

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ТУННЕЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ

Цель работы – изучение основ сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), получение топографии поверхности исследуемого образца в режиме постоянного туннельного тока.

### Введение

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) является одним из мощных современных методов исследования морфологии и локальных свойств поверхности твердого тела, нашедшим широкое применение в различных областях науки и технологии. Основное отличие между различными разновидностями методов СЗМ (сканирующая туннельная микроскопия (СТМ), сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия, атомно-силовая микроскопия (АСМ), магнитно-силовая микроскопия, ближнепольная акустическая микроскопия и т.д.) лежит в типе взаимодействия, который используется для контроля расстояния зонд – образец. Несмотря на то, что количество вариантов СЗМ достаточно многочисленно, оно продолжает расти, что позволяет получать дополнительную информацию, не только топографическую, о поверхностных свойствах образцов.

Метод СТМ является основоположником всего семейства методов СЗМ. Первый сканирующий туннельный микроскоп был создан в 1981 году Г. Биннигом и Г. Рорером в научно-исследовательской лаборатории фирмы ИВМ в Цюрихе. А в 1986 году Г. Бинниг и Г. Рорер были удостоены Нобелевской премии за свое изобретение. Изначально метод СТМ создавался и развивался как метод, позволяющий исследовать топографию поверхности металлов с высоким (вплоть до атомарного) разрешением в сверхвысоком

вакууме. Позже метод был применен для исследования других материалов, таких как полупроводники, тонкие непроводящие пленки или биологические молекулы в различных условиях (вакуум, воздух или жидкость).

Основой СТМ является очень острая игла, скользящая над исследуемой поверхностью, почти касаясь ее (зазор между иглой и поверхностью составляет менее одного нанометра). При этом, вследствие туннельного эффекта между острием иглы и поверхностью образца возникает *туннельный ток*.

Сильная зависимость туннельного тока от расстояния (при изменении зазора на одну десятую нанометра ток изменяется в 10 раз) обеспечивает высокую чувствительность микроскопа. Баланс иглы на столь малом расстоянии от исследуемой поверхности обеспечивается следящей системой, управляющей пьезоманипулятором по результатам измерения туннельного тока. Измеряя величины управляющих сигналов, определяют высоту исследуемой области, а перемещая иглу вдоль поверхности образца, определяют профиль поверхности с точностью до отдельных атомов.

Основанные на измерении туннельного тока изображения, получаемые с помощью этого микроскопа, дают информацию о пространственном распределении плотности электронных состояний вблизи поверхности. Образно говоря, туннельный микроскоп как бы “видит” распределение электронных облаков вблизи поверхности.

В случае использования низкого разрешения СТМ - изображение может рассматриваться как отображение поверхностной топографии образца. При больших полях сканирования (микроны) топографические эффекты обычно доминируют над электронными эффектами, поэтому интерпретация особенностей изображения достаточно однозначна. По мере усиления увеличения и приближения к атомарному разрешению топографические и электронные эффекты смешиваются, и интерпретация наблюдаемых особенностей становится более сложной задачей.

В настоящее время разработано большое количество разновидностей сканирующих туннельных микроскопов, в том числе совмещенных с другими методами исследования поверхности, например, Оже – электронной спектроскопией, методом дифракции медленных электронов и т.д. При этом существует ряд элементов, общих для всех вариантов устройства СТМ, в частности: сканирующая игла; система сближения иглы и образца для получения туннельного тока; сканирующее устройство, обычно, на основе пьезокерамических материалов (пьезоприводов); электронная система с обратной связью, которая поддерживает заданный туннельный ток; компьютерная система управления сканированием и сбором данных; система виброизоляции, уменьшающая амплитуду внешних воздействий на туннельный промежуток.

Различают два крайних варианта записи СТМ - изображения: режим “постоянного туннельного тока” (Рис. 42.1а) и “постоянной высоты зонда” (Рис. 42.1б).

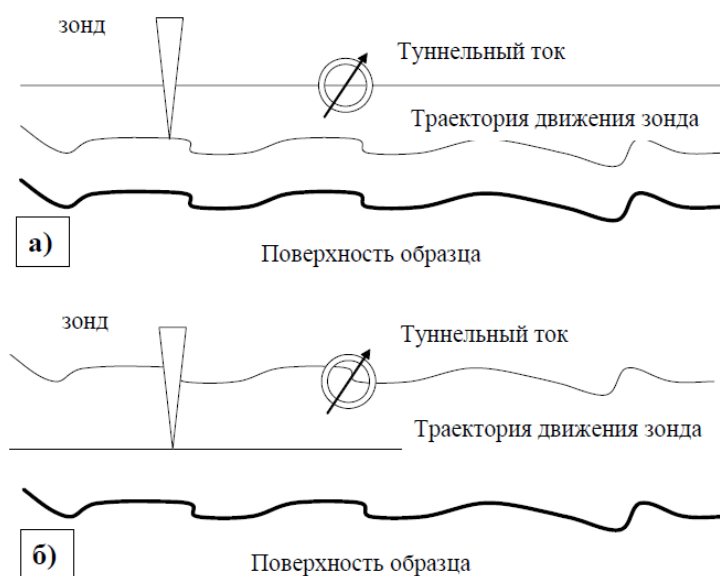


Рис. 42.1. Режимы постоянного тока (а) и постоянной высоты (б).

В режиме постоянного тока («топографическом») система обратной связи постоянно регистрирует туннельный ток и вносит такие корректировки в высоту зависания иглы, управляя при этом двигателями подачи иглы, чтобы величина заданного оператором туннельного тока оставалась

постоянной в каждой точке сканирования. Игла при этом остается всегда на одном и том же расстоянии от поверхности, и коррекция высоты иглы прямо отражает рельеф поверхности образца. В режиме “постоянной высоты” или быстрого сканирования цепь обратной связи не отслеживает профиль поверхности, т.е. не изменяется положение иглы, но при этом регистрируются изменения туннельного тока  $\Delta I$ . Последний режим полезен при исследовании с атомарным разрешением относительно ровных поверхностей, таких, например, как монокристаллы, так как при фиксированном положении иглы проще обеспечить механическую стабильность системы в целом, а изменения туннельного тока очень чувствительны к изменению туннельного промежутка. При этом данный режим не применим для исследования образцов с неизвестной морфологией или заведомо шероховатых поверхностей, так как велика вероятность повреждения иглы. В связи с этим, наибольшее распространение получил режим постоянного тока.

Сканирующий зондовый микроскоп дает изображение поверхности, увеличенное во всех трех измерениях:  $x$ ,  $y$  и  $z$ , максимальная разрешающая способность для каждой из осей определяется различными факторами.

Разрешение по оси  $z$  ограничивается, во-первых, чувствительностью сенсора, и, во-вторых, амплитудой вибраций зонда относительно поверхности образца. Конструкция микроскопа должна обеспечивать уменьшение амплитуды этих вибрации до долей ангстрема.

Разрешение СТМ по нормали к поверхности образца для атомно-чистых поверхностей достигает в благоприятных случаях сотых долей ангстрема. Однако для «грязных» поверхностей шум по координате  $Z$  резко возрастает, доходя до долей микрометра.

Максимальное разрешение в плоскости  $x$ - $y$  определяется, прежде всего, точностью позиционирования зонда. Важную роль играет геометрия острия зонда. При сканировании предельно плоских (атомно-плоских) поверхностей разрешение лимитируется диаметром атома на самом конце иглы (так

называемый эффект последнего атома, Рис. 42.2). Таким образом, для оценки предельного разрешения можно принять, что туннелирование (до 90% тока) происходит с единственного атома. Макроскопическая геометрия зонда не является определяющей для атомного разрешения.

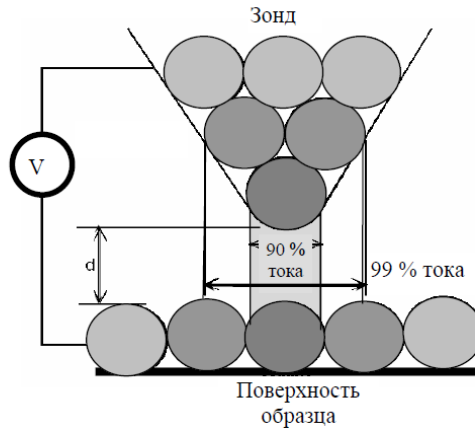


Рис. 42.2. Схематическое изображение взаимодействия кончика иглы с образцом.

При выявлении сравнительно больших геометрических деталей качество изображений определяется геометрией острия. Критическими являются следующие параметры: радиус закругления конца иглы  $r$  и отношение аспекта  $A_r = L/W$  (отношение высоты зонда к диаметру основания) (Рис. 42.3).

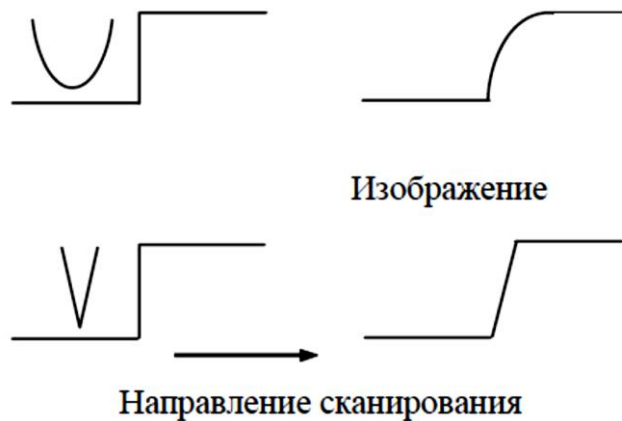


Рис. 42.3. Искажение изображения профиля поверхности вследствие конечной величины отношения аспекта и радиуса закругления острия

Предельное разрешение сканирующего туннельного микроскопа, в первую очередь, определяется физическими характеристиками пьезосканера и точностью измерения регистрируемого сигнала – туннельного тока. На практике же именно приборная реализация общих принципов формирования

изображения СТМ во многом определяет качество получаемой информации. В частности, поскольку сканирование обычно производится изгибанием трубчатого сканера, на участках изображения, отвечающих максимальному отклонению, могут наблюдаться искажения. К схожему эффекту приводит явление криппа – запаздывание деформации / реакции пьезокерамики в ответ на изменение управляющего напряжения. Еще один фактор нестабильности положения зонда относительно исследуемой поверхности – влияние колебаний температуры сканера в ходе эксперимента. Учитывая малость расстояния игла – образец ( $\sim 1$  нм), очевидно, что при изменении температуры сканера за счет различий в коэффициентах температурного расширения его деталей, особенно пьезокерамики, происходит неконтролируемое смещение иглы относительно образца – температурный дрейф.

Наконец, важную роль играет качество схемотехнических решений управляющей электроники – корректность измерения туннельного тока, точность получения и поддержания напряжения, подаваемого на пьезоэлементы сканера, устройства системы обратной связи и т.д.

Помимо этого, в лабораторных условиях бывает затруднительно избавиться от воздействия внешних возмущений на качество изображений СТМ. Одними из основных факторов, ухудшающих разрешение СТМ, являются влияние внешних вибраций и (для исследований на воздухе) акустических шумов, также приводящее к колебаниям зонда относительно поверхности исследуемого образца. Влияние электромагнитных наводок и электрических помех в сети питания приводит к наложению на изображение периодической «картинки», ухудшающей разрешение. На нанометровом уровне часто возможна ситуация, когда периодические наводки и особенности рельефа имеют близкие «размеры» на СТМ – изображении, в этом случае возможное ухудшение разрешения может привести к потере реальной информации о рельефе. Такое искажение СТМ – изображения обычно очевидно и не интерпретируется. При получении сканов с атомарным

разрешением подобная дополнительная периодичность может привести к ошибочным заключениям. Влияние условий сканирования на разрешение прибора проверяется варьированием задаваемых оператором параметров и оптимизируется индивидуально для каждого образца.

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 42.4.

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 42.1.

В левой части окна программы расположена панель инструментов, описание которой приведено в таблице 42.2.

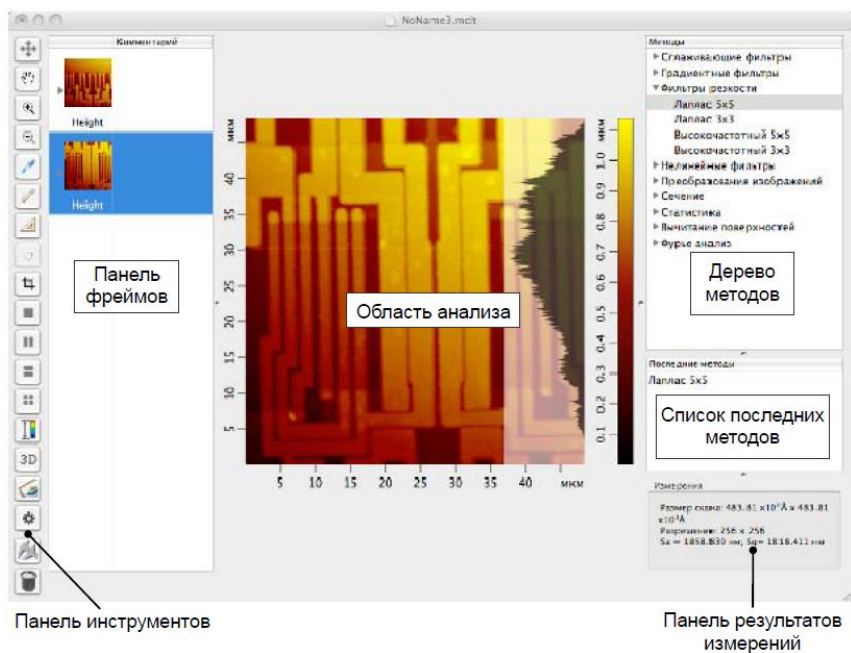


Рис. 42.4. Главное окно программы Scan Viewer

Таблица 42.1. Основные клавиши программы Scan Viewer


















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

Таблица 42.2. 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. 42.5): 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 42.6 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.

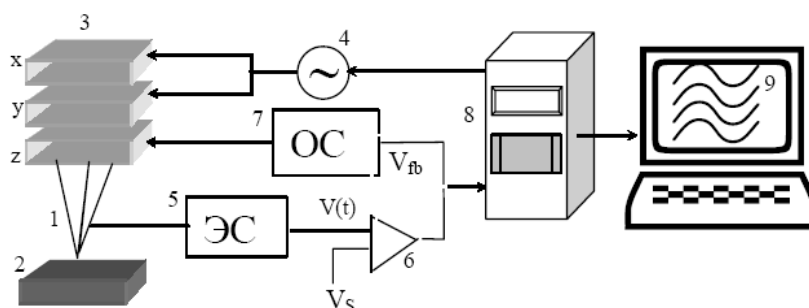


Рис. 42.5. Схема работы сканирующего зондового микроскопа

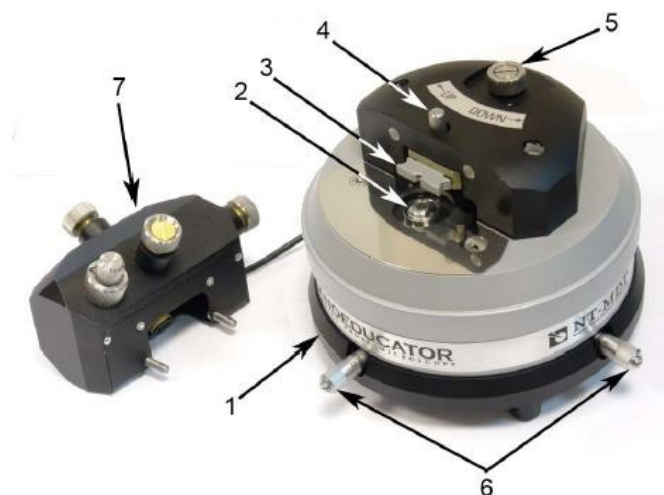


Рис. 42.6. Внешний вид (справа) и конструкция измерительной головки (слева) СЗМ NanoEducator

### 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 таблице 1.3 предыдущей лабораторной работы.

**ВНИМАНИЕ! Поднимать защитную крышку с видеокамерой (элемент 7 на рисунке 42.6) 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
2. Открыть окно «Подготовка к сканированию» соответствующей кнопкой на панели основных операций и выбрать параметры:
  - Выбор контроллера: НаноЭдюкатор
  - Выбор режима: АСМ

Задание 2. Построение резонансной кривой и установка рабочей частоты

1. Открыть окно «Резонанс» кнопкой (табл. 42.3) 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.

б. 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. 42.3) 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. 42.3). 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 42.3.

#### Задание 4. Переход в режим сканирующей туннельной микроскопии

Для перехода в режим СТМ следует открыть окно «Подготовка к сканированию» соответствующей кнопкой на панели основных операций и выбрать параметры:

- Выбор контроллера: НаноЭдюкатор
- Выбор режима: СТМ

#### Задание 5. Захват взаимодействия

1. Если индикатор «Z Сканер» при переходе из одного режима сканирования в другой изменил свой цвет на желтый, то следует установить флажок «Настройки» и нажать на стрелку «вниз». Нажимать до тех пор, пока индикатор «Z Сканер» не станет зеленым, а «индикатор тока» не станет желтым.

2. По окончании подвода индикатор «Z Сканер» займет промежуточное положение, что соответствует середине полного диапазона удлинения сканера.

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

#### Задание 6. Сканирование

1. В главном окне программы нажмите кнопку «Сканирование».
2. В режиме сканирования необходимо установить параметры, которые сгруппированы на панели сканирования, открываемой кнопкой (табл. 42.3) в правой части окна программы.

*Рекомендуемые параметры (параметры могут быть изменены.*

*Обратите внимание на записи на рабочем столе):*

X0: 0 нм	Y0: 0 нм	Тунн. напр.: -2.01 В
Размер: 10078×10078 нм	Шаг: 128×128 нм	Режим: СТМ
Скорость: 2.52 мкм/с	Усиление ОС: 3	Рабочая точка: 0.5нА

3. Запуск сканирования осуществляется соответствующей кнопкой «Пуск» в главном окне программы. В результате начнется построчное сканирование поверхности образца и в области измерений, строчка за строчкой, будет появляться изображение сканируемой поверхности.

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. 42.3), 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.

5. Проведите сканирование в режиме сканирующей туннельной микроскопии также при скоростях 5.20 мкм/с и 12.00 мкм/с.

6. Выберите оптимальную скорость сканирования и сделайте вывод о зависимости качества полученного изображения от скорости сканирования.

7. 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 \*.mdt. В полученном файле будут содержаться фреймы представленные в окне сессии в момент сохранения

Задание 7. Анализ влияния различных фильтров на результат проведенного сканирования

1. Для выполнения данного задания выберите одно из сделанных результатов сканирования, 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 6 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.

5. В заключении проанализируйте результаты сканирования, сделайте выводы относительно выбранной скорости сканирования. Сделайте отдельный вывод относительно оптимального сочетания фильтров и искажения периодов структур при применении того или иного фильтра при применении метода сканирующей туннельной микроскопии.



Таблица 42.3. 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. На чем основывается метод сканирующей туннельной микроскопии?
2. Каковы общие элементы всех СТМ?
3. Сколько существует режимов записи СТМ-изображений? В чем их различия?
4. Назовите факторы, определяющие качество изображения в СТМ. Какие требования предъявляются к СТМ-зонду?
5. Опишите общую конструкцию прибора NanoEducator.

## Литература

1. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. - М:Техносфера, 2004. -144 с.
2. Paredes J.I., Martinez-Alonso A., Tascon J.M.D. Application of scanning tunneling and atomic force microscopies to the characterization of microporous and mesoporous materials // Microporous and Mesoporous Materials. - 2003. - V. 65. - P. 93 – 126.
3. Guntherodt H.-J., Wiesendanger R. (Eds.) Scanning Tunneling Microscopy I. - Berlin Heidelberg: Springer Series in Surface Sciences. Springer – Verlag, 1992. - 246 p.
4. Шайхутдинов Ш.К., Кочубей Д.И. Исследования гетерогенных каталитических систем и их моделей методом сканирующей туннельной микроскопии // Успехи химии. – 1993. – Т. 62, № 5. – С. 443 – 453.
5. Kuk Y., Sulverman P.J. Scanning tunneling microscope instrumentation // Rev. Sci. Instrum. – 1989. – V. 60, No. 2. – P. 165 – 180.
6. Magonov S.N., Whangbo-Weinheim M.-H. Surface Analysis with STM and AFM: Experimental and Theoretical Aspects of Image Analysis. – New York; Basel;Cambridge; Tokyo; VCH: Printed in the FRG, 1996. – 323 p.
7. Howland R.S. How to Buy a Scanning Probe Microscope. Stanford: Park Scientific Instruments, 1993. - 44 p.
8. Г. Бинниг, Г. Рорер. Сканирующая туннельная микроскопия – от рождения к юности – Нобелевские лекции по физике – 1996. // УФН, т. 154 (1988), вып.2, с. 261.

## 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.

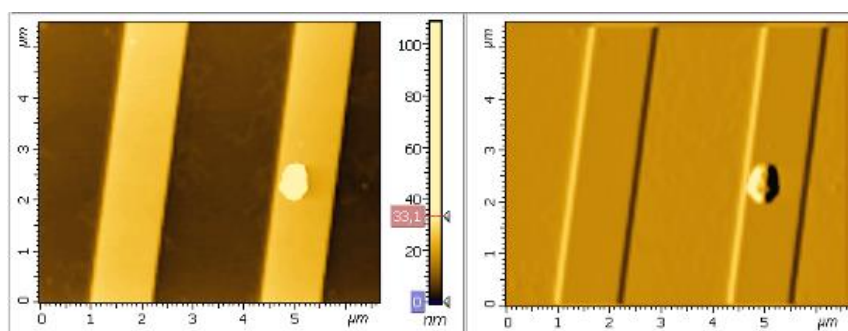


Рис. 1.11. Результат применения вертикального фильтра Прюитта

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

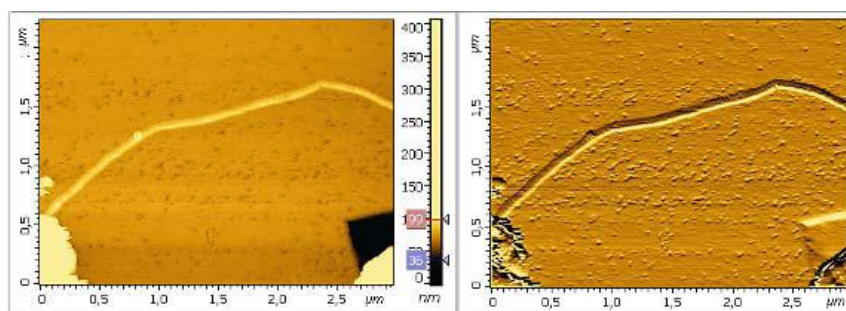


Рис. 1.12. Результат применения горизонтального фильтра Прюитта

*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  $5 \times 5$ ».

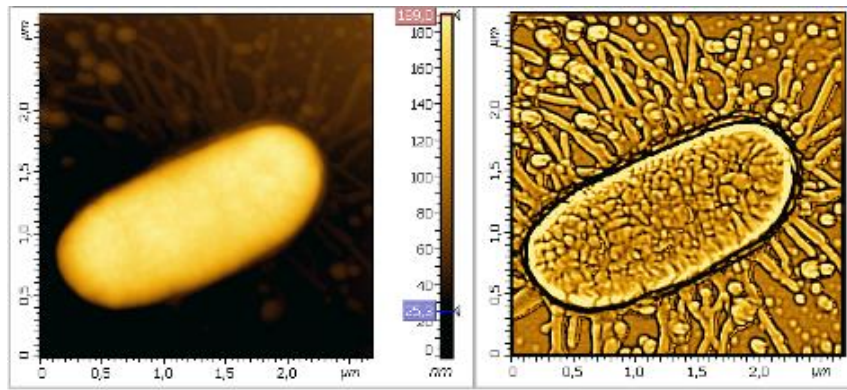


Рис. 1.13. Результат применения высокочастотного фильтра

### *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  $5 \times 5$ ».

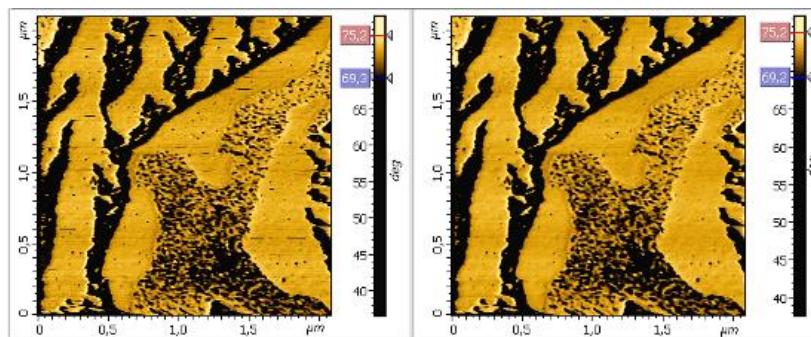


Рис. 1.14. Результат применения медианного фильтра

## ***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.

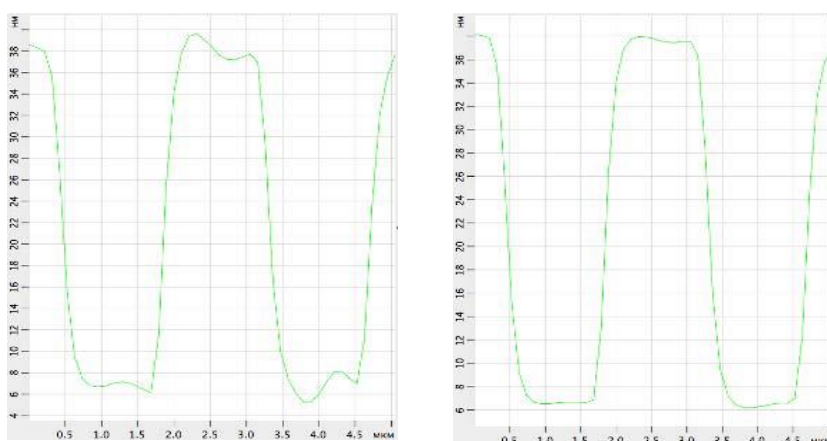


Рис. 1.15. Результат применения усреднения по сечению