

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Омский государственный технический университет»

## МЕТОДЫ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Методические указания к лабораторным работам

Омск  
Издательство ОмГТУ  
2014

Составители: *М. А. Зверев*, канд. техн. наук;  
*Е. А. Рогачев*, канд. техн. наук;  
*А. М. Ласица*, канд. техн. наук

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Наноструктурные материалы и нанокompозиты» содержат краткие теоретические сведения, порядок выполнения лабораторных работ и контрольные вопросы.

Предназначены для магистрантов направления 28.04.02 «Наноинженерия», а также могут быть использованы в образовательном процессе студентами технических направлений подготовки, изучающими высокотехнологические методы исследований.

*Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Омского государственного технического университета*

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа № 1 АРТЕФАКТЫ В СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ.....	4
Лабораторная работа № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ТУННельНОЙ МИКРОСКОПИИ.....	13
Лабораторная работа № 3 СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ ЛИТОГРАФИЯ.....	25
Библиографический список.....	31

## Лабораторная работа № 1

### АРТЕФАКТЫ В СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

**Цель работы:** изучение источников артефактов в сканирующей зондовой микроскопии, исследование СЗМ сканера, определение формы зонда.

**Приборы и принадлежности:** сканирующий зондовый микроскоп Nano-Educator, тестовый образец TGT1.

#### Краткие теоретические сведения

Микроскопическое исследование твердых тел позволяет получить увеличенное изображение поверхности. В силу целого ряда причин получаемые изображения содержат некоторые искажения, так называемые артефакты. Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ), как и все аналитические методы исследования, также приводит к появлению артефактов. Понимание причин и закономерностей их появления позволяет разработать методы борьбы с артефактами, правильно оценивать работу приборов, трактовать результаты исследования с высокой степенью достоверности.

Возникающие при сканирующей зондовой микроскопии артефакты в основном связаны с принципом работы сканера, геометрией и состоянием зонда.

Сканерами называются конструкции из пьезокерамик, обеспечивающие перемещение по трем координатам:  $X$ ,  $Y$  (в латеральной плоскости образца) и  $Z$  (по вертикали). Существует несколько типов сканеров, среди которых широкое распространение получили треногий и трубчатый (рис. 1.1).

В треногом сканере прецизионные перемещения обеспечивают три пьезокерамики, представляющие собой ортогональную структуру (рис. 1.1, *a*). При сканировании образца на  $X$ - и  $Y$ -пьезокерамику подается напряжение, при этом геометрия сканера действует на зонд, укрепленный на конце  $Z$ -пьезокерамики, вынуждая выходить его из плоскости образца. Вследствие этого на  $Z$ -пьезокерамику необходимо подавать напряжение для поддержания зонда в обратной связи с образцом. Получается изображение, которое кажется изогнутым, даже когда фактическая поверхность образца полностью плоская. В треногом сканере  $Z$ -пьезокерамика (и соответственно зонд) движется при сканировании по дуге окружности (плоскости второго порядка). Эта дуга определяется размерами треноги сканера. Данное искажение можно удалить из полученного изображения вычитанием кривой второго порядка.

Трубчатые сканеры работают посредством изгиба полой пьезоэлектрической трубки в латеральной плоскости и удлинения или сжатия трубки по оси  $Z$ . Электроды, управляющие движениями трубки в направлениях  $X$  и  $Y$ , размещаются в виде четырех сегментов по наружной поверхности трубки (рис. 1.1, *б*).

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  $Y$ . Перемещение в направлении  $Z$  осуществляется подачей напряжения на электрод, расположенный в центре трубки.

Диапазон сжатия или растяжения трубки в направлении  $Z$  пропорционален длине трубки, в то время как изгиб в направлениях  $X$  и  $Y$  пропорционален квадрату длины. Вследствие этого сканеру может не хватить диапазона перемещений в направлении  $Z$  при сканировании большой площади, чтобы измерить большие детали поверхности.

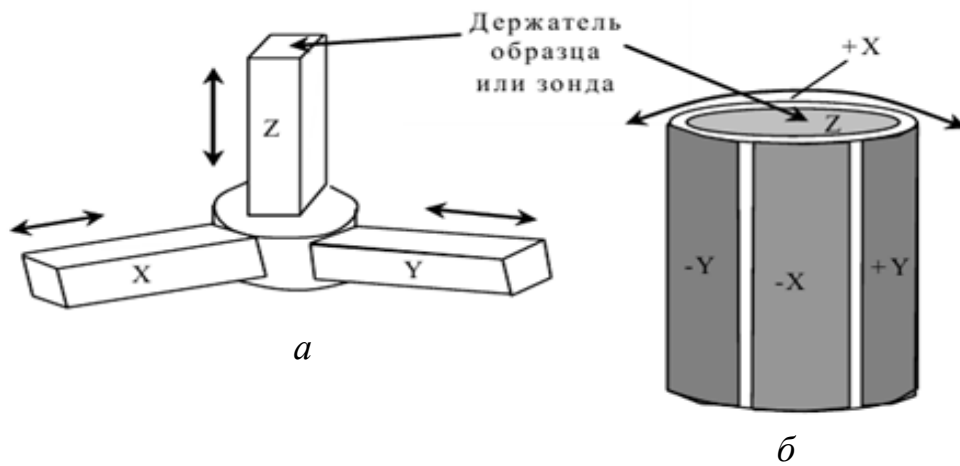


Рис. 1.1. Сканеры:  $a$  – треногий;  $b$  – трубчатый

Трубчатый сканер создает изгибное искажение большего порядка, чем треногий. Так как величина гистерезиса увеличивается при увеличении скорости и диапазона сканирования, величина и форма изгиба изменяются. Для устранения изгиба на изображении должна использоваться программная коррекция более высокого порядка, которая может приводить к другим искажениям.

Существует несколько способов коррекции нелинейности и других свойств пьезокерамики в сканирующих зондовых микроскопах. Наиболее надежный подход к решению этой проблемы заключается в прямом измерении мгновенного положения сканера и коррекции нелинейности в реальном времени посредством цепи обратной связи. В качестве датчиков смещения могут использоваться, например, емкостные или тензодатчики.

Более простой способ заключается в использовании нелинейных напряжений возбуждения пьезокерамики так, чтобы результирующее смещение сканера было приблизительно линейным. Для этого СЗМ сканер должен быть предварительно откалиброван, т. е. найдена функция зависимости смещения  $\Delta l$  от приложенного напряжения  $U$ :  $\Delta l = f(U)$ . Калибровку сканера осуществляют

с использованием образцов, имеющих периодические структуры с известными размерами.

Важной характеристикой сканера является его резонансная частота. Сканеры с жесткой конструкцией, т. е. высоким значением резонансной частоты, лучше защищены от влияния внешних вибраций и позволяют с достаточной точностью отслеживать сигналы в широкой частотной полосе. Это позволяет сканировать поверхность образца с высокой скоростью. Уменьшение времени сканирования удобно, а кроме того, при этом уменьшается вредное влияние температурных дрейфов.

Можно оценить собственную резонансную частоту сканера в виде пьезотрубки, воспользовавшись выражением для частоты основной гармоники поперечных колебаний в плоскости  $X_Z$  стержня с одним жестко закрепленным концом:

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \frac{(1,875)^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI_Y}{m}}, \quad (1.1)$$

где  $I_Y$  – момент инерции относительно оси  $z$  единицы длины;  $l$  – длина;  $m$  – масса;  $E = c^2 \rho$  – модуль Юнга,  $c$  – скорость звука в пьезоматериале,  $\rho$  – плотность пьезокерамики.

Для полого цилиндра длиной  $l$ , радиусом  $R$  и толщиной стенки  $h$  имеем:

$$I_Y = \frac{\rho \pi R^4}{2} \left[ 1 - \left( \frac{R-h}{R} \right)^4 \right].$$

Подставляя  $l = 30$  мм,  $h = 1$  мм,  $R = 6$  мм,  $c = 3,3 \cdot 10^3$  м/с,  $\rho = 7$  г/см<sup>2</sup>, получим  $\omega \approx 12,3$  кГц.

Из формулы (1.1) видно, что увеличение диапазона перемещений сканера за счет увеличения его длины приводит к квадратичному уменьшению его резонансной частоты. В случае крепления образца на сканере его масса должна быть небольшой по сравнению с массой сканера, иначе будет заметным уменьшение резонансной частоты. В случае сканеров сложной конфигурации, когда математический расчет представляет собой достаточно сложную задачу, пользуются данными, полученными экспериментально.

Существует много видов СЗМ зондов, различающихся геометрией. В методе атомно-силовой микроскопии (АСМ) наиболее часто используют зонды пирамидальной и конической формы с радиусом закругления вершины 20–50 нм. Зонды для сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), как правило, изготавливаются методом электрохимического травления из тонкой вольфрамовой проволоки. Радиус закругления вершины СТМ зонда порядка 10 нм.

Артефакты, связанные с зондом, появляются на СЗМ изображении неизбежно. Взаимодействие между геометрией зонда и поверхностью образца показано на рис. 1.2.

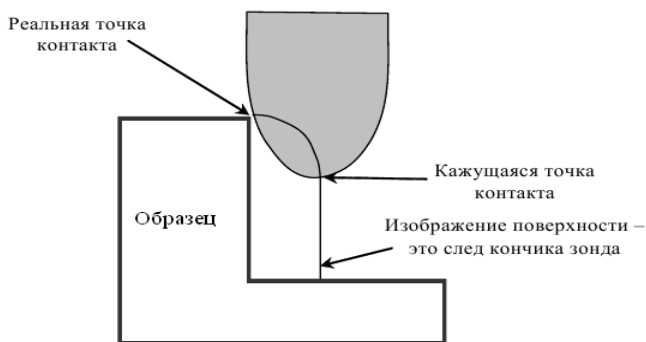


Рис. 1.2. Контакт СЗМ зонда с образцом

Кажущаяся точка контакта СЗМ зонда с образцом зависит как от геометрии зонда, так и от геометрии отображаемой поверхностной особенности образца. Геометрия зонда очень важна при отображении резких особенностей. Зонд с большим радиусом закругления начинает взаимодействовать с поверхностными особенностями задолго до того, как центральная ось зонда достигает особенностей. Это можно наблюдать при отображении особенностей типа ступенек (рис.1,3).

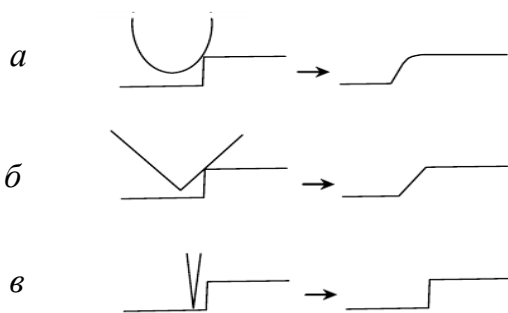
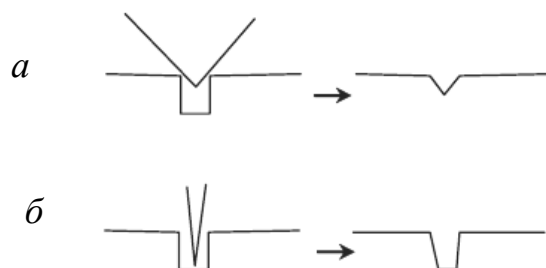


Рис. 1.3. Отображение особенностей типа ступенек

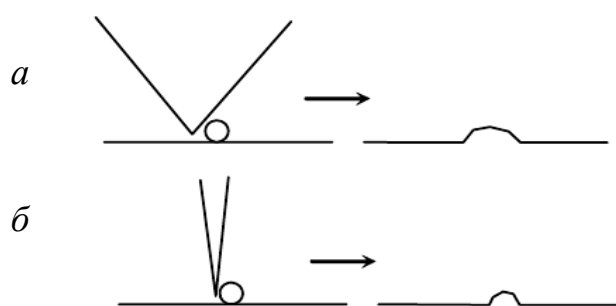
При отображении ступеньки геометрия зонда является критичной. После того как закругленный зонд начинает взаимодействовать с особенностью, он очерчивает округленную форму, а не острый край (рис. 1.3, а). Зонды с малым отношением сторон производят наклонные ступеньки (рис. 1.3, б). Для получения изображений, наиболее близко соответствующих поверхности образца, требуются зонды с большим отношением сторон (рис. 1.3, в). При использовании зонда пирамидальной формы будет казаться, что ступенька имеет угол, равный углу зонда. Таким образом, зонды с большим отношением сторон будут вносить наименьшие искажения.

Еще более важным это становится при отображении глубоких особенностей типа канавок. Такие особенности отображаются при использовании тонких и длинных зондов. Зонды с малыми отношениями сторон не будут достигать дна этих особенностей, как показано на рис. 1.4, *а*. Эти особенности могут быть отображены только тонкими и длинными зондами (рис. 1.4, *б*).



*Рис. 1.4.* Отображение особенностей типа канавок

При отображении малых выпуклостей на плоской поверхности заостренность используемого зонда существенно влияет на ширину изображения. Как показано на рис. 1.5, *а*, зонд с большим радиусом начинает взаимодействовать с особенностью типа выпуклости задолго до того, как центральная ось зонда коснется образца. Изображение будет значительно шире, чем реальная поверхность образца. При использовании острых зондов ширина изображения больше соответствует реальной ширине деталей (рис. 1.5, *б*). Зонды для этого типа образцов должны быть острыми, но при этом они не обязательно должны быть длинными. В обоих случаях высота особенностей воспроизводится точно.



*Рис. 1.5.* Отображение малых выпуклостей

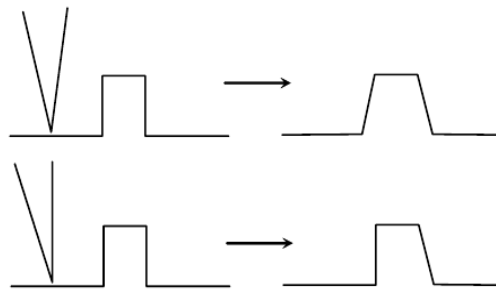
Если кончик зонда загрязнен, результирующее изображение будет изменяться, как правило происходит размазывание отображаемых деталей.

В процессе получения изображения твердых образцов или неосторожного обращения с зондом может происходить частичное разрушение зонда, приво-



дующее, например, к раздвоению кончика зонда. При использовании такого зонда на получающемся изображении будет наблюдаться сдвоенное изображение каждой особенности на поверхности образца.

Если зонд располагается под углом к поверхности образца, отличным от  $90^\circ$ , получающееся изображение будет искаженным. При отображении особенности, которая имеет равные углы с каждой стороны, одна сторона будет казаться более крутой, чем другая, как показано на рис. 1.6.



*Рис. 1.6.* Артефакты на изображении, вызванные углом между зондом и образцом

Знание геометрии зонда позволяет минимизировать эти искажения при интерпретации полученных изображений, а также использовать зонды, наиболее подходящие для отображения особенностей исследуемого образца.

Во всех описанных случаях наблюдаются искажения в СЗМ изображениях при сканировании поверхностей с неровностями рельефа, сравнимыми с характерными размерами рабочей части зонда. Частично данную проблему позволяют решить методы восстановления СЗМ изображений, основанные на компьютерной обработке СЗМ данных с учетом конкретной формы зондов. Наиболее эффективным методом восстановления поверхности является метод численной деконволюции, использующий форму зонда, получаемую экспериментально при сканировании тестовых структур с известными параметрами рельефа поверхности.

Калибровочная решетка в виде острых пиков (массив перевернутых АСМ зондов) позволяет хорошо прописывать кончик зонда, а прямоугольная решетка помогает восстановить форму боковой поверхности. Используя результаты сканирования данных решеток, можно полностью восстанавливать форму рабочей части зондов.

## Порядок выполнения работы

Выполняется первая или вторая часть по выбору преподавателя.

### Часть 1

1. Измерение резонансной частоты сканера.

1.1. Закройте программу NanoEducator и выключите контроллер прибора.

1.2. Извлеките зондовый датчик из гнезда измерительной головки, если он установлен. Снимите образец, если он установлен на держателе.

1.3. Отсоедините от измерительной головки кабель.

1.4. Присоедините специальный переходной кабель к разъему головки. Второй конец кабеля со вставкой вставьте в гнездо вместо зондового датчика. Данный кабель предназначен для подведения напряжения развертки с генератора для измерения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) сканера. Схема измерения АЧХ сканера показана на рис. 1.7. На пьезоэлемент Z сканера подается напряжение с генератора. Механические колебания приводят к возникновению электрических зарядов на пьезоэлементе оси X сканера, этот сигнал усиливается и поступает в измерительную схему.

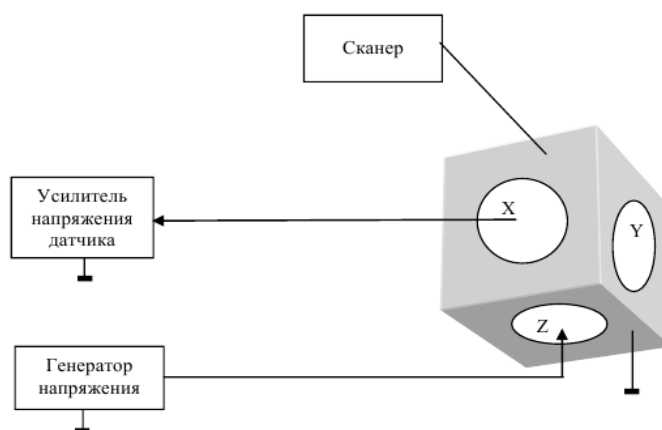



Рис. 1.7. Схема измерения АЧХ сканера

1.5. Включите сначала контроллер прибора, далее запустите управляющую программу прибора NanoEducator. Выберите режим атомно-силового микроскопа (АСМ).

1.6. Нажмите на панели инструментов кнопку . Установите флажок **Настройки**. Нажмите кнопку **Старт**. В результате производится измерение амплитудно-частотной характеристики колебаний, возникающих в сканере.

1.7. Определите по полученной АЧХ пик, соответствующий сканеру. Изменяйте величину возбуждающего напряжения с генератора, при этом должна меняться высота резонансного пика сканера. Если этого не происходит, то по-

пробуйте поискать пик, соответствующий резонансному колебанию сканера, в другом частотном интервале. Рекомендуется устанавливать **Амплитуду колебаний** в диапазоне от 32 до 40 мВ, а **Усиление амплитуды** в интервале от 0 до 20 дБ. По умолчанию измерение амплитуды колебаний происходит в интервале частот от 3 до 17 кГц (при центральной частоте, равной 10 кГц). Получите графики зависимости амплитуды колебаний от частоты при значениях центральной частоты 2 и 50 кГц. Сохраните АЧХ в том частотном интервале, в котором присутствует резонансный пик колебаний сканера.

1.8. Исследуйте влияние веса образца на резонансную частоту сканера. Для этого установите на держатель образец весом более пяти грамм (например, монету). Масса монеты достоинством в 10 рублей – 5.8 г.

1.9. Измерьте резонансную частоту сканера с грузом. Резонансный пик сканера может при этом сместиться в другой частотный интервал, но форма максимума не изменится. Сохраните АЧХ в том частотном интервале, в котором присутствует резонансный пик колебаний сканера.

1.10. Закройте программу NanoEducator и выключите контроллер прибора.

1.11. Отсоедините переходный кабель от гнезда датчика взаимодействия и от разъема измерительной головки. Подсоедините вместо него кабель, по которому подается напряжение на сканер от контроллера прибора.

1.12. Сделайте выводы по проделанной работе. Оформите отчет о проделанных исследованиях.


## Часть 2

2. Определение формы зонда по тестовой решетке TGT1.

2.1. Установите на держатель исследуемый образец – тестовую решетку TGT1.

2.2. Установите зондовый датчик в гнездо измерительной головки прибора NanoEducator. Лишь слегка затяните прижимающий винт.

2.3. Включите сначала контроллер прибора, далее запустите управляющую программу прибора NanoEducator. Выберите режим АСМ.

2.4. Произведите настройку зондового датчика на резонанс кнопкой . Рекомендуется устанавливать величину амплитуды, задаваемой генератором, минимальной (вплоть до нуля) и не более **50 мВ**. При недостаточной величине амплитуды ответных колебаний зонда ( $< 1 \text{ В}$ ) рекомендуется увеличить коэффициент **Усиление амплитуды**.

2.5. Осуществите сближение зонда с образцом с помощью винта ручного подвода до расстояния примерно 1 мм.

2.6. Откройте вкладку **Подвод** (меню **NanoEducator** → **Свойства** →

**Подвод).** Увеличьте значение **Задержка интегратора** (время, необходимое для вытягивания сканера на полный диапазон при включении следящей системы) до 1000 мс, что позволит осторожно осуществлять сближение. Установите значение **Амплитуда останова** равным приблизительно 0.2. Эта предосторожность необходима, так как работа следящей системы может быть неустойчивой при захвате взаимодействия на вершине или склоне иглы тестовой решетки TGT1.

2.7. Осуществите подвод зонда к образцу в автоматическом режиме. После захвата взаимодействия уменьшите величину взаимодействия до значения 0.1. Убедитесь, что величина  $Z$  не уменьшается.

2.8. Перейдите на вкладку сканирования, щелкнув на кнопке **Сканирование**. Задайте необходимые параметры сканирования. Установите скорость сканирования не более 1000 нм/с, шаг сканирования – меньше 100 нм.

2.9. Получите изображение рельефа поверхности образца, нажав кнопку **Пуск** в рабочем окне программы. Запишите параметры, при которых производилось сканирование.

2.10. Примените к полученному изображению операцию вычитания плоскости в программе обработки данных. Сохраните двухмерное и трехмерное изображение поверхности после применения операции.

2.11. Осуществите отвод зонда от поверхности образца.

2.12. Выньте датчик с зондом из гнезда измерительной головки прибора NanoEducator.

2.13. Вставьте новый зонд и осуществите повторное определение формы зонда по тестовой решетки TGT1.

2.14. Постройте на одном графике профили линии через вершину зонда до и после замены зонда.

2.15. Закройте программу NanoEducator и выключите контроллер прибора.

2.16. Сделайте выводы по проделанной работе. Оформите отчет о проделанных исследованиях.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие виды сканеров вы знаете? Опишите их устройство.
2. Назовите виды искажений, вносимые сканерами в СЗМ изображение.
3. На какие характеристики влияет резонансная частота сканера?
4. Перечислите основные виды зондов, используемых в СЗМ. Опишите идеальный СЗМ зонд.
5. Какие искажения способны вызвать зонды при отображении различных поверхностных особенностей?

## Лабораторная работа № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ТУННЕЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ

**Цель работы:** изучение основ сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии, принципов работы датчика туннельного тока в приборе NanoEducator и измерение его основных параметров; получение топографии поверхности исследуемого образца в режиме постоянного туннельного тока.

**Приборы и принадлежности:** сканирующий зондовый микроскоп NanoEducator, набор образцов.

#### Краткие теоретические сведения

Первым сканирующим зондовым микроскопом был микроскоп, созданный в 1981 году Гердом Биннигом и Генрихом Рорером в научно-исследовательской лаборатории фирмы IBM в Цюрихе. Работа микроскопа была основана на методике туннельной микроскопии. Этот тип микроскопа впервые позволил получить изображение поверхности кремния с атомарным разрешением.

Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) основана на явлении, называемом «туннельный эффект» или «туннелирование», заключающемся в преодолении микрочастицей потенциального барьера в случае, когда её полная энергия (остающаяся при туннелировании неизменной) меньше высоты барьера. Туннельный эффект – явление исключительно квантовой природы, невозможное в классической механике и даже полностью противоречащее ей.

Для характеристики величины туннельного эффекта вводится коэффициент прозрачности барьера, равный модулю отношения плотности потока прошедших частиц к плотности потока упавших:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \int_{z_1}^{z_2} \sqrt{2m(W(z) - E)} dz\right), \quad (2.1)$$

где  $m$  – масса частицы;  $W(z)$  – потенциальная энергия (высота потенциального барьера);  $E$  – полная энергия частицы;  $D_0$  – постоянный коэффициент, близкий к единице.

При сближении двух металлов на расстояние, меньшее расстояния, на котором волновые функции покинувших потенциальные ямы электронов затухают, возникает туннельный контакт металл – вакуум – металл (рис. 2.1).

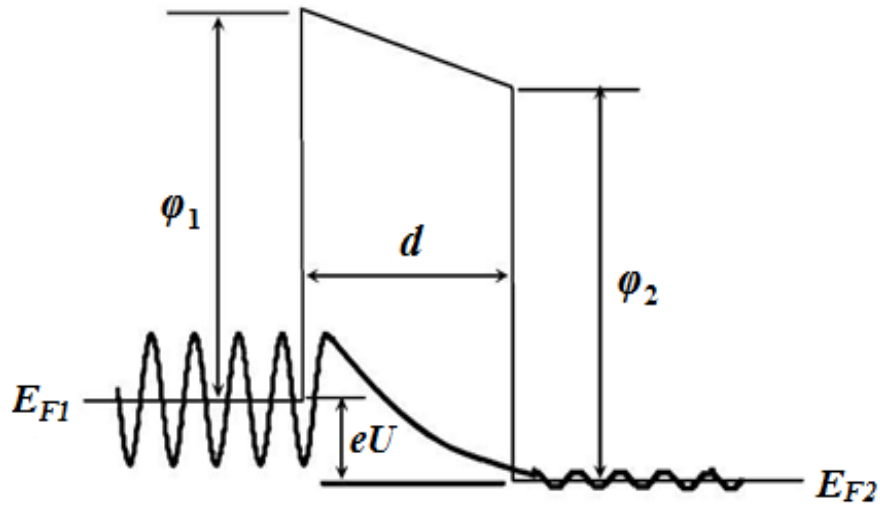


Рис. 2.1. Зонная диаграмма туннельного контакта двух проводников и огибающие волновые функции электронов в металле и в барьере в приближении эффективной массы

На рис. 2.1  $E_{F1}$ ,  $E_{F2}$  – уровни энергии Ферми контактирующих металлов,  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  – потенциалы поверхностей этих металлов,  $d$  – расстояние между ними.

В такой системе при наличии внешнего напряжения, называемого напряжением смещения  $U$ , между двумя металлами возможно протекание туннельного тока. Если напряжение смещения невелико ( $eU \ll \phi$ ), то величина туннельного тока  $I_T$  пропорциональна приложенному напряжению:

$$I_T = AUe^{-b\sqrt{\phi d}}, \quad (2.2)$$

где  $d$  – расстояние между двумя металлами;  $A$  и  $b$  – константы. Важным выводом из этого соотношения является экспоненциальный характер зависимости величины туннельного тока от ширины туннельного барьера  $d$ . С помощью зависимости (2.2) можно получить, что увеличение ширины туннельного барьера на  $1 \text{ \AA}$  приводит к уменьшению величины туннельного тока на порядок.

В СТМ используется туннелирование электронов между проводящими зондом и образцом при наличии внешнего напряжения; шириной туннельного перехода является расстояние между зондом и поверхностью образца.

В качестве зонда в СТМ используется остро заточенная металлическая игла. Предельное пространственное разрешение СТМ определяется в основном радиусом закругления острия (который может достигать нескольких ангстрем) и его механической жесткостью. Если механическая жесткость в продольном и поперечном направлениях оказывается достаточно малой, механические, тепловые и квантовые флуктуации иглы могут существенно ухудшить разрешение СТМ. В качестве материала для зонда обычно используются металлы с высокой твердостью и химической стойкостью: вольфрам или платина.

Между зондом и образцом прикладывается напряжение. Когда кончик зонда оказывается на расстоянии около  $10 \text{ \AA}$  от образца, электроны из образца начинают туннелировать через промежуток в иглу или наоборот, в зависимости от знака напряжения. Возникающий в результате ток туннелирования изменяется с зазором зонд – образец экспоненциально и измеряется туннельным сенсором 5 (рис. 2.2).

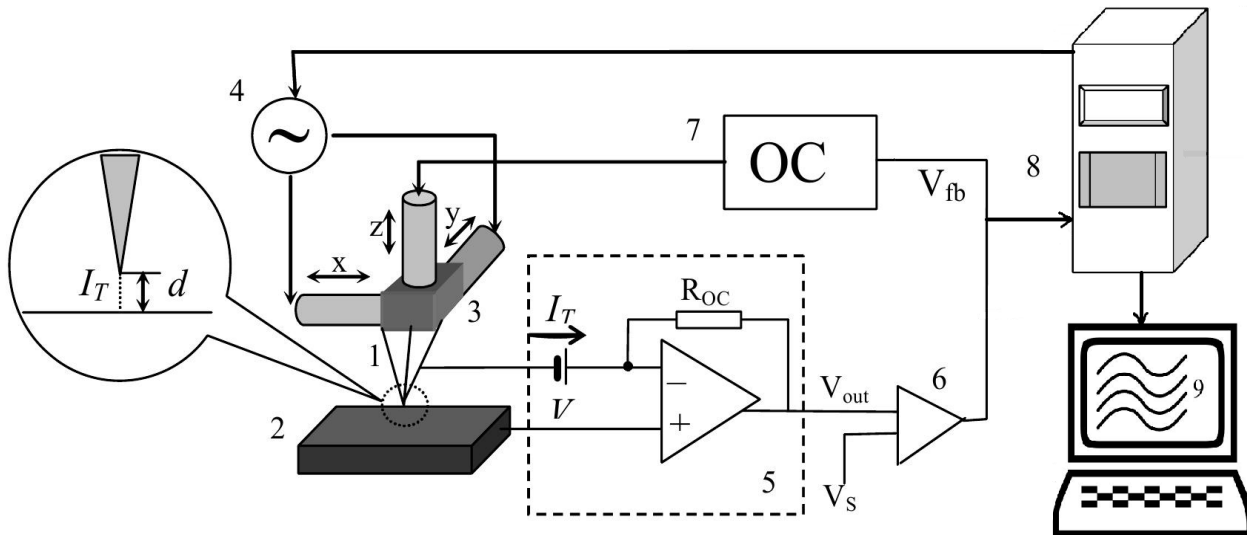


Рис. 2.2. Схема сканирующего туннельного микроскопа:

1 – зонд; 2 – образец; 3 – пьезоэлектрические двигатели  $x, y, z$ ; 4 – генератор развертки  $x, y$ ;  
 5 – туннельный сенсор; 6 – компаратор; 7 – электронная цепь обратной связи; 8 – компьютер;  
 9 – изображение  $z(x, y)$

В режиме постоянного тока (рис. 2.3, а) величина туннельного тока между зондом и образцом поддерживается постоянной за счет приближения и отвода зонда системой обратной связи. Сигнал для получения изображения топографии поверхности берется из канала  $z$ -пьезопривода. Альтернативный метод регистрации, применяемый при исследовании малых достаточно плоских участков (атомно-гладких поверхностей), – работа в режиме с очень большой постоянной времени цепи обратной связи, так что при сканировании среднее расстояние острие – образец поддерживается постоянным (рис. 2.3, б) и регистрируются быстрые изменения туннельного тока («токовое изображение»). Этот способ позволяет максимально использовать быстродействие системы регистрации и получать изображения «в реальном времени».

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 вибраций до долей ангстрема.

Разрешение СТМ по нормали к поверхности образца для атомно-чистых поверхностей достигает в благоприятных случаях сотых долей ангстрема. Благодаря крутой зависимости  $I(Z)$  электронные шумы аппаратуры, дробовой шум туннельного тока и т. п. слабо влияют на результаты. Однако для «грязных» поверхностей шум по координате  $Z$  резко возрастает, доходя до долей микрометра.

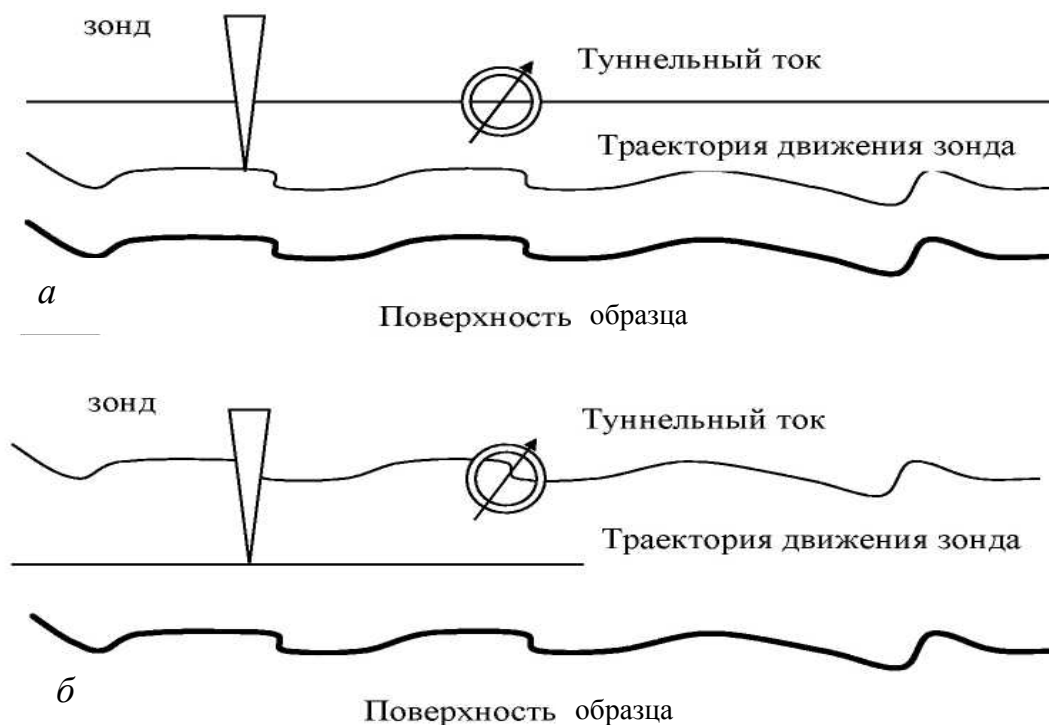


Рис. 2.3. Режимы постоянного тока (а) и постоянной высоты (б)

Максимальное разрешение в плоскости  $X$ - $Y$  определяется, прежде всего, точностью позиционирования зонда. Важное значение имеет геометрия острия зонда. При сканировании атомно-плоских поверхностей разрешение ограничивается диаметром атома на самом конце иглы (так называемый эффект последнего атома, рис. 2.4). 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.



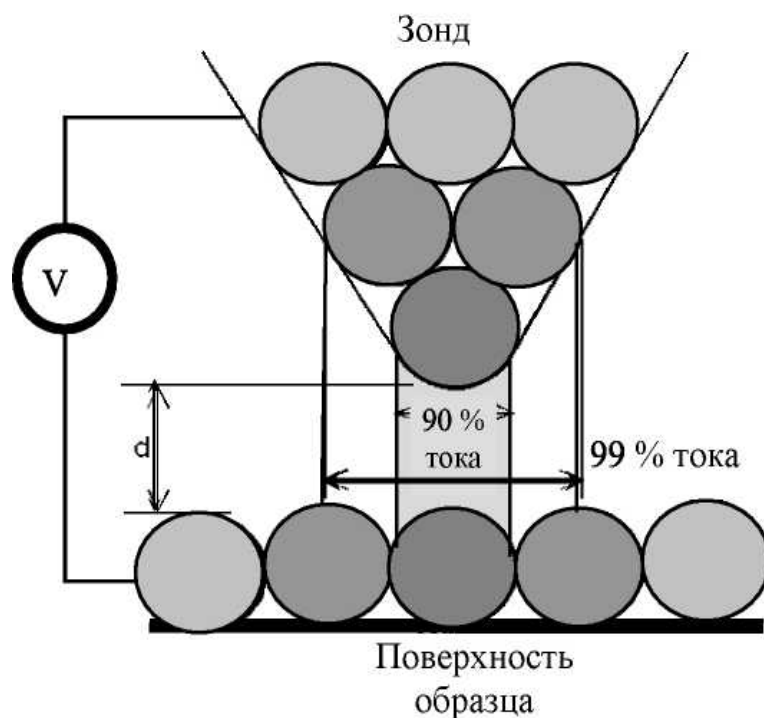


Рис. 2.4. Схематическое изображение взаимодействия кончика иглы с образцом

При выявлении сравнительно больших геометрических деталей качество изображений определяется геометрией острия. Критическими являются следующие параметры: радиус закругления конца иглы и отношение высоты зонда к диаметру основания (рис. 2.5).

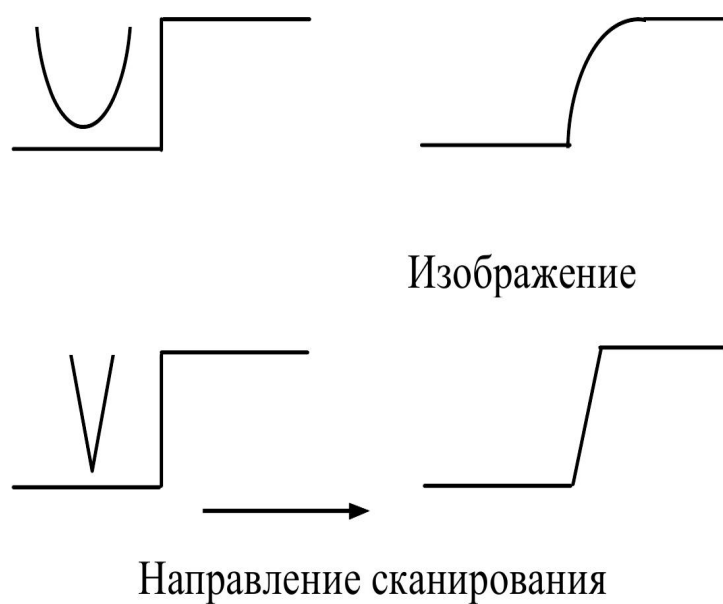


Рис. 2.5. Искажение изображения профиля поверхности вследствие конечной величины отношения аспекта и радиуса закругления острия

Под туннельной спектроскопией подразумевается измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) туннельного контакта в различных точках поверхности. Это позволяет судить о локальной проводимости образца и изучать особенности локальной плотности состояний в энергетическом спектре электронов.

Процедура измерения ВАХ заключается в следующем. На СТМ изображении поверхности выбирается область образца, в которой предполагается произвести измерения. Зонд СТМ выводится сканером в соответствующую точку поверхности. Для получения ВАХ контакта обратная связь на короткое время разрывается, и к туннельному промежутку прикладывается линейно нарастающее напряжение. При этом синхронно с изменением напряжения регистрируется ток, протекающий через туннельный контакт. Во время снятия ВАХ на время разрыва обратной связи на электрод сканера подается потенциал, равный потенциалу непосредственно перед разрывом.

Характер туннельной ВАХ существенно зависит от энергетического спектра электронов в образце. Туннельные спектры позволяют определить положения краев зоны проводимости и валентной зоны относительно уровня Ферми, а также идентифицировать спектральные пики, связанные с примесными состояниями внутри запрещенной зоны полупроводников.

В приборе NanoEducator применяется универсальный датчик туннельного тока и силового взаимодействия. Датчик выполнен в виде пьезокерамической трубки длиной  $l = 7$  мм, диаметром  $d = 1,2$  мм и толщиной стенки  $h = 0,25$  мм, жестко закрепленной с одного конца. К свободному концу трубки прикреплена вольфрамовая проволока диаметром 100 мкм. Свободный конец проволоки, используемой в качестве зонда, заточен электрохимически, радиус закругления имеет величину  $0,2 \div 0,05$  мкм. На внутреннюю поверхность трубки нанесен проводящий электрод, соединенный с заземленным корпусом прибора. Зонд имеет электрический контакт с внутренним электродом трубки. При измерении туннельного тока пьезотрубка играет роль жесткой пассивной балки. Электрическое смещение прикладывается к образцу относительно заземленного зонда. Схема, иллюстрирующая принцип регистрации туннельного тока, представлена на рис. 2.6.

На схеме изображен преобразователь ток – напряжение (ПТН), используемый в приборе NanoEducator. ПТН вырабатывает электрическое напряжение  $U_T$ , обуславливающее протекание туннельного тока  $I$ , и выдает напряжение  $U_{ПТН}$ , пропорциональное величине этого тока, в электронный блок.

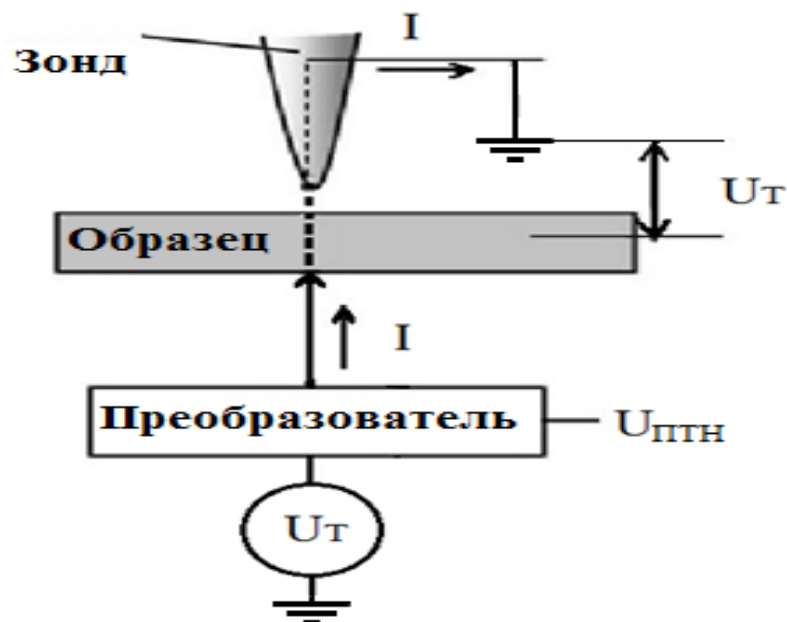


Рис. 2.6. Принцип регистрации туннельного тока

Коэффициент преобразования ПТН можно рассчитать по формуле

$$K = U_{\text{ПТН}}/I. \quad (2.3)$$

Однако в реальном случае в измерительной цепи возможны токи утечки, соизмеримые с туннельным током ( $10^{-10}$ –  $10^{-11}$  А). Принципиальные ограничения на минимальную величину измеряемого тока накладывают «дробовые» флуктуации, связанные с дискретностью заряда электрона, и «найквистовские» флуктуации, обусловленные тепловыми шумами, пропорциональные ширине полосы частот измеряемого тока.

Однако на практике уровень шумов тока в основном обусловлен случайными изменениями расстояния между зондом и образцом, вызванными механическими и акустическими шумами.

### Порядок выполнения работы

1. Измерение коэффициента преобразования  $K$  преобразователя ток – напряжение (ПТН).

1.1. Согните U-образно ножку эталонного резистора. Вставьте держатель с резистором в измерительную головку вместо датчика взаимодействия. Подведите аккуратно держатель с резистором так, чтобы ножка резистора касалась держателя образца. Ток, протекающий через высокоомный эталонный резистор, имитирует туннельный ток.

**ВНИМАНИЕ!** Будьте осторожны при установке резистора, так как излишнее давление на держатель образца может привести к поломке сканера.

1.2. Включите сначала контроллер прибора, далее запустите управляющую программу прибора NanoEducator.

1.3. Для работы прибора в режиме сканирующего туннельного микроскопа в меню **2) Выбор режима** окна **Подготовка к сканированию** выберите конфигурацию **СТМ** (рис. 2.7).

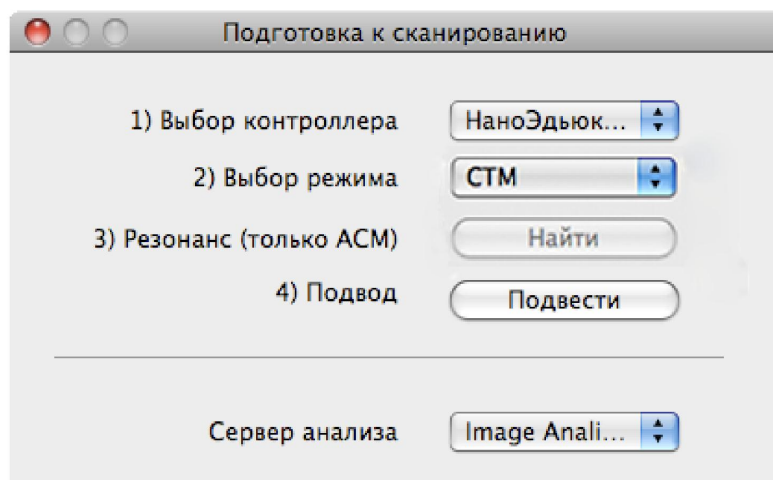




Рис. 2.7. Окно подготовки к сканированию

1.4. На панели основных операций главного окна программы откройте окно подвода кнопкой . Установите флажок **Настройки**. Установите **напряжение**  $\sim -2$  В в открывшейся панели настроек. Вычислите величину протекающего тока  $I = U/R$ , где  $R = 100$  МОм – сопротивление эталонного резистора.

Посмотрите величину реально протекающего тока через резистор на индикаторе величины туннельного тока (**Ток**) в окне **Подвод**. В случае их различия объясните возможные причины.

*Примечание.* В правильно подведенном состоянии ток должен быть близок к 20 нА, если ток меньше, необходимо сильнее прижать резистор к сканеру.

1.5. Откройте программный осциллограф кнопкой  на панели основных операций главного окна программы. Установите сигнал **ЦАП - напряжение** на одном из каналов осциллографа. На этом канале индицируется величина напряжения на выходе ПТН.

*Примечание.* Для корректной работы осциллографа необходимо, чтобы сначала был включен контроллер, а затем была запущена программа. Если осциллограф не работает, проверьте, включен ли контроллер, и перезапустите программу NanoEducator.


1.6. Определите по виртуальному осциллографу величину напряжения на выходе ПТН ( $U_{ПТН}$ ). Вычислите коэффициент преобразования по формуле (2.3).


2. Определение максимального измеряемого тока.

2.1. Для выполнения этого пункта необходимо реализовать процедуру снятия вольт-амперных характеристик (определение зависимости величины протекающего через эталонный резистор тока от величины приложенного напряжения) – туннельную спектроскопию.

**ВНИМАНИЕ! Перед проведением спектроскопии следует закрыть окна Резонанс и Подвод.**

2.2. Перейдите к процедуре **Спектроскопии**, нажав одноименную кнопку в главном окне программы.

2.3. Нажмите кнопку  на панели инструментов главного окна программы. Затем выберите точки проведения спектроскопии, щелкнув мышью в нужном месте области проведения спектроскопии. При выборе нескольких точек спектроскопии каждая последующая задается щелчком мыши с нажатой клавишей <Ctrl>. Выберите две точки.

2.4. Нажмите кнопку , при этом откроется панель настроек параметров спектроскопии (рис. 2.8). Выберите **Режим** проведения спектроскопии **СТМ (В-А)**. Установите начальное и конечное значение напряжения для получения вольт-амперной характеристики: **От, До** ( $-5\text{ В}, 5\text{ В}$ ), количество точек измерения в одном графике – **Число точек** (например, 200). Задержку в измерениях между точками оставьте установленной по умолчанию (**Задержка** = 1 мс).

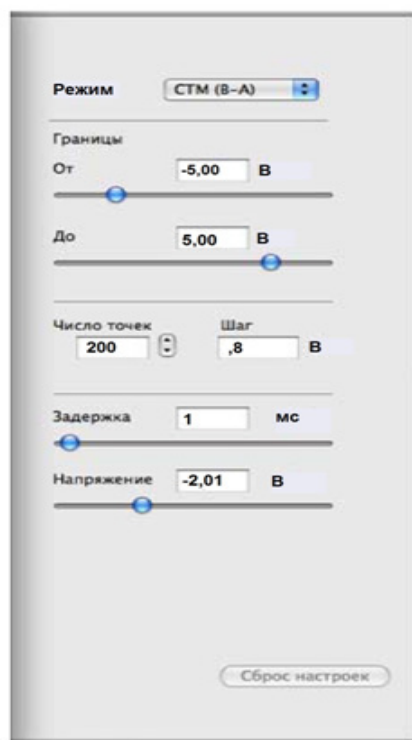



Рис. 2.8. Панель настроек параметров спектроскопии

2.5. Нажмите кнопку **Пуск** главного окна программы. Произойдет измерение туннельного тока (в нашем случае тока, протекающего через эталонный резистор) в каждой из 200 точек через интервалы, на которые разбит диапазон изменения напряжений. Программа визуализирует графики зависимости  $I(U)$  (рис. 2.9). Полученный график представляет собой прямую, отражающую закон Ома. Графики, измеренные в обеих точках, совпадают. Сохраните один из них для представления в отчете.

Если для спектроскопии были выбраны несколько точек, в правом верхнем углу графика появляется список выбора точки проведения спектроскопии (для этого в **Инспекторе просмотра**, открываемом кнопкой , должен стоять флажок **Заголовок**). На графике отображается результат в выбранной точке.

*Примечание.* С целью защиты от электромагнитных помех следует проводить измерения при закрытой крышке измерительной головки.

2.6. При правильно настроенной аппаратуре и отсутствии электрических утечек графики должны проходить через начало координат. Это означает, что при отсутствии напряжения ток, протекающий через резистор, равен нулю.

2.7. Полученные графики будут иметь горизонтальные участки там, где происходит ограничение измерительной схемы. Определите по графику максимальный измеряемый прибором ток.

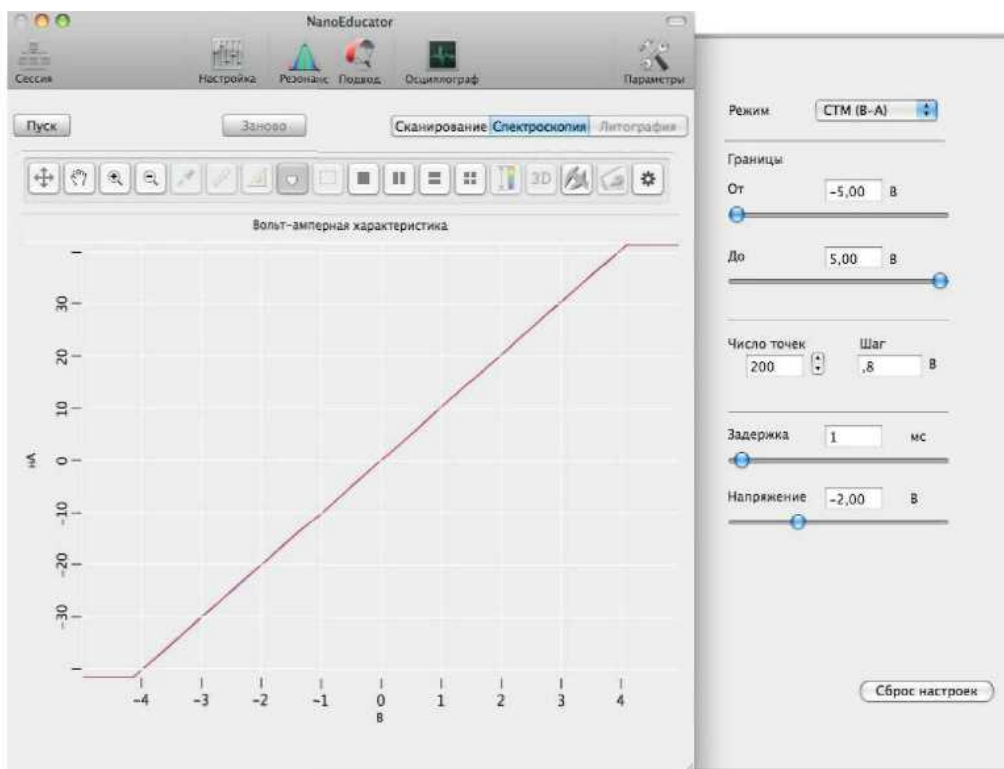


Рис. 2.9. Вольт-амперная характеристика

3. Определение величины минимального тока, измеряемого прибором.

3.1. Отсоедините эталонный резистор от держателя образца. Извлеките держатель с эталонным резистором из измерительной головки. Закройте крышку измерительной головки для защиты от электромагнитных помех. При этом ПТН будет измерять токи утечки.

3.2. Установите сигнал **АЦП Current** на одном из каналов осциллографа. Увеличьте масштаб осциллографа по вертикали до появления шумовой дорожки. Сохраните окно с шумовой дорожкой для представления в отчете.


3.3. Оцените величину минимального измеряемого тока по амплитуде размаха шумовой дорожки сигнала **АЦП Current**. Минимальное значение измеряемого тока определяется величиной шумов аппаратуры.

4. Получение рельефа поверхности в режиме постоянного туннельного тока.

4.1. Установите на держатель исследуемый образец.

4.2. Установите зондовый датчик в гнездо измерительной головки прибора NanoEducator.

4.3. Выберите режим атомно-силового микроскопа (АСМ). Захват взаимодействия на приборе NanoEducator, работающем на воздухе, лучше осуществлять в режиме силового взаимодействия. Эта предосторожность необходима для того, чтобы не повредить зонд во время захвата, так как исследуемые в СТМ образцы на воздухе могут быть частично окислены.

4.4. Проведите настройку зондового датчика на резонанс (меню настройки резонансной частоты вызывается нажатием кнопки  на панели инструментов).

4.5. Осуществите сближение зонда с образцом с помощью винта ручного подвода до расстояния примерно 1 мм.

4.6. Осуществите подвод зонда к образцу в автоматическом режиме.

4.7. Получите предварительное изображение поверхности образца в режиме АСМ (вкладка **Сканирование** в рабочем окне программы). Задайте необходимые параметры сканирования и запустите процесс сканирования, нажав кнопку **Пуск**.

4.8. Запишите параметры, при которых производилось сканирование. Примените к полученному изображению операцию вычитания плоскости. Получите двухмерное изображение поверхности образца после применения операции. Сохраните полученное изображение с целью дальнейшего сравнения его с изображением, полученным в режиме СТМ.

4.9. Перейдите в режим туннельного микроскопа, выбрав **СТМ** в окне **Подготовка к сканированию** программы NanoEducator.

4.10. Выполните захват взаимодействия в режиме туннельной микроскопии (если при переключении между режимами взаимодействие было потеряно) при следующих параметрах режима **СТМ** (задаются на вкладке **Подвод окна Свойства**):

**Задержка интегратора:** 1000;

**Рабочая точка:** 0,5 нА;

**Усиление ОС:** 3;

**Напряжение:** –2 В.

4.11. Откройте окно сканирования. Задайте необходимые параметры сканирования, исходя из предварительных сведений об исследуемом образце. Начните измерение топографии поверхности в режиме постоянного туннельного тока, нажав кнопку **Пуск**.

4.12. Если получаемое изображение содержит артефакты сканирования (соседние линии на скане не повторяются, имеются вылеты зонда из обратной связи вследствие неустойчивого туннельного контакта), то остановите сканирование и попробуйте стабилизировать контакт путем изменения значения параметров:

**Рабочая точка:** 0.2–1 нА;

**Усиление ОС:** 1–3;

**Напряжение:** –2 ÷ –1 В.

Если величина  $Z$  на индикаторе **Сканер** начнет уменьшаться, увеличьте один из параметров **Усиление ОС** или **Рабочая точка**, пока величина  $Z$  не восстановится.

Осуществите измерение рельефа поверхности в режиме постоянного туннельного тока.

4.13. Запишите параметры, при которых производилось сканирование. Примените к полученному изображению операцию вычитания плоскости. Получите двухмерное изображение поверхности образца после применения операции. Сохраните полученное изображение.

4.14. Осуществите отвод зонда от поверхности образца.

4.15. Закройте программу NanoEducator и выключите контроллер прибора.

4.16. Сделайте выводы по работе. Оформите отчет о выполненных исследованиях.

### **Контрольные вопросы**

1. Назовите основные компоненты СТМ и их назначение. Объясните принцип работы СТМ на примере туннельного контакта двух проводников.
2. Поясните устройство и принцип действия туннельного сенсора. Опишите основные параметры, которые вы будете определять в работе.
3. Что такое режим постоянного тока и постоянной высоты?
4. Туннельная спектроскопия: назначение и суть методики исследования.
5. Назовите факторы, определяющие качество изображения в СТМ. Какие требования предъявляются к СТМ зонду?



## Лабораторная работа № 3

### СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ ЛИТОГРАФИЯ

**Цель работы:** изучение физических основ зондовой нанотехнологии; изучение различных видов литографии, выполняемых с помощью сканирующего зондового микроскопа; получение практических навыков выполнения динамической силовой литографии.

**Приборы и принадлежности:** прибор NanoEducator, фрагмент компакт-диска со снятым защитным слоем или любой другой образец по выбору преподавателя.

#### Краткие теоретические сведения

В области локального контакта зонда с образцом могут возникать достаточно большие силы, напряженности электрического поля и плотности электрических токов. Раздельное или совместное действие этих факторов может приводить к заметной локальной модификации поверхности образца и зонда. Повышая уровень взаимодействия между зондом и образцом, можно перевести СЗМ из измерительного режима работы в литографический режим, обеспечивающий создание на поверхности образца заранее заданных структур с нанометровым уровнем пространственного разрешения.

В сканирующем туннельном микроскопе при напряжении между игольчатым электродом и подложкой 5 В и зазоре между ними 0,5 нм возникают электрические поля с напряженностью, близкой к внутриатомной ( $E = 10^8$  В/см). Преимуществами таких полей являются их локальность, определяющаяся степенью заострения зонда, и низкие приложенные напряжения, которые не могут вызывать ионизацию молекул и атомов в межэлектродном зазоре. При таких полях возможны плотности токов электронной эмиссии до  $10^8$  А/см<sup>2</sup>, которые можно оценить по формулам Фаулера – Нордхейма:

$$j = 1,55 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{E^2}{\varphi} \exp\left(-6,836 \cdot 10^7 \cdot \frac{\theta \cdot \varphi^{\frac{3}{2}}}{E}\right), \quad (3.1)$$
$$\theta = 0,935 - 10,79 \cdot 10^{-8} \frac{E}{\varphi^2},$$

где  $E$  – напряженность электрического поля, В/см;  $\varphi$  – работа выхода электрона из электрода, к которому приложено электрическое поле, В. Сверхплотный пучок электронов из игольчатого электрода может вызвать на подложке локальный разогрев.

Локальное повышение температуры по радиусу  $r$  вдоль поверхности от оси пучка для изотропных подложек можно оценить по формуле

$$\delta T(r) = \frac{UI}{4\pi kl} \left( 2 \frac{l}{r} \left( 1 - e^{-\frac{r}{l}} \right) - e^{-\frac{r}{l}} \right), \quad (3.2)$$

где  $U$  – напряжение, приложенное к электродам;  $I$  – туннельный ток;  $k$  – коэффициент термической проводимости подложки;  $l$  – длина неупругого рассеяния электронов в подложке. При этом электрическое поле вызывает нормальное к поверхности электродов механическое напряжение (величина поля может быть достаточной для упругих и пластических деформаций в образце). Кроме того, в методах СТМ или АСМ возможно прямое механическое воздействие на образец.

В зависимости от того, какой из факторов (локальное электрическое поле, сверхбольшие плотности токов, сверхплотные локальные потоки тепла, локальные механические деформации) используется для воздействия на образец, различают следующие виды зондовой литографии:

- СТМ литография,
- АСМ анодно-окислительная литография,
- АСМ силовая литография,
- другие специфические виды (электростатическая зарядовая литография, литография с помощью зонда ближнепольного оптического микроскопа и др.).

Наиболее простой способ модификации поверхности с помощью СТМ заключается в непосредственном контактном воздействии СТМ зонда на поверхность. Это приводит к появлению ямки на поверхности образца, но при этом может повреждаться и сам зонд. Более щадящий способ воздействия на поверхность заключается в подаче на образец импульса тока высокой плотности или электрического поля высокой напряженности. Поверхность образца под зондом при этом может расплавляться и даже частично испаряться (рис. 3.1). СТМ зонд может перемещать частицы материала по поверхности образца либо удалять их оттуда, манипулировать большими молекулами и даже отдельными атомами.

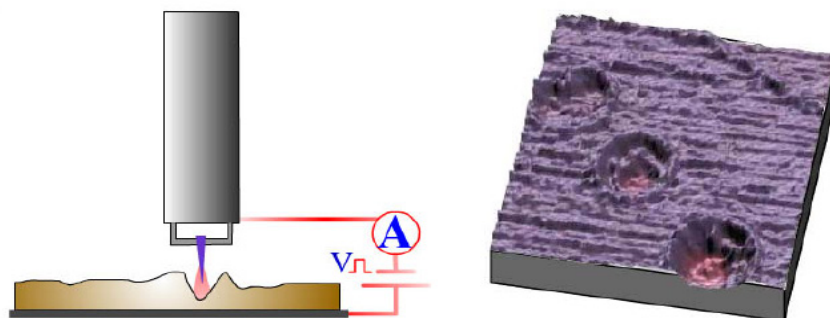


Рис. 3.1. Кратерообразные дефекты на СТМ изображении после приложения импульсов напряжения

В процессе анодно-окислительной литографии изменяется не только рельеф образца, но и локальные электрофизические свойства его поверхности. При сближении зонда с образцом за счет капиллярного эффекта между ними возникает водяная перемычка. Подача напряжения на проводящий АСМ зонд инициирует реакцию окисления на поверхности образца (зонд и образец выполняют роли катода и анода) и формирование наноразмерного оксидного слоя непосредственно под зондом (рис. 3.2).

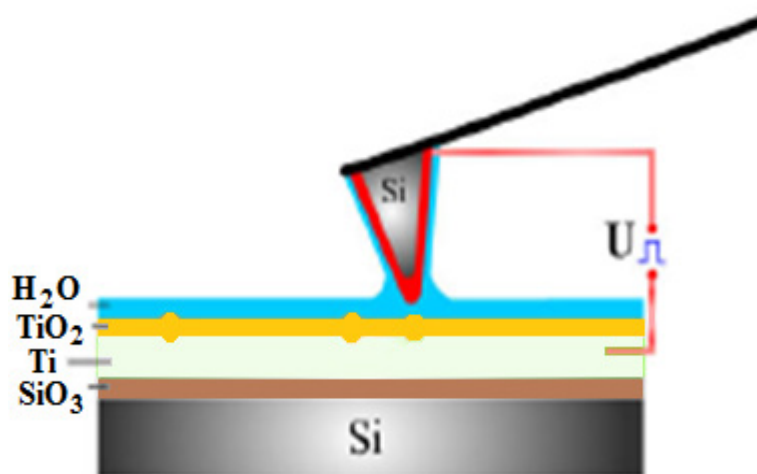


Рис. 3.2. Схема процесса локального анодного окисления с помощью проводящего АСМ зонда

Непосредственное механическое воздействие СЗМ на образец возможно производить двумя способами – статическим воздействием (наногравировка) и динамическим воздействием (наночеканка).

При осуществлении наногравировки с использованием методики обычной контактной силовой микроскопии зонд микроскопа перемещается по поверхности подложки с достаточно большой силой прижима, так что на образце формируется рисунок в виде углублений (царапин). Такая методика использует принцип вспашки: материал извлекается из подложки, оставляя канавки с характерным сечением, определяемым формой кончика зонда.



Для проведения силовой литографии необходимо, очевидно, чтобы твердость материала зонда была выше твердости образца. При этом не должно происходить залипание кантилевера и налипание частиц материала подложки на зонд. Шероховатость образца должна быть небольшой (обычно не более 1 – 10 нм). Также необходимо, чтобы поверхность была чиста от загрязнений. Для осуществления силовой литографии хорошо подходят некоторые полимеры, такие как поликарбонат и полиэтилен. К недостаткам метода следует отнести краевые неоднородности рисунка (возникают из-за случайных торсионных изгибов кантилевера) и быстрое разрушение зонда.

В процессе динамической силовой литографии (наночеканки) модификация поверхности происходит за счет формирования углублений на поверхности образца колеблющимся зондом, при этом используется прерывисто-контактный метод сканирования. Такой метод нанолитографии свободен от торсионных искажений и позволяет производить визуализацию сформированного рисунка без серьезного воздействия на поверхность образца. Малое время воздействия также защищает зонд от быстрого разрушения.


Динамическая литография может производиться с использованием векторного или растрового сканирования. Векторная литография осуществляется с большей скоростью, однако она не позволяет варьировать силу воздействия на подложку в процессе литографии. Растровая литография производится более медленно, поскольку при ее проведении сканирование осуществляется по всей площади участка подложки, на которой формируется рисунок, однако она позволяет осуществлять различное по силе воздействие зонда на подложку.


В получении хороших результатов в растровой литографии большую роль играет предварительная подготовка графического изображения-шаблона. Белому цвету на изображении соответствует отсутствие воздействия на образец, черному цвету – воздействие с максимальной силой. При подготовке изображения наиболее важные детали необходимо окрашивать в черный цвет таким образом, чтобы области черного цвета были достаточно большими и не чередовались с малыми белыми участками, а фон и ненужные детали, как правило, заливаются белым цветом. Также иногда бывает полезно повысить контрастность изображения.


### Порядок выполнения работы

1. Установите на держатель исследуемый образец.
2. Установите зондовый датчик в гнездо измерительной головки прибора NanoEducator.
3. Включите сначала контроллер прибора, далее запустите управляющую программу прибора NanoEducator. Выберите режим атомно-силового микроскопа (АСМ).
4. Проведите настройку зондового датчика на резонанс (меню настройки резонансной частоты вызывается нажатием кнопки  на панели инструментов).
5. Осуществите сближение зонда с образцом с помощью винта ручного подвода до расстояния примерно 1 мм.
6. Осуществите подвод зонда к образцу в автоматическом режиме со следующими параметрами: **Амплитуда останова** = 0.3, **Усиление ОС** = 3 (меню подвода вызывается нажатием кнопки  на панели инструментов).

7. Проведите предварительное сканирование поверхности образца (вкладка **Сканирование** в рабочем окне программы) с целью выбора участка проведения литографии. Задайте необходимые параметры сканирования и запустите процесс сканирования, нажав кнопку **Пуск**. Сохраните полученное изображение и передайте его в программу анализа (двойное нажатие левой клавишей мыши на полученном изображении).


8. Получите трехмерное изображение поверхности образца (кнопка  на рабочей панели). Определите шероховатость поверхности по полученному изображению. Выберите область проведения литографии (рекомендуемый размер области 10 x 10 мкм).

9. Перейдите на вкладку **Спектроскопия**. Нажмите кнопку . Выберите точку в середине выбранной области и проведите измерение. По полученным кривым спектроскопии определите расстояние между зондом и образцом.

10. Перейдите на вкладку **Литография** и войдите в меню параметров проведения литографии (кнопка  на рабочем окне программы).

11. По заданию преподавателя выберите файл с шаблоном изображения. Установите параметры проведения литографии. Рекомендуемые параметры:

- скорость сканирования (**Скорость**) – 2000 нм/с;
- максимальная глубина воздействия (**Сила**) – в полтора раза больше расстояния между зондом и образцом, но не менее шероховатости образца;
- время воздействия (**Время**) – 100 мкс;
- шаг между точками литографии (**Шаг**) – 100 нм.

12. Выберите режим наблюдения четырех фреймов (кнопка  на рабочей панели). Выполните литографию, нажав кнопку **Пуск** в рабочем окне программы. В процессе выполнения литографии наблюдайте изменение рельефа и шероховатости образца.

13. Сохраните двумерные изображения поверхности образца, полученные при прямом (нанесение литографии) и обратном (анализ полученного изображения) ходе зонда.

14. Осуществите отвод зонда от поверхности образца.

15. Закройте программу NanoEducator и выключите контроллер прибора.

16. Сравните полученные изображения с изображением шаблона. Сделайте вывод о результатах проведения литографии. Оформите отчет о проделанных исследованиях.

## Контрольные вопросы

1. Опишите физические процессы, протекающие между зондом и образцом при их значительном взаимодействии.
2. Перечислите основные виды нанолитографии.
3. Как осуществляется нанолитография в режиме СТМ?
4. В чем заключается метод анодно-окислительной литографии?
5. В чем различие между статическим и динамическим методами проведения АСМ литографии?
6. Опишите ход выполнения динамической АСМ литографии на приборе NanoEducator.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Миронов, В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии : учеб. пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений / В. Л. Миронов. – М. : Техносфера, 2009. – 144 с.
2. NT-MDT [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.ntmdt.ru/support>. – Загл. с экрана.
3. Справочник Шпрингера по нанотехнологиям : в 3 т. / под ред. Б. Бхушана ; пер. с англ. ; под общ. ред. А. Н. Саурова. – М. : Техносфера, 2010. – Т. 2. – 1040 с.
4. Ерофеев, А. А. Пьезокерамические микроманипуляторы для сканирующего туннельного микроскопа / А. А. Ерофеев, С. В. Бойцов, Т. А. Поплевкин // Электронная промышленность. – 1991. – № 3. – С. 54–57.
5. Бинниг, Г. Сканирующая туннельная микроскопия – от рождения к юности / Г. Бинниг, Г. Рорер // УФН. – 1988. – Т. 154, вып. 2. – С. 261–278.
6. ССМ метрология микро- и наноструктур / А. А. Бухараев [и др.] // Микроэлектроника. – 1997. – Т. 26, № 3. – С. 163–175.
7. Неволин, В. К. Зондовые нанотехнологии в электронике / В. К. Неволин. – М. : Техносфера, 2005. – 152 с.
8. Старостин, В. В. Материалы и методы нанотехнологий : учеб. пособие / В. В. Старостин. – 2-е изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 431 с.

Редактор *М. А. Болдырева*  
Компьютерная верстка *Ю. П. Шелехиной*

Сводный темплан 2014 г.  
Подписано в печать 19.05.14. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Отпечатано на дупликаторе.  
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,00. Уч.-изд. л. 2,00.  
Тираж 50 экз. Заказ 326.

---

Издательство ОмГТУ. 644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12.  
Типография ОмГТУ.