

## АТОМНО-СИЛОВАЯ СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Цель работы – изучение основ сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), конструкции и принципов работы сканирующего зондового микроскопа; получение первого СЗМ-изображения, его анализ и обработка.

### Введение

Для детального исследования поверхности твердых тел существует много разнообразных методов. Микроскопия, как средство получения увеличенного изображения, зародилась еще XV в., когда впервые были изготовлены простые увеличительные стекла для изучения насекомых. В конце XVII в. Антонио ван Левенгук изготовил оптический микроскоп, который позволял установить существование отдельных клеток, болезнетворных микробов и бактерий. Уже в XX в. были разработаны методы микроскопии с помощью электронных и ионных пучков.

Во всех описанных методах применяется следующий принцип: освещение исследуемого объекта потоком частиц и его последующее преобразование. В сканирующей зондовой микроскопии использован другой принцип – вместо зондирующих частиц в ней используется механический зонд, игла. Образно выражаясь, можно сказать, что, если в оптическом или электронном микроскопах образец осматривается, то в СЗМ – ощупывается.

Другим важным принципом, отраженным в названии метода СЗМ, является принцип сканирования, т.е. получение не усредненной информации об объекте исследования, а дискретное (от точки к точке, от линии к линии) перемещение зонда и считывание информации в каждой точке.

Двумя основными методами зондовой микроскопии являются:

- СТМ (сканирующая туннельная микроскопия);

➤ АСМ (атомно-силовая микроскопия).

Принцип действия АСМ основан на использовании сил атомных связей, действующих между атомами вещества. Аналогичные силы действуют и между любыми сближающимися телами. В атомно-силовом микроскопе такими телами служат исследуемая поверхность и скользящее над ней сканирующее остриё. При приближении зонда к образцу он сначала притягивается к поверхности благодаря наличию наиболее дальнедействующих сил Ван-дер-Ваальса.



Рис. 41.1. Адсорбированный слой на поверхности материала

Если на поверхности образца имеется адсорбированный слой (рис. 41.1), то при соприкосновении зонда с его поверхностью возникает притяжение за счет капиллярных сил. Притягивающие силы могут быть обусловлены так же электростатическим взаимодействием.

При дальнейшем уменьшении расстояния возникают силы отталкивания. Когда расстояние между зондом и образцом станет меньше среднего межатомного расстояния, то начнется перекрытие электронных оболочек ближайших атомов, в результате чего электроны первого атома стремятся частично занять состояния второго. В результате действия принципа запрета Паули они вынуждены занимать состояния с более высокой энергией. Увеличение энергии системы двух взаимодействующих атомов приводит к появлению отталкивающей силы.

При еще большем сближении атомов доминирующей становится кулоновская сила отталкивания ядер. В общем виде зависимость силы межатомного взаимодействия  $F$  от расстояния между атомами  $R$  имеет вид

$$F(R) = -\frac{a}{R^m} + \frac{b}{R^n},$$

где  $a$  и  $b$ , а также показатели степени  $m$  и  $n$  зависят от сорта атомов и типа химических связей.

К примеру, для сил Ван-дер-Ваальса –  $m=7$ , для кулоновской силы –  $n \approx 2$ . Качественно зависимость  $F(R)$  показана на рисунке 41.2.

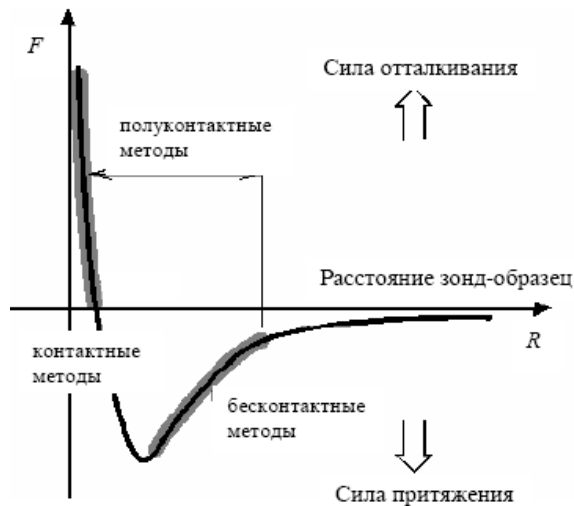


Рис. 41.2. Качественная зависимость силы межатомного взаимодействия от расстояния между атомами

В зависимости от знака силы, действующей между зондом и образцом, различают:

- Контактный способ проведения силовой микроскопии (зонд упирается в образец и находится в области действия сил отталкивания);
- Неконтактный способ проведения микроскопии (зонд удален от поверхности и находится в области действия дальнедействующих притягивающих сил);
- Прерывисто-контактный («полуконтактный») способ проведения силовой микроскопии (зонд частично касается поверхности,

находясь попеременно как в области притяжения, так и в области отталкивания).

Контактный способ измерений наиболее удобен с точки зрения детектирования силового взаимодействия, т.к. величины сил отталкивания в области контакта могут значительно превышать величины сил притяжения, однако при его использовании существует опасность возникновения нарушений структуры поверхности образца и быстрого износа или даже поломки зонда. При бесконтактном способе измерений разрушение образца отсутствует, однако малы измеряемые сигналы. Поэтому наиболее часто для визуализации различных свойств поверхности в силовой микроскопии используется «полуконтактный» способ детектирования взаимодействия. При этом вследствие кратковременности контакта воздействие зонда на поверхность минимально, а измеряемые сигналы достаточны для их надежного детектирования. Дополнительным преимуществом «полуконтактного» способа является отсутствие сдвиговой составляющей силы воздействия на исследуемую поверхность, что существенно уменьшает искажения получаемых изображений.

### *Датчики, зонды*

Традиционным датчиком силового взаимодействия является упругая микробалка-консоль или кантилевер (от англ. cantilever – консоль). Датчики изготавливаются методами фотолитографии и травления из кремниевых пластин. Упругие консоли V- или I-образной формы, фотографии которых представлены на рисунке 41.3, изготавливаются, в основном, из тонких слоев легированного кремния,  $\text{SiO}_2$  или  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Один конец кантилевера жестко закреплен на кремниевом основании – держателе. На другом конце консоли располагается собственно зонд в виде острой иглы. Радиус закругления современных АСМ зондов составляет  $1\div 50$  нм в зависимости от типа зондов и технологии их изготовления.

В контактном режиме работы взаимодействие зонда и образца осуществляется в области действия сил отталкивания. Обычно в контактном режиме используются тонкопленочные V-образные кантилеверы из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с пирамидальными зондами. Кантилеверы характеризуются коэффициентом упругости  $k=0.03\div 1$  Н/м. Сила  $F$ , действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу кантилевера  $x$ , соотношение между которыми определяется законом Гука:  $F = -kx$ .

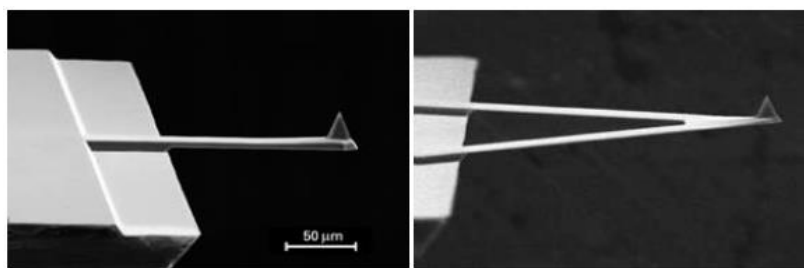


Рис. 41.3. Кантилеверы I- (слева) и V- (справа) образной формы

Величина изгиба регистрируется, как правило, с помощью оптической системы, состоящей из полупроводникового лазера и четырехсекционного (квадрантного) фотодиода (рис. 41.4). Оптическая система АСМ юстируется таким образом, чтобы излучение лазера фокусировалось на конце кантилевера, а отраженный луч попадал в центр фотодетектора. При изгибе кантилевера под действием контактных сил отраженный от него луч лазера смещается относительно центра фотодетектора. Таким образом, отклонение кантилевера может быть определено по относительному изменению освещенности верхней и нижней половинок фотодетектора.

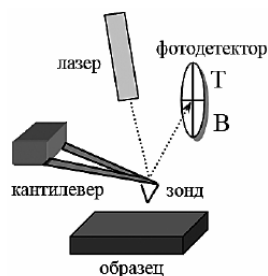


Рис. 41.4. Оптическая система сканирующего зондового микроскопа

## *Пьезоэлектрический двигатель. Сканеры*

Для контролируемого перемещения иглы на сверхмалых расстояниях в СЗМ используются пьезоэлектрические двигатели. Их задача – обеспечить прецизионное механическое сканирование зондом исследуемого образца путем перемещения зонда относительно неподвижного образца или перемещения образца относительно неподвижного зонда. Конструкции из пьезокерамик, обеспечивающие перемещение по трем координатам  $x, y$  (в латеральной плоскости образца) и  $z$  (по вертикали), называются «сканерами». Существует несколько типов сканеров, наиболее распространенными из которых являются треногий и трубчатый (рис. 1.5).

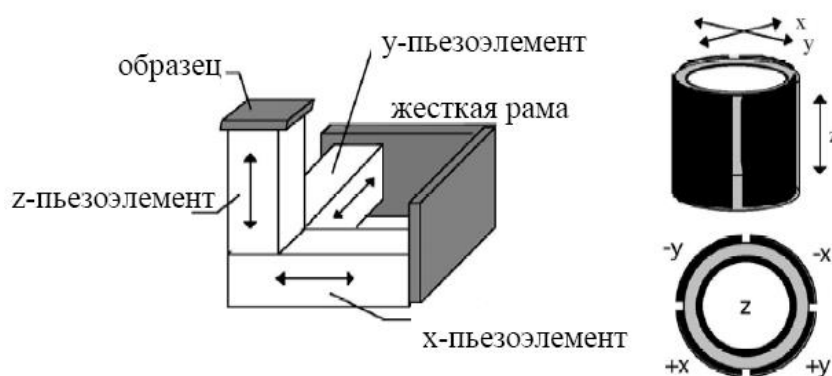


Рис. 1.5. Основные конструкции сканеров: треногий (слева), трубчатый (справа)

В треногом сканере перемещения по трем координатам обеспечивают расположенные в ортогональную структуру три независимые пьезокерамики.

Трубчатые сканеры работают посредством изгиба полой пьезоэлектрической трубки в латеральной плоскости и удлинения или сжатия трубки по оси  $Z$ . Электроды, управляющие перемещениями трубки в  $X$  и  $Y$  направлениях, размещаются в виде четырех сегментов по наружной поверхности трубки (рис. 1.5 – справа). Для изгиба трубки в направлении  $X$ , на  $+X$  керамику подается напряжение для удлинения одной из ее сторон. Тот же самый принцип используется для задания движения в направлении  $Y$ . Смещения в  $X$  и  $Y$  направлениях пропорциональны приложенному напряжению и квадрату длины трубки. Движение в  $Z$  направлении генерируется подачей напряжения на электрод в центре трубки. Это

приводит к удлинению всей трубки пропорционально ее длине и приложенному напряжению.

Процесс сканирования поверхности в СЗМ (рис. 41.6) имеет сходство с движением электронного луча по экрану в электроннолучевой трубке телевизора. Зонд движется вдоль линии (строки) сначала в прямом, а потом в обратном направлении (строчная развертка), затем переходит на следующую строку (кадровая развертка). Движение зонда осуществляется с помощью сканера небольшими шагами под действием пилообразных напряжений, подаваемых с генератора развертки (обычно, цифро-аналогового преобразователя). Регистрация информации о рельефе поверхности производится, как правило, на прямом проходе.

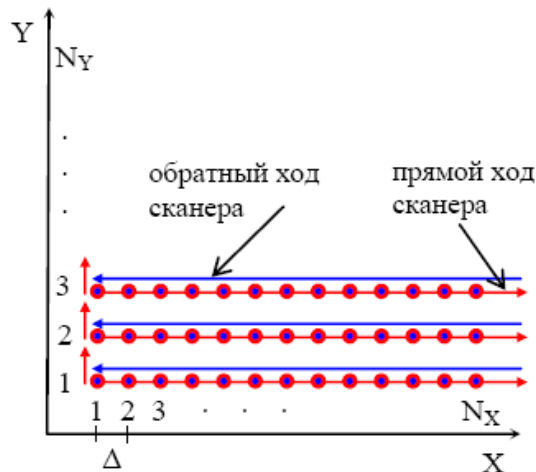


Рис. 41.6. Процесс сканирования поверхности

К числу основных параметров, выбираемых перед началом сканирования, относятся следующие:

- размер скана;
- число точек на линии  $N_x$  и линий в скане  $N_y$ , определяющие шаг сканирования  $\Delta$ ;
- скорость сканирования.

Параметры сканирования выбираются исходя из предварительных данных (размера характерных поверхностных особенностей), которые имеются у исследователя об объекте исследования.

При выборе размера скана необходимо получить наиболее полную информацию о поверхности образца, т.е. отобразить наиболее характерные особенности его поверхности. Например, при сканировании дифракционной решетки с периодом 3 мкм необходимо отобразить хотя бы несколько периодов, т.е. размер скана должен составлять  $10 \div 15$  мкм. В случае если расположение особенностей на поверхности исследуемого объекта неоднородно, то для достоверной оценки необходимо провести сканирование в нескольких отстоящих друг от друга точках на поверхности образца. При отсутствии информации об объекте исследования сначала, как правило, проводят сканирование в области, близкой к максимально доступной для отображения, с целью получения обзорной информации о характере поверхности. Выбор размера скана при повторном сканировании осуществляют исходя из данных, полученных на обзорном скане.

Число точек сканирования ( $N_x, N_y$ ) выбирается таким образом, чтобы шаг сканирования  $\Delta$  (расстояние между точками, в которых производится считывание информации о поверхности) был меньше характерных ее особенностей, иначе произойдет потеря части информации, заключенной между точками сканирования. С другой стороны, выбор излишнего количества точек сканирования приведет к увеличению времени получения скана.

Скорость сканирования определяет скорость движения зонда между точками, в которых производится считывание информации. Излишне большая скорость может привести к тому, что система обратной связи не будет успевать отводить зонд от поверхности, что приведет к неправильному воспроизведению вертикальных размеров, а также к повреждению зонда и поверхности образца. Малая скорость сканирования приведет к увеличению времени получения скана.

Изображения поверхности, получаемые с помощью зондовых микроскопов, как правило, имеют общий наклон. Это может быть обусловлено несколькими причинами. Во-первых, наклон может появляться



вследствие неточной установки образца относительно зонда или неплоскопараллельности образца; во-вторых, он может быть связан с температурным дрейфом, который приводит к смещению зонда относительно образца; в-третьих, он может быть обусловлен нелинейностью перемещений пьезосканера. На отображение наклона тратится большой объем полезного пространства в СЗМ кадре, так что становятся не видны мелкие детали изображения. Для устранения данного недостатка производят операцию вычитания постоянного наклона (левелинга) (рис. 41.7).

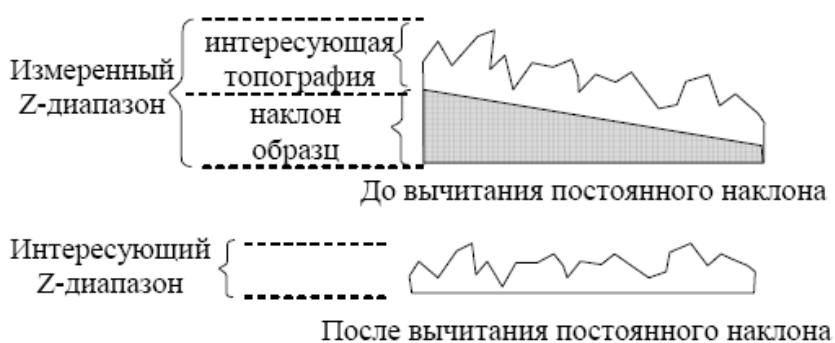


Рис. 41.7. Устранение постоянного наклона из СЗМ-изображения

Помимо этого, характерным искажением СЗМ изображений является наличие горизонтальных полос, которые могут быть удалены с помощью медианных фильтров, работающих путем выравнивания средних значений элементов в каждой строке изображения. Это связано с тем, что изображения в СЗМ эксперименте обычно получаются путем построчного сканирования, и время между измерениями в соседних точках одной строки существенно меньше времени между измерениями соседних точек в направлении, перпендикулярном направлению сканирования.

Для анализа и обработки изображения, полученного методом атомно-силовой микроскопии, используется программа Scan Viewer, которая автоматически включается в ходе с работы с программой Nanoeducator. Главное окно программы Scan Viewer представлено на рисунке 41.8.

Файл СЗМ-данных состоит из одного или нескольких так называемых фреймов. Каждый фрейм является элементарным фрагментом данных, который соответствует СЗМ изображению.

В области анализа одновременно может отображаться до четырех фреймов, переключение между соответствующими режимами выполняется с помощью кнопок, представленных в таблице 1.1.

В левой части окна программы расположена панель инструментов, описание которой приведено в таблице 1.2.

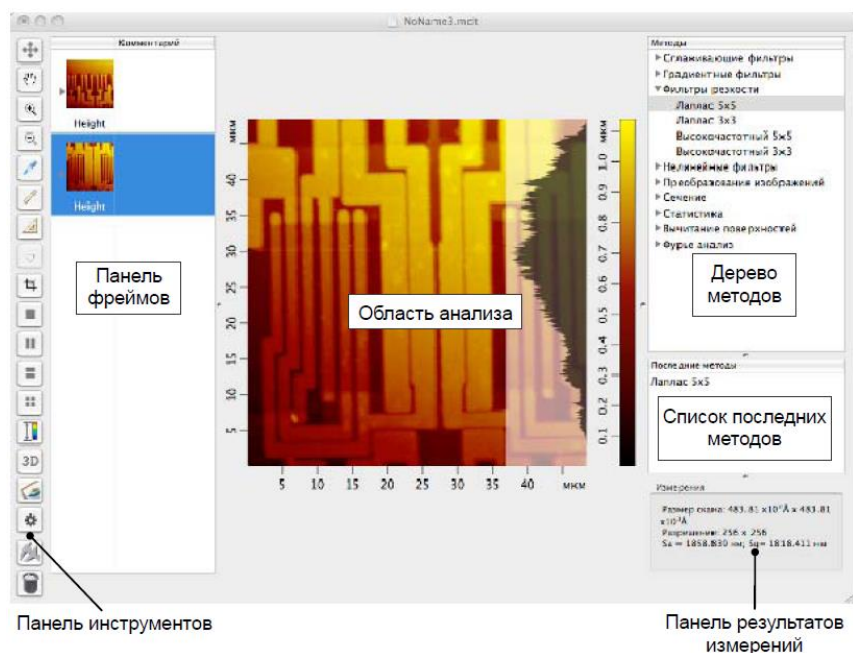


Рис. 41.8. Главное окно программы Scan Viewer

Таблица 1.1. Основные клавиши программы Scan Viewer


















	отображается только один фрейм
	отображается не более двух фреймов
	отображается не более четырех фреймов

Таблица 1.2. Основные инструменты программы Scan Viewer

Внешний вид кнопки	Выполняемое или требуемое действие
	Вернуть исходный масштаб изображения
	Переместить видимую область
	Увеличить/уменьшить масштаб

	Измерить координаты точки
	Измерить расстояние между точками
	Измерить угол
	Установить маркеры
	Выделить область прямоугольной области
	Изменить контрастность
	Трехмерное представление данных
	Сохранить изображение фрейма в виде графического файла (по умолчанию)
	Открыть окно «Инспектор просмотра»
	Открыть окно экспорта активного фрейма
	Удалить выбранные фреймы

Все методы обработки и анализа реализованные в программе Scan Viewer разделены на группы, которые объединяют родственные методы. Список групп и входящих в них методов содержится в двухуровневом дереве методов: первый уровень – названия групп методов, второй уровень – названия методов входящих в группы. Список групп приведен ниже:

- сглаживающие фильтры;
- градиентные фильтры;
- фильтры резкости;
- нелинейные фильтры;
- преобразования изображений;
- сечение;

- статистика;
- вычитание поверхностей;
- Фурье анализ.

Подробнее о фильтрах возможно прочитать в *Приложении 1* к текущей лабораторной работе.

### ***Общая конструкция сканирующего зондового микроскопа***

СЗМ состоит из следующих основных компонентов (рис. 41.9): 1 – зонд; 2 – образец; 3 – пьезоэлектрические двигатели  $x$ ,  $y$ ,  $z$  для прецизионного перемещения зонда над поверхностью исследуемого образца; 4 – генератор развертки, подающий напряжения на пьезодрайверы  $x$  и  $y$ , обеспечивающие сканирование зонда в горизонтальной плоскости; 5 – электронный датчик, детектирующий величину локального взаимодействия между зондом и образцом; 6 – компаратор, сравнивающий текущий сигнал в цепи датчика  $V(t)$  с изначально заданным  $V_s$ , и, при его отклонении, вырабатывающий корректирующий сигнал  $V_{fb}$ ; 7 – электронная цепь обратной связи, управляющая положением зонда по оси  $z$ ; 8 – компьютер, управляющий процессом сканирования и получением изображения (9).

### ***Конструкция СЗМ NanoEducator***

На рисунке 41.10 представлен внешний вид и конструкция измерительной головки СЗМ NanoEducator и обозначены основные элементы прибора, используемые при работе. На основании 1 расположены сканер 7 с держателем образца 6 и механизм подвода 2 на основе шагового двигателя. Подвод зонда 5, закрепленного на датчике взаимодействия 4, к образцу можно также осуществлять с помощью винта ручного подвода 3. Предварительный выбор места исследования на образце осуществляется с помощью винтов 6.

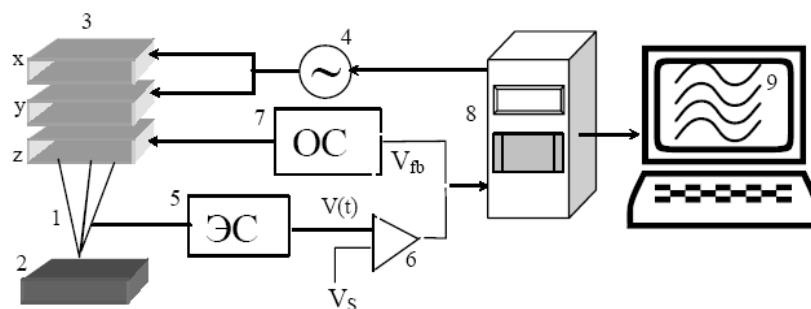


Рис. 41.9. Схема работы сканирующего зондового микроскопа

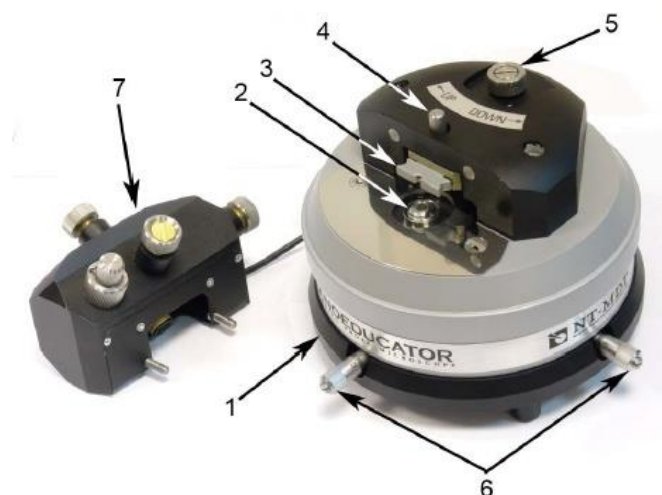


Рис. 41.10. Внешний вид (справа) и конструкция измерительной головки (слева) СЗМ NanoEducator

## Порядок проведения эксперимента

Эксперимент и обработка результатов выполняются с помощью компьютера в виде последовательных заданий. Графические изображения кнопок на экране монитора, которые необходимо использовать для выполнения того или иного действия, указанного в заданиях, представлены в конце данного раздела в таблице 41.3.

**ВНИМАНИЕ!** Поднимать защитную крышку с видеокамерой (элемент 7 на рисунке 41.10) для замены образца разрешается **ТОЛЬКО В ПРИСУТСТВИИ ПРЕПОДАВАТЕЛЯ!**

### Задание 1. Подготовка микроскопа к эксперименту

1. Вызвать на экран компьютера программу Nanoeducator, а затем камеру рядом с иконкой Nanoeducator, нажав на иконку программы в панели быстрого запуска.

2. Открыть окно «Подготовка к сканированию» соответствующей кнопкой на панели основных операций проверить выбор параметров:

- Выбор контроллера: НаноЭдюкатор
- Выбор режима: АСМ

В случае несоответствия, изменить параметры на требуемые.

### Задание 2. Построение резонансной кривой и установка рабочей частоты

1. Открыть окно «Резонанс» кнопкой (табл. 41.3) на панели основных операций главного окна программы или кнопкой «Резонанс» в окне «Подготовка к сканированию».

2. Установите флажок «Настройки». В результате справа от окна программы откроется панель параметров поиска резонанса.

3. Убедитесь, что флажок «точно» сброшен.

4. Нажмите кнопку «Старт» для грубого поиска резонанса. В результате будет измерена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) зонда и приблизительно установлена резонансная частота.

5. Убедитесь, что резонансная кривая симметрична и максимум не менее 2 В. Если резонансный пик имеет искаженную форму, или амплитуда колебаний зонда на частоте резонанса мала (менее 2 В), измените параметры «Амплитуда колебаний» и «Усиление амплитуды», после чего повторно проведите определение резонансной частоты.

6. Установите флажок «точно». Щелкните на кнопке «Старт» для точного поиска резонанса. В результате в области максимума, найденного при грубом поиске, будет измерена АЧХ зонда и рабочая частота генератора (параметр «Частота») будет установлена равной резонансной частоте зонда.

### Задание 3. Захват взаимодействия

1. Открыть окно «Подвод» кнопкой (табл. 41.3) на панели основных операций главного окна программы.

2. Окно «Подвод» содержит элементы управления подводом зонда, а также индикации параметров, которые позволяют анализировать ход выполнения процедуры. В этом окне есть возможность наблюдать за следующими величинами.

- Вытянутость сканера (индикатор «Сканер») по оси Z относительно максимально возможной, принятой за единицу. Величина относительного удлинения сканера характеризуется уровнем заполнения левого индикатора цветом, соответствующим зоне, в которой находится сканер в текущий момент: зеленый цвет – рабочая зона, красный – вне рабочей зоны, желтый - переходная зона. Если индикатор красного цвета и сканер втянут, это означает, что сканер подошел слишком близко к поверхности образца, что может повлечь деформацию зонда. Если индикатор красного цвета и сканер вытянут, это означает отсутствие контакта с поверхностью. Если индикатор не отображает цвета, то необходимо отвести зонд от образца, заново выполнить поиск резонанса и, затем, заново выполнить подвод.

- Амплитуда колебаний зонда (индикатор «Амплитуда») относительно амплитуды его колебаний в отсутствии силового взаимодействия, принятой за единицу. Величина относительной амплитуды колебаний зонда показана на правом индикаторе уровнем его заполнения зеленым цветом.

- Количество шагов («Шаги»), пройденных в заданном направлении.

Чтобы подвести зонд к образцу, нажмите соответствующую кнопку (табл. 41.3). В результате этой операции:

- замкнется цепь обратной связи, и Z-сканер выдвинется на максимальную длину, что отобразится на индикаторе Z Сканер;

- включится шаговый двигатель, выполняющий подвод образца к зонду;
- индикатор «Шаги» начнет отсчитывать пройденные шаги.

Подвод происходит автоматически. Если после остановки подвода индикатор «Z Сканер» остается желтым, то следует установить флажок «Настройки» и нажать на стрелку «вниз». Нажимать до тех пор, пока индикатор «Z Сканер» не станет зеленым.

Для вывода зонда из области взаимодействия и увеличения расстояния между зондом и образцом используется кнопка «Вывод зонда из области взаимодействия», приведенная в таблице 41.3.

#### Задание 4. Сканирование и обработка изображения

**ВНИМАНИЕ! Перед сканированием следует **ОБЯЗАТЕЛЬНО** закрыть окна «Резонанс» и «Подвод»!**

1. В главном окне программы нажмите кнопку «Сканирование».
2. В режиме сканирования необходимо установить параметры сканирования, которые сгруппированы на панели сканирования, открываемой кнопкой «Открыть панель сканирования» (табл. 41.3) в правой части окна программы.

*Рекомендуемые параметры (в зависимости от образца параметры могут изменяться. Проверьте рабочее место перед началом сканирования!):*

X0: 0 нм	Y0: 0 нм	Быстрый: X
Размер: 9766 × 9766 нм	Шаг: 76 × 76 нм	Режим: АСМ
Скорость: 2.52 мкм/с	Усиление ОС: 3	Рабочая точка: 0.87

3. Запуск сканирования осуществляется соответствующей кнопкой (табл. 41.3) в главном окне программы. В результате начнется построчное сканирование поверхности образца и в области измерений, строчка за строчкой, будет появляться изображение сканируемой поверхности. После



завершения сканирования результаты автоматически будут переданы в программу обработки изображений Scan Viewer.

4. Перейдите в программу Scan Viewer. Определите период полученной структуры. Для этого следует сначала вычесть постоянную составляющую изображения. Нажмите на строчку «Вычитание поверхности» в разделе «Обработка изображений» и нажмите дважды на строке «Поверхность». Для просмотра результата вызовите функцию «3D». Чтобы определить период необходимо сделать сечение перпендикулярное периодической структуре образца. Для этого выберите значок «Линейка» (табл. 41.3), затем поставьте флажок напротив «Сечение» и дважды нажмите на строке «Простое сечение». Измерение расстояния между двумя точками с помощью инструмента «Линейка» осуществляется следующим образом: после нажатия кнопки, щелчком мыши зафиксируйте на изображении одну точку, при перемещении мыши с нажатой основной кнопкой происходит построение отрезка из зафиксированной точки, а измеряемая длина отображается в центре отрезка.

#### Задание 5. Сканирование при двух других скоростях

1. Повторите все подпункты задания 4, но в параметрах сканирования установите скорость равную 5.20 мкм/с и 12.00 мкм/с.

2. Сохраните полученные изображения. Для *сохранения результатов измерений* необходимо выполнить следующие действия.

- В главном меню выберите Файл → Сохранить, как.
- В открывшемся диалоговом окне выберите папку, в которой будут храниться полученные данные (на «Рабочем столе» в папке «Лабораторные работы» выберите папку, соответствующую номеру вашего класса). Введите название файла (в формате фамилия\_номер работы). и сохраните его с расширением \*.mtd. В полученном файле будут содержаться фреймы представленные в окне сессии в момент сохранения

3. Сравните полученные изображения. Сделайте вывод о влиянии скорости сканирования на качество получаемого изображения, уровень дефектов, период структуры.

Задание 6. Анализ влияния различных фильтров на результат проведенного сканирования

1. Для выполнения данного задания выберите одно из полученных изображений в предыдущих заданиях, с которым Вы и продолжите работу.

**ВНИМАНИЕ!** При переходе к очередному фильтру возвращайтесь к исходному изображению с уже вычтенной поверхностью (второй фрейм на левой стороне панели)!

2. Сравните влияние на изображение следующих групп фильтров:

- однородный  $3 \times 3$  и однородный  $5 \times 5$ ;
- гауссов 1.0, гауссов 0.85, гауссов 0.391;
- горизонтальный и вертикальный фильтры Прюитта;
- медианный  $3 \times 3$  и медианный  $7 \times 7$ .

3. Сохраните полученные результаты (процесс сохранения описан в задании 5 текущей лабораторной работы).

4. Исследуйте влияние каждого фильтра на величину периода изображения. Выберите оптимальный фильтр или оптимальное сочетание фильтров, сделайте выводы и напишите заключение к работе.

Таблица 41.3. Основные клавиши для проведения работы

Требуемое действие	Кнопка (изображение на мониторе)
открыть окно «Подготовка к сканированию»	
открыть окно «Резонанс»	
открыть окно «Подвод»	
подвод зонда к образцу	
вывод зонда из области взаимодействия	
открыть панель сканирования	
запуск сканирования	
линейка	

### Контрольные вопросы

1. Опишите (качественно) зависимость силы взаимодействия от расстояния зонд-образец.
2. Назовите основные режимы работы АСМ, их назначение, а также преимущества и недостатки.
3. Объясните основные способы детектирования силы в контактном режиме АСМ.
4. Назовите основные компоненты СЗМ и их назначение.
5. Назовите виды датчиков и принципы их действия.
6. Объясните понятие пьезоэлектрического эффекта и принцип действия пьезоэлектрического двигателя. Опишите различные конструкции сканеров.

7. Опишите общую конструкцию прибора NanoEducator.
8. Какие типы искажений характерны для СЗМ изображений, и по каким причинам они возникают?
9. Каковы основные методы фильтрации СЗМ изображений?

### **Литература**

1. М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. М.: Наука, 1973.
2. Э. Руска. Развитие электронного микроскопа и электронной микроскопии – Нобелевские лекции по физике – 1996. // УФН, т.154 (1988), вып.2, с. 243.
3. В.Л. Миронов. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений. ИФМ РАН – М.: Техносфера, 2005 г., С.144.
4. G. Binnig, C.F. Quate, Ch. Gerber. Atomic force microscope. // Phys. Rev. Lett., 1986, Vol. 56, №9, p. 930 – 933.
5. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. Н. Новгород: Изд. ННГУ, 1993.
6. M. Tortonese, R.C. Barrett, C.F. Quate. Atomic resolution with an atomic force microscope using piezoresistive detection.// Appl. Phys. Lett., 1993, Vol. 62, No. 8, p. 834.
7. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. – М.: Мир, 1976, С. 511.
8. Прэйт У. Цифровая обработка изображений – М.: Мир, 1982, книги 1,2, С. 790.
9. Ярославский Л.П. Введение в цифровую обработку изображений – М.: Советское радио, 1979, С. 312.

## Приложение 1

### **Сглаживающие фильтры**

Данная группа содержит следующие методы.

*Сглаживающие фильтры* (сглаживание  $3 \times 3$  2.0, сглаживание  $3 \times 3$  1.73, сглаживание  $3 \times 3$  1.41): применяются для удаления с изображения высокочастотных шумовых всплесков.

*Однородные фильтры* (однородный  $3 \times 3$ , однородный  $5 \times 5$ ): результирующее изображение получается в результате простого усреднения по некоторой локальной области, размеры которой  $3 \times 3$  или  $5 \times 5$  точек соответственно.

*Гауссовы фильтры* (гауссов 1.0, гауссов 0.625, гауссов 0.85, гауссов 0.391): является фильтром низких частот.

### **Градиентные фильтры**

Методы этой группы используются для выделения границ объектов, для подчеркивания и усиления локальных неоднородностей, посредством выделения их границ.

*Вертикальный фильтр Прюитта* выделяет границы объектов, расположенные в вертикальном направлении. Результат применения данного фильтра показан на рисунке 1.11.

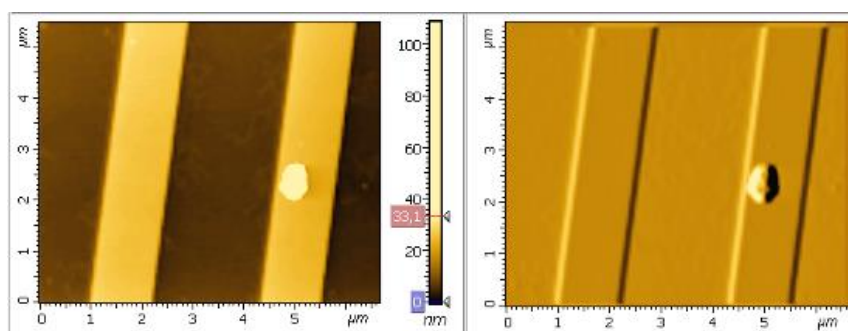


Рис. 1.11. Результат применения вертикального фильтра Прюитта

*Горизонтальный фильтр Прюитта* выделяет границы объектов, расположенные в горизонтальном направлении. На рисунке 1.12 показан результат применения данного фильтра.

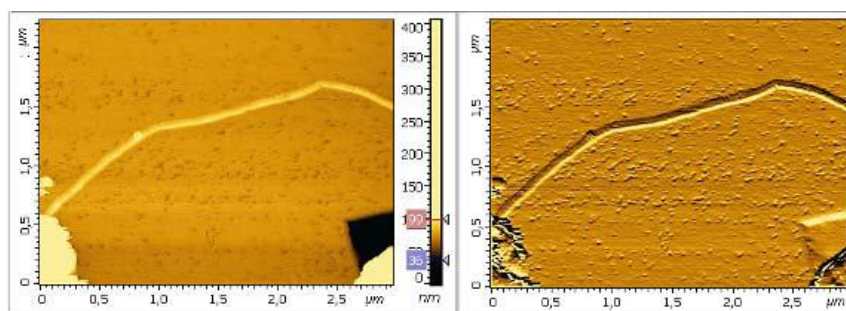


Рис. 1.12. Результат применения горизонтального фильтра Прюитта

*Горизонтальный и Вертикальный фильтры Собеля* являются модификацией аналогичных фильтров Прюитта, но в меньшей степени сглаживают изображение.

### ***Фильтры резкости***

Данные фильтры усиливают разницу между соседними точками изображения, используются для повышения общей визуальной четкости изображения, для выделения границ областей и объектов с различной высотой). Имеются следующие разновидности фильтров данной группы

*Фильтры Лапласа* (Лаплас  $3 \times 3$  и  $5 \times 5$ ) – усиливают различие между каждыми третьими и пятыми точками соответственно.

*Высокочастотные фильтры* (Высокочастотный  $3 \times 3$  и  $5 \times 5$ ) – тождественные названия фильтров Лапласа  $3 \times 3$  и  $5 \times 5$  соответственно.

Результат применения данных фильтров представлен на рисунке 1.13, на котором слева показано исходное изображение бактерии E-coil, а справа – изображение той же бактерии после применения фильтра «Высокочастотный  $5 \times 5$ ».

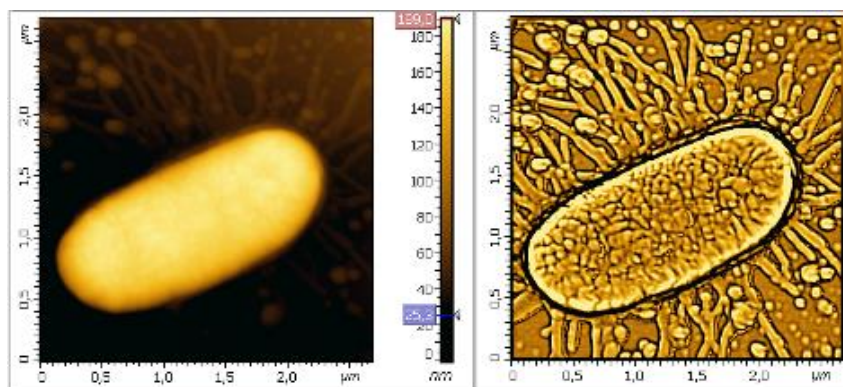


Рис. 1.13. Результат применения высокочастотного фильтра

### *Нелинейные (или медианные) фильтры*

Фильтры данной группы являются сглаживающими фильтрами, которые хорошо убирают шумы импульсного характера, например, шумы в виде «отдельных точек», и в то же время, сохраняют резкость границ. К ним относятся:

- Медианный  $7 \times 7$ ;
- Медианный  $5 \times 5$ ;
- Медианный  $3 \times 3$ ;
- Медианный авто.

Результат использования фильтра «Медианный  $5 \times 5$ » представлен на рисунке 1.14, на котором слева показано исходное СЗМ изображение, а справа – то же изображение после применения фильтра «Медианный  $5 \times 5$ ».

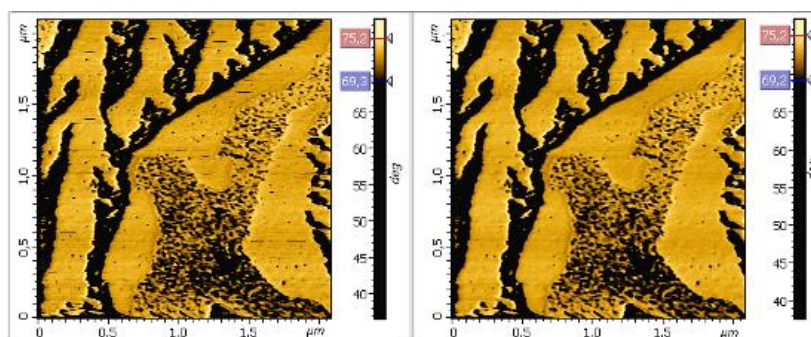


Рис. 1.14. Результат применения медианного фильтра

## ***Построение сечения***

Методы этой группы позволяют выполнять следующие действия и построения.

*Простое сечение* – перед применением отмечается отрезок с помощью кнопки «Линейка» (табл. 1.1). Сечение выполняется по отмеченному отрезку, результат использования данного метода показан слева на рисунке 1.15.

*Сечение с усреднением* – перед применением выделяется фрагмент изображения, а его сечение осуществляется слева направо и усредняется по выбранному количеству линий, равномерно расположенных внутри. На рисунке 1.15 справа представлен результат использования данного метода с коэффициентом усреднения 20.

*Анализ сечений* – при использовании этого метода открывает окно, в котором выполняется работа с сечениями.

## ***Вычитание полиномов и поверхностей***

При использовании методов данной группы происходит преобразование поверхности, предназначенное для ее «выравнивания», в частности, для устранения наклона и искажений более высокого порядка.

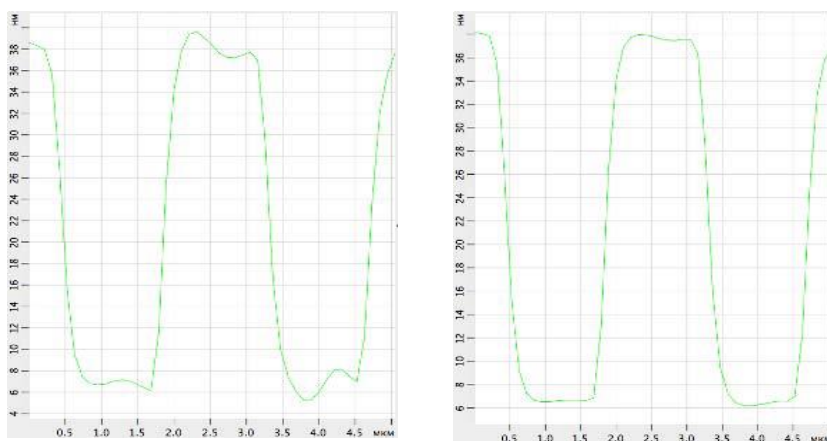


Рис. 1.15. Результат применения усреднения по сечению