работе с использованием методов, требующих контролируемого перемещения сканера по Z (спектроскопии, двухпроходные методы и т.д.).

Следует отметить, что использование датчиков перемещений сканера может несколько ухудшить разрешающую способность прибора. Обычно это происходит с разрешением по X, Y осям. Датчик обладает собственным электронным шумом, который по цепи обратной связи (см. Рис. 2-1) передается на высоковольтный усилитель, что приводит к большему (по сравнению с использованием аналогичного сканера без датчиков) “дрожанию” сканера по соответствующей оси. Z-датчик, как правило, шумит меньше, т.к. обычно диапазон сканера по Z в несколько раз меньше диапазона по XY, что позволяет уменьшить зазор между обкладками датчика (зависимость уровня шума от величины зазора при постоянной площади обкладок примерно квадратичная).

2.3. Подготовка к работе сканера с датчиками

2.3.1. Загрузка калибровочных параметров сканера

При запуске программы по умолчанию загружается файл **Default.par** в котором содержатся калибровочные параметры определенного сканера. Если в комплектацию прибора входит один сканер, то в файле **Default.par** содержатся параметры именно этого сканера.



ПРИМЕЧАНИЕ. При использовании конфигуратора для предварительного конфигурирования программы Nova, в качестве файла параметров будет загружаться par-файл, содержащийся в конфигурационном файле.

Если же в комплектацию входят несколько сканеров, то файл **Default.par** содержит параметры, соответствующие одному из них.

После смены сканера необходимо загрузить соответствующий ему файл параметров (*.par).

Чтобы загрузить par-файл сканера, выполните следующие действия:

1. В Главном меню последовательно выберите пункты **Settings** → **Calibrations** → **Load Calibrations** (Рис. 2-2).

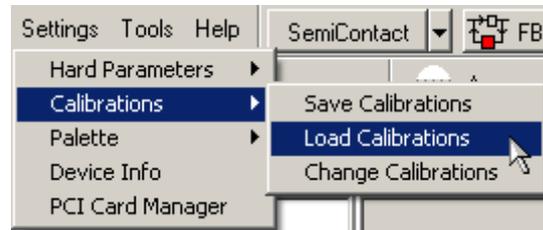


Рис. 2-2

В результате откроется диалоговое окно со списком par-файлов, содержащихся в папке **PARFiles**, например как на Рис. 2-3.

Структура названия par-файла сканера с датчиками имеет следующий вид:

XXXXXX-YY-ZZZ.par

где **XXXXXX** – код идентификации;

YY – год изготовления;

ZZZ – порядковый номер.

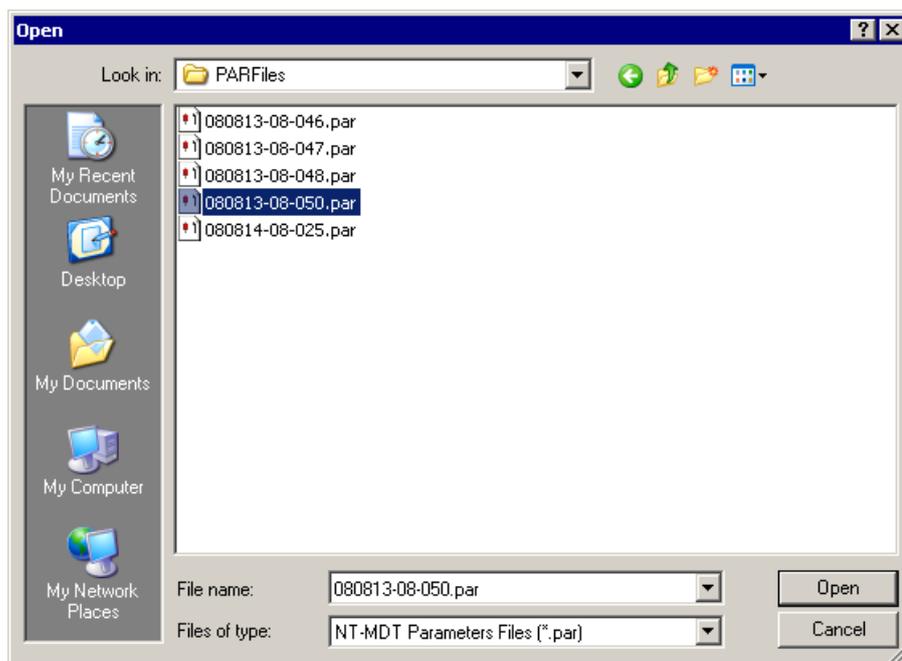


Рис. 2-3. Диалоговое окно **Open**

2. Выберите раг-файл, соответствующий установленному сканеру.
3. Щелкните на кнопке **Open**, чтобы загрузить раг-файл.

После загрузки раг-файла сканера с датчиками, в области дополнительных операций (открывается кнопкой  в правом верхнем углу Главного окна программы) появится вкладка **Closed-Loop** (Рис. 2-4).

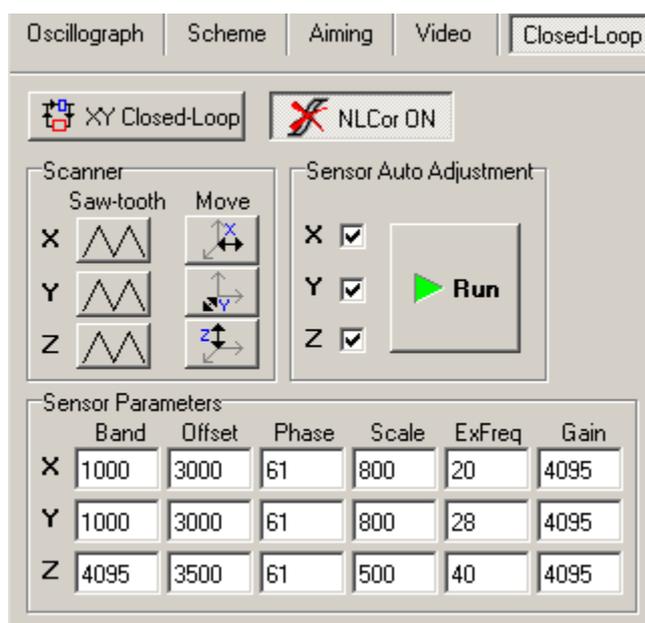


Рис. 2-4. Вкладка **Closed-Loop**

Если необходимо чтобы при загрузке программы параметры данного сканера загружались по умолчанию, сохраните файл как **Default.par**. Для этого:

1. В Главном меню последовательно выберите пункты **Settings** → **Calibrations** → **Save Calibrations** (Рис. 2-5).

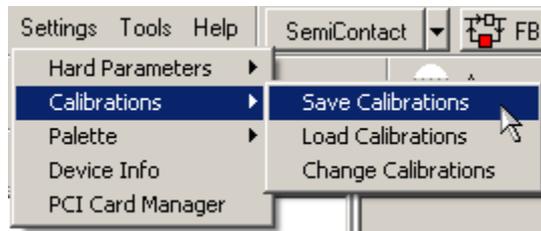


Рис. 2-5

Откроется диалоговое окно **Save As** (Рис. 2-6).

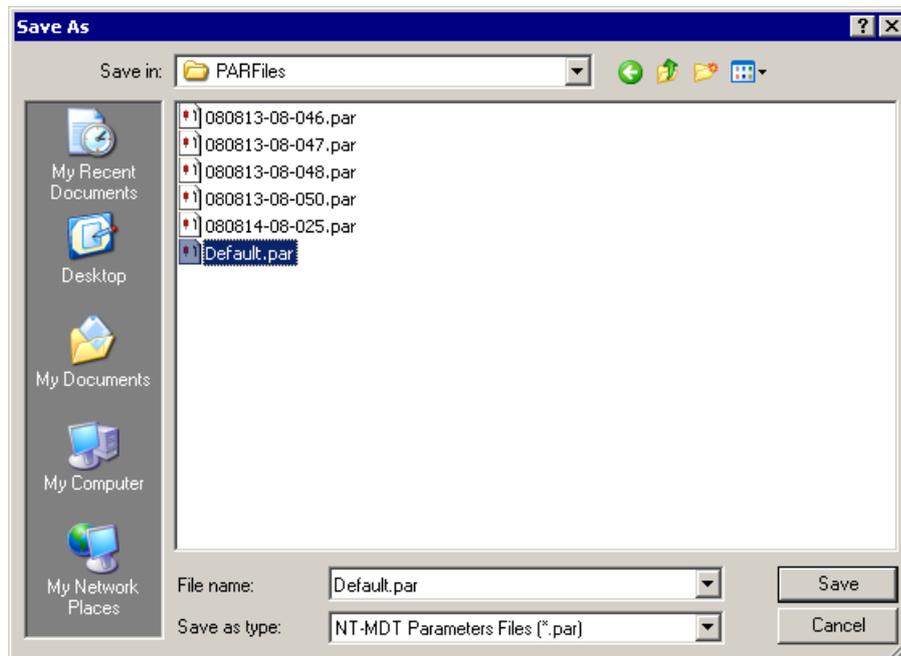


Рис. 2-6. Диалоговое окно **Save As**

2. Сохраните файл как **Default.par**.

2.3.2. Проверка и устранение генерации

Если на сканер с датчиками устанавливается образец весом больше 1 г, тяжелый держатель образца, жидкостная ячейка и т.п., то перед началом работы следует проверить наличие генерации в цепи обратной связи, контролирующей перемещение сканера в плоскости XY. Кроме того, наличие генерации рекомендуется проверить, если качество АСМ-изображения при работе с использованием датчиков хуже, чем без датчиков.

Для проверки и устранения генерации выполните следующие действия:

1. Откройте область дополнительных операций, щелкнув на кнопке  в правом верхнем углу Главного окна программы.
2. Перейдите на вкладку **Closed-Loop** (Рис. 2-7).

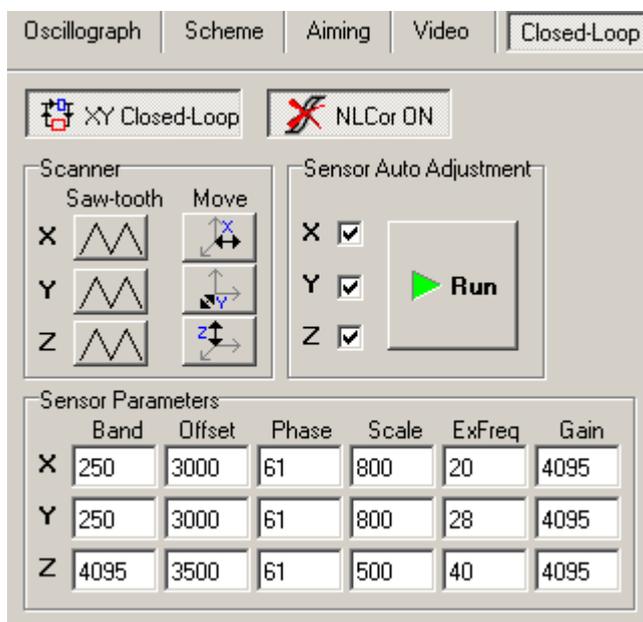


Рис. 2-7. Вкладка **Closed-Loop**

3. Замкните цепь обратной связи по XY (кнопка  XY Closed-Loop нажата).
4. Установите зонд в левый нижний угол максимальной области сканирования. Для этого:
 - щелкните на кнопке  и установите ползунок в ноль;
 - щелкните на кнопке  и установите ползунок в ноль.
5. На осциллографе выберите в качестве регистрируемого сигнала сначала **X Sensor** (Рис. 2-8), а затем **Y Sensor**. Проверьте значения RMS для сигналов **X Sensor** и **Y Sensor**. Величины RMS должны составлять примерно 0.0002 В.

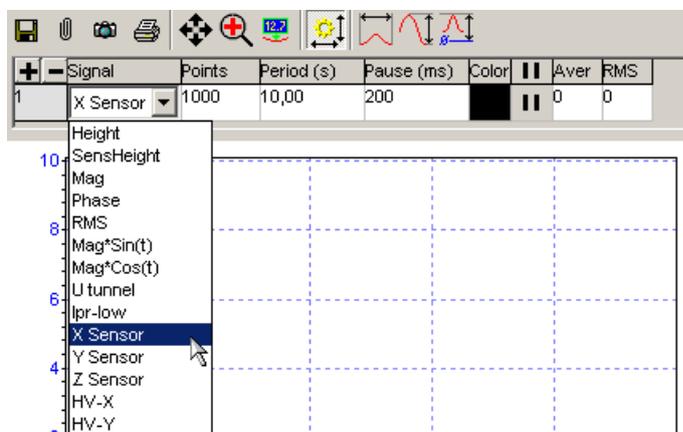


Рис. 2-8

6. Если значения RMS заметно больше 0.0002 В, то это указывает на наличие генерации в цепи XY обратной связи. В этом случае, поочередно уменьшая значения **Band X**, **Band Y**, подберите их такими, чтобы генерация как по X, так и по Y осям отсутствовала. Типичные значения **Band X**, **Band Y**, при которых отсутствует генерация, составляют 150÷200.

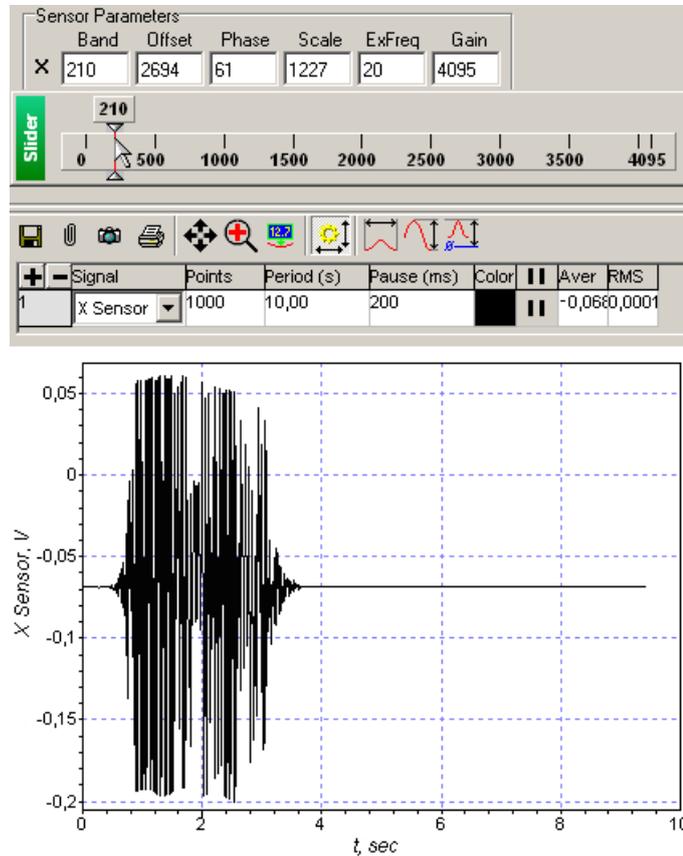


Рис. 2-9. Устранение генерации

7. Установите рабочее значение **Band X** (см. Рис. 2-9). Для этого:
- Выбрав в качестве регистрируемого сигнала **X Sensor**, увеличивайте значение **Band X** до тех пор, пока не начнется генерация.
 - Установите значение **Band X** на уровне 0.7 от значения, при котором начинается генерация.
8. Аналогичным образом установите рабочее значение **Band Y**.

2.4. Техническое обслуживание

При использовании сканеров с датчиками рекомендуется один раз в месяц проверять правильность настройки датчиков. Если настройка по какому-либо из датчиков сбилась, то необходимо выполнить процедуру подстройки и/или калибровки данного датчика.



ВНИМАНИЕ! Перед проверкой настройки и подстройкой датчиков в течение 6÷8 часов сканер должен находиться в нерабочем состоянии, т.е. на пьезотрубки сканера не должно подаваться напряжение.

2.4.1. Проверка настройки датчиков перемещения



ВНИМАНИЕ! Процедуру проверки датчиков можно производить только в случае, когда зонд отведен от поверхности образца.

Чтобы проверить настройку датчиков сканера выполните следующие действия:

1. Запустите программу управления.
2. Включите СЗМ контроллер.
3. Загрузите файл параметров сканера, для которого будет проводиться подстройка датчиков (см. п. [2.3.1](#) «Загрузка калибровочных параметров сканера» на стр. [193](#)).
4. Разомкните цепь обратной связи (кнопка  FB не нажата).
5. Откройте область дополнительных операций, щелкнув на кнопке  в правом верхнем углу Главного окна программы.
6. Перейдите на вкладку **Closed-Loop** (Рис. 2-10).

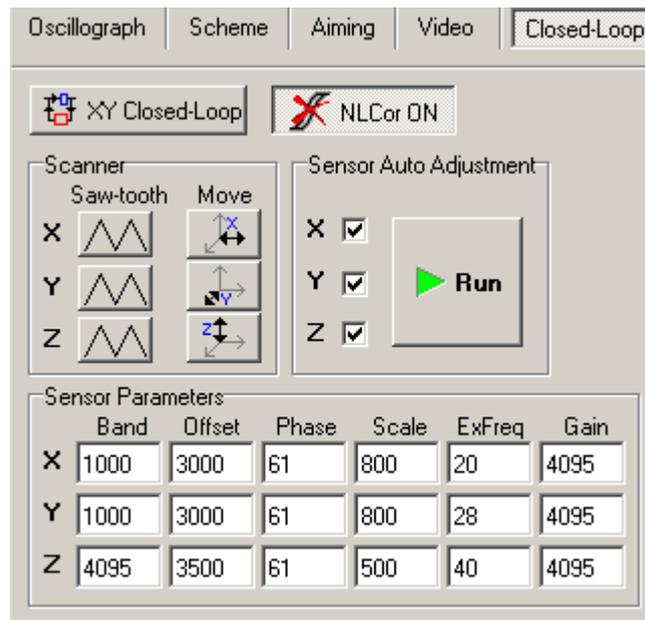


Рис. 2-10. Вкладка **Closed-Loop**

7. Разомкните цепь обратной связи по XY (кнопка  не нажата).
8. Установите величины напряжений, подаваемых на X, Y, Z секции пьезосканера, в середину диапазона. При этом сканер установится примерно в середину диапазона сканирования по соответствующим осям. Для этого:
 - щелкните на кнопке **Move X**  и, с помощью появившегося ползунка, установите положение сканера по оси X в середину диапазона сканирования (Рис. 2-11);

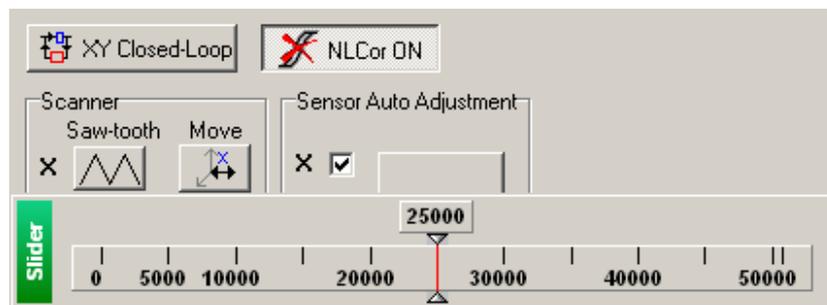


Рис. 2-11

- щелкните на кнопке **Move Y**  и, с помощью появившегося ползунка, установите положение сканера по оси Y в середину диапазона сканирования;
 - щелкните на кнопке **Move Z**  и, с помощью появившегося ползунка, установите положение сканера по оси Z в середину диапазона сканирования.
9. Проверьте настройку X датчика. Для этого выполните следующие действия:
 - а. Нажмите **Saw-tooth** по X. При этом на X-секцию сканера подается напряжение треугольной формы с амплитудой ± 300 В (Рис. 2-12).

Перемещение сканера под действием поданного напряжения будет регистрироваться датчиками.

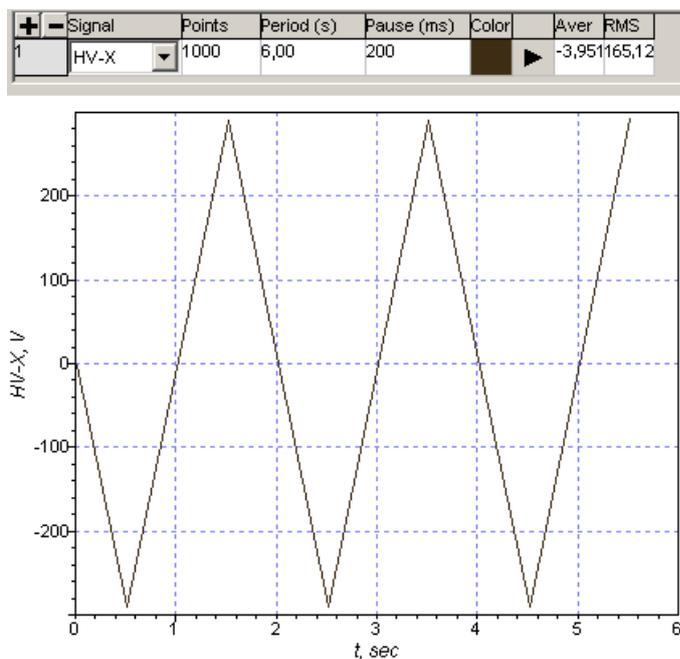


Рис. 2-12

- b. На программном осциллографе выберите сигнал **X Sensor** в качестве отображаемого сигнала.
 - Если амплитуда сигнала не менее 9 В, а среднее напряжение не выходит за пределы диапазона ± 1 В (Рис. 2-13), то X-датчик не нуждается в подстройке и калибровке. Среднее значение сигнала отражается в графе **Aver** на панели выбора отображаемых сигналов.

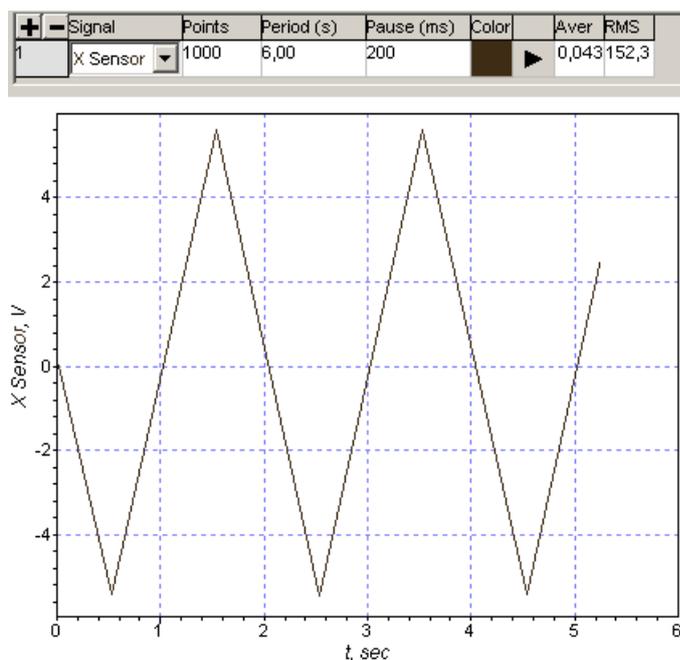


Рис. 2-13. Проверка настройки X-датчика.
Датчик не нуждается в подстройке

- Если амплитуда сигнала не менее 9 В, а среднее напряжение выходит за пределы диапазона ± 1 В (Рис. 2-14), необходимо провести процедуру подстройки X-датчика (см. п. [2.4.2](#) на стр. [203](#)).

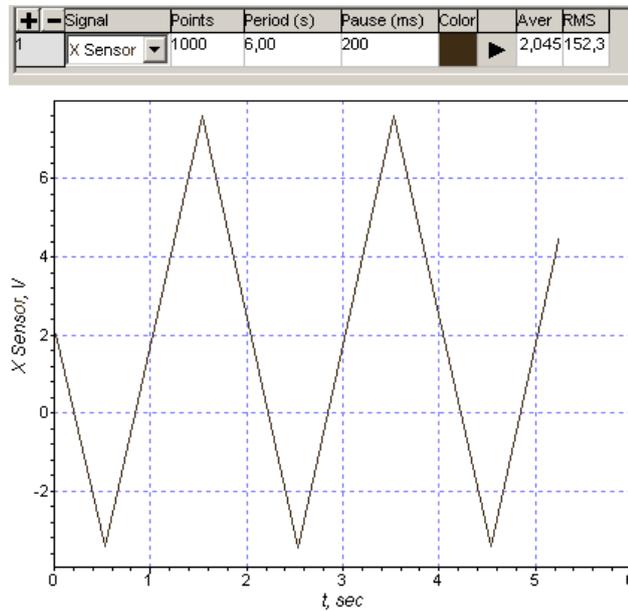


Рис. 2-14. Проверка настройки X-датчика. Требуется подстройка датчика

- Если амплитуда сигнала меньше 9 В (Рис. 2-15), необходимо провести процедуры подстройки и калибровки X-датчика (см. п. [2.4.3](#) на стр. [204](#)).

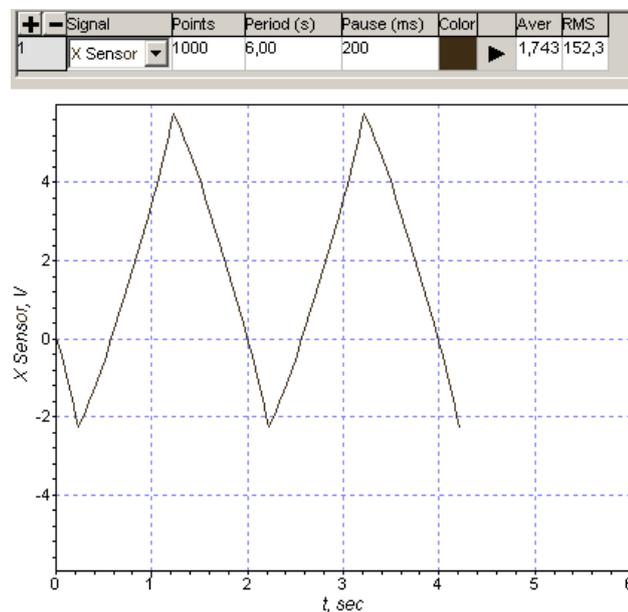


Рис. 2-15. Проверка настройки X-датчика. Требуется калибровка датчика



ПРИМЕЧАНИЕ. При использовании 50-мкм сменного сканера верхняя часть треугольного сигнала с датчика срезается (Рис. 2-16), при этом амплитуда сигнала должна быть не менее 9 В, а среднее напряжение находится в пределах ± 1 В.

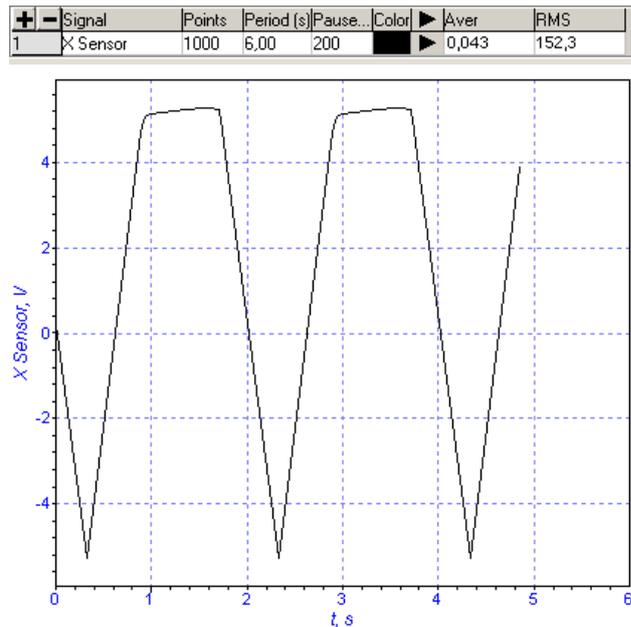


Рис. 2-16. Проверка настройки X-датчика на 50-мкм сканере. Датчик не нуждается в подстройке

10. Аналогично проверьте настройку Y-датчика, нажав кнопку **Saw-tooth Y** и выбрав сигнал **Y Sensor** в качестве отображаемого на осциллографе сигнала.
11. Проверьте настройку Z-датчика, нажав кнопку **Saw-tooth Z** и выбрав на осциллографе сигнал **Z Sensor**. Z-датчик не нуждается в подстройке или калибровке если (Рис. 2-17):
 - амплитуда сигнала составляет $5 \div 8$ В;
 - среднее значение напряжения не выходит за пределы диапазона ± 1 В.

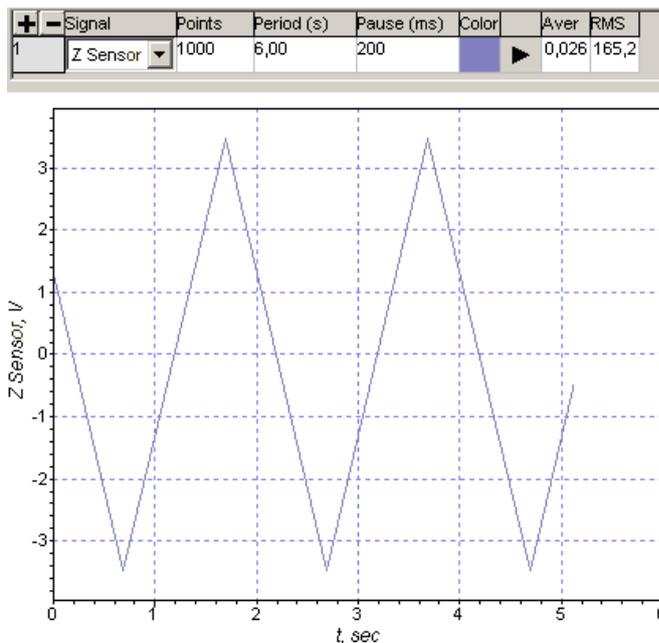


Рис. 2-17. Проверка настройки Z-датчика. Датчик не нуждается в подстройке

2.4.2. Подстройка датчиков перемещения

Процедура подстройки датчиков заключается в подборе коэффициентов **Offset** и **Scale** для каждого датчика таким образом, чтобы диапазон регистрируемого сигнала составлял: ± 5 В для X и Y датчиков, ± 3.5 В для Z-датчика. Подбор коэффициентов выполняется автоматически после запуска процедуры подстройки.



ВНИМАНИЕ! Процедуру подстройки датчиков можно производить только в случае, когда зонд отведен от поверхности образца.

Чтобы провести процедуру подстройки датчиков выполните следующие действия:

1. Запустите программу управления.
2. Включите СЗМ контроллер.
3. Загрузите файл параметров сканера, для которого будет проводиться подстройка датчиков (см. п. [2.3.1](#) «Загрузка калибровочных параметров сканера» на стр. [193](#)).
4. Разомкните цепь обратной связи (кнопка  не нажата).
5. Откройте область дополнительных операций, щелкнув на кнопке  в правом верхнем углу Главного окна программы.
6. Перейдите на вкладку **Closed-Loop** (Рис. 2-18).

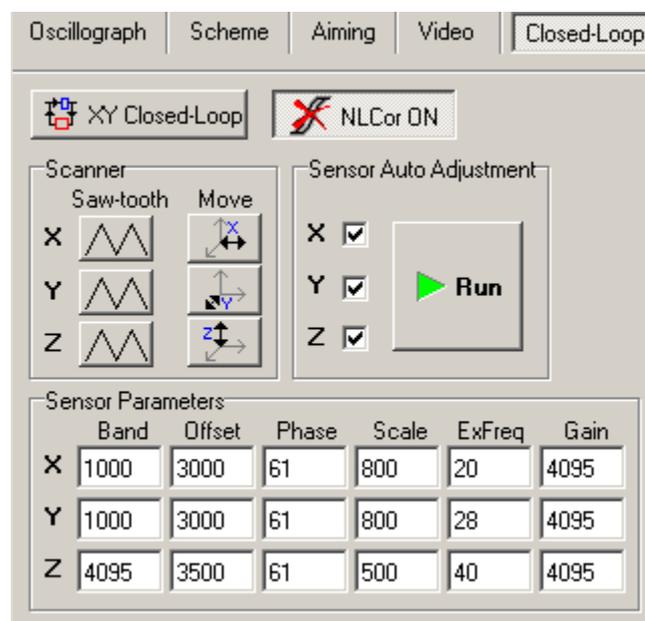


Рис. 2-18. Вкладка **Closed-Loop**

7. На панели **Sensor Auto Adjustment** (Рис. 2-19) установите флажки для тех датчиков, которые требуется подстроить.

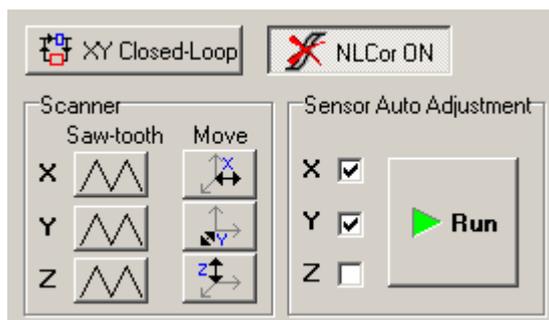


Рис. 2-19

8. Щелкните на кнопке **Run**.

В результате произойдет следующее:

- вместо кнопки **Run** появится кнопка **Stop**;
- на выбранные секции сканера последовательно будет подаваться напряжение треугольной формы;
- перемещения сканера по каждому направлению под действием поданного напряжения будут регистрироваться соответствующим датчиком;
- коэффициенты **Scale**, **Offset** для каждого датчика будут подобраны таким образом, чтобы сигнал, регистрируемый с датчиков, изменялся в диапазоне: ± 5 В для X и Y датчиков, ± 3.5 В для Z-датчика.

По окончании подстройки кнопка **Run** примет первоначальный вид.

Процедура подстройки датчиков занимает не более 1÷2 минут.

Сохранение коэффициентов подстройки

Чтобы сохранить полученные результаты в раг-файле, выполните следующие действия:

1. Выберите пункт меню **Settings → Calibrations → Save Calibrations**;
2. В открывшемся диалоговом окне выберите раг-файл для сохранения результатов, и сохраните их.

2.4.3. Калибровка датчиков перемещения

Калибровка проводится по тестовым решеткам. Для калибровки по осям X, Y рекомендуется использовать решетки TGQ. Для калибровки по оси Z – решетки серии TGZ.

2.4.3.1. Калибровка датчиков перемещения по осям ХУ

Для калибровки по ХУ рекомендуется использовать решётку TGQ.

1. Задание толщины образца.



ПРИМЕЧАНИЕ. Установка толщины образца необходима при использовании сменного сканера. При сканировании зондом пропустите пункт установки толщины образца.

При калибровке датчиков по направлениям X и Y на геометрические размеры получаемого изображения влияет высота расположения измеряемой поверхности образца над магнитным фиксатором сканера. Высота складывается из толщин образца и подложки.

Толщину образца мы можем установить в программе в окне **Scanner Calibration Setup** (Рис. 2-20).

В работе со сменным сканером с датчиками можно использовать поликоровые или металлические подложки. Поликоровая подложка закрепляется на предметном столике, который устанавливается на магнитный фиксатор сканера (толщина ≈4 мм). Металлическая подложка непосредственно устанавливается на магнитный фиксатор сканера (толщина 0.5 мм).

При использовании в работе одного типа подложек, произведите калибровку с этой подложкой.

При использовании в работе подложек различной толщины, рекомендуется произвести калибровку для каждого типа подложек, и, сохранить результаты в отдельные раг-файлы. В дальнейшем, после смены подложки необходимо загрузить соответствующий этой подложке раг-файл.

Чтобы задать толщину образца:

- Откройте диалоговое окно **Scanner Calibration Setup** (Рис. 2-20), выбрав в Главном меню **Settings → Calibrations → Change Calibrations**.

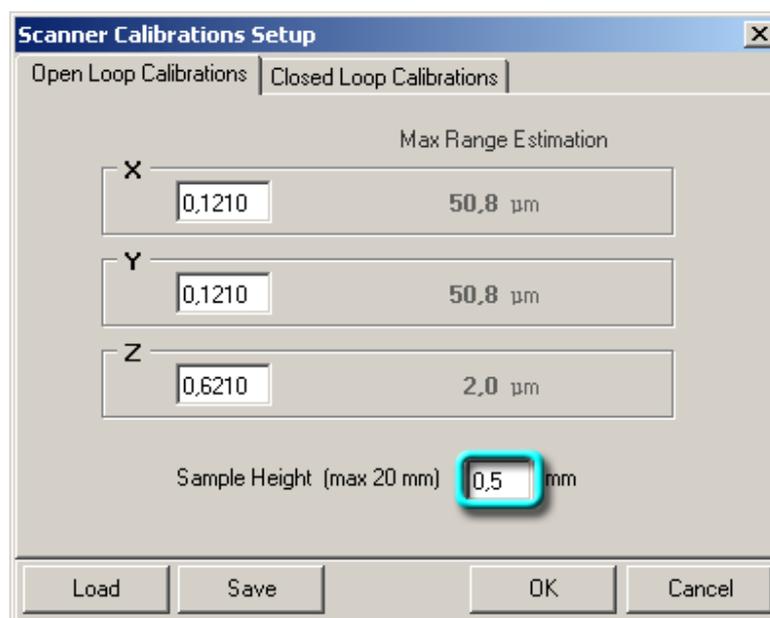


Рис. 2-20. Диалоговое окно **Scanner Calibrations Setup**

- b. В поле ввода **Sample Height**, на любой из вкладок, введите значение толщины образца. Толщина измеряется от верхней плоскости подложки, на которой проводится калибровка.



ПРИМЕЧАНИЕ. Для тестовой решетки толщина образца равна 0.5 мм.

- c. Щелкните на кнопке **ОК**, чтобы применить сделанные изменения.

2. Отсканируйте тестовую решётку. При сканировании должны выполняться следующие условия:

- решетка должна быть сориентирована параллельно осям X и Y (с точностью до нескольких градусов);
- цепь обратной связи XY замкнута (кнопка  XY Closed-Loop нажата);
- по оси, по которой будет производиться калибровка, нужно установить максимальную область сканирования. В настройках сканирования (кнопка  Settings на панели управления вкладки **Scan**) выбрать направление сканирования по этой оси. При этом для калибровки необходимо отсканировать не менее 3 периодов решетки по медленному направлению сканирования.

3. Определите средний измеренный период решетки по XY с помощью программного модуля **Image Analysis**. Для этого:

- a. Перейдите на вкладку **Data**. Последнее отсканированное изображение отображается в области просмотра и редактирования фрейма.
- b. Чтобы открыть **Image Analysis** щелкните на кнопке  на панели инструментов.
- c. Определите период решетки по осям X и Y с помощью метода **Calibration**. Подробное описание процедуры измерения периода решетки см. в книге «Программное обеспечение для СЗМ», часть 2, п. 2.2.7. «Calibration».
- d. Закройте программный модуль **Image Analysis**.

4. Измените калибровочные параметры датчиков. Для этого:

- a. В главном меню последовательно выберите **Settings** → **Calibrations** → **Change Calibrations**. На экране появится диалоговое окно **Scanner Calibrations Setup** (Рис. 2-21).
- b. Выберите вкладку **Closed Loop Calibrations**.

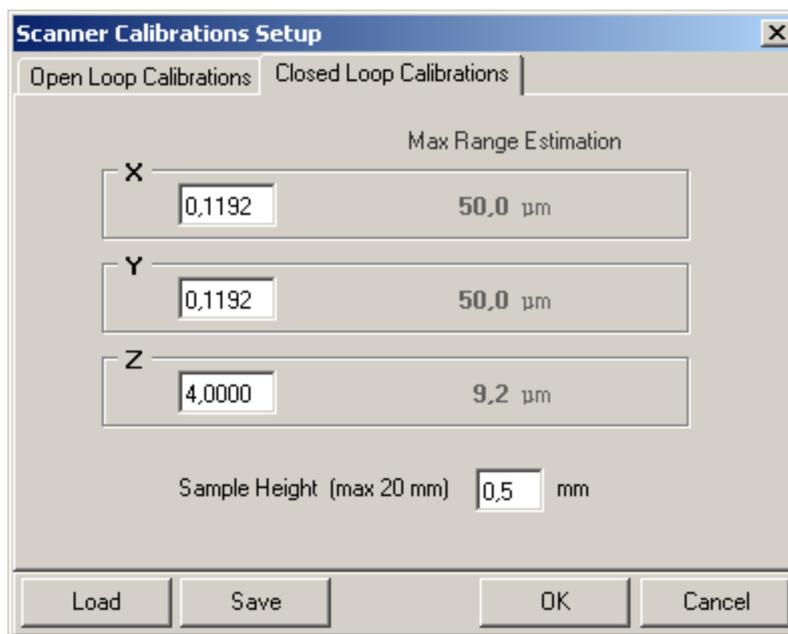


Рис. 2-21. Диалоговое окно **Scanner Calibrations Setup**

- с. Измените соответствующие калибровочные параметры датчиков по следующему правилу:

$$\text{new} = \text{old} \times r' / r$$

где:

- new** – новое значение калибровочного параметра;
- old** – старое значение калибровочного параметра;
- r'** – период решётки по паспорту;
- r** – измеренный период решётки.

5. Чтобы сохранить калибровочные параметры в раг-файле, щелкните на кнопке **Save**.
6. Щелкните на кнопке **OK**, чтобы применить сделанные изменения и закрыть диалоговое окно.

2.4.3.2. Калибровка датчика перемещения по оси Z

Для калибровки датчика по оси Z рекомендуется использовать тестовые решетки серии TGZ. Для более точной калибровки желательно использовать решетку с большой высотой ступенек, например TGZ3.

1. Отсканируйте тестовую решетку. При сканировании должны выполняться следующие условия:
 - цепь обратной связи XY замкнута (кнопка  XY Closed-Loop нажата);
 - в качестве регистрируемого сигнала выбран **SensorHeight** (устанавливается в диалоговом окне **Scan Setup**, вызываемом кнопкой  Settings).

2. Определите высоту решетки с помощью программного модуля **Image Analysis**. Для этого:
 - a. Перейдите на вкладку **Data**. Последнее сканированное изображение отображается в панели просмотра и редактирования фрейма.
 - b. Чтобы открыть **Image Analysis**, щелкните на кнопке  на панели инструментов.
 - c. При необходимости выполните вычитание плоскости, либо поверхности второго порядка (с помощью групп методов **Flatten Correction**).
 - d. Из списка в дереве методов выберите **Statistics** → **Histogram**, и щелкните на кнопке **Apply**. В результате будет построена гистограмма плотности распределения значений высоты (Рис. 2-22). Расстояние между максимумами (по оси X), соответствует средней высоте выступов решетки.
 - e. Измерьте расстояние между максимумами, с помощью инструмента **Pair Markers** .

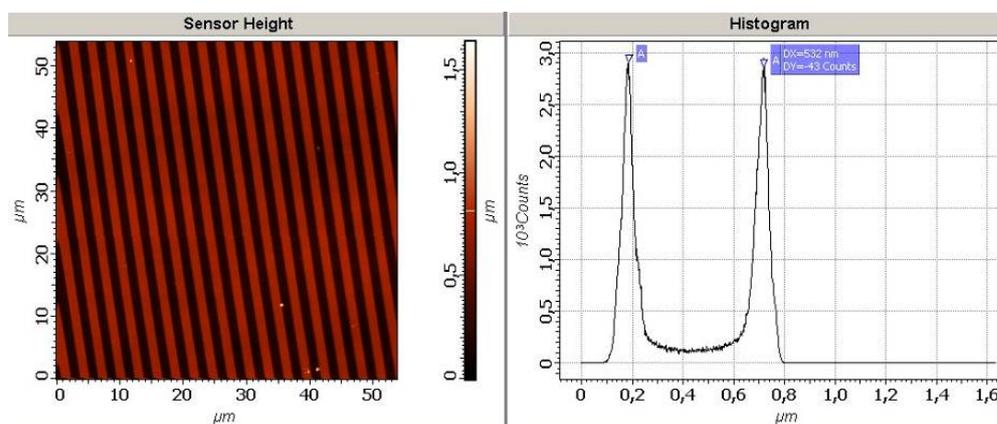


Рис. 2-22. Слева – СЗМ-изображение стандартной решетки (TGZ3 шаг 3 мкм, высота 540 нм).

Справа – гистограмма плотности распределения значений 2D-функции

- f. Закройте программный модуль **Image Analysis**.

3. Измените калибровочные параметры датчика. Для этого:
 - a. В Главном меню последовательно выберите пункты **Settings** → **Calibrations** → **Change Calibrations**. На экране появится диалоговое окно **Scanner Calibrations Setup**.
 - b. Выберите вкладку **Closed Loop Calibrations** (Рис. 2-23).

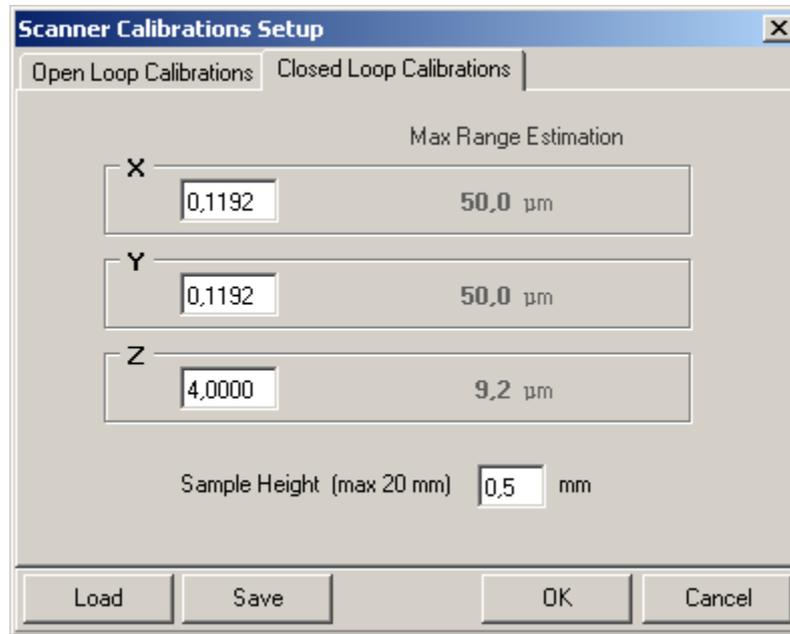


Рис. 2-23. Диалоговое окно **Scanner Calibrations Setup**

- c. Измените Z параметр датчика по следующему правилу:

$$\text{new} = \text{old} \times r' / r$$
 где:
 - new** – новое значение калибровочного параметра;
 - old** – старое значение калибровочного параметра;
 - r'** – высота решетки по паспорту;
 - r** – измеренная высота решетки.
4. Чтобы сохранить калибровочные параметры в rag-файле щелкните на кнопке **Save**.
5. Щелкните на кнопке **OK**, чтобы применить сделанные изменения и закрыть диалоговое окно.