



Certus

Сканирующий зондовый микроскоп

Руководство пользователя

ООО “Нано Скан Технологии”

Россия, 141700, Долгопрудный, ул. Заводская, 7

Тел: +7 (495) 665-00-85

+7 (495) 642-40-68

+7 (495) 642-40-67

E-mail: info@nanoscantech.ru

web: www.nanoscantech.ru

2010 г.



Данное руководство пользователя предназначено для установки и работы со сканирующим зондовый микроскопом (СЗМ) Certus. Сканирующий зондовый микроскоп Certus представляет собой XYZ сканер, управляемый контроллерами сканирующих зондовых микроскопов серии EG-3000 и программным обеспечением NSpec.

Сканирующий зондовый микроскоп Certus входит в состав приборов Certus Light и Certus Standard, а также в состав комплексов Certus Optic, Certus NSOM, Centaur (HR).

Перед началом установки и работы с данным прибором рекомендуем ознакомиться с руководством пользователя. По всем вопросам, связанным с технической поддержкой и модернизацией данного прибора под дополнительные функции обращаться по следующим адресам:

Тел: +7 (495) 665-00-85
+7 (495) 642-40-68
+7 (495) 642-40-67
E-mail: info@nanoscantech.ru
web: www.nanoscantech.ru
Skype: NanoScanTech

Прочтите перед началом работы!

Лазерное излучение.

При работе в некоторых режимах на сканирующем зондовом микроскопе Certus, используются источники лазерного излучения различной мощности и длины волны.

Перед началом работы с СЗМ Certus рекомендуем ознакомиться с документацией на установленный источник лазерного излучения и техникой безопасности для соответствующего класса лазерного источника.

В случае использования внешнего лазера в регистрирующей системе микроскопа или при совмещении СЗМ Certus с внешними источниками лазерного излучения рекомендуем изучить документацию и технику безопасности для используемого источника лазерного излучения.

Меры предосторожности.

СЗМ Certus – это сложный исследовательский прибор. Сильные физические воздействия, работа в агрессивных средах, внесение изменений в конструкцию в процессе эксплуатации, хранения или транспортировки могут привести к повреждению прибора и выходу его из строя.

Модификация и самостоятельное совмещение СЗМ Certus с исследовательским оборудованием.

В случае самостоятельного совмещения СЗМ Certus с исследовательским оборудованием или модификацией под специфические исследовательские задачи рекомендуем согласовать данный вопрос с компанией ООО “Нано Скан Технологии”, так как самостоятельное вмешательство в конструкцию без согласования лишает гарантии.

Оглавление	
Введение.....	7
1. Основные сведения.....	8
1.1. Назначение сканирующего зондового микроскопа Certus.....	8
1.2. Технические характеристики.....	9
1.2.1. Основные параметры.....	9
1.2.2. Размеры исследуемых образцов.....	9
1.2.3. Лазеры используемые в системе регистрации.....	9
1.2.4. Размеры сканирующей головки СЗМ Certus.....	10
1.3. Условия эксплуатации.....	11
1.4. Правила безопасности.....	13
1.5. Правила хранения и транспортировки.....	14
1.5.1. Хранение.....	14
1.5.2. Транспортировка.....	14
1.6. Описание основных узлов.....	15
1.6.1. СЗМ головка Certus.....	15
1.6.2. Контроллер EG-3000.....	17
1.6.3. Программное обеспечение NSpec.....	19
1.6.4. Приборы и комплексы включающие СЗМ Certus.....	20
2. Принципы работы.....	21
2.1. Общие принципы работы сканирующего зондового микроскопа.....	21
2.2. Система перемещения зонда.....	24
2.2.1. Сканирование.....	24
2.2.2. Использование пьезоэффекта.....	25
2.2.3. Неразрывные рычажные системы.....	27
2.2.4. Датчики положения.....	28
2.3. Зонды.....	30
2.3.1. Основные параметры зондов.....	30
2.3.2. Общий вид зондов.....	31

2.4. Система регистрации.....	32
2.4.1. Система регистрации на основе дефлектометра.....	32
2.4.2. Система регистрации методом “shear-force”.....	34
2.5. Обратная связь.....	35
3. Ввод в эксплуатацию.....	37
3.1. Установка СЗМ Certus.....	37
3.1.1. Описание СЗМ головки Certus.....	37
3.1.2. Подключение держателя зондов.....	41
3.2. Подключение контроллера EG-3000.....	42
3.3. Подключение к компьютеру.....	43
3.4. Установка и запуск программного обеспечения NSpec.....	43
3.5. Порядок включения/выключения СЗМ Certus.....	45
3.5.1. Порядок включения.....	45
3.5.2. Порядок отключения.....	46
4. Работа со сканирующим зондовым микроскопом Certus.....	47
4.1. Установка зондов.....	47
4.2. Настройка регистрирующей системы.....	50
4.2.1. Наведение лазерного луча на балку кантилевера.....	50
4.2.2. Позиционирование фотодиода.....	52
4.2.3. Поиск максимума отражения лазерного луча от балки.....	53
4.2.4. Совмещение центров лазерного пятна и фотодиода.....	54
4.2.5. Получение резонансной частоты зонда.....	55
4.3. Настройка параметров обратной связи.....	57
4.4. Настройка Set point.....	58
4.5. Подвод зонда к поверхности.....	58
4.5.1. Грубый подвод зонда к поверхности.....	58
4.5.2. Наклон СЗМ головки.....	58
4.5.3. Плавный подвод.....	59
4.6. Общие принципы настройки параметров сканирования.....	59

4.7. Сканирование.....	60
4.8. Первичная обработка и сохранение результатов.....	61
5. Калибровка сканера.....	62
5.1. Свойства пьезокерамики.....	62
5.1.1. Крип.....	62
5.1.2. Нелинейность и гистерезис.....	65
5.1.3. Основные свойства петли гистерезиса пьезосканера.....	65
5.1.4. Нелинейная коррекция в плоскости XY.....	66
5.1.5. Отклонения от основных свойств петли гистерезиса.....	67
5.1.7. Влияние гистерезиса и нелинейности на измерения по Z.....	71
5.2. Калибровка и коррекция нелинейности.....	73
6. Использование оптического оборудования с СЗМ Certus.....	78
6.1. Общие принципы совмещения с оптическим оборудованием.....	78
6.2. Примеры совмещения с оптическим оборудованием.....	79

Введение

В данном руководстве пользователя описан сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) Certus.

СЗМ Certus специально разработан для работы с оптическим оборудованием, таким как оптические микроскопы, спектрометры и другие подобные приборы.

СЗМ Certus является основой таких приборов и комплексов, как Certus Optic, Certus NSOM, Certus Standard, Centaur и Centaur HR.

Для полноценной работы СЗМ Certus необходимы универсальный СЗМ контроллер EG-3000 и программное обеспечение NSpec.

1. Основные сведения

1.1. Назначение сканирующего зондового микроскопа Certus

Certus — специализированный сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ), специально разработанный для работы с оптическим оборудованием для совмещения методик сканирующей зондовой микроскопии и оптической микроскопии и спектроскопии.

В основе СЗМ Certus лежит сканирующая трехкоординатная (XYZ) головка на основе комплекса пьезостеков (пьезокерамических стеков) и неразрывной рычажной системы.

СЗМ Certus предназначен для получения изображения и изучения свойств поверхности различных веществ, материалов и структур, как естественных, так и искусственных. Например, изучение свойств поверхности полимерных, биологических, неорганических и полупроводниковых материалов, биологических клеток, тканей, отдельных биологических структур и биомолекул, покрытый, элементов электронной техники и т.д.

На СЗМ Certus можно решать следующие задачи:

- получать изображение поверхности исследуемых образцов;
- определять рельеф поверхности исследуемых образцов;
- проводить силовую спектроскопию поверхности;
- осуществлять СЗМ литографию;
- при использовании различных методик получать соответствующую информацию о физико-химических свойствах поверхности исследуемых образцов;
- при совмещении с оптическими методами исследования получать и сопоставлять информацию о спектральных и топографических (в зависимости от методики) свойствах поверхности исследуемых объектов.

Общий список задач, решаемых посредством СЗМ Certus, определяется используемыми методиками.

1.2. Технические характеристики

1.2.1. Основные параметры

Основные параметры		
1	СЗМ головка	
1.1	Встроенный XYZ сканер	
1.1.1	Поле зрения СЗМ (диапазон сканирования)	100x100x15 мкм
1.1.2	Резонансные частоты XY	1 кГц
1.1.3	Резонансные частоты Z	7 кГц
1.1.4	СЗМ пространственное разрешение (XY, латеральное)	<1 нм
1.1.5	СЗМ пространственное разрешение (Z, вертикальное)	<0.1 нм
1.1.6	Остаточная нелинейность	<0.3%
1.1.7	Минимальный шаг сканирования	0.1 нм
1.2	Датчики перемещения	
1.2.1	Тип датчиков	Ёмкостные
1.2.2	Принцип измерения	Время-цифровые преобразования
1.3	Материал сканера	
1.3.1	Базовый	Алюминиевый сплав
1.3.2	Специализированное исполнение №1	Титан
1.3.3	Специализированное исполнение №2	Сплавы с заданным температурным коэффициентом линейного расширения

1.2.2. Размеры исследуемых образцов

min	Минимальный размер образцов определяется только удобством работы.
max без установки СЗМ на образец	До Ø 125 мм и 16 мм в высоту.
max с установкой СЗМ на образец	Не ограничены.

1.2.3. Лазеры используемые в системе регистрации

По умолчанию	650 нм, <1 мВт, Class II
Инфракрасный	1300 нм, <1 мВт, Class II
Внешний	Установленный у пользователя

1.2.4. Размеры сканирующей головки СЗМ Certus

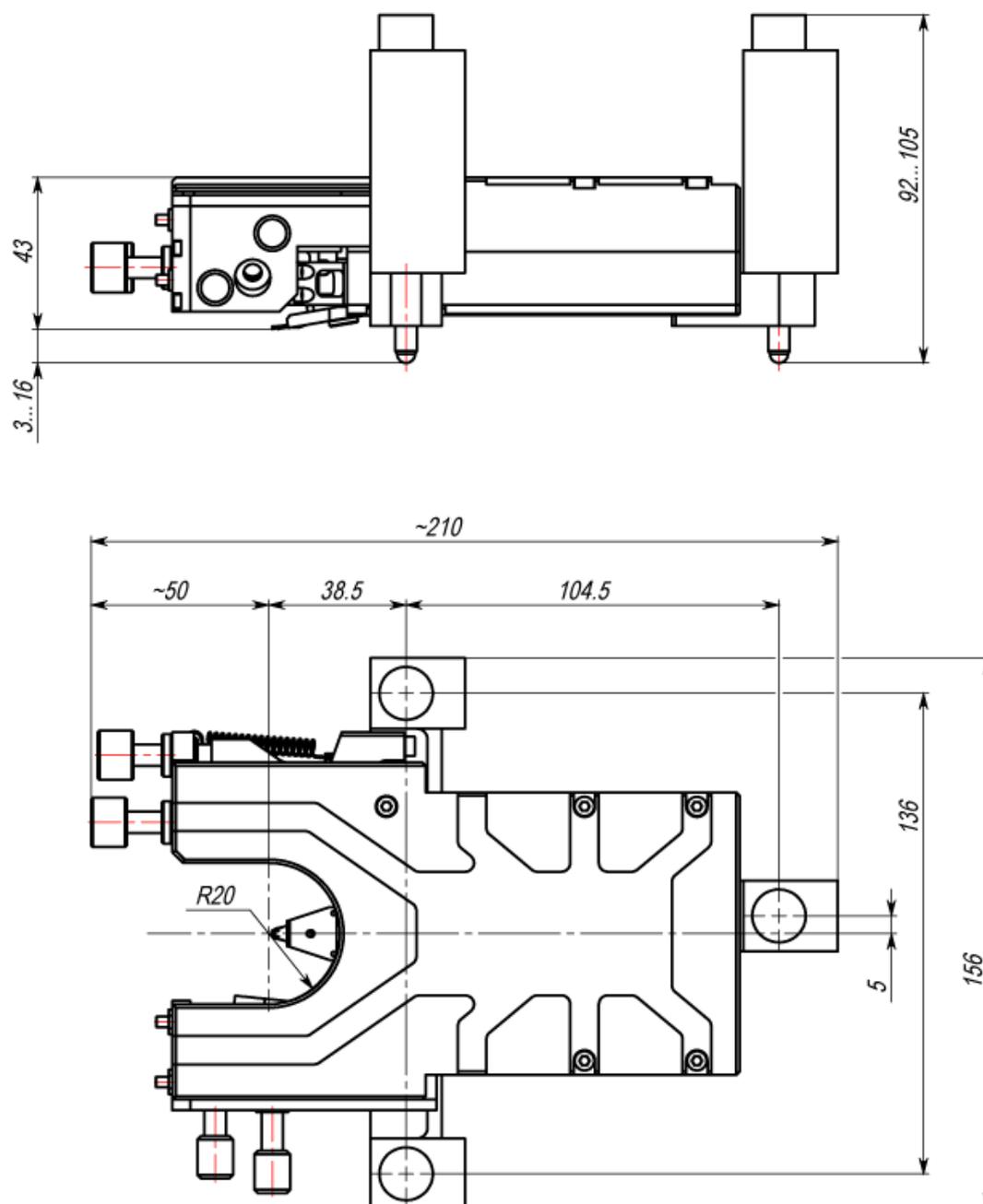


Рис. 1.1 Размеры сканирующей головки СЗМ Certus.

1.3. Условия эксплуатации

Сканирующий зондовый микроскоп Certus представляет собой сложный, высокоточный исследовательский прибор. Для обеспечения нормальной работы прибора рекомендуется соблюдать следующие условия эксплуатации и размещения:

1	Температура	
1.1	Общий допустимый диапазон рабочих температур	10÷50°C
1.2	Рабочая температура*	Из общего допустимого диапазона ±3°C
1.3	Оптимальная рабочая температура	22±3°C
1.4	Изменение температуры	Не более 1°C в час
*При поставке СЗМ Certus настраивается под оптимальную рабочую температуру. При температуре в помещении отличной от оптимальной, но в пределах допустимого диапазона рабочих температур, необходимо провести калибровку сканера микроскопа под среднюю температуру в помещении.		
2	Относительная влажность	
2.1	Не более	80 %
2.2	Оптимальная влажность	65±15 %
2.3	Изменение влажности	Не более 15% в час
3	Атмосферное давление, мм. рт. ст.	760±30
4	Требования к электропитанию	
4.1	Напряжение, В	110/220 (+10%/-15%)
4.2	Частота, Гц	50/60
4.3	Заземление	Обязательно
5	Требования к шумам и вибрациям в помещении	
5.1	Значимый диапазон вибраций, Гц	1÷100
5.2	Амплитуда вибраций в значимом диапазоне	Не более 0.5 μm
5.3	Уровень звукового давления до частоты 10000 Гц при работе СЗМ без дополнительной акустической защиты	Не более 35 дБ
6	Требования к чистоте помещений или мест установки*	
6.1	Класс по ГОСТ ИСО 14644-1-2002	Не хуже класса 9 ИСО
6.2	При калибровке по ГОСТ Р 8.635-2007 ГСИ и поверке по ГОСТ Р 8.630-2007, ГОСТ Р 8.593-2009	Не хуже класса 8 ИСО
*Попадание пыли на поверхность исследуемых образцов приводит к искажению результатов исследования. Рекомендуется помещать сканирующую головку СЗМ Certus в специализированные боксы для защиты от пыли или готовить и хранить образцы в условиях уменьшающих вероятность попадания пыли в область сканирования.		
7	Экранирование	
7.1	От прямых солнечных лучей	Обязательно

7.2	Нагревательных элементов	Обязательно
7.3	От источников сильных электромагнитных помех	Обязательно
7.4	От прямых потоков воздуха и других газов	Обязательно
8	Общие рекомендации	
8.1	На работу и качество полученных результатов влияют тепловые потоки в помещении, частые и резкие изменения температуры и влажности.	
8.2	Шумовой фон могут создавать работающие компрессоры, тяги, ламинарные боксы, системы охлаждения приборов и подобные источники периодических или случайных шумов.	
8.3	Рекомендуется размещать СЗМ головку Certus на максимально возможное расстояние от компьютеров, мониторов и периферических устройств.	
8.4	Избегать сильных механических воздействий на СЗМ Certus, так как это может привести к выходу из строя механики и управляющей электроники прибора.	



1.4. Правила безопасности

1	Общие правила	
1.1	Заземление	Необходимо проверить заземление всех основных узлов
1.2	Открытые части прибора	Запрещается включать и проводить работу на приборе со снятыми крышками и кожухами.
1.3	Подключение/отключение кабелей	Отключение/подключение кабелей к разъёмам прибора проводить только на выключенном приборе.
1.4	Демонтаж/монтаж узлов прибора	Только специалистами компании “Нано Скан Технология”, сертифицированными специалистами, по согласованию с компанией “Нано Скан Технология”
1.5	Подключение дополнительных устройств	Только по согласованию с компанией “Нано Скан Технология”.
1.6	Попадание жидкости	Не допускается.
2	Источники лазерного излучения	
2.1	Лазер дефлектометра	В соответствии с классом безопасности установленного лазера, класс безопасности и характеристики лазера описаны на СЗМ головке под ярлыком изображённом на рис. 1.2.
2.2	Внешние источники	В соответствии с маркировкой на внешних источниках лазерного излучения



Рис. 1.2 Предупреждающий ярлык на источниках лазерного излучения.



1.5. Правила хранения и транспортировки

1.5.1. Хранение

Прибор должен храниться в упакованном виде в специализированном помещении без резких изменений температуры и влажности.

1	Температура	22±10°C
2	Влажность	Не более 80%

1.5.2. Транспортировка

При транспортировке прибор должен быть упакован в оригинальную упаковку, либо в любой другой упаковке, исключающей повреждения при транспортировке.

После транспортировки при температурах ниже 0°C перед запуском прибора дождитесь выравнивания температуры прибора с температурой в помещении.



1.6. Описание основных узлов

В состав сканирующего зондового микроскопа Certus входят:

- СЗМ головка Certus;
- Контроллер EG-3000;
- Программное обеспечение NSpec.

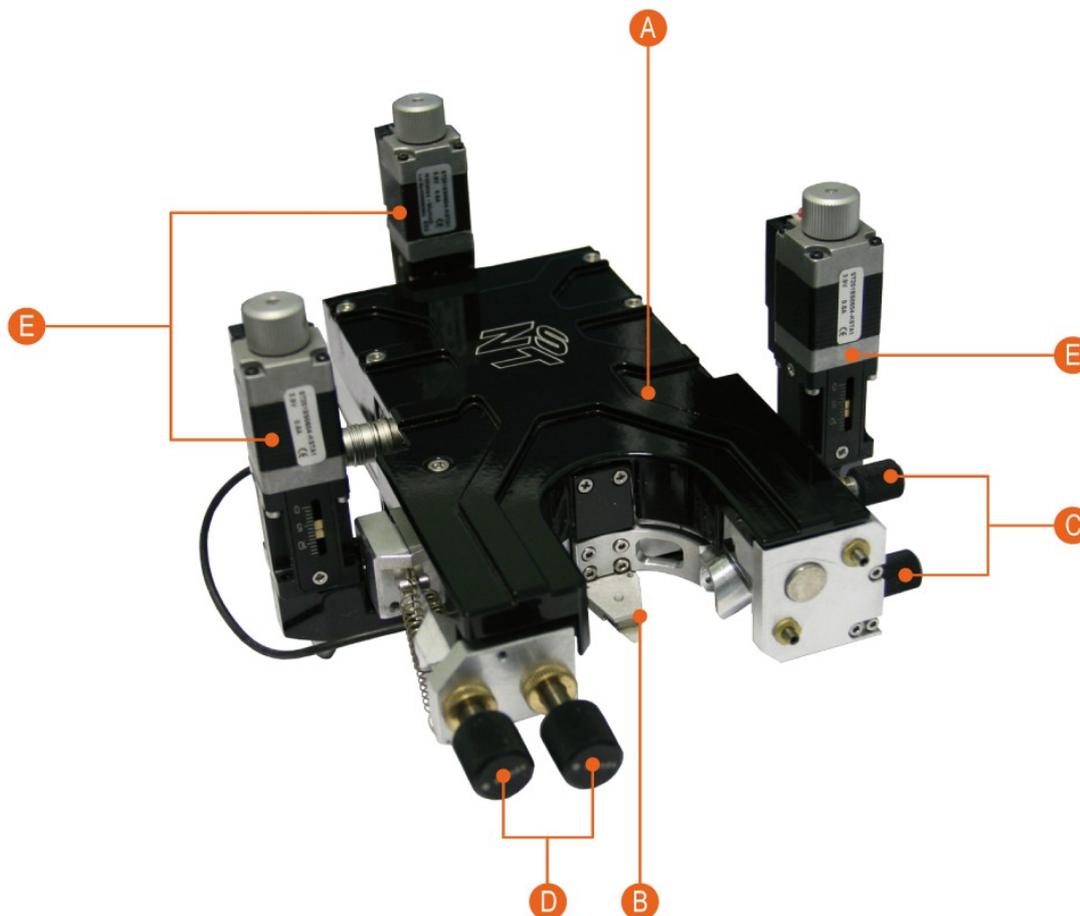
1.6.1. СЗМ головка Certus

Основой сканирующего зондового микроскопа Certus является сканирующая головка нового поколения. Основными отличительными чертами СЗМ **Certus** являются:

- трехкоординатный плоскопараллельный сканер с ёмкостными датчиками на всех осях;
- модульная архитектура, позволяющая использовать широкий диапазон лазеров для дефлектометра (вплоть до стационарных внешних лазеров);
- легко съёмный узел крепления зонда, который позволяет использовать принципиально разные типы зондов;
- открытая рабочая зона (точка контакта зонда и образца), обеспечивающая легкое наблюдение за зондом, ввод внешнего излучения и т.п.;
- параллельный подвод зонда к образцу с возможностью автоматического выравнивания головки над плоскостью образца;
- полностью цифровая связь между головкой и контроллером.

Плоскопараллельный сканер представляет собой монолитное металлическое тело (из высококачественного сплава, обычно из алюминиевого), в котором электроэрозией и другими методами прецизионной обработки сформированы каналы для пьезокерамических актюаторов (пьезостеков), подвижные элементы сканера и т.п. Такая конструкция обеспечивает отличную линейность и плоскостность перемещения, в отличие от классических сканеров на основе пьезотрубок, поверхностью сканирования в которых является сфера. Кроме того, плоскопараллельные сканеры обладают высокой механической прочностью по сравнению с хрупкими пьезотрубками.

В основном режиме СЗМ Certus работает как атомно-силовой микроскоп (АСМ). В качестве дополнительных реализованы режимы: сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), сканирование датчиком Холла, метод Кельвина и другие режимы сканирующей зондовой микроскопии.



A	Система перемещения зонда относительно поверхности по 3-м (X-Y-Z) координатам.
B	Устройство для закрепления зондов для различных методик сканирующей зондовой микроскопии.
C	Винты позиционирования лазера (лазерного пятна) по координатам XY в плоскости верхней стороны балки кантилевера.
D	Винты позиционирования фотодиода для регистрации колебаний балки кантилевера.
E	Шаговые двигатели для подвода сканирующей зондовой головки к поверхности образца.

Рис. 1.3 Сканирующая головка СЗМ Certus.

Все три оси сканирования снабжены ёмкостными датчиками перемещения. Измерительная часть построена на основе ВЦП (время-цифровых преобразователей), которые физически расположены максимально близко к датчикам, и непосредственно выдают цифровой сигнал, пропорциональный измеряемой емкости. Это позволяет осуществлять высокоточные измерения и передавать их в контроллер по длинным соединительным кабелям без ухудшения качества измерений.

В стандартной комплектации дефлектометр построен с использованием диодного лазера с длиной волны 650 нм. По желанию заказчика возможно использование другого, например инфракрасного, лазера. Кроме того, на головку возможна установка оптоволоконного порта для подключения внешнего лазера.

Головка комплектуется несколькими съёмными держателями зонда: для стандартных кантилеверов, для зондов типа *tuning fork* с вертикальным или горизонтальным расположением. По требованию заказчиков могут быть разработаны крепление практически под любые оригинальные зонды.

Уникальный "открытый дизайн" СЗМ **Certus** позволяет использовать высокократные внешние объективы, осветители, конденсоры микроскопов и т.п. для освещения рабочей зоны, наблюдения за образцом и зондом, для подведения излучения в точку контакта зонда и образца.

Управление головкой **Certus** осуществляется с помощью универсального контроллера **EG-3000** и программного обеспечения **NSpec**.

1.6.2. Контроллер EG-3000

Контроллер EG-3060/3060A предназначен для управления работой сканирующего зондового или оптического конфокального микроскопа. Контроллер обеспечивает сбор информации с различных датчиков и внешних устройств и выдает управляющие воздействия на пьезоэлектрические устройства позиционирования, кроме того, вся собранная информация отправляется на управляющий компьютер для последующей обработки и визуализации. Также с помощью компьютера задаются все параметры движения и сканирования. Внешний вид контроллера представлен на рис. 1.4:



Рис. 1.4 СЗМ контроллер EG-3000.

Для контроля положения устройств позиционирования используется цифровая система следящей обратной связи и оригинальная схема измерения ёмкости датчиков перемещения, основанная на преобразователях "время-цифра". Измерение емкости осуществляется в самом сканирующем устройстве, а в контроллер поступает уже цифровой сигнал. Такая система позволяет увеличить точность измерений и значительно повысить помехозащищенность устройства.

Для работы обратной связи зонд-образец может быть использован любой из сигналов, доступных в системе. Контроллер позволяет поддерживать обратную связь по шести каналам одновременно, что позволяет реализовать алгоритмы сканирования как зондом, так и образцом.

Возможно использование любых других сигналов СЗМ для осуществления обратной связи.

В целях реализации модуляционных методик микроскопии (таких, как, например, бесконтактная атомно-силовая микроскопия) в контроллере предусмотрен двухканальный модуль синхронного детектирования, снабженный высокостабильным задающим генератором, выполненным на основе цифрового синтезатора частоты. Скоростная цифровая обработка данных, реализованная с применением программируемой логики (ПЛИС), позволила осуществлять синхронное детектирование сигналов на частотах до 1.5 МГц.

Для управления устройствами грубого позиционирования сканирующей головки, в контроллере предусмотрен модуль управления шаговыми двигателями, позволяющий подключать от 4 до 12 приводов в микрошаговом режиме.

В приборе имеются дополнительные аналоговые входы и выходы для подключения внешних устройств, а также входы и выходы синхронизации. Связь с управляющим компьютером осуществляется с помощью интерфейса USB. Контроллер управляется специализированным программным обеспечением NSpec.

Более подробно контроллер EG-3000 описан в руководстве пользователя:

“Контроллер сканирующего зондового микроскопа (модели EG-3060 и EG-3060A).

1.6.3. Программное обеспечение NSpec

Программное обеспечение NSpec предназначено для управления приборами:

- Certus Light (включая СЗМ головку Certus);
- Certus Standard (включая СЗМ головку Certus);
- Certus Optic (включая СЗМ головку Certus);
- Certus NSOM (включая СЗМ головку Certus);
- Centaur (включая СЗМ головку Certus);
- Centaur HR (включая СЗМ головку Certus);
- Snotra;
- Ratis.

В основе программы лежит многопоточное ядро, написанное на языке C++ и собранное компилятором GCC4. Интерфейс программы создан с использованием кроссплатформенной библиотеки QT4 и библиотеки QWT.

Программа совместима со всеми актуальными версиями ОС Windows (XP, 2003, Vista, 7). По требованию заказчика возможен перенос программы на ОС Linux, *BSD, MacOS.

В программе NSpec реализованы только базовые функции по обработке данных, необходимые для оптимальной настройки параметров сканирования. Для полноценной обработки данных сканирования рекомендуется использовать специализированное программное обеспечение, например Gwyddion. Для обработки спектральных данных так же рекомендуется использовать специализированные программы, такие как GRAMS. Для облегчения передачи данных в другие приложения программа NSpec снабжена фильтрами импорта/экспорта в форматы ASCII, gwy (gwyddion), spc (GRAMS).

1.6.4. Приборы и комплексы включающие СЗМ Certus

- **Certus Light** – минимальная версия СЗМ, в которую входит СЗМ головка **Certus**, подставка с креплением для образца, контроллер и программное обеспечение.
- **Certus Standard** – основная рабочая комплектация СЗМ. В состав входит головка **Certus**, подставка с подвижным столиком для образца, оптический видеомикроскоп, контроллер и программное обеспечение.
- **Certus Optic** – расширенный вариант СЗМ, готовый для интеграции с инвертированным оптическим микроскопом. В состав помимо сканирующей головки **Certus** входит основание с интегрированным плоскопараллельным сканером и подвижным столиком для образца, 6-канальный контроллер и программное обеспечение.
- **Certus NSOM** – сканирующий ближнепольный оптический микроскоп (СБОМ), адаптация сканирующей головки **Certus** для исследований веществ и материалов методиками ближнепольной микроскопии.
- **Centaur** – сканирующая СЗМ головка **Certus** входит в состав СЗМ части комплекса, сочетающего в себе методики сканирующей зондовой микроскопии, рамановской/флюоресцентной конфокальной микроскопии/спектроскопии, традиционной оптической микроскопии.
- **Centaur HR** – сканирующая СЗМ головка **Certus** входит в состав СЗМ части комплекса, сочетающего в себе методики сканирующей зондовой микроскопии, рамановской/флюоресцентной конфокальной микроскопии/спектроскопии с высоким спектральным разрешением, традиционной оптической микроскопии.

2. Принципы работы

2.1. Общие принципы работы сканирующего зондового микроскопа

Сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ, англ. SPM — Scanning Probe Microscope) — микроскоп для получения изображения поверхности и информации о её локальных характеристиках.

В общем случае сканирующий зондовый микроскоп (рис. 2.1) включает в себя:

- зонд;
- систему перемещения зонда относительно образца по 3-м (XYZ) координатам;
- регистрирующую систему.

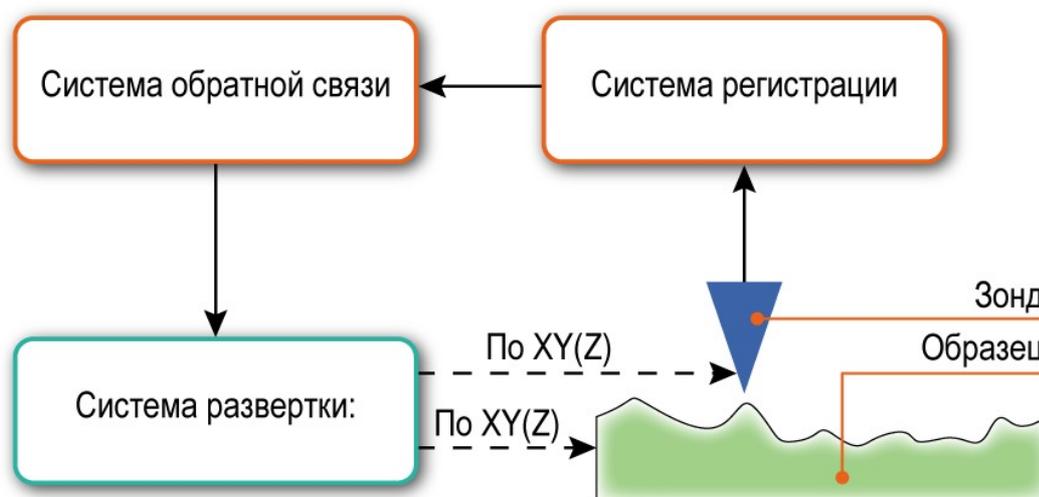


Рис. 2.1 Принципиальное устройство сканирующего зондового микроскопа.

В основе работы сканирующего зондового микроскопа лежит принцип получения информации о взаимодействии зонда с поверхностью в одной точке. При малом расстоянии между поверхностью и зондом можно зафиксировать действие сил взаимодействия (отталкивания, притяжения, и других сил) и проявление различных эффектов (например, туннелирование электронов). Эти взаимодействия и

эффекты можно регистрировать с помощью современных средств регистрации. Для регистрации используют различные типы сенсоров, чувствительность которых позволяет зафиксировать такие возмущения.

Для построения растрового изображения используется система перемещения зонда (система развертки) относительно поверхности по 2-м (XY) или 3-м (XYZ) координатам.

Регистрирующая система фиксирует значение выбранного параметра. В общем случае, регистрируется значение параметра, зависящего от величины взаимодействия между зондом и поверхностью образца. На основе известных или предполагаемых зависимостей величины взаимодействия от расстояния между зондом и поверхностью в ходе сканирования строится топография поверхности (3-х мерное изображение по координатам XYZ). В том случае, если регистрация изменения величины взаимодействия от расстояния не имеет смысла или её нельзя определить однозначно, то строится распределение величины измеряемого параметра по поверхности (3-х мерное изображение, где по XY строится распределение параметра, а по Z величина того или иного параметра) (рис. 2.2).

Регистрируемое значение обрабатывается системой отрицательной обратной связи, которая управляет положением образца или зонда по одной из координат (в большинстве случаев по Z). В качестве системы обратной связи чаще всего используется ПИД-регулятор.

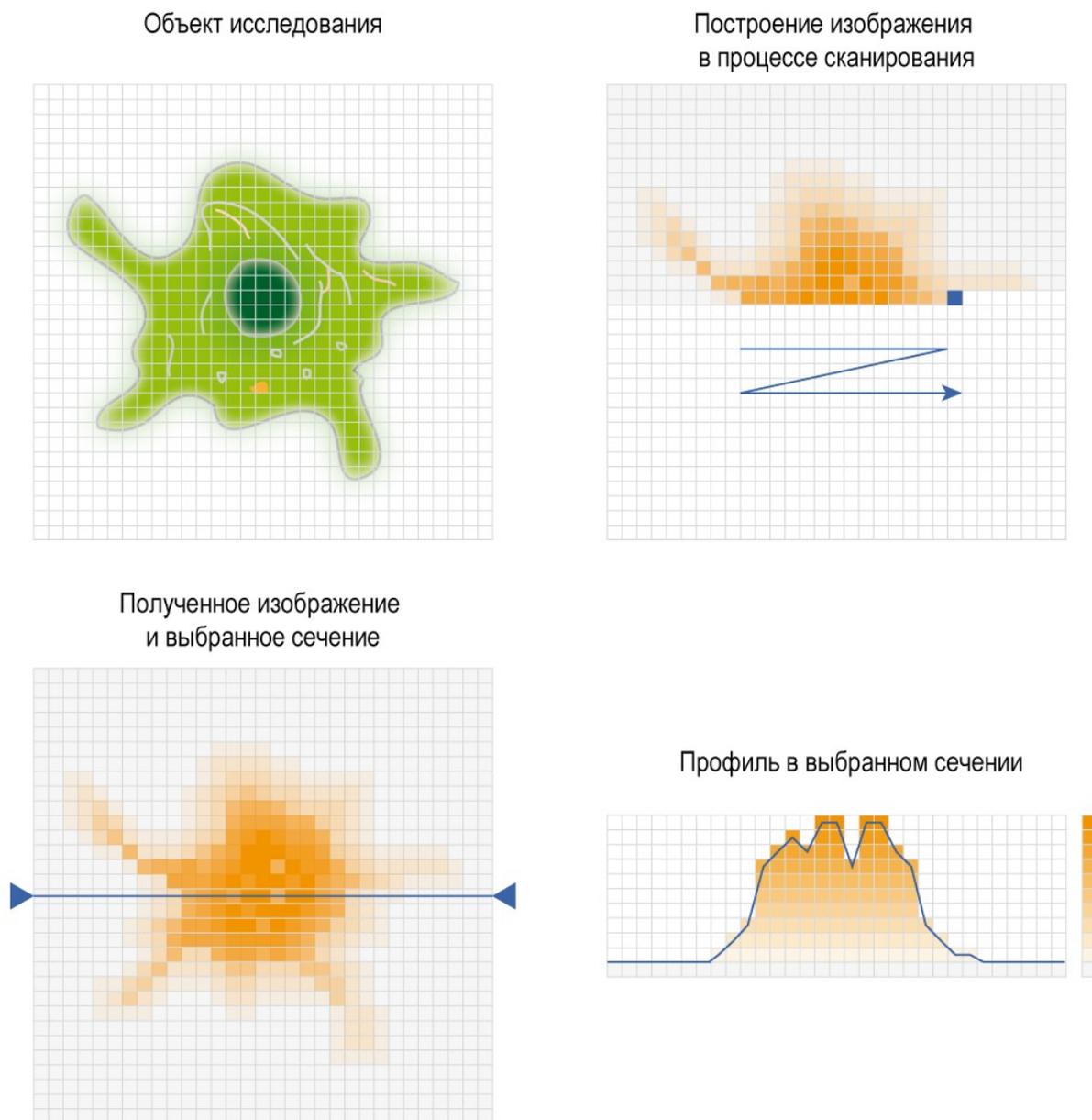


Рис. 2.2 Общий принцип построения изображений сканирующим зондовым микроскопом.

Основное различие методик сканирующей микроскопии состоит в выбранном для регистрации параметре и методе его регистрации.



2.2. Система перемещения зонда

Для получения изображения в сканирующих зондовых микроскопах используются системы развертки по 2-м (XY) или 3-м (XYZ) координатам.

2.2.1. Сканирование

Процесс сканирования происходит следующим образом. Сканер осуществляет растровое перемещение зонда относительно образца (рис. 2.3). В узлах растра происходит оцифровка измеряемых сигналов. Направление строк, вдоль которых движется сканер, называется направлением быстрого сканирования. Перпендикулярное ему направление называется направлением медленного сканирования. Итоговое изображение строится на основе данных, получаемых по быстрому направлению сканирования на прямом или на обратном ходу сканирования.

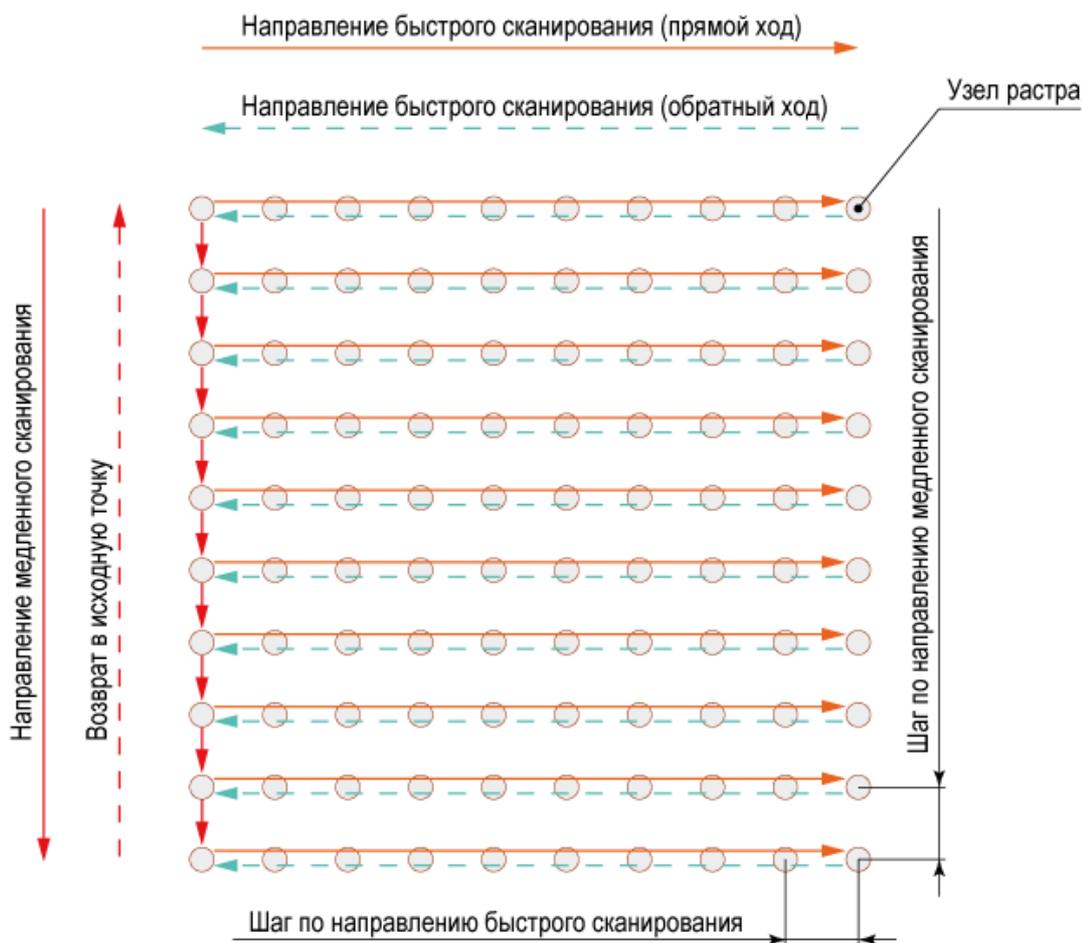


Рис. 2.3 Иллюстрация процесса сканирования.

Можно записывать данные и на прямом, и на обратном ходу сканирования, производя смещения в перпендикулярном направлении как в начале, так и в конце строки. При этом скорость получения изображения увеличивается в два раза. Однако, для сканеров без датчиков такой способ сканирования не применяется, т.к. разница между профилем поверхности на прямом и обратном ходу в силу нелинейных свойств пьезокерамики обычно существенна. Для сканеров с датчиками тоже есть различие между “прямым” и “обратным” профилем, хотя и не всегда заметное. Причиной этого являются ошибки обратной связи по направлению быстрого сканирования. Эти ошибки уменьшаются при снижении скорости сканирования. Также в контактном режиме измерений возможны паразитные смещения зонда под действием силы трения между ним и образцом. Эти смещения меняют знак в зависимости от направления движения зонда. В итоге, часто оказывается, что для получения изображения требуемого качества выгодней использовать запись данных только на прямом или только на обратном ходу. Если не проводить смещение по направлению медленного сканирования, то данные, записываемые на обратном ходу сканера, практически не отличимы от данных, получаемых на прямом ходу сканирования.

2.2.2. Использование пьезоэффекта

Во всех современных сканирующих зондовых микроскопах, независимо от конструкции, для позиционирования зонда и его перемещения относительно поверхности используется обратный пьезоэлектрический эффект.

Обратный пьезоэлектрический эффект — эффект возникновения механических деформаций в диэлектриках под действием электрического поля. Он возникает в кристаллах, ячейки которых не имеют центра симметрии, в результате чего такие ячейки представляют собой постоянный электрический диполь. При приложении к такому кристаллу внешнего электрического поля происходит деформация диполей, приводящая к изменению размеров кристалла. Так как выращивание монокристаллов материалов с пьезоэлектрическими свойствами представляет значительную трудность, обычно используют поликристаллические материалы — керамики, диполи в кристалли-

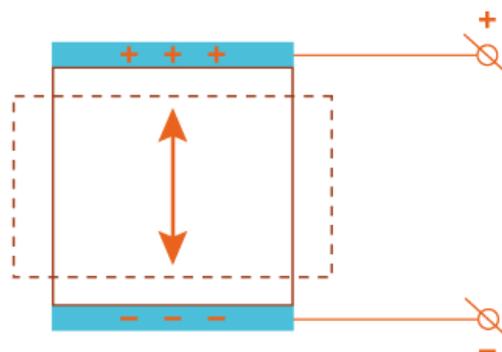


Рис. 2.4 Схематическое изображение обратного пьезоэффекта.

тах которых ориентированы преимущественно в одном направлении поляризации в сильном магнитном поле. Соответственно, при приложении электрического поля к такой керамике происходит изменение её размеров (рис. 2.4).

Пьезоэлектрические свойства материалов описывают с помощью набора пьезоконстант, отражающих связь величины приложенного электрического поля с удлинением материала. Как правило, даже для относительно небольшого удлинения необходимо приложить к материалу высокое напряжение. Например, для титаната циркониевокислого свинца (ТЦС, $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,55}\text{Ti}_{0,45})\text{O}_3$ с добавками Nb, Cr, La, Fe и т.д.) пьезоконстанта $d_{33}=374 \times 10^{-12}$ м/В (для ТЦС-5А).

Для уменьшения напряжения управляющего сигнала используют последовательное соединение слоев пьезокерамики с электродами на каждом слое (рис. 2.5). В более усовершенствованном варианте используется сплошной массив пьезокерамики с электродами в теле пьезостека.

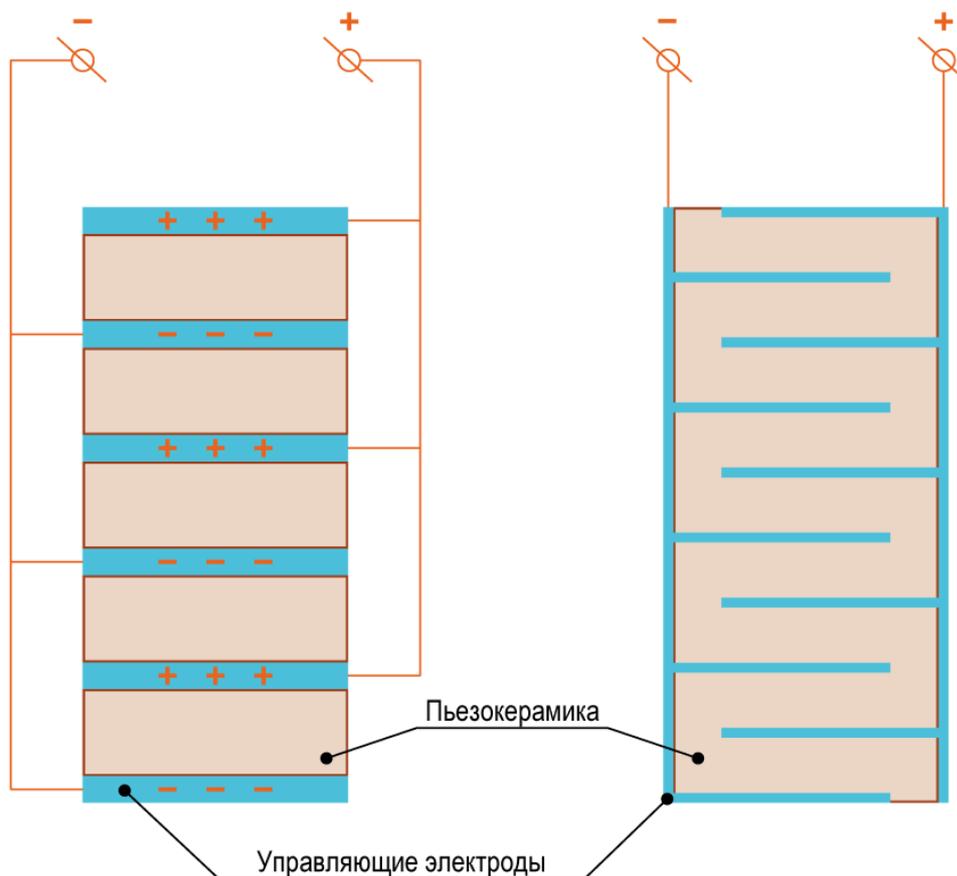


Рис. 2.5 Схематическое изображение многослойного пьезоэлектрического актюатора (пьезостека).



2.2.3. Нерывные рычажные системы

В общем случае величина смещений, вызванных обратным пьезоэлектрическим эффектом, относительно размеров пьезокерамического элемента, представляет очень малую величину. Относительная деформация обычно не превышает 0.1% и общее удлинение такого устройства составляет несколько десятков микрометров. Для увеличения смещения используют различные механические устройства, такие как рычаги, шарниры (рис. 2.6) и устройства работающие на изгиб (рис. 2.7).

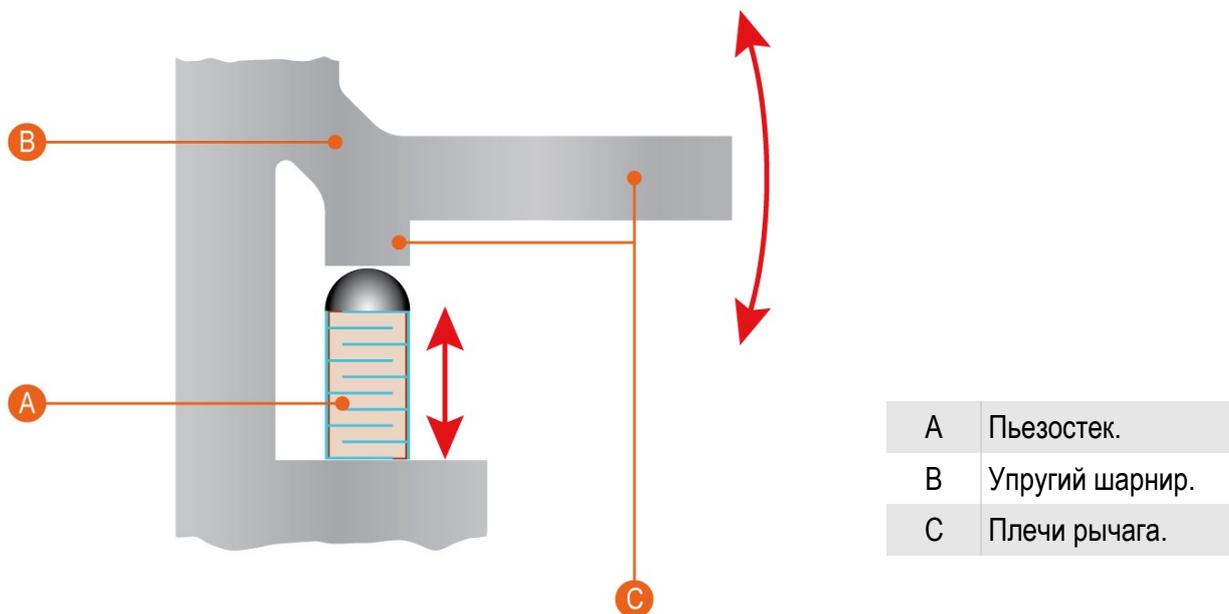


Рис. 2.6 Схематическое изображение принципа действия рычажно-шарнирного элемента.

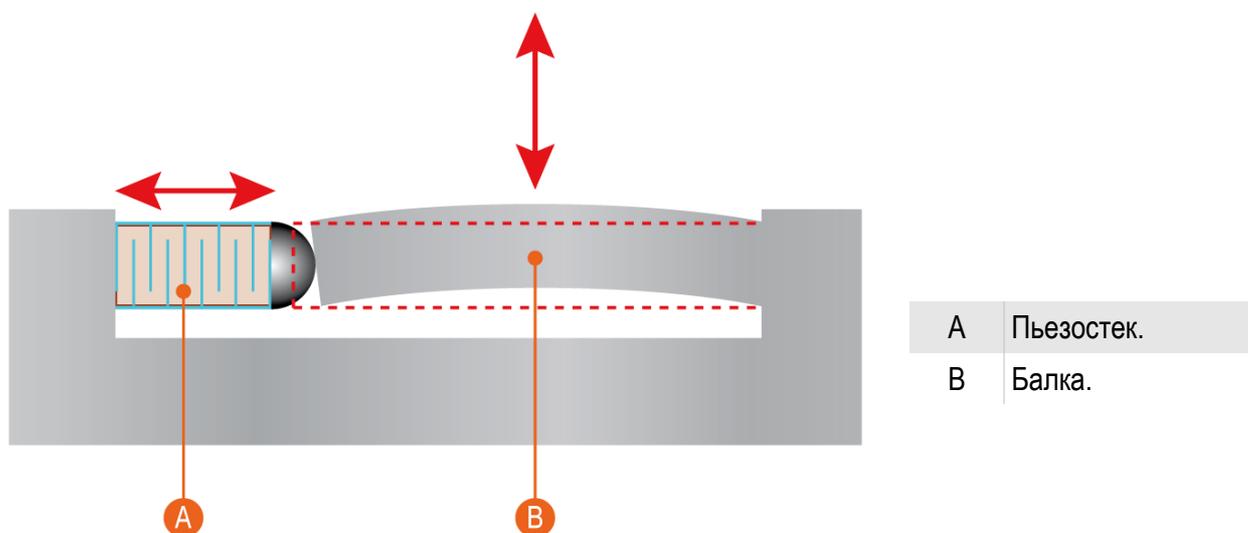


Рис. 2.7 Схематическое изображение принципа действия элемента работающего на изгиб.

Как правило, пьезоэлектрические движущие элементы используют только для осуществления поступательного движения, для возвратного движения пользуются тем фактом, что в диапазоне прикладываемых нагрузок, применяемые материалы подчиняются закону Гука, то есть деформация прямо пропорциональна приложенному напряжению и материал такого устройства испытывает только упругие деформации. В результате чего, после прекращения действия внешней силы элементы такой системы принимают первоначальные размер, форму и, соответственно, положение в пространстве.

Для реальных устройств элементы сканера комбинируют таким образом, чтобы их форма и расположение образовывали кинематическую схему для плоско-параллельного перемещения в плоскости XY или в пространстве по XYZ.

2.2.4. Датчики положения

Из-за нелинейных свойств пьезокерамики получаемое изображение содержит искажения. Под нелинейными свойствами пьезокерамики следует понимать особенности зависимости между управляющим электрическим полем и деформацией пьезокерамического образца, а именно, нелинейность и неоднозначность этой зависимости. Обычно нелинейные свойства керамики разделяют на крип, гистерезис и собственно нелинейность. Также к нелинейным свойствам следует отнести нестабильность чувствительности пьезокерамики.

Для сканера, не оснащенного датчиками, управляющее напряжение по данной оси является индикатором его положения по этой оси. Нелинейность и неоднозначность зависимости управляющее напряжение - положение часто приводит к существенным искажениям получаемого изображения.

Для коррекции перемещения по осям и точного определения положения зонда в пространстве используют датчики с различными принципами действия. Это могут быть оптические, индуктивные, магнитоэлектрические, ёмкостные и т.д.

В сканирующей головке СЗМ Certus используются ёмкостные датчики. Принцип действия таких

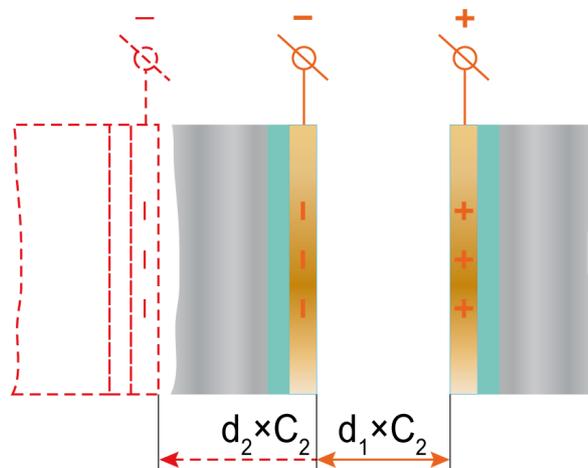


Рис. 2.8 Схематическое изображение принципа действия ёмкостного датчика перемещений.

датчиков отображен на рисунке 2.8.

Так как, ёмкость плоского конденсатора, состоящего из двух параллельных пластин выражается формулой 2.1:

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad (2.1)$$

C – ёмкость;

S – площадь каждой пластины;

d – расстояние между пластинами;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

ε_0 – электрическая постоянная.

То при изменении расстояния между пластинами меняется ёмкость конденсатора датчика, что позволяет определить смещение по оси.

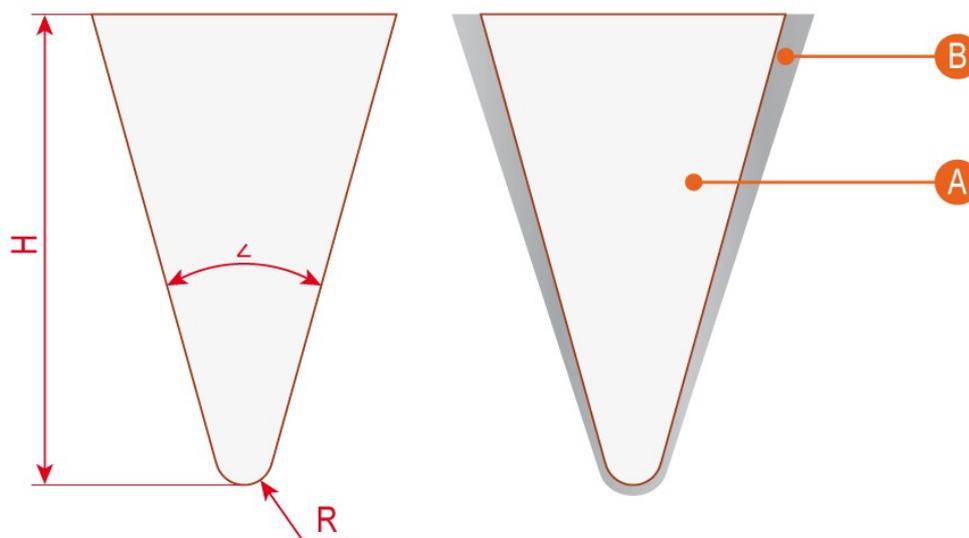


2.3. Зонды

2.3.1. Основные параметры зондов

Основной элемент любого сканирующего зондового микроскопа — зонд. На основе взаимодействия зондов с поверхностью строится изображение поверхности и распределение по поверхности локальных физических характеристик.

В общем случае зонд сканирующего зондового микроскопа представляет собой иглу конической или пирамидальной формы. Наиболее распространенные материалы для зондов это металлы (вольфрам, платина и подобные для туннельной микроскопии), кремний и нитрид кремния — Si_3N_4 для атомно-силовой микроскопии, кремний с покрытием для магнитных и проводящих методик, кремний с алмазным покрытием для индентирования и т.д. Общий вид зондов изображен на рисунке 2.9.



A	Основной материал зонда.
B	Покрытие зонда.
R	Радиус иглы зонда.
H	Высота иглы.
α	Угол конуса.

Рис. 2.9 Схематическое изображение игл зондов.

От радиуса закругления вершины зонда и угла конуса зависит разрешение и точность отображения элементов на поверхности. От высоты зонда зависит максимальный перепад высот на поверхности доступный для отображения. Покрытия зондов позволяют использовать различные методики сканирующей зондовой микроскопии.

Кроме этих параметров на качество получаемого изображения, набор методик и возможность исследования образцов разной природы влияют два параметра. Это жесткость зонда или силовая константа (англ. force constant, N/m) и резонансная частота зонда (англ. resonant frequency, kHz).

2.3.2. Общий вид зондов

В общем виде зонды для сканирующей зондовой микроскопии могут представлять собой иглы, однако промышленно методами литографии и различными методами напыления покрытий, производится зонды специализированной формы (рис. 2.10).

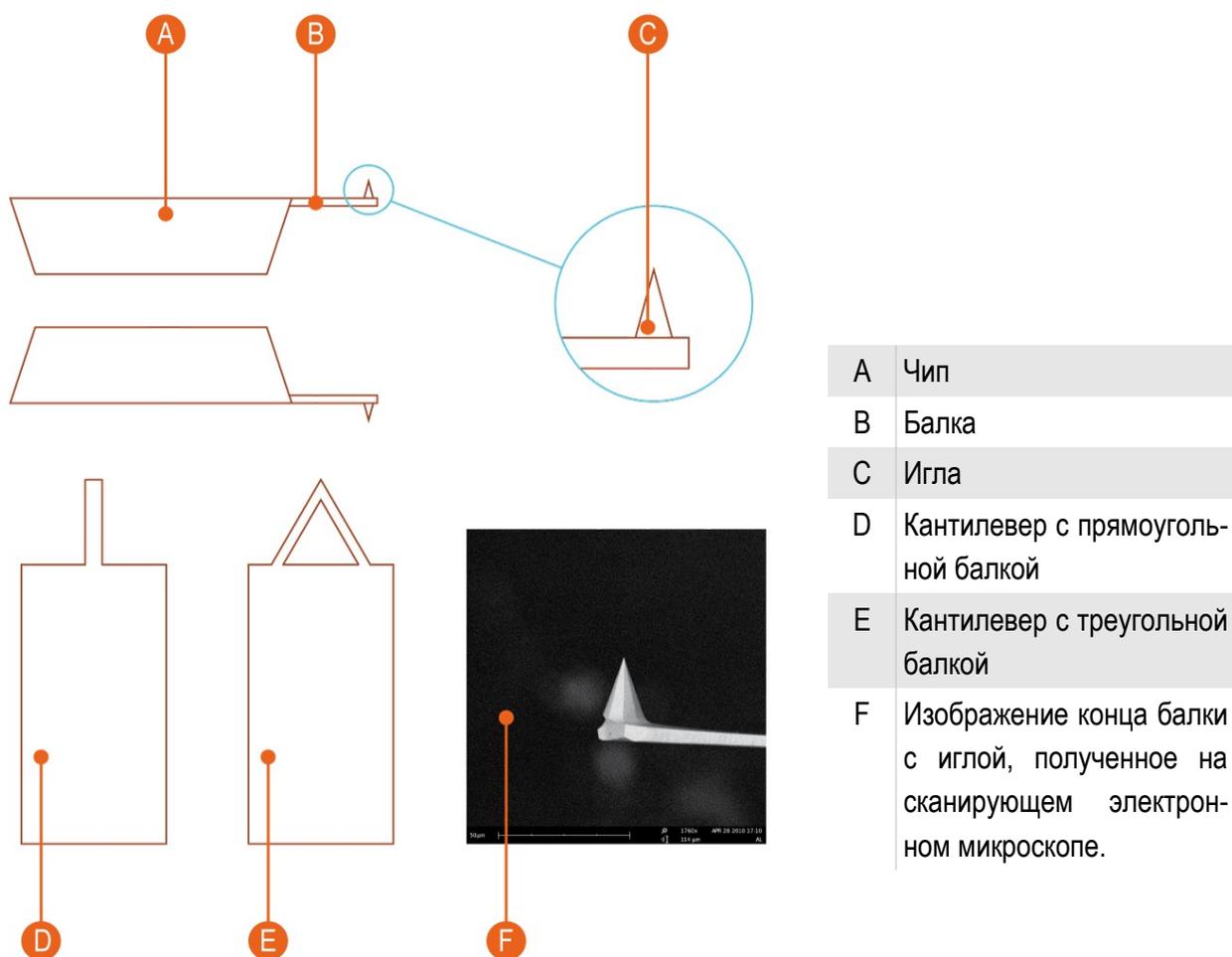


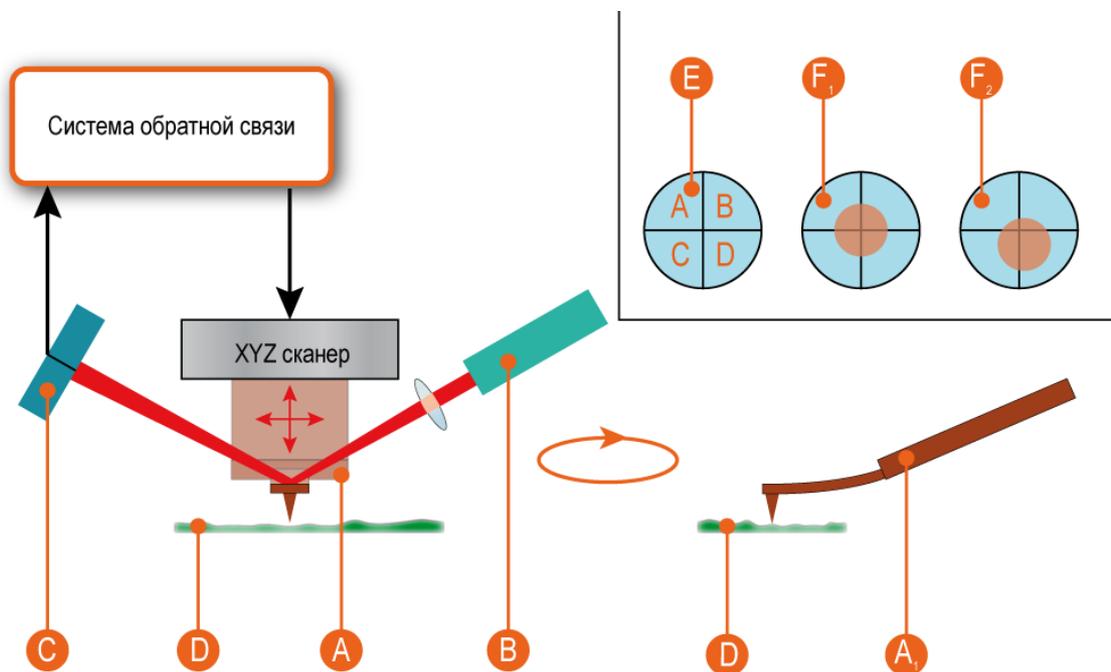
Рис. 2.10 Схематическое изображение игл зондов.

2.4. Система регистрации

Для регистрации перемещения зонда и позиционирования его относительно поверхности используются различные системы регистрации. Для атомно-силовой микроскопии, как правило, используют два типа систем регистрации.

2.4.1. Система регистрации на основе дефлектометра.

Наиболее распространена система регистрации на основе лазерного дефлектометра. Принципиальная схема такой системы изображена на рис. 2.11.

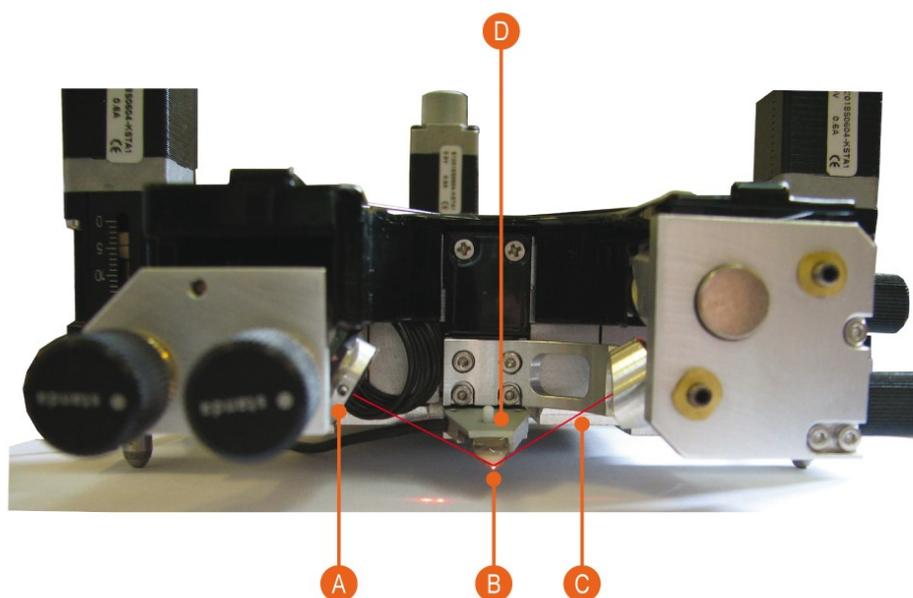


A	Зонд.
A ₁	Отображение изгиба кантилевера.
B	Лазер.
C	4-х секционный фотодиод.
D	Образец.
E	Схема 4-х секционного фотодиода. Секции обозначены A, B, C, D.
F ₁	Положение лазерного пятна по центру фотодиода.
F ₂	Случайное положение лазерного пятна на фотодиоде.

Рис. 2.11 Схематическое изображение дефлектометра.

Лазерный луч фокусируют на балке зонда. Отраженный луч попадает на 4-х секционный фотодиод. По соотношению интенсивности на секциях фотодиода определяется положение отражающей части зонда в пространстве. При перемещении зонда по оси Z или поворотах балки происходит изменение положения лазерного пятна на фотодиоде. В результате, по заранее определенным соотношениям определяется положение зонда относительно поверхности.

В сканирующем зондовом микроскопе Certus система регистрации на основе дефлектометра изображена на рис. 2.12.



A	4-х секционный фотодиод.
B	Зонд.
C	Лазер.
D	Держатель зонда и сканер.

Рис. 2.12 Реализация системы регистрации на основе дефлектометра в СЗМ Certus.

Общий вид фотодиода с лазерным пятном отображен на рисунке 2.13.

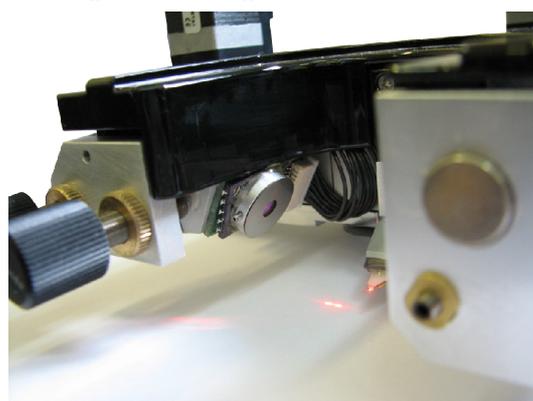
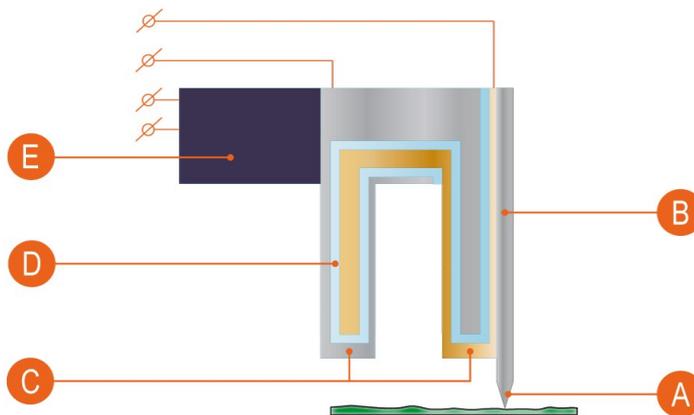


Рис. 2.13 Фотодиод в системе регистрации.

2.4.2. Система регистрации методом “shear-force”

Метод “**shear-force**” основан на регистрации изменения частоты колебаний зонда, вызванных тангенциальной составляющей сил взаимодействия зонд-поверхность. Для определения изменения частоты колебаний используют резонаторы камертонного типа (**tuning-fork**, рис. 2.14), колебания с которых детектируют с помощью прямого пьезоэлектрического эффекта кристаллов кварца.

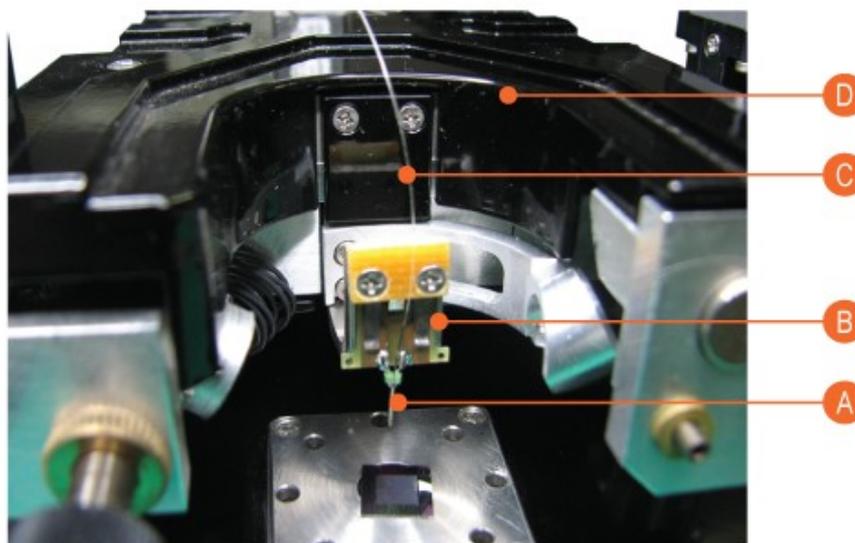


A	Острие иглы.
B	Зонд.
C	Электроды, которые используются для измерения изменения напряжения возникающего на сторонах кристалла кварца (прямой пьезоэлектрический эффект) в результате изменения частоты колебаний при взаимодействии с поверхностью. Информация о изменении напряжения позволяет определить текущую частоту колебаний резонатора.
D	Кристалл кварца (пьезоэлектрик).
E	Пьезовибратор. Используется для создания вынужденных колебаний резонатора (установка начальной частоты колебаний резонатора).

Рис. 2.14 Реализация системы регистрации по методу “shear-force”.

Наиболее часто такой метод регистрации используется в тех случаях, где необходимо избежать взаимодействия вещества образца с лазерным излучением, либо в системах ближнепольной микроскопии.

В случае ближнепольной микроскопии вместо иглы на зонд типа “**tuning-fork**” устанавливается специализированный зонд для ближнепольной микроскопии и используется специализированный держатель зондов (рис. 2.15).

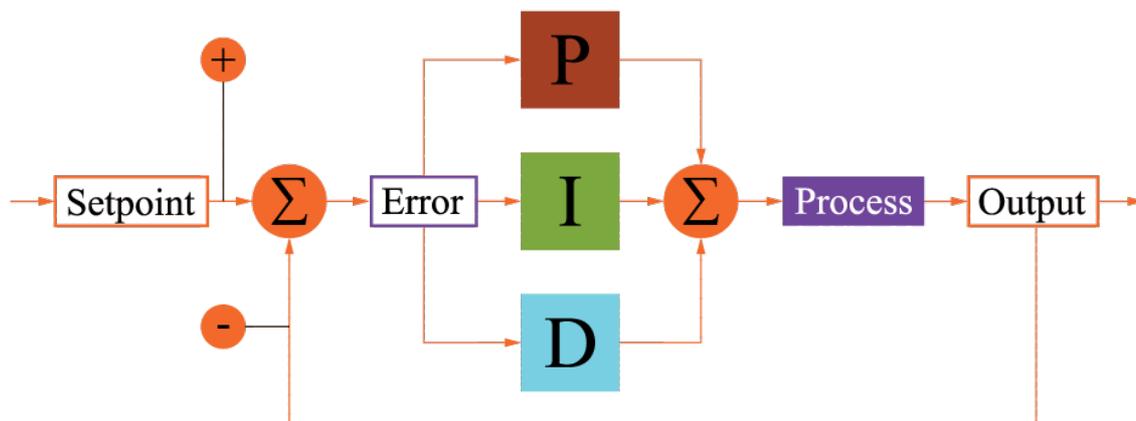


A	Кварцевый камертонный резонатор (tuning-fork) с зондом.
B	Держатель зондов.
C	Оптическое волокно.
D	СЗМ головка Certus

Рис. 2.15 Реализация системы регистрации по методу “shear-force”.

2.5. Обратная связь

В цепи обратной связи сканирующих зондовых микроскопов для формирования управляющего сигнала обычно используется пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор (схема приведена на рисунке 2.16).



P	По пропорциональной составляющей генерируется сигнал противодействующий отклонению регулируемой величины от заданного значения.
I	Интегральная составляющая используется для сглаживания статистических ошибок во входном сигнале.
D	Дифференциальная составляющая необходима для предсказания отклонений регулируемой величины.
Setpoint	Установленное значение регулируемой величины.
Error	Разница между действительным и установленным значением регулируемой величины.
Process	Контролируемый процесс.
Output	Действительное значение регулируемой величины..
+/-	Знак слагаемого для вычисления разницы между действительным и установленным значением регулируемой величины.

Рис. 2.16 Схема ПИД-регулятора.

ПИД регулятор формирует управляющий сигнал на основе составляющих пропорциональному сигналу, интегралу входного сигнала и производной от входного сигнала.

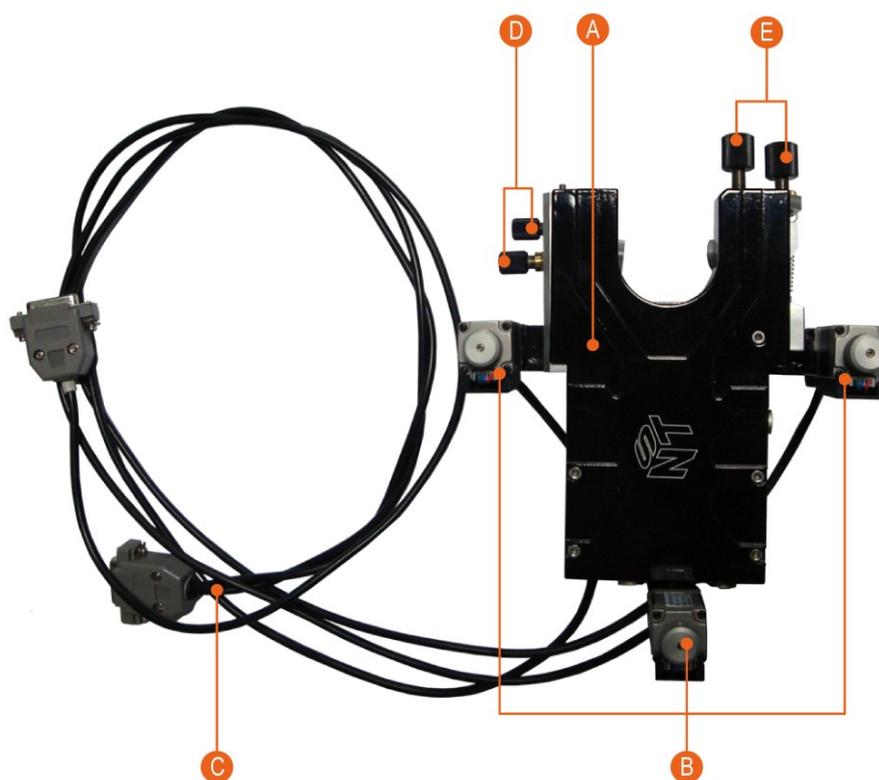
3. Ввод в эксплуатацию

3.1. Установка СЗМ Certus

Для установки СЗМ Certus необходимы: сканирующая головка Certus, СЗМ контроллер серии EG-3000, держатель зондов, набор кабелей для подключения; компьютер.

3.1.1. Описание СЗМ головки Certus

Первоначально необходимо установить на твердую ровную поверхность головку сканирующего зондового микроскопа (рис. 3.1).



A	Система перемещения зонда относительно поверхности по 3-м (X-Y-Z) координатам.
B	Шаговые двигатели для подвода сканирующей зондовой головки к поверхности образца.
C	Кабели управления шаговыми моторами
D	Винты позиционирования лазера (лазерного пятна) по координатам XY в плоскости верхней стороны балки кантилевера.
E	Винты позиционирования фотодиода для регистрации колебаний балки кантилевера.

Рис. 3.1 Общий вид сканирующей головки Certus.

К головке подключены кабели управления шаговыми моторами (рис. 3.2).



A	Разъем кабеля на два боковых шаговых мотора. На один разъем идет два кабеля.
B	Разъем кабеля на задний шаговый мотор. На один разъем идет один кабель.
C	Внешний вид разъема кабелей управления шаговыми моторами.

Рис. 3.2 Кабели управления шаговыми моторами.

Дополнительно, к СЗМ головке Certus необходимо подключить кабели для высоковольтных сигналов и цифрового интерфейса, аналоговых сигналов и питания (рис. 3.3).



Рис. 3.3 Общий вид кабеля, подключаемого к сканирующей головке.

Дополнительные кабели подключаются к разъемам с обратной стороны головки (рис. 3.4).



- | | |
|---|--|
| A | Аналоговые сигналы и питание. |
| B | Высоковольтные сигналы и цифровой интерфейс. |

Рис. 3.4 Схема подключения кабелей к разъемам головки.

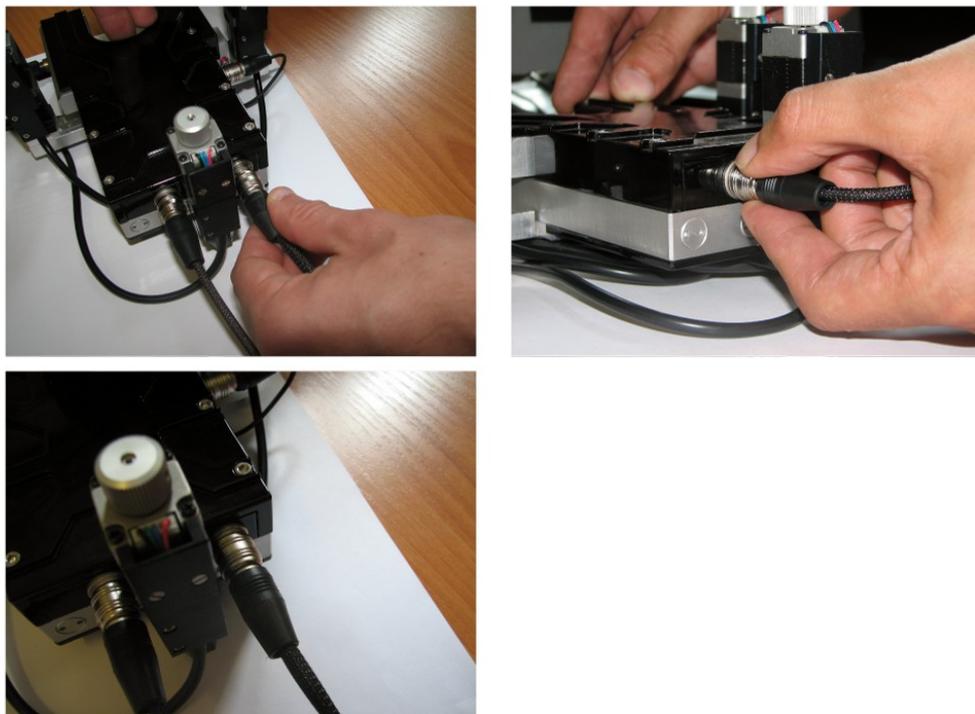


Рис. 3.5 Подключение разъемов и штекеров кабелей к сканирующей головке.

Штекеры кабелей сконструированы таким образом, что их можно подключить только в одном положении. Для этого необходимо соединить разъемы и штекеры и плавно вращая определить положение при котором можно замкнуть разь-

емы на головке и кабеле.

Общий вид головки с подключенными управляющими кабелями дан на рисунке 3.6.



Рис. 3.6 Общий вид сканирующей головки со всеми кабелями.

На правой стороне головки расположен разъём для подключения держателя зондов (рис. 3.7).

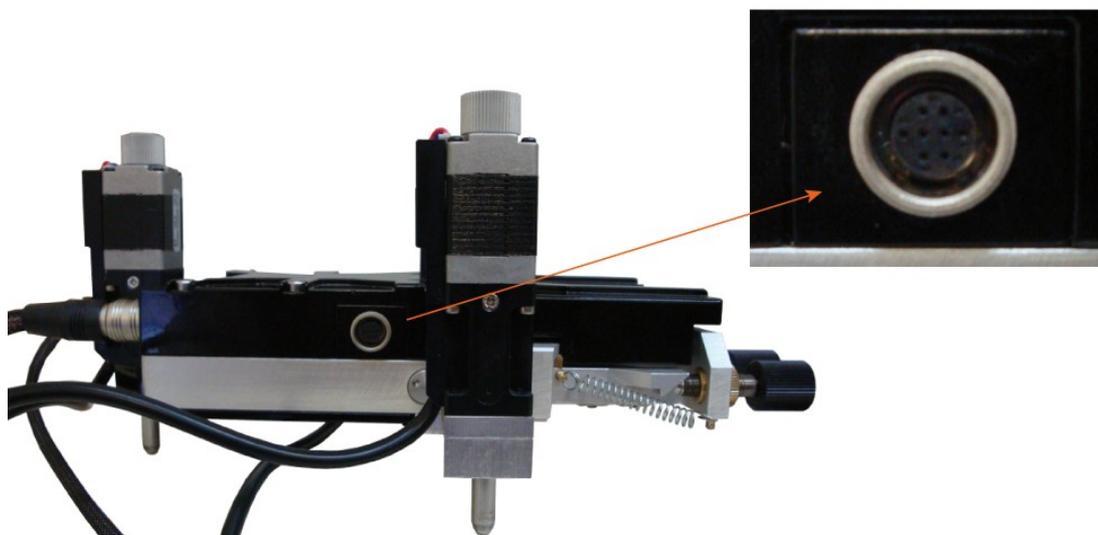


Рис. 3.7 Разъем для подключения держателя зондов.

Разъем на штекере держателя зондов подключается к разъему аналогичным образом.

3.1.2. Подключение держателя зондов

В общем случае к сканирующей головке необходимо подключить держатель зондов (рис. 3.8). Независимо от режима работы сканирующего зондового микроскопа принцип подключения держателя зондов одинаков.



Рис. 3.8 Держатель зондов.

Держатель зондов крепится к сканирующей СЗМ головке магнитными держателями. Соответствующее крепление расположено на нижней части головки. Для закрепления держателя зондов его необходимо понести к соответствующему креплению на СЗМ головке и установить в соответствующие паз.

Для предотвращения повреждения зондов после их установки рекомендуются первоначально устанавливать держатель на СЗМ головку, а затем подключать штекер к разъёму на головке (рис. 3.9).

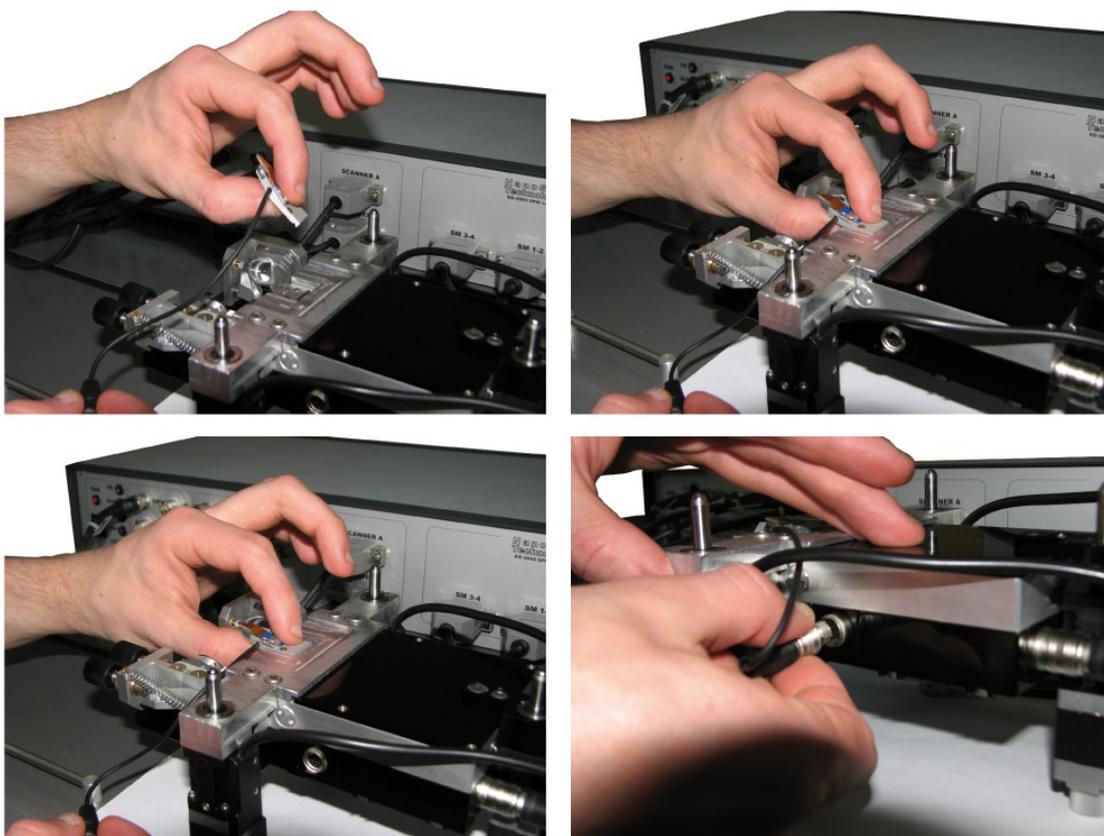


Рис. 3.9 Установка держатель зондов.

3.2. Подключение контроллера EG-3000

После подключения всех кабелей и установки держателя зондов необходимо подключить сканирующую головку Certus к СЗМ контроллеру серии EG-3000.

Описание соответствия разъемов для подключения дано на рисунке 3.10.

Полное описание разъемов на передней панели контроллера дано в руководстве пользователя СЗМ контроллером EG-3000.



A	Высоковольтные сигналы и цифровой интерфейс.
B	Аналоговые сигналы и питание.
C	Подключение заднего шагового двигателя.
D	Подключение боковых шаговых двигателей.

Рис. 3.10 Соответствие разъемов СЗМ головки Certus и СЗМ контроллера EG-3000.

3.3. Подключение к компьютеру

После подключения СЗМ головки Certus к СЗМ контроллеру необходимо по USB подключить контроллер к компьютеру. Непосредственного подключения СЗМ головки к компьютеру нет, только через контроллер.

При этом на компьютере должно быть установлено программное обеспечение NSpec для управления СЗМ Certus.

3.4. Установка и запуск программного обеспечения NSpec

Перед началом работы с программой NSpec, архив, содержащий файлы программы, необходимо распаковать на локальный или съёмный диск компьютера.

Установка не требуется. Программа запускается непосредственно с помощью *.exe файла.

Для работы с программой достаточно запустить двойным нажатием левой кнопки мыши файл **nst.exe** или **NSpec_№.exe** в папке **Soft_Package_№**. Пример на рис. 3.11.

После запуска файла **nst.exe** или **NSpec_№.exe** начнётся запуск программы (рис. 3.12).

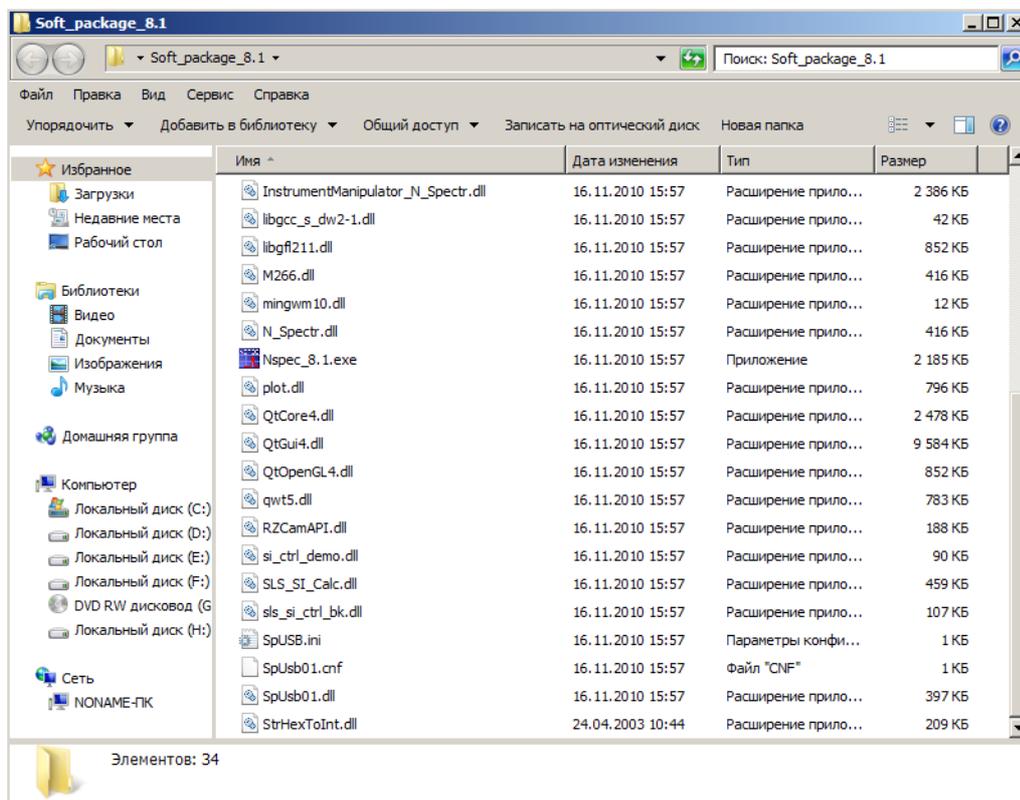


Рис. 3.11 Выбор файла для запуска программы NSpec.



Рис. 3.12 Запуск программы NSpec.

После выполнения вышеописанных действий на экран выводится главное окно программы NSpec.

После вывода главного окна программы на экран можно приступить к работе с программой и подключенным оборудованием.

Подробное описание работы с программой NSpec дано руководстве пользователя программным обеспечением NSpec.

3.5. Порядок включения/выключения СЗМ Certus

3.5.1. Порядок включения

- подключить питание контроллера;
- запустить компьютер;
- запустить программное обеспечение NSpec;
- включить контроллер;
- проверить работоспособность системы.

В случае правильного подключения контроллера и сканирующей зондовой головки Certus в правом верхнем углу главного окна программы NSpec индикатор подключения контроллера СЗМ отобразится как:



Показания индикаторов на передней панели СЗМ контроллера означают:

1	PWR	Индикатор включения контроллера
2	USB	Индикатор передачи данных по USB
3	FNC	Вспомогательный индикатор контроллера
4	RDY	Индикатор готовности контроллера к работе
5	SCN	Индикатор хода сканирования
6	FB	Сигнал обратной связи по Z



3.5.2. Порядок отключения

- остановить сканирование;
- сохранить при необходимости полученные данные;
- отвести головку сканирующего зондового микроскопа от поверхности, чтобы избежать повреждения зондов;
- закрыть программное обеспечение NSpec;
- выключить контроллер.



4. Работа со сканирующим зондовым микроскопом Certus

Для начала работы необходимо включить сканирующий зондовый микроскоп Certus.

В данном разделе описана работа со сканирующим зондовым микроскопом Certus в режиме атомно-силового микроскопа. Полу-контактный режим сканирования. Для других методик работы смотрите дополнения к руководству пользователя. Перед прочтением данного раздела рекомендуем ознакомиться с руководством пользователя программным обеспечением NSpec.

4.1. Установка зондов

Перед началом работы необходимо установить зонд в держатель зондом изображенный на рисунке 4.1.



Рис. 4.1 Держатель зондов.

Зонды или кантилеверы хранят либо в виде пластин от которых необходимо отламывать перед работой отдельные зонды, либо уже подготовленные для работы в специальных контейнерах (рис. 4.2). Обычно кантилеверы направлены балками в сторону крышки упаковки.

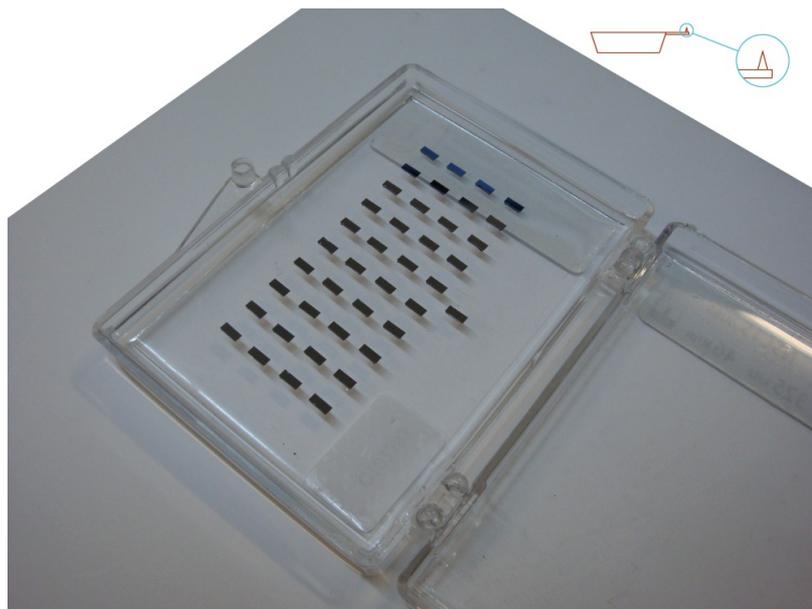


Рис. 4.2 Кантилеверы в гель-паке.

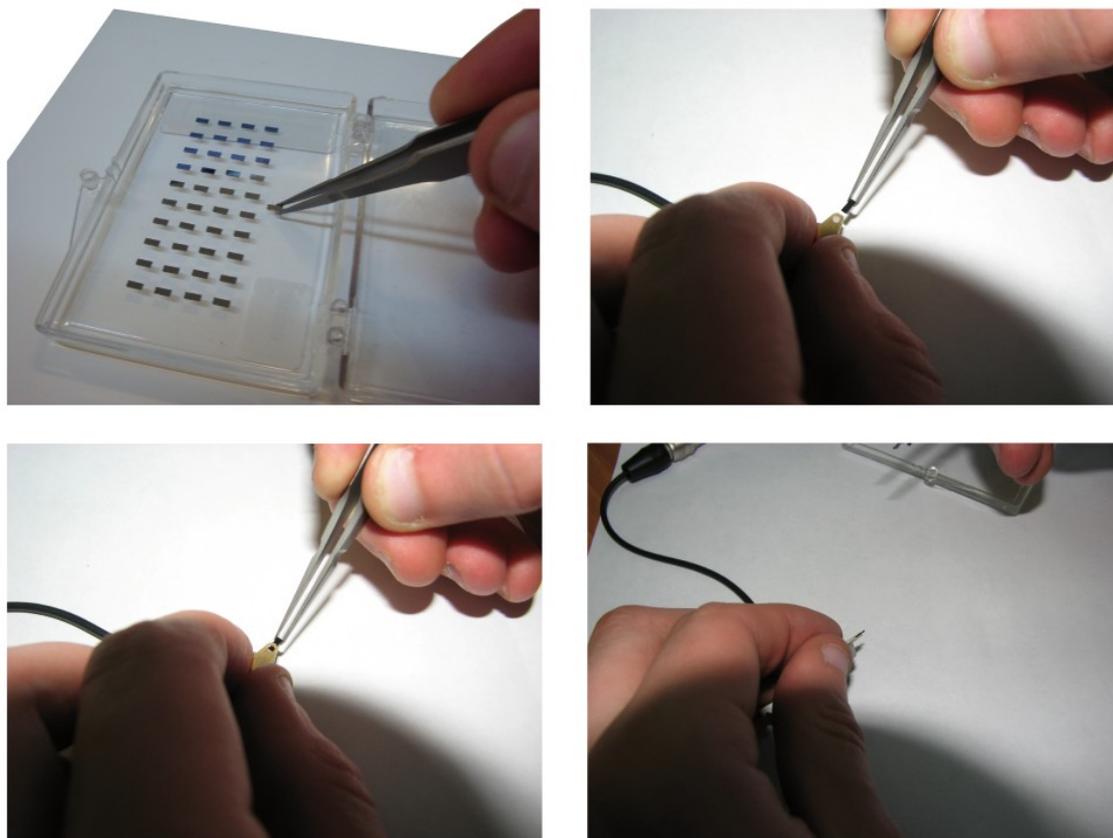
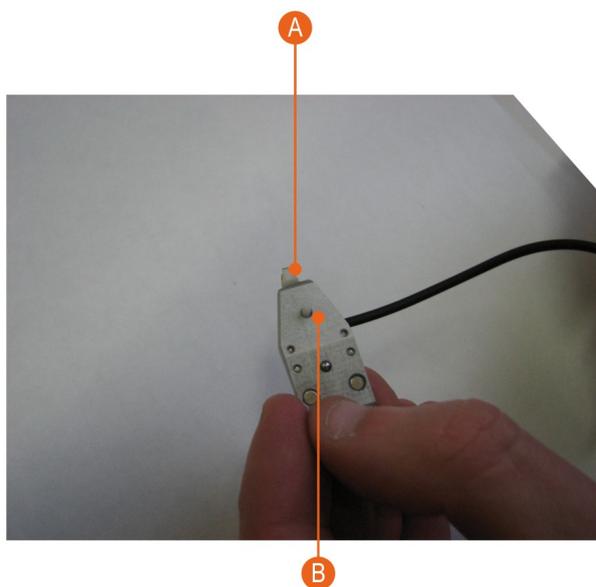


Рис. 4.3 Установка зондов в держатель зондов.

Для установки зонда в держатель зондов необходимо:

- пинцетом захватить зонд за боковые поверхности таким образом, чтобы балка с иглой была направлена в сторону руки;
- держатель зондов необходимо перевернуть и прижать к поверхности для раскрытия зажима так, чтобы нажатой оказалась кнопка на верхней стороне держателя зондов (рис.4.4);
- установить зонд в держатель;
- отпустить держатель зонда для захвата зонда;
- установить держатель зондов в СЗМ головку в соответствии с пунктом 3.1.2.



A	Зонд.
B	Кнопка зажима зонда.

Рис. 4.4 Установка зондов в держатель зондов.



4.2. Настройка регистрирующей системы

Первоначально необходимо настроить систему регистрации перемещения зонда. Для этого необходимо:

- Навести лазерный луч на балку зонда (атомно-силовая микроскопия);
- Добиться попадания отраженного лазерного луча в фотодиод;
- Провести настройку параметров колебаний кантилевера;
- Снять резонансную кривую зонда.

4.2.1. Наведение лазерного луча на балку кантилевера

Для наведения лазерного луча на балку кантилевера необходимо:

- В программе NSpec открыть окно SPM;
- В дополнительном окне SPM Feed Back определить текущее состояние системы. Два случая состояния системы регистрации показаны на рисунках 4.5;
- Добиться попадания лазерного луча на балку кантилевера.

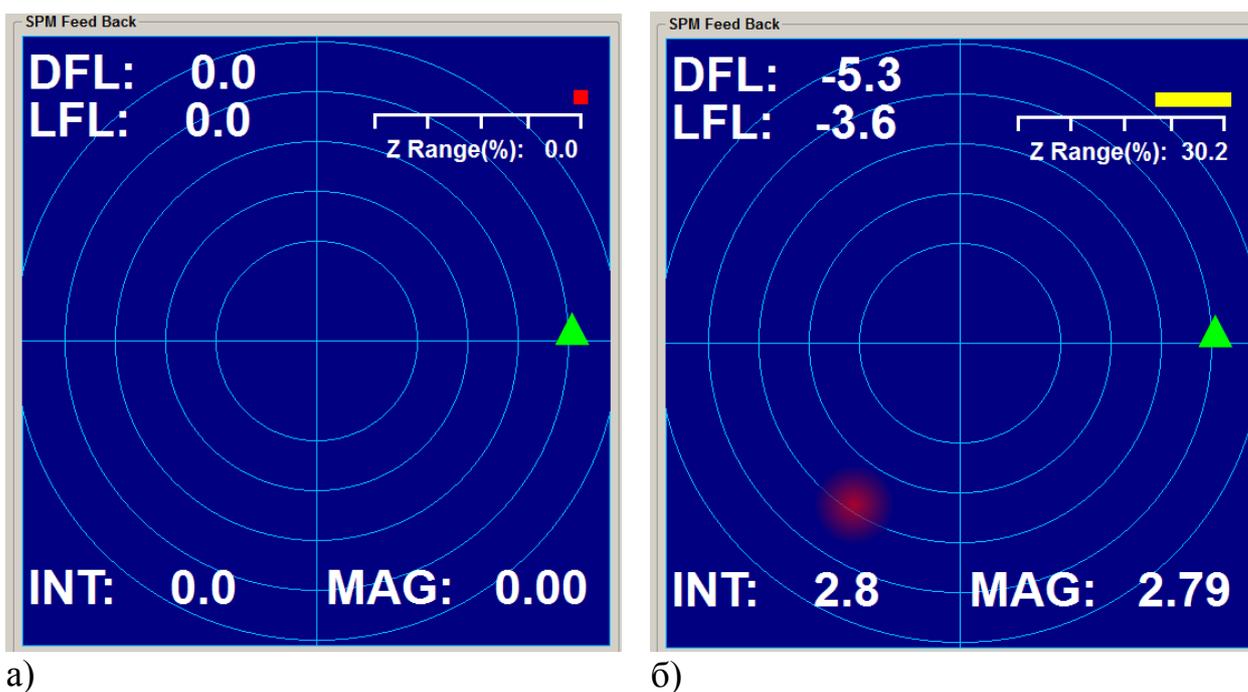


Рис. 4.5 а) полностью настроенная система регистрации; б) частично настроенная система регистрации.

В случае полностью не настроенной системы регистрации возможно попадание лазерного луча как на поверхность мимо балки, так и попадание на держатель зондов (рис. 4.6).

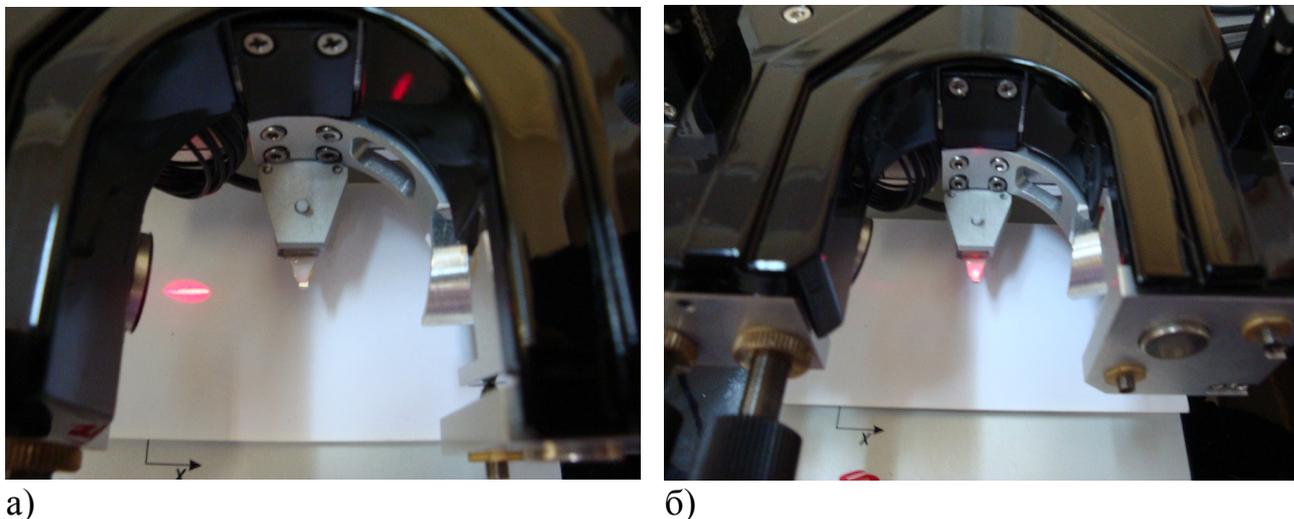


Рис. 4.6 а) попадание мимо балки; б) попадание в держатель зондов.

В этом случае необходимо, используя винты позиционирования лазерного луча, добиться попадания лазерного луча на балку кантилевера (рис. 4.7).

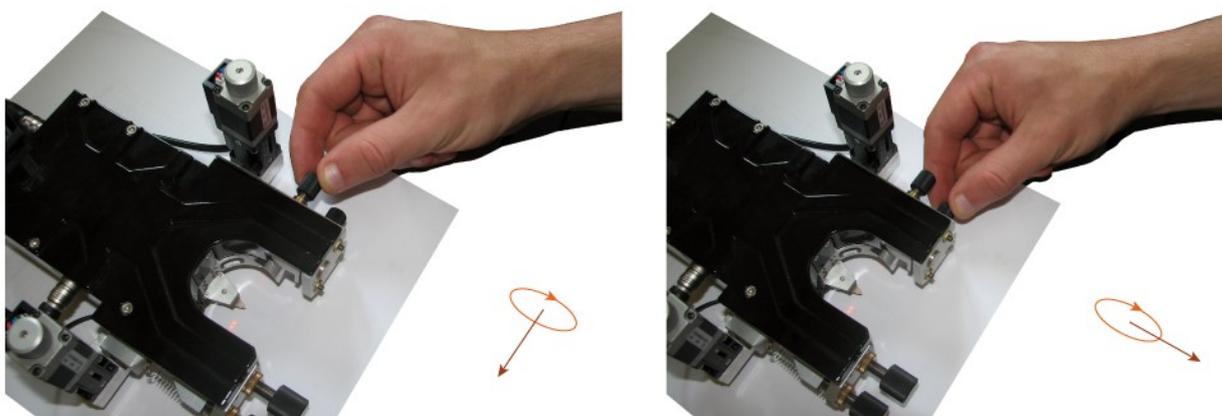


Рис. 4.7 Соответствие направления вращения и направления перемещения лазерного пятна.

В случае попадания на лазерного луча на балку кантилевера будет отчетливо видна дифракция лазерного луча на балке кантилевера (рис. 4.8).

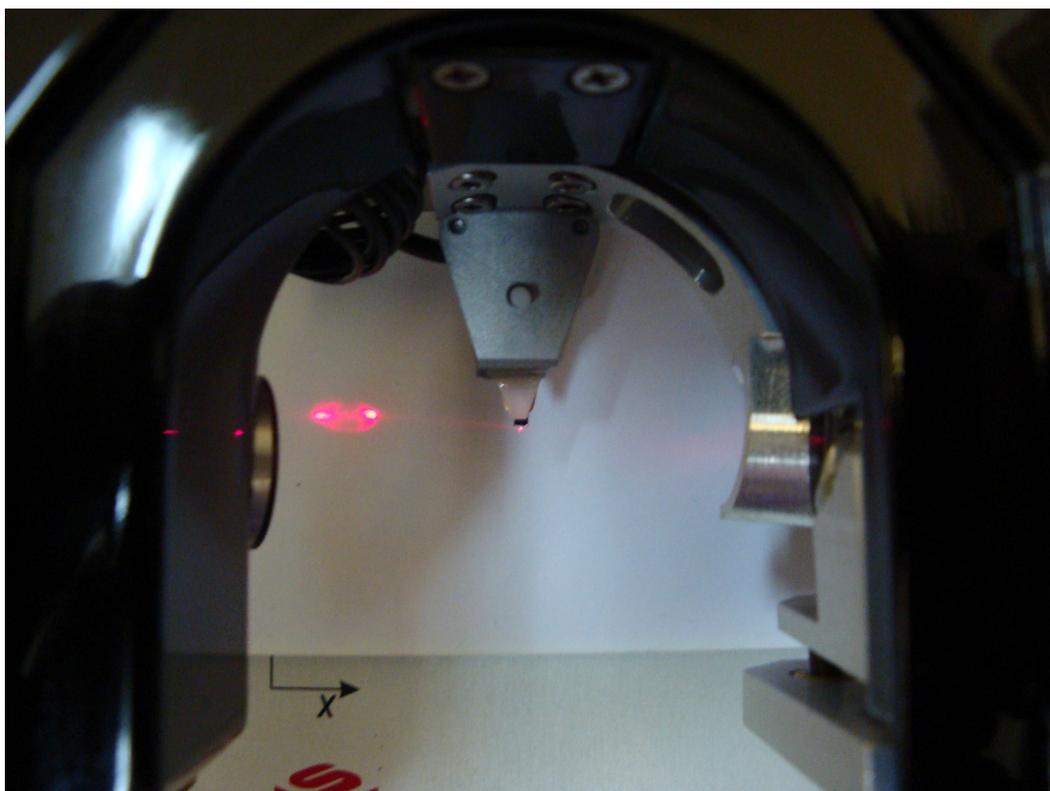


Рис. 4.8 Вид лазерного пятна при попадании на балку кантилевера.

4.2.2. Позиционирование фотодиода

После попадания лазерного луча на балку кантилевера необходимо добиться попадания луча на поверхность фотодиода. Для этого необходимо воспользоваться винтами позиционирования фотодиода (рис. 4.9).

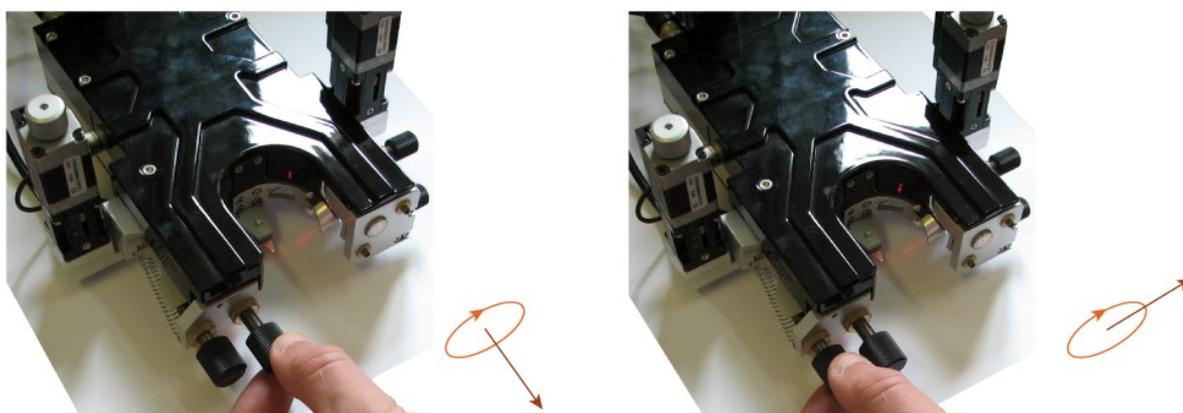


Рис. 4.9 Соответствие направления вращения и направления перемещения сигнала с фотодиода в окне SPM Feed Back.

При этом в окне SPM Feed Back отображается положение лазерного пятна относительно центра фотодиода и его интенсивность.

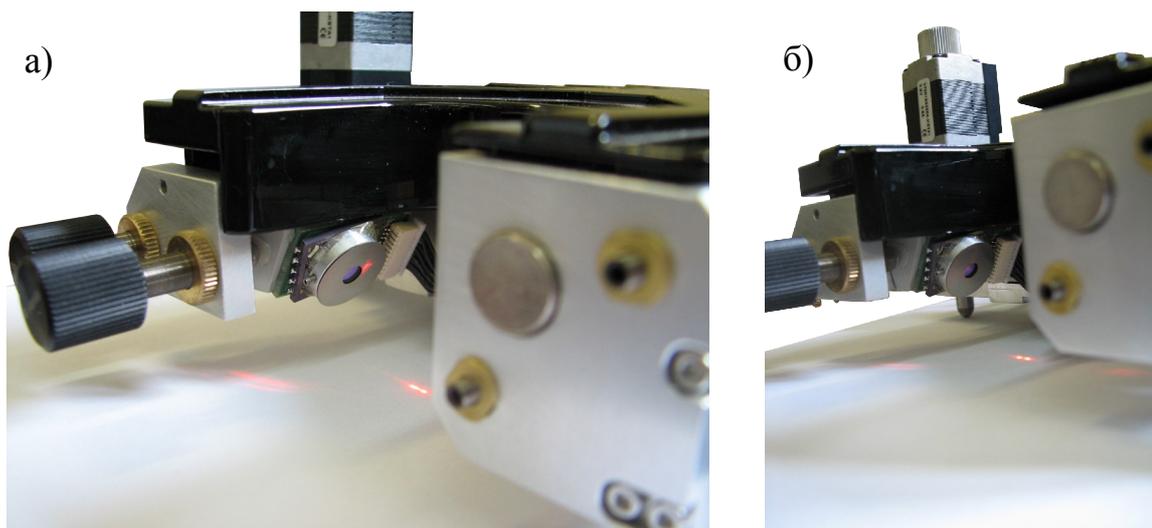


Рис. 4.10 а) попадание мимо фотодиода; б) попадание в фотодиод.

4.2.3. Поиск максимума отражения лазерного луча от балки

После того, как в окне SPM Feed Back отобразиться сигнал с фотодиода необходимо найти максимум отражения от балки. Красная сфера отражающая сигнал от лазерного пятна и его интенсивность должна находиться на синем поле (рис. 4.11).

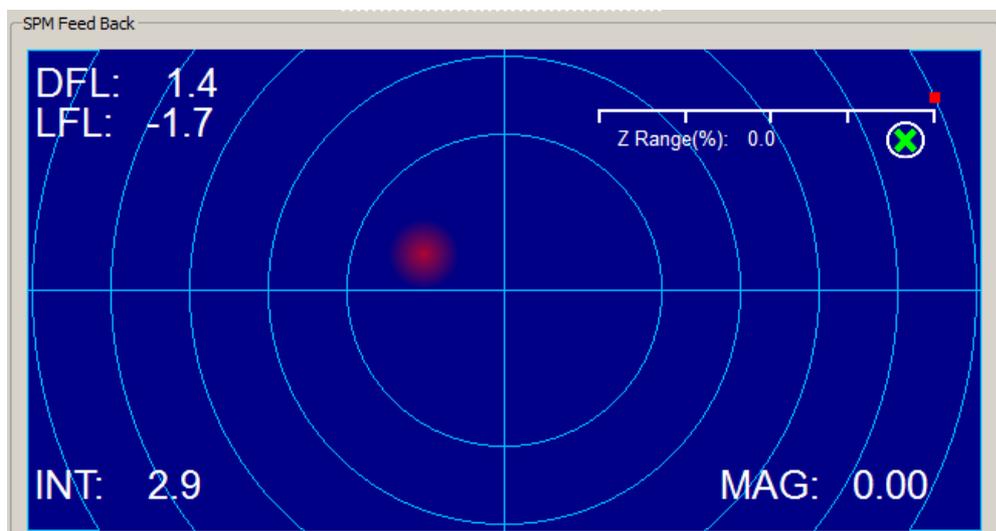


Рис. 4.11 Сигнал с фотодиода.

После этого, используя винты позиционирования лазерного луча, необходимо добиться максимума отраженного сигнала (рис. 4.12).

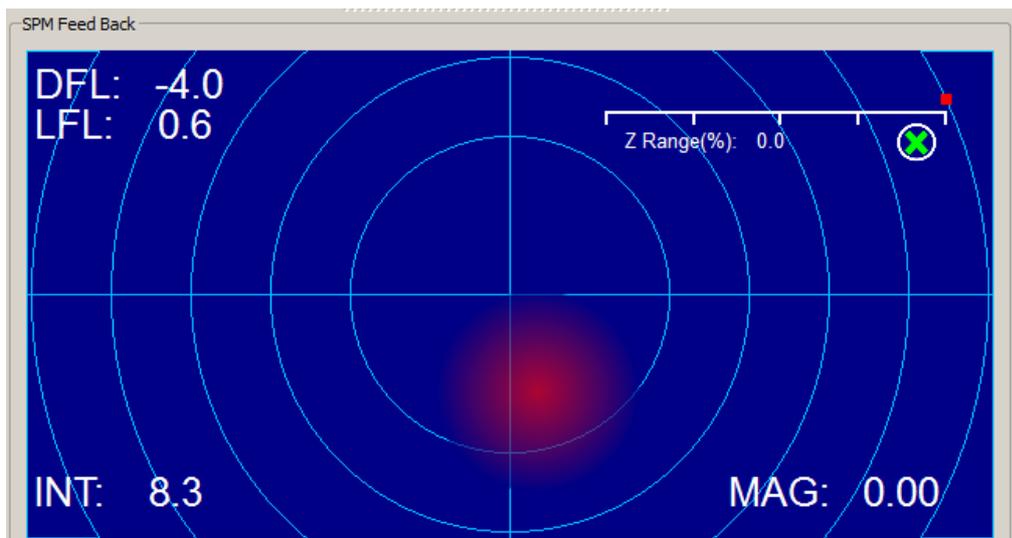


Рис. 4.12 Максимум сигнала с фотодиода.

4.2.4. Совмещение центров лазерного пятна и фотодиода

После нахождения максимума отраженного сигнала необходимо совместить центр лазерного пятна с центром фотодиода.

Для этого, используя винты позиционирования фотодиода необходимо переместить лазерное пятно в центр окна SPM Feed Back и по возможности добиться наиболее близкого к нулю значений показателей DFL и LFL. (рис. 4.13).

При этом в выпадающем меню под окном SPM Feed Back должно быть установлено OFF.

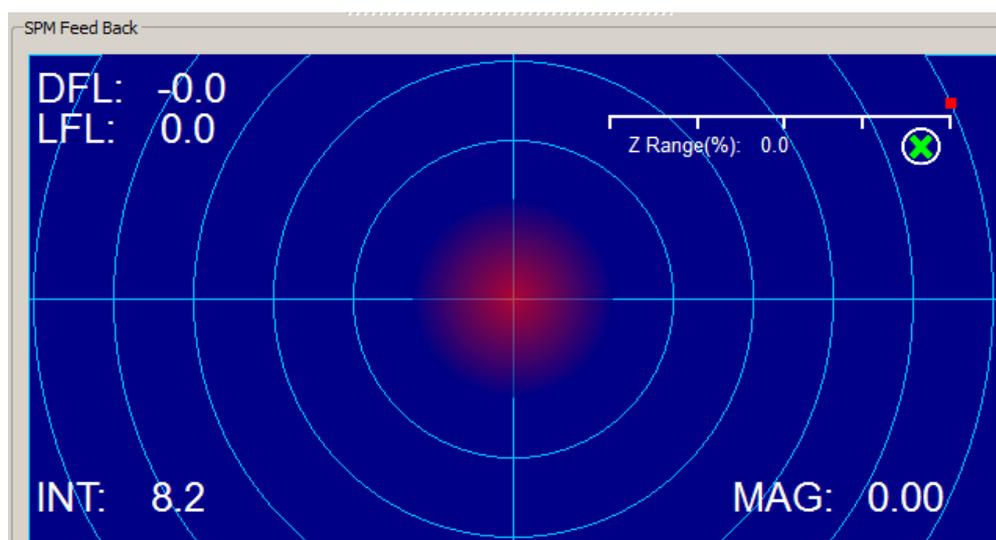


Рис. 4.13 Лазерное пятно в центре фотодиода.

4.2.5. Получение резонансной частоты зонда

После нахождения максимума отраженного сигнала и совмещения центров лазерного пятна и фотодиода в случае контактного режима работы можно приступить к настройкам параметров обратной связи и подводу зонда к поверхности. В случае бесконтактных методик необходимо найти резонансную частоту кантилевера. Для бесконтактных методик в поле FB Input Signal (SPM Mode) необходимо установить значение Probe Magnitude – Tapping Mode.

Для этого необходимо:

- в поле Scan окна SPM в выпадающем списке Channel необходимо выбрать для отображения параметр MAG (рис. 4.13);
- установить диапазон поиска частоты от 0 до 500 (или в случае кантилеверов с большой резонансной частотой большее значение);
- в поле Input Gains выставить все значения множителей равными 1;
- в поле Drive Intensity на слайдере установить значение равное 1;
- Нажать на кнопку Run.

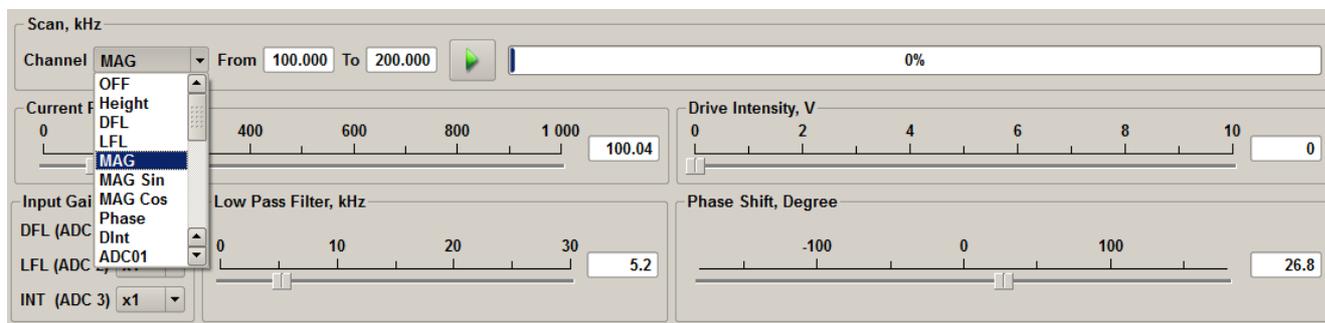


Рис. 4.13 Настройка параметров колебаний кантилевера.

После этого в поле Frequency curve отобразится текущая резонансная частота кантилевера (рис. 4.14).

При известной резонансной частоте кантилевера диапазон поиска можно сузить (рис. 4.15).

При необходимости по найденной резонансной кривой можно установить резонансную частоту вручную (рис. 4.16).

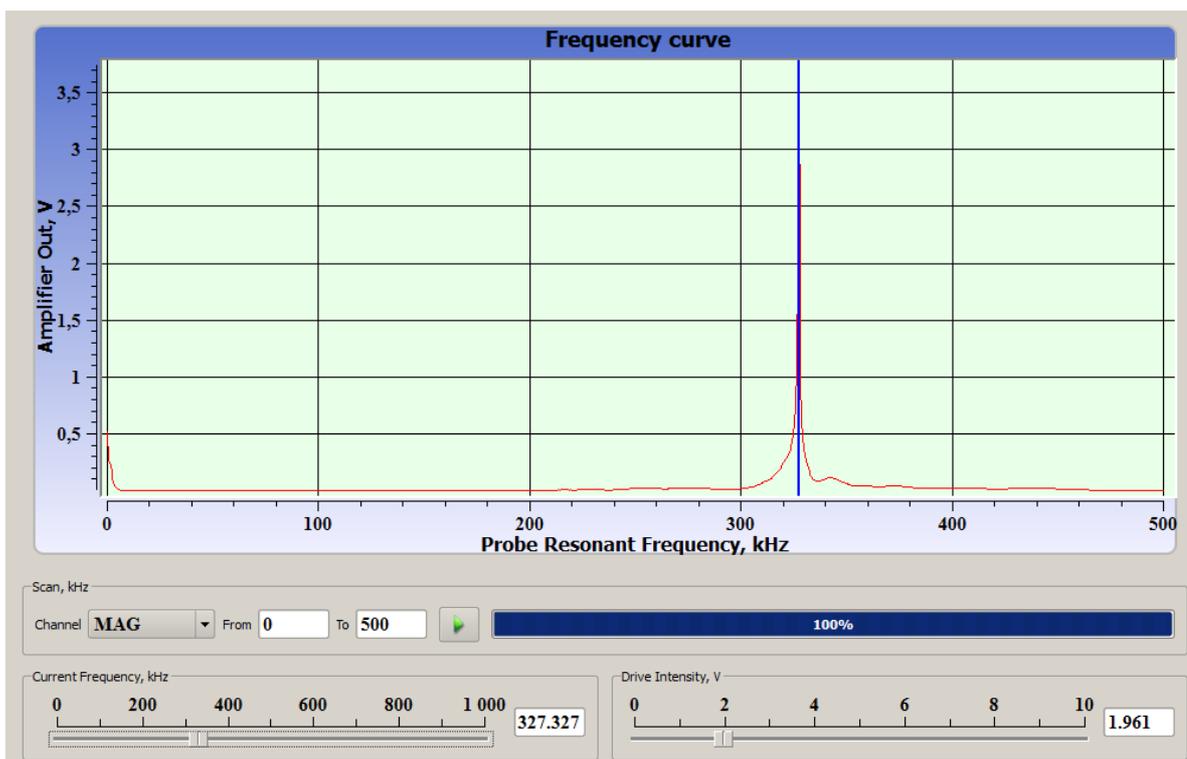


Рис. 4.14 Получение резонансной частоты кантилевера.

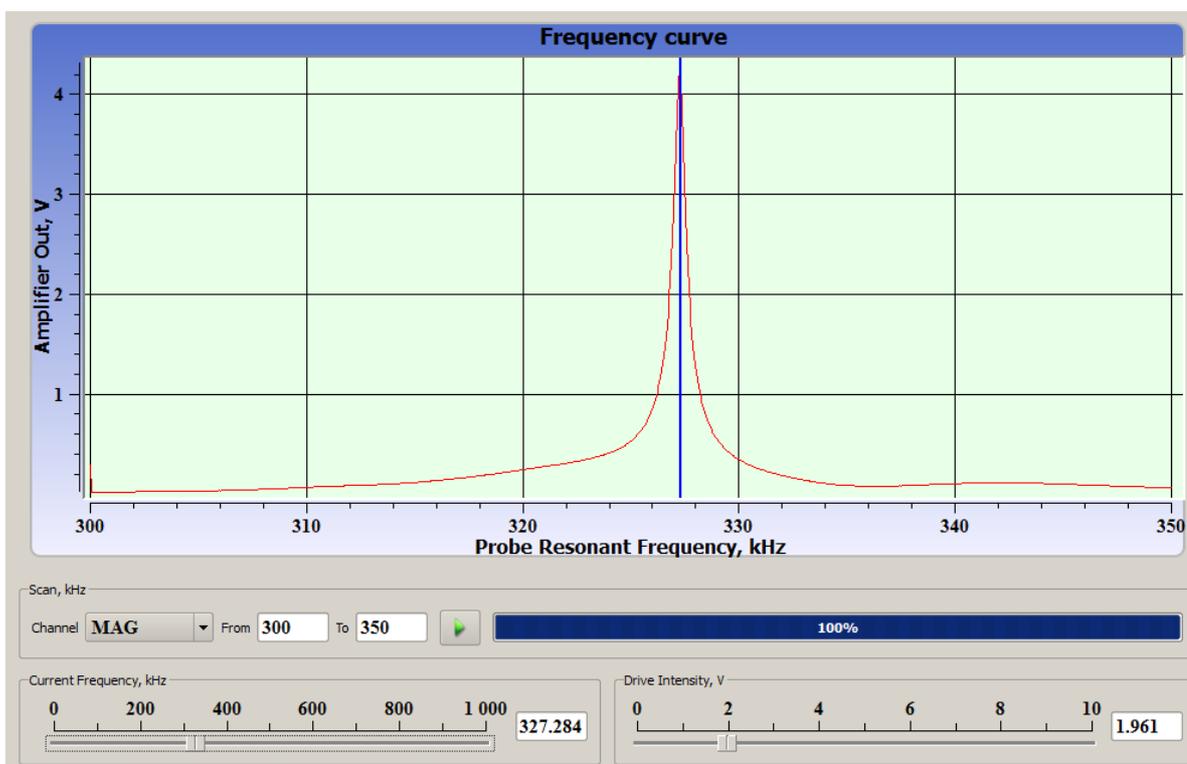


Рис. 4.15 Получение резонансной частоты кантилевера.

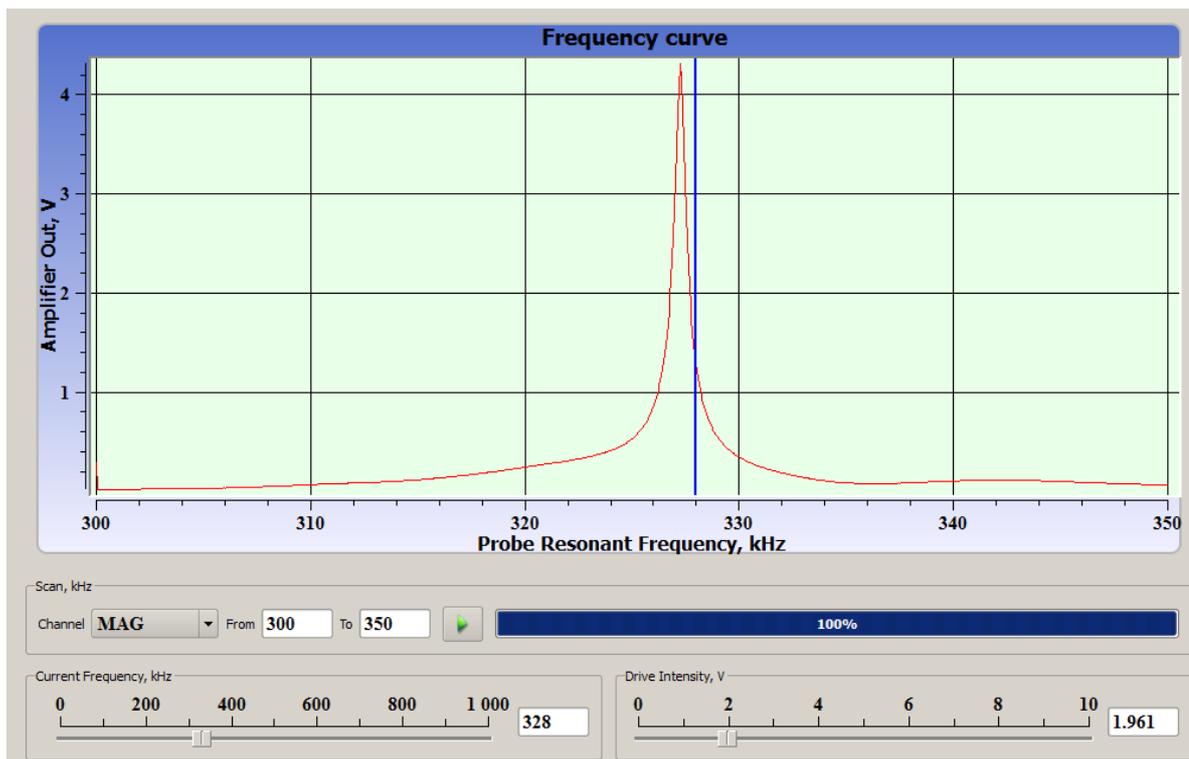


Рис. 4.16 Установка резонансной частоты вручную в поле Current Frequency.

В общем случае необходимо добиться значения резонансной частоты в 1 V при отсутствии информации о свойствах образца. То есть взять это значение за опорную величину.

4.3. Настройка параметров обратной связи

Для управления параметрами обратной связи можно воспользоваться функциями в поле FB I окна SPM или вкладкой Feed back в окне SCAN (более подробно о функции в разделе 5.1 руководства пользователя программным обеспечением NSpec).

При неизвестном рельефе образца рекомендуется выставить все параметры обратной связи в соответствующих слайдерах на значение 1. В дальнейшем после анализа предварительных изображений провести корректировку параметров обратной связи в большую или меньшую сторону.

Максимальное значение обратной связи определяется началом генерации на графике OSC curve, выражающееся в наличии колебаний с большой амплитудой и малым периодом при установке зонда в точку. Генерация может возникать при одинаковых параметрах на разных образцах. Для каждого вида образцов подбор параметров обратной связи индивидуален. В общем случае, чем “мягче” поверх-

ность образца и чем больше перепад по высоте, тем больше должны быть параметры обратной связи. Тоже касается и влияния шумов и внешних колебаний. Для этого необходимо регулировать параметры FB P и FB D.

Для “твердых” материалов с относительно небольшим перепадом высот (порядка нескольких десятков нм) на небольших участках можно устанавливать параметры обратной связи близкие к 0. Например от 0,1 до 0,3.

При больших скоростях сканирования для любых образцов рекомендуется устанавливать параметры обратной связи более 1. Практически до значений близких к возникновению генераций в контуре обратной связи.

4.4. Настройка Set point

После установки параметров обратной связи и снятия резонансной кривой, используя значение MAG в поле SPM Feed Back, установить в поле FB INPUT SIGNAL (SPM MODE) задающее значение для обратной связи. Для оценочного сканирования рекомендуется устанавливать 50% от текущего значения MAG. В дальнейшем следует подкорректировать это значение под характеристики поверхности образца.

4.5. Подвод зонда к поверхности

4.5.1. Грубый подвод зонда к поверхности

Для грубого подвода используются функции описанные в руководстве пользователя программным обеспечением NSpec в разделе 4.3 Управление шаговыми моторами.

4.5.2. Наклон СЗМ головки

В некоторых случаях рекомендуется проводить сканирование с зондом, наклоненный на определенный угол к поверхности, или компенсировать наклон поверхности образца.

Для этого необходимо воспользоваться функцией управления отдельными шаговыми моторами.

В общем случае алгоритм наклона СЗМ головки такой:

- Провести грубый подвод на 5-10 мм от наивысшего положения СЗМ головки;
- Перейти в меню управления отдельными шаговыми моторами (раздел 4.3.1 руководства пользователя программным обеспечением NSpec);
- Поднять до максимального значения задний шаговый мотор СЗМ головки;
- Перейти обратно к функции совместной работы шаговых моторов;
- Начать грубый подвод к поверхности.

Рекомендуется проводить грубый подвод до расстояния приблизительно в 3 мм от поверхности. Это определяется визуально. Для более близкого грубого подвода рекомендуется уменьшить скорость подвода.

4.5.3. Плавный подвод

После осуществления грубого подвода необходимо включить обратную связь (раздел 4.4. руководства пользователя программным обеспечением NSpec). И нажать кнопку Landing.

При достижении поверхности, а магнитуды колебаний зонда равному заданному значению автоматический подвод прекратится.

Далее необходимо проверить отсутствие генераций. Для этого необходимо открыть поле OSC sigve через группу инструментов Plot Mode Control (подробнее раздел 4.1. руководства пользователя программным обеспечением NSpec).

4.6. Общие принципы настройки параметров сканирования

После подвода к поверхности для сканирования необходимо открыть окно SCAN. Подробное описание функций данного окна дано в руководстве пользователя программным обеспечением NSpec в разделе 5. Окно получения растровых изображений SCAN.

Первоначально рекомендуем провести обзорное сканирование для подбора параметров обратной связи, параметров колебания зонда.



Для пробного сканирования рекомендуем следующие параметры:

- Полное поле сканирования;
- Число точек — 300 x 300 на скан;
- Скорость сканирования 1 лин/сек;
- Поля Height и Phase для прямого направления сканирования и поля Height и Phase для обратного направления сканирования.

После получения пробных изображений подобрать параметры сканирования, выбрать интересующий участок на поверхности и уже приступить к сканированию.

Для выбора числа точек в изображении следует руководствоваться следующими параметрами:

- Для неконтактных методик не имеет смысла ставить число точек дающее разрешение меньше радиуса кривизны зонда;
- Скорость перемещения зонда относительно размеров поля сканирования меняется в зависимости от размеров поля сканирования при одинаковом количестве точек. Рекомендуется уменьшать количество точек при уменьшении поля сканирования для сохранения скорости сканирования пропорционально изменению размеров поля сканирования или увеличивать скорость сканирования;
- Для разных размеров поля сканирования может понадобиться изменение параметров обратной связи.

4.7. Сканирование

На время сканирования при отсутствии вибрационной и акустической защиты рекомендуется не подвергать вибрационным и акустическим воздействиям сканирующий зондовый микроскоп Certus. Это может привести к появлению артефактов на изображении и даже перемещению образца относительно микроскопа и поломке зонда.



4.8. Первичная обработка и сохранение результатов

Для первичной обработки и сохранения результатов используются встроенные инструменты работы с изображениями и графиками.

Подробное описание расположения и функций данных инструментов дано в руководстве пользователя программным обеспечением NSpec в разделах:

- раздел 2. Общие элементы интерфейса;
- раздел 3. Окно работы с данными DATA (данные).

При работе с данными рекомендуем всегда сохранять исходный файл без применения фильтров и дополнительных инструментов.

5. Калибровка сканера

Практически во всех системах развертки и позиционирования для СЗМ используются пьезокерамические материалы. Кроме очевидных преимуществ по точности и контролю перемещений данные материалы имеют ряд недостатков. Основным недостатком является нелинейность.

Под нелинейными свойствами пьезокерамики следует понимать особенности зависимости между управляющим электрическим полем и деформацией пьезокерамического образца, а именно, нелинейность и неоднозначность этой зависимости. Обычно нелинейные свойства керамики разделяют на крип, гистерезис и собственно нелинейность. Также к нелинейным свойствам следует отнести нестабильность чувствительности пьезокерамики.

Для сканера, не оснащенного датчиками, управляющее напряжение по данной оси является индикатором его положения по этой оси. Нелинейность и неоднозначность зависимости управляющее напряжение - положение часто приводит к существенным искажениям получаемого изображения.

5.1. Свойства пьезокерамики

5.1.1. Крип

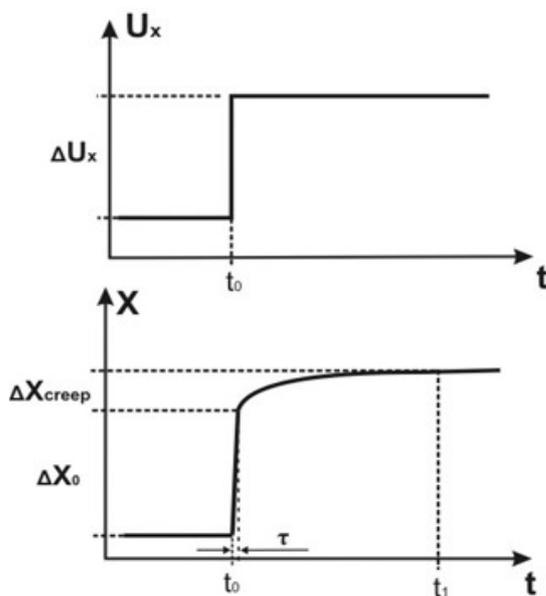


Рис. 5.1 Реакция сканера на скачок управляющего напряжения по оси X

Крип пьезокерамики проявляется в том, что по окончании изменения управляющего напряжения, размеры пьезоэлемента сканера продолжают меняться. Например, после подачи скачка напряжения на пьезоэлемент, наблюдается долговременный дрейф сканера в сторону этого скачка (рис. 5.1).

Крип в плоскости XY хорошо заметен после больших смещений области сканирования (рис. 5.2). При попытке переместить сканер в заданную точку, например, для проведения векторной литографии или наноманипуляций, а также при выборе области сканирования,



Рис. 5.2 Крип в плоскости XY после смещения области сканирования.

крип наряду с гистерезисом пьезоке-рамики является главным источником ошибок.

Для определения крипа после скачка напряжения (рис. 5.3) можно пользоваться выражением:

$$\Delta X_{creep}(t) = \Delta X_0 \beta \ln \frac{t-t_0}{\tau}, \quad (5.1)$$

где $\beta \sim 0.01 - 0.03$, ΔX_0 – перемещение за первые τ секунд после скачка ($\tau \sim 0.1 - 1$ сек.). Положив $\beta = 0.02$, получим: через одну минуту после скачка напряжения крип составит 8% от перемещения за первую се-

кунду; далее при каждом увеличении прошедшего времени в 10 раз добавляется по 4.6% к начальному перемещению. Соотношение (5.1) верно в интервале времени от долей секунды до, по крайней мере, нескольких часов. Можно использовать это соотношение как оценку крипа и для любых других монотонных изменений управляющего напряжения.

Коэффициент β для данного пьезоэлемента зависит от величины скачка управляющего напряжения. Также есть зависимость крипа от направления скачка. Поэтому не стоит ожидать, что, пользуясь формулой (5.1), можно ввести точную программную компенсацию крипа в плоскости XY.

Каждый раз при запуске сканирования по медленному направлению сканирования наблюдается крип. Дело в том, что сканер, сместившись из центра поля в начальную точку, продолжает “ползти” в направлении этого смещения с убывающей скоростью. Для медленного направления скорость крипа в начальный момент больше средней скорости движения при сканировании. Результат оценки с помощью соотношения (5.1) таков: скорость по медленному направлению достигнет нулевого значения, за время, равное $50 \times \beta\%$ (т.е. около 1%) от общего времени сканирования. По прошествии промежутка времени, равного 10% от общего времени, скорость крипа будет в 10 раз меньше средней скорости по медленному направлению при сканировании. Измерения подтверждают эту оценку. Чтобы крип не вносил заметных искажений, надо подождать, пока будет отсканировано 5 – 10% от всей области, а затем перезапустить сканирование. Характерный пример действия крипа по Z – искажение профиля при измерении ступеньки. При подаче на сканер напряжения, соответствующего высоте ступеньки, сканер сокращается на задан-

ное расстояние, а затем еще некоторое время продолжает «ползти» в том же направлении. Для сохранения контакта зонда с образцом, необходимо подавать напряжение в обратном направлении. Поскольку в качестве сигнала рельефа регистрируется подаваемое на Z-элемент сканера напряжение, измеренный профиль будет иметь вид как на рис. 7.3.

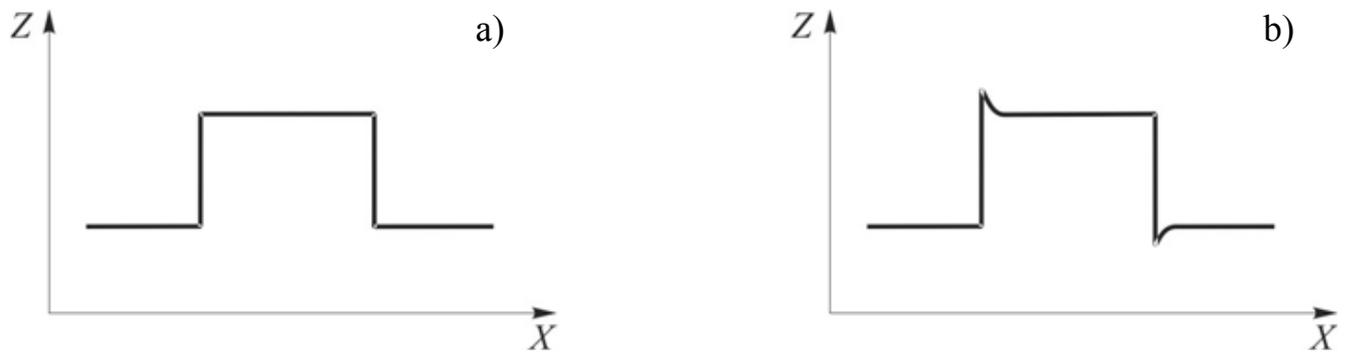


Рис. 5.3 Влияние крива по Z на форму измеренного профиля ступеньки: а) реальный профиль; б) измеренный профиль.

Для движения сканера под действием периодически меняющегося напряжения крив является причиной зависимости амплитуды перемещения от скорости изменения напряжения. Например, при подаче на какую-либо секцию сканера управляющего напряжения треугольной формы постоянной амплитуды и уменьшать скорость изменения напряжения, амплитуда перемещения сканера будет увеличиваться. Зависимость амплитуды от скорости логарифмическая:

$$S(v) = S_0 \left(1 + \beta \lg \frac{v_0}{v} \right), \quad (5.2)$$

где v , v_0 – скорость изменения управляющего напряжения, S – амплитуда перемещения сканера, S_0 – амплитуда при скорости v_0 .

Следствия зависимости (5.2) такие. Диапазон сканера по XY и Z при максимально возможной амплитуде управляющего напряжения зависит от скорости изменения напряжения. При измерении рельефа по напряжению, подаваемому на Z-секцию сканера, высота какого-либо объекта на поверхности образца при разных скоростях сканирования разная.

Соотношение (5.2) используется для программной коррекции размера поля в плоскости XY в зависимости от скорости сканирования.

5.1.2. Нелинейность и гистерезис

В общем случае пьезокерамика характеризуется нелинейной зависимостью деформации от управляющего электрического поля. Эта зависимость также неоднозначна (гистерезис). Соответственно, пьезосканер обладает нелинейностью и гистерезисом зависимости положения от управляющего напряжения по каждой из осей. На рис. 5.4 приведен пример проявления нелинейности и гистерезиса сканера по оси X. Ширина петли гистерезиса для сканера (рис. 5.5) по данной оси зависит от амплитуды управляющего напряжения и свойств соответствующего пьезоэлемента. Обычными являются значения 15 – 20 % от диапазона сканера.

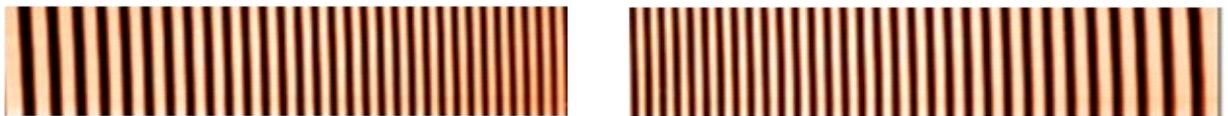


Рис. 5.4 АСМ-изображение решетки TGZ2 (период – 3 мкм), демонстрирующее нелинейность и гистерезис сканера по оси X. Размер поля по оси X – 100 мкм. Развертка напряжения треугольной формы. Слева – изображение, полученное на прямом ходе; справа – изображение, полученное на обратном ходе.

5.1.3. Основные свойства петли гистерезиса пьезосканера

Основные свойства петли гистерезиса используются для программной нелинейной коррекции сканера.

Предполагается, что на сканер подается периодическое управляющее напряжение треугольной формы (как на рис. 7.8, а).

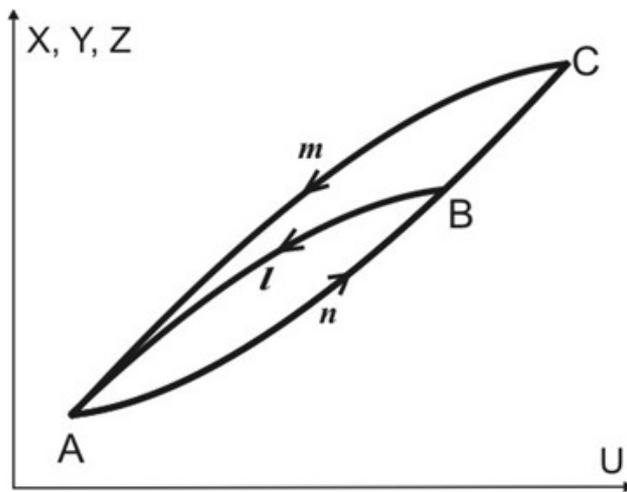


Рис. 5.5 Зависимость положения сканера от величины и направления изменения приложенного напряжения.

а). Симметричность. На рис. 5.5 изображены две петли гистерезиса ($AnCmA$ и $AnBIA$) пьезосканера для разных амплитуд управляющего напряжения. Ветви AnC и CmA получаются друг из друга симметрией относительно центра отрезка AC , который, таким образом является центром симметрии всей петли. Аналогичное утверждение верно для меньшей петли $AnBIA$ и центра отрезка AB .

б). Сохранение формы при изменении амплитуды. При одинаковой скорости изменения управляющего напряжения ветвь AnB меньшей петли совпадает с начальным участком ветви AnC большей петли (как на рис. 5.5).

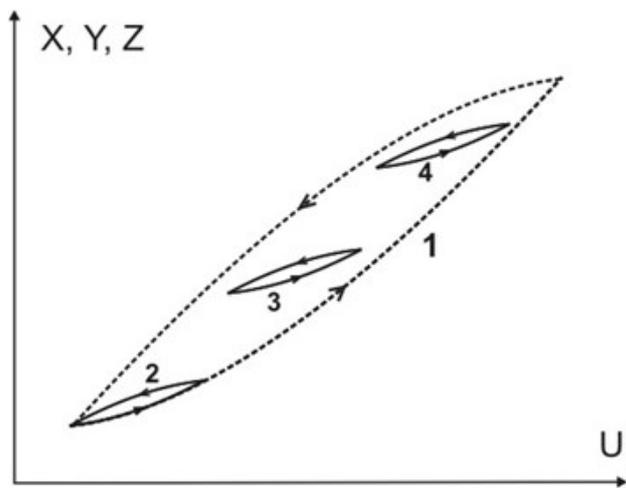


Рис. 5.6 Петли гистерезиса при разных постоянных составляющих напряжения.

в). Сохранение формы при изменении постоянной составляющей управляющего напряжения. Форма петли гистерезиса не зависит от постоянной составляющей управляющего напряжения. На рис. 5.6 изображена петля гистерезиса 1 для максимальной амплитуды управляющего напряжения. В зависимости от способа подачи напряжения, сканер может оказаться в любой точке (U, X) внутри этой петли. Петли 2, 3 и 4 получены при одинаковой амплитуде,

но разных постоянных составляющих управляющего напряжения. Эти петли одинаковые, форма их ветвей приблизительно совпадает с начальным участком нижней ветви петли 1.

г). Слабая зависимость формы петли от скорости. При уменьшении скорости изменения управляющего напряжения, в соответствии с соотношением (5.2) изменяется амплитуда движений сканера. При этом в достаточно широком интервале значений скорости можно считать, что для петли гистерезиса просто меняется масштаб по оси перемещений.

5.1.4. Нелинейная коррекция в плоскости XY

На рис. 5.7 показано движение сканера с выключенной и включенной программной нелинейной коррекцией по оси X. Из этого рисунка можно понять, как устроен алгоритм коррекции. Сначала на сканер подается напряжение треугольной формы (рис. 5.7, а), каким-нибудь образом измеряется его положение (например, по тестовой решетке). В результате определяется связь положения по данной оси с управляющим напряжением $X(U)$. Далее, пользуясь обратной зависимостью $U(X)$ можно рассчитать развертку напряжения такую, чтобы движение по X было линейным (рис. 5.7, б).

Свойства б), в) и г) петли гистерезиса позволяют использовать зависимость $U(X)$ для любых размеров и положений сканируемой области, а также для разных скоростей сканирования. С помощью соотношения (5.2) вводится коррекция размера поля от скорости сканирования.

Коррекция дает хорошие результаты при выполнении следующих условий:

- движение сканера периодическое во времени;
- между крайними точками траектории движение монотонное.

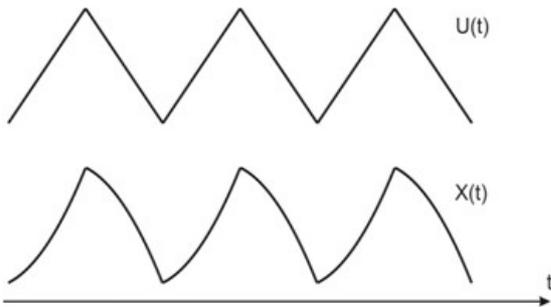


Рис. 5.7 а) Движение сканера по оси X при подаче управляющего напряжения треугольной формы.

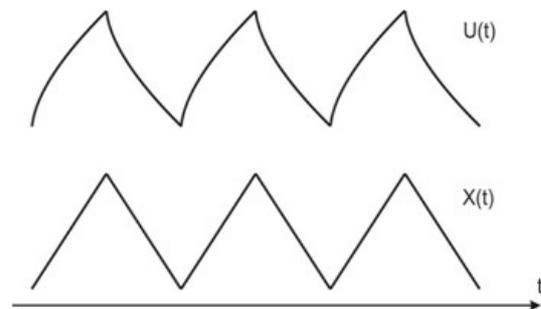


Рис. 5.7 б) Движение сканера по оси X при использовании программной нелинейной коррекции.

Эти условия всегда выполняются для быстрой оси сканирования. Если размер поля по медленной оси сравним с полным диапазоном сканера по этой оси, программная нелинейная коррекция удовлетворительно работает и для медленного направления. Если же область сканирования мала, для устранения искажений по медленной оси может возникнуть необходимость в повторном сканировании (см. далее пояснения к рис. 5.8 и рис. 5.9).

Программная коррекция сканирования позволяет достигнуть остаточной нелинейности, меньшей 1%. Обычно, для быстрого направления сканирования остаточная нелинейность составляет около 0.3%; для медленного — 0.5%.

5.1.5. Отклонения от основных свойств петли гистерезиса

Эффекты, описываемые в данном пункте, позволяют понять, почему использование программной нелинейной коррекции в плоскости XY не устраняет искажения изображения полностью, и в каких ситуациях следует ожидать наибольших ошибок при работе сканера. Некоторые сведения из этого пункта помогут в объяснении неповторяемости измерений по оси Z.

а) Отклонения от свойства а) наблюдаются при больших амплитудах управляющего напряжения. В плоскости XY в результате даже при использовании нелинейной коррекции имеется остаточный гистерезис между прямым и обратным ходом при сканировании. Это является одной из причин, почему для сканеров, не оснащенных датчиками, при сканировании для записи данных используется только прямой или только обратный ход. Этот остаточный гистерезис составляет обычно несколько десятых процента от размера поля.

Если исследовать, как Z -секция работает на растяжение-сжатие при развертке управляющего напряжения, симметричной относительно нулевого напряжения, часто можно обнаружить несимметричность петли гистерезиса. Для данного сорта пьезокерамики в подавляющем количестве случаев отклонения от симметричной формы происходят одинаково, т.е., например, ход ветви, которая соответствует движению пьезостека из состояния максимального сжатия в растянутое состояние вначале всегда более крутой, чем у начального участка обратной ветви, а на конечном участке наоборот, всегда более пологий. Такая же, как и у Z -секции, особенность петли гистерезиса должна быть у каждой из частей XU -сканера. Пусть две части X -секции трубки совершенно одинаковы и обе обладают несимметричной петлей гистерезиса на растяжение-сжатие. Тогда при движении трубки по X между крайними положениями изменения длины противоположных частей трубки разные (эти изменения длины сравниваются только в крайних положениях), что приводит к дополнительному смещению по Z . При сканировании плоского образца появляется аномально большой прогиб на полученном изображении (см. далее пункт “Нелинейные искажения: прогиб на изображении плоской поверхности”).

б) Свойство б) петли гистерезиса хорошо выполняется, если амплитуда напряжения на петле AnB составляет более 30% от амплитуды на максимальной петле AnC (рис. 7.6). При уменьшении амплитуды наблюдаются отклонения, прежде всего общий наклон малой петли отличается от наклона соответствующего участка большой (различия в форме обычно уже не существенны). Если использовать большую петлю для нелинейной коррекции на малых полях, это различие в наклоне приводит к ошибкам в определении истинного размера поля сканирования. Если прибор откалиброван так, что размер большого поля в программе управления прибором правильный, тогда при той же калибровке “программный” размер малого поля может заметно отличаться от истинного. Небольшая модернизация алгоритма нелинейной коррекции для малых полей позволяет частично компенсировать этот эффект. Однако устранить полностью различие в калибровках на больших и малых полях не удается, обычно оно составляет несколько процентов.

в) Отклонения от свойства в) – это, прежде всего, изменение наклона петли гистерезиса при малой амплитуде управляющего напряжения в зависимости от постоянной составляющей напряжения. В плоскости XU это приводит к зависимости калибровки на малом поле от его положения. На полях промежуточных размеров в одном из двух крайних по напряжению положений могут наблюдаться и нелинейные искажения. Для Z получается, что измеренная высота объекта зависит от среднего значения управляющего напряжения, подаваемого на Z -секцию сканера.

ра. Отклонения от свойств а) и в) всегда проявляются вместе; действительно, нижняя ветвь петли 2 на рис. 5.6 совпадает с начальным участком нижней ветви петли 0, верхняя ветвь петли 4 - с начальным участком верхней ветви петли 0.

Следует сказать, что наклон малой петли гистерезиса не только меняется в зависимости от постоянной составляющей управляющего напряжения, но и не является однозначной функцией этого напряжения. Пояснения к этому утверждению содержатся в пункте “Нестабильность чувствительности пьезокерамики”.

г) При уменьшении скорости изменения управляющего напряжения ширина петли гистерезиса растет, поэтому свойство г) выполняется с приемлемой точностью в интервале скоростей от нескольких герц до нескольких сотых долей герца. Для нелинейной коррекции по медленному направлению сканирования нужна своя кривая зависимости перемещения от напряжения, отличная от той, что используется для быстрого направления. Отклонения от свойства г) связаны, по-видимому, с различным вкладом крива в форму петли гистерезиса.

Не стоит забывать, что сканер является механической системой, обладающей инерцией и набором резонансных частот для разных типов колебаний. Соответственно, при подаче периодического управляющего воздействия в зависимости от частоты должна меняться фазовая задержка и амплитуда движения сканера. Если управляющее воздействие – сигнал треугольной формы, то в крайних точках, где происходит скачок производной этого сигнала, должен возникать некий переходной процесс, а именно затухающие колебания сканера на частоте, близкой к резонансной (обычно этот переходной процесс называют переколебаниями сканера). При увеличении скорости сканирования такие динамические ошибки должны расти.

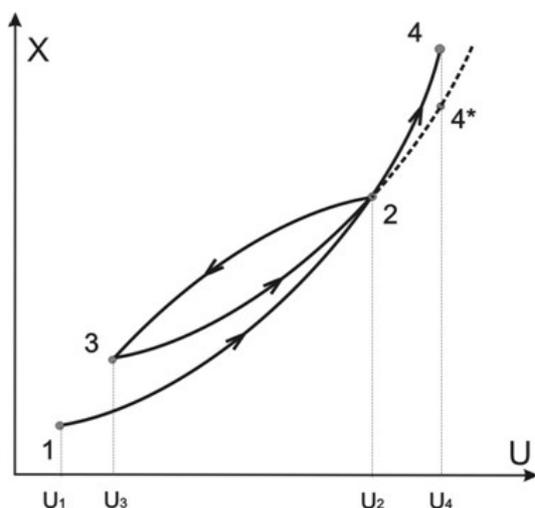


Рис. 5.8 Траектория движения сканера при немонотонном изменении напряжения.

Формально эти ошибки для сканеров, не оснащенных датчиками, также можно было бы отнести к отклонениям от основных свойств петли гистерезиса в плоскости XY. Однако на практике получается, что при увеличении скорости сканирования, прежде всего, страдает качество картинки по Z. Обычно, если качество картинки приемлемое, это означает, что на данной скорости сканирования влиянием динамических ошибок можно пренебречь.

Основные свойства петли гистерезиса были сформулированы для управляющего напряжения треугольной формы. В случае подачи на пьезосканер напряжения, изменяющегося немонотонно, зависимость положения от напряжения становится намного сложнее. На рис. 5.8 приведен пример такого движения. На сканер последовательно подавалось напряжения U_1, U_2, U_3, U_4 . Чтобы отвлечься от крипа, после U_4 подается снова U_1 , затем цикл повторяется. Движения между точками 1 и 2, 2 и 3 происходят по неискаженным ветвям петли гистерезиса данного сканера. Траекторию сканера от U_3 до U_4 можно приближенно разбить на два участка. Первый участок 3 – 2 также совпадает с начальным участком неискаженной ветви петли гистерезиса. Продолжением этой траектории при отсутствии искажения формы петли гистерезиса является участок 2 – 4*, однако сканер движется по траектории 2 – 4, являющейся продолжением ветви 1–2. Таким образом, при изменении напряжения от U_3 до U_4 траектория движения сканера не совпадает со “стандартной” ветвью петли гистерезиса для монотонных изменений управляющего напряжения.

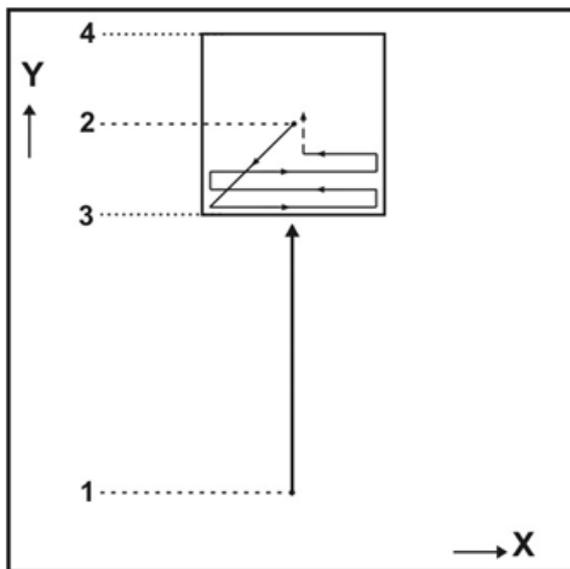


Рис. 5.9 Траектория движения сканера при немонотонном изменении напряжения.

Искажения, связанные с трансформацией петли гистерезиса при немонотонном изменении управляющего напряжения можно наблюдать для медленного направления сканирования. На рис. 5.9 зонд движется из точки 1 в точку 4 по оси Y . Между уровнями 3 и 4 производится сканирование, медленная ось сканирования - Y . Уровень 2 – центр области сканирования (по напряжению). Полученное изображение будет нелинейным и сильно сжатым по оси Y . При повторном запуске сканирования искажение исчезнет. Чем меньше сканируемая область в сравнении с начальным перемещением 1 – 2, тем больше будет сжата первая картинка.

Данное явление нельзя объяснить наличием крипа – если долго стоять в точке 2 перед запуском сканирования, сжатие первого отсканированного изображения не пропадет.

В принципе, можно было бы расширить область применения нелинейной коррекции в плоскости XY , осуществив алгоритм, который бы запоминал всю историю движений сканера и рассчитывал траектории последующих движений в соответствии с этой с этой историей. Для этого, кроме “стандартной” петли гистерезиса надо использовать способ построения траектории, как на рис. 5.8. В этот ал-

горитм также необходимо включить коррекцию крипа для непериодических движений (соотношение 5.1). Однако такой алгоритм слишком сложен и все равно ошибки при измерениях не могут даже приблизиться к уровню погрешностей, которые демонстрируют сканеры с датчиками.

5.1.6.

5.1.7. Влияние гистерезиса и нелинейности на измерения по Z

5.1.8.

Движение сканера по оси Z определяется рельефом образца: в общем случае это непериодические, немонотонные перемещения с большими перепадами в скорости. Поэтому алгоритм нелинейной коррекции, аналогичный случаю X и Y направлений, по Z малоэффективен и в стандартных системах с использованием пьезотрубок не применяется. Таким образом, при регистрации рельефа образца по напряжению, подаваемому на Z-секцию сканера, наблюдаются искажения, вызванные и крипом, и гистерезисом, и нелинейностью пьезокерамики.

Характерный пример гистерезиса по оси Z: на плоском образце с большим наклоном (перепад высот сравним с диапазоном сканера по Z), получаемое изображение рельефа зависит от направления сканирования (рис. 5.10).

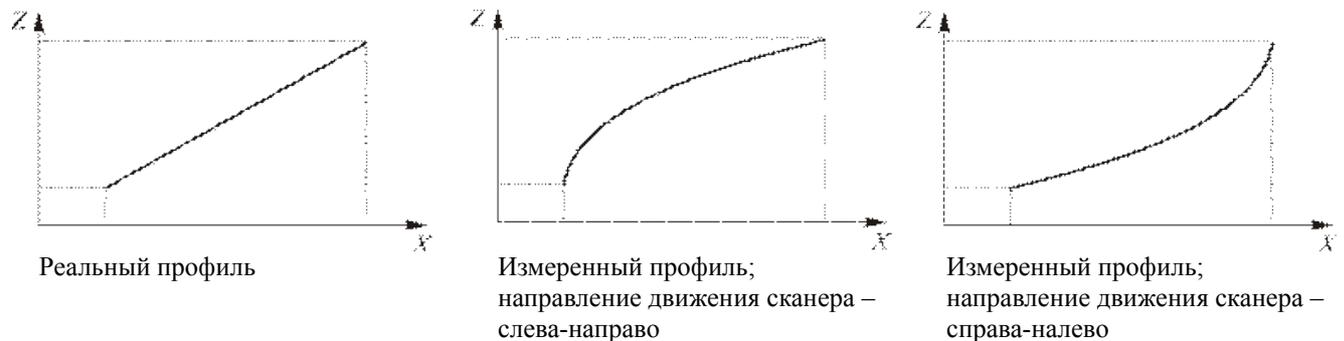


Рис. 5.10 Реальный профиль и получаемые профили в зависимости от направления сканирования.

Нелинейность пьезокерамики приводит к тому, что для измерения высоты какого-либо объекта требуется предварительно откалибровать прибор по тестовой решетке с высотой, близкой к высоте этого объекта. Если эта предварительная калибровка не выполнялась, погрешность в определении высоты может составлять десятки процентов. Здесь уместно ввести определение чувствительности пьезо-сканера к управляющему напряжению, оно нам потребуется и в других разделах описания.

Чувствительность сканера к управляющему напряжению по данной оси есть отношение смещения по этой оси к вызвавшему его приращению управляющего

напряжения. Чувствительность для сканера на основе пьезотрубок пропорциональна пьезомодулю d_{31} керамики, который связывает поперечную (относительно вектора поляризации) деформацию с продольным электрическим полем.

Понятно, что из-за гистерезиса только при подаче переменного периодического напряжения, монотонно меняющегося между своими крайними значениями, можно ожидать однозначный результат измерения чувствительности. Имеется зависимость чувствительности от скорости изменения управляющего напряжения (соотношение (1.2)). Однако эта зависимость достаточно слабая. Основной вклад в изменение чувствительности дает нелинейность пьезокерамики.

На рис. 5.11 наклон петель гистерезиса к оси напряжений (наклон отрезков АВ, АС и АД) растет с увеличением амплитуды управляющего напряжения. Этот наклон и есть чувствительность к переменному напряжению. Для наших сканеров чувствительности к малым и большим (максимальным) амплитудам напряжения

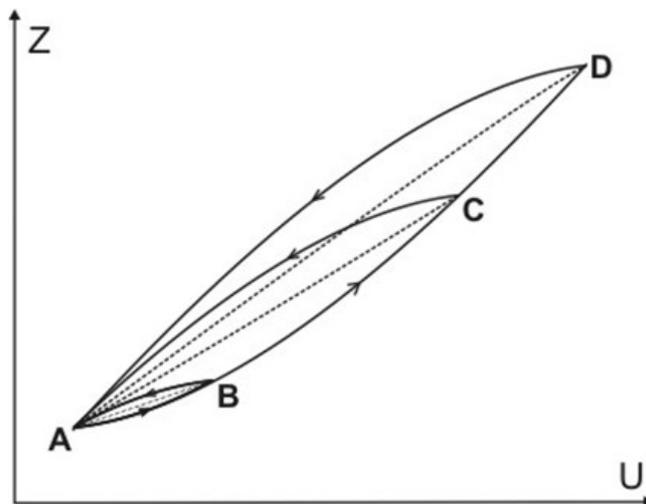


Рис. 5.11 Зависимость чувствительности от амплитуды управляющего напряжения.

отличаются почти в 2 раза. Соответственно, если произвести калибровку по Z на объекте малой высоты, диапазон сканера по этой калибровке будет примерно в 2 раза меньше реального.

Не лишним будет также привести здесь рекомендации для калибровки и измерения по Z для сканера, не оснащенного датчиками. Следуя этим рекомендациям, можно получать результаты, которые будут зависеть только от реальной высоты объекта.

1) Измерения следует проводить на профиле вдоль быстрой оси сканирования. Если необходимо, следует развернуть образец или поменять направление сканирования, чтобы интересующий перепад высот был вдоль быстрой оси. Под профилем далее понимается рельеф вдоль целой строки по быстрому направлению сканирования.

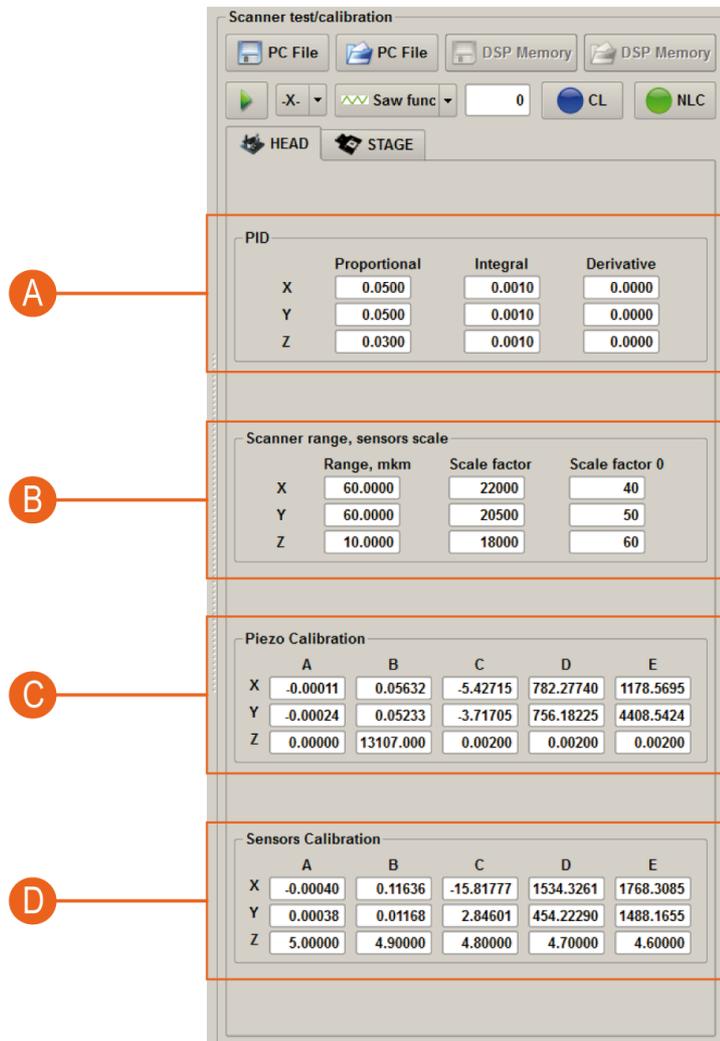
2) Если высота измеряемого объекта сравнима с диапазоном сканера, перепад высоты вдоль профиля должен не сильно отличаться от высоты объекта.

3) Если высота объекта мала, перепад высоты вдоль профиля должен быть мал по сравнению с диапазоном сканера по Z.

Данные рекомендации очевидным образом следуют из описанных ранее нелинейных свойств пьезокерамики.

5.2. Калибровка и коррекция нелинейности

Для осуществления нелинейной коррекции перейдите в опцию OSC, щелкнув мышкой в верхней панели инструментов по соответствующему значку. В правой части открывшейся панели находится раздел **Scanner test/calibration** (рис. 5.12):



- | | |
|---|---|
| A | Настройка ПИД регулятора обратной связи ёмкостных датчиков. |
| B | Настройка диапазона сканера. |
| C | Таблица коэффициентов программной коррекции нелинейности пьезосканера. |
| D | Таблица коэффициентов программной коррекции нелинейности ёмкостных датчиков перемещения |

Рис. 5.12 Настройки нелинейной коррекции.

		CL	Кнопка включения/выключения обратной связи по датчикам. При включении обратной связи по датчикам кнопка становится зеленой.
		NCL	Кнопка включения/выключения коррекции нелинейности. При включении коррекции нелинейности кнопка становится зелёной.
		PC File	Открытие PC-файла.
		PC File	Сохранение всех данных калибровочных коэффициентов в PC-файл.
		DSP Memory	Открытие DSP-файла.
		DSP Memory	Сохранение всех данных калибровочных коэффициентов в DSP-файл.

Из изложенной выше теории, необходим нелинейный пересчет напряжения U прикладываемого к пьзосканеру по соответствующему направлению от перемещения X . В системе EG-3000:

$$U(X) = A \times X^4 + B \times X^3 + C \times X^2 + D \times X + E,$$

где U – напряжение в счетах $0 \dots 65535$, X – перемещение в μm , $0 \dots X_{max}$ (диапазон), пересчет включается при нажатой кнопке NLC, при отжатой кнопке NLC напряжение высчитывается линейно:

$$U(X) = 65535 \times \frac{X}{X_{max}}.$$

Поэтому для вычисления коэффициентов нелинейности необходимо провести следующую последовательность действий:

- отключить коррекцию и обратную связь по датчикам;
- установить диапазон сканера $65,535 \mu\text{m} \times 65,535$;
- отсканировать тестовый образец (рис. 5.13) на полном количестве точек (1000×1000) по направлению калибровки и полном диапазоне, направление и начальную точку выбираем верхнюю левую, направление медленного сканирования по X (измерения должны происходить на росте напряжения от минимума к максимуму);
- произвести горизонтальное сечение полученного изображения (рис 5.14).

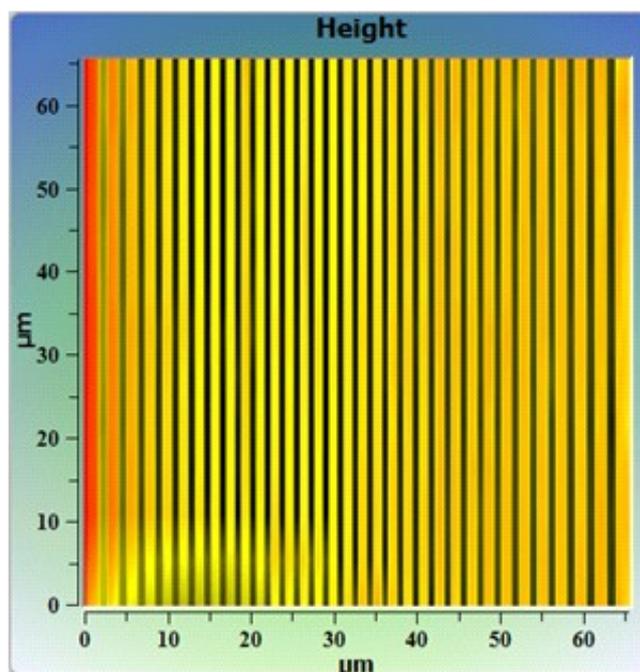
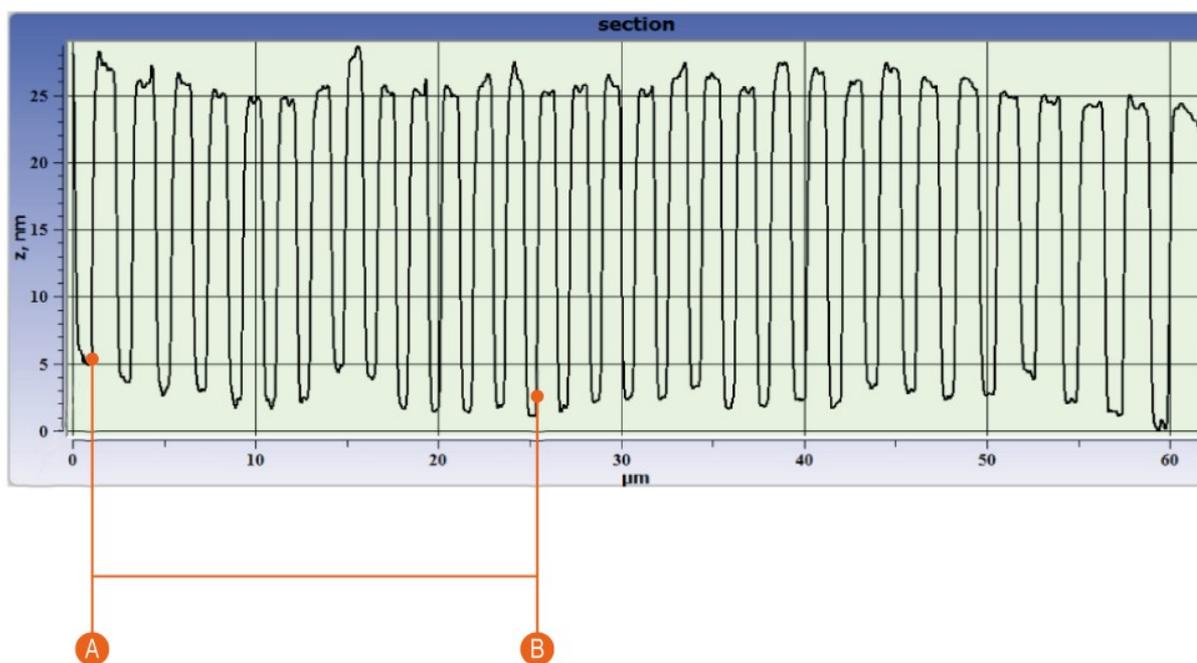


Рис. 5.13 Отсканированный тестовый образец.



A	Нулевая точка $X(0)=0 \mu\text{m}$. $U(0)=1000 \times$ (измеренное значение по оси X в μm).
B	n точка, $X(n)=n \times T \mu\text{m}$, где T — период. $U(n)=1000 \times$ (измеренное значение по оси X в μm).

Рис. 5.14 Горизонтальное сечение полученного изображения.

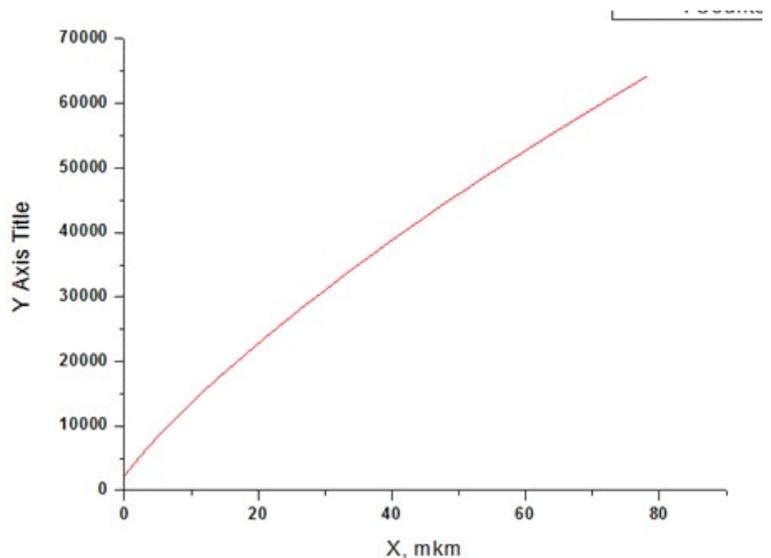
Заполнить таблицу значений напряжения и перемещения следующим образом: за ноль перемещения выбрать первую слева точку, однозначно характеризующую как начало нового периода, сдвиг которой при этом будет образован будет

автоматически учтен программой контроллера, то есть $X(0)=0 \mu\text{m}$, $U(0) =$ точно измеренное значение по оси X сечения в микронах и умноженное на 1000. Таким же образом заполнить остальные значения: $X(n)=n \cdot T$, где T- период в микронах; $U(n)= 1000 \cdot (\text{точно измеренное начало } n \text{ периода в микронах})$.

	Xmkm	YCounts
1	0	2296
2	3	6100
3	6	9512
4	9	12529
5	12	15547
6	15	18368
7	18	20992
8	21	23681
9	24	26174
10	27	28733
11	30	31029
12	33	33521
13	36	35752
14	39	38048
15	42	40278
16	45	42443
17	48	44608
18	51	46642
19	54	48741
20	57	50709
21	60	52742
22	63	54710
23	66	56613
24	69	58515
25	72	60418
26	75	62255
27	78	64157
28		

Затем при помощи вспомогательного программного обеспечения выполнить фитирование табличных данных полиномом четвертой степени:

$$U(X) = A \times X^4 + B \times X^3 + C \times X^2 + D \times X + E,$$



Проделать точно такую же процедуру для Оси Y, с той лишь разницей, что направление и начальную точку сканирования необходимо выбрать в нижнем левом углу и с направлением быстрого сканирования по оси Y.

Полученные данные необходимо занести в таблицу и сохранить в файл.

Piezo Calibration					
	A	B	C	D	E
X	-0.00011	0.05632	-5.42715	782.27740	1178.5695
Y	-0.00024	0.05233	-3.71705	756.18225	4408.5424
Z	0.00000	13107.000	0.00200	0.00200	0.00200

Затем необходимо включить коррекцию нелинейности, отсканировать еще раз тестовый объект, убедиться в корректной работе системы и подобрать максимальный диапазон сканирования и занести его в таблицу и файл:

Scanner range, sensors scale			
	Range, mkm	Scale factor	Scale factor 0
X	60.0000	22000	40
Y	60.0000	20500	50
Z	10.0000	18000	60

Более подробно процедура описана в руководстве пользователя программным обеспечением NSpec.



6. Использование оптического оборудования с СЗМ Certus

6.1. Общие принципы совмещения с оптическим оборудованием

Сканирующий зондовый микроскоп специально разработан для работы с оптическим оборудованием.

Конструкция СЗМ головки Certus позволяет совмещать её как с прямыми, так и инвертированными микроскопами, подводить дополнительные источники освещения, например, лазеры, использовать штатные осветители микроскопов и т.д.

Одним из основных ограничений сканирующего зондового микроскопа является трудность в поиске представляющего интерес участка на поверхности объекта исследования, а так же установка зонда в выбранную точку на поверхности. Обойти это ограничение позволяет использование методик оптической микроскопии и спектроскопии.

Пример возможных положений объектива прямого микроскопа дан на рисунке 6.1.

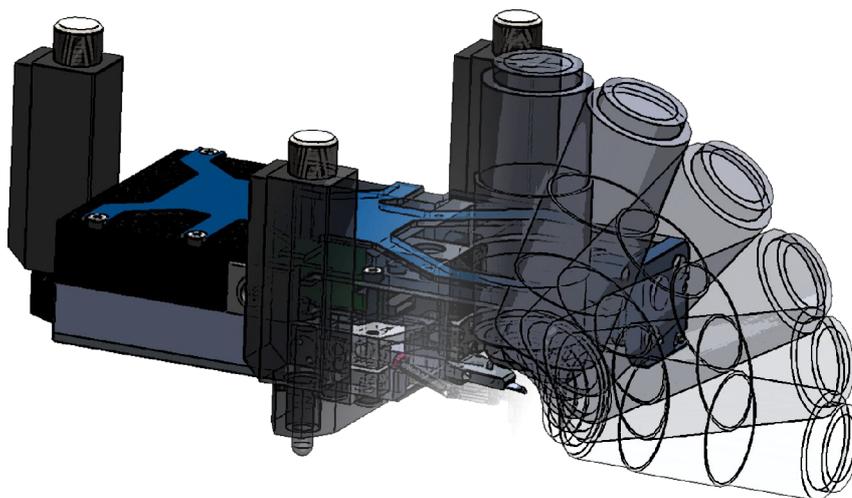


Рис. 6.1. Возможные положения объектива прямого микроскопа.

Общий диапазон положений объективов $0-180^\circ$ относительно оси проходящей через иглу зонда. Максимальный диаметр используемых объективов в случае прямого микроскопа — 40 мм, а в случае инвертированного микроскопа диаметр используемых объективов ограничен только конструкцией объективов.

Рабочее расстояние используемых объективов (WD) составляет 12 мм для прямых микроскопов, а для инвертированных микроскопов ограничено только толщиной используемой подложки.



6.2. Примеры совмещения с оптическим оборудованием

Совмещение с прямым оптическим микроскопом имеет смысл для исследования как прозрачных, так и непрозрачных объектов. Общий вид такого совмещения дан на рис. 6.2



Рис. 6.2. Совмещение с прямым оптическим микроскопом.

В этом случае первоначально необходимо совместить СЗМ и оптический микроскоп таким образом, чтобы в поле зрения оптического микроскопа попадал зонд сканирующего зондового микроскопа (рис. 6.3). Далее, используя методики оптической микроскопии и подвижки для образца необходимо выделить участки на поверхности объекта исследования и проводить сканирование.

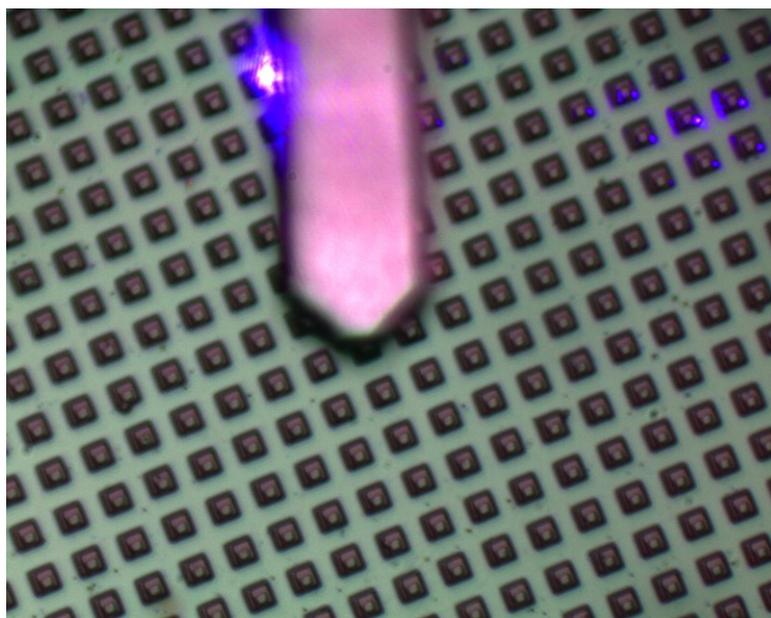


Рис. 6.3. Оптическое изображение зонда и поверхности образца.

Совмещение с инвертированным оптическим микроскопом имеет смысл только при исследовании поверхности прозрачных образцов. Пример такого совмещения дан на рисунке 6.4



Рис. 6.4. Совмещение с инвертированным оптическим микроскопом.

В этом случае общий алгоритм совмещения аналогичен совмещению с прямым оптическим микроскопом. Однако необходимо учитывать, что взгляд направлен снизу. И оптическое изображение и СЗМ изображение при наличии сходства в изображении будут зеркальны друг другу. Пример изображения зонда и объекта исследований дан на рисунке 6.5.

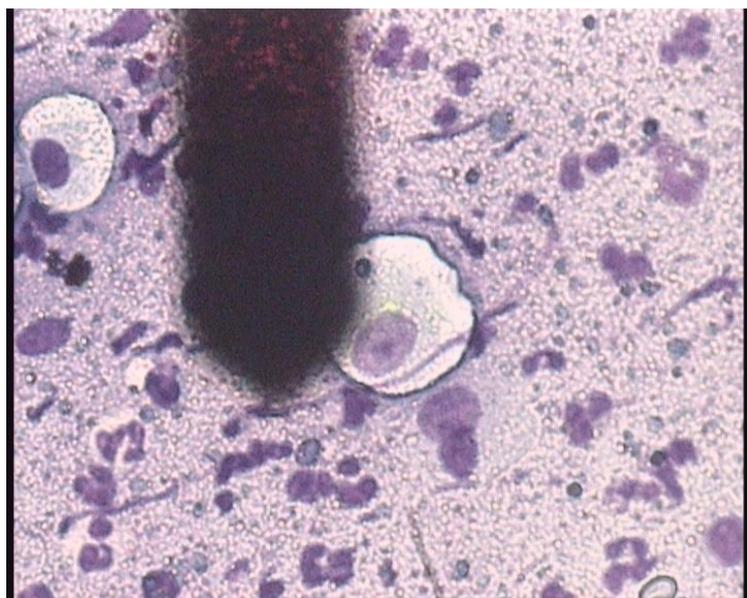


Рис. 6.5. Оптическое изображение зонда и поверхности образца.