

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова  
Кафедра нанотехнологий в электронике  
Центр коллективного пользования  
«Диагностика микро- и наноструктур»

# **СКАНИРУЮЩАЯ ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ**

*Методические указания  
по выполнению лабораторных работ*

*Рекомендовано  
Научно-методическим советом университета  
для студентов, обучающихся по направлению  
Электроника и микроэлектроника*

Ярославль  
ЯрГУ  
2012

УДК 621.38(072)  
ББК П03я73  
С 42

*Рекомендовано  
Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного издания. План 2012 года*

Рецензент  
кафедра нанотехнологий в электронике ЯрГУ

Составители: С. А. Кривелевич, М. О. Насонова

С 42      **Сканирующая туннельная микроскопия:** методические указания / сост.: С. А. Кривелевич, М. О. Насонова; Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Демидова. – Ярославль : ЯрГУ, 2012. – 40 с.

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению 210100.62 Электроника и микроэлектроника (дисциплина «Физические методы диагностики наноструктур», цикл БЗ), очной формы обучения.

УДК 621.38(072)  
ББК П03я73

© ЯрГУ, 2012

---

# Сканирующая зондовая микроскопия

## *Принципы работы сканирующих зондовых микроскопов*

Сканирующая туннельная микроскопия – это один из методов сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ). Этим методом можно получать трехмерное изображение поверхности с разрешением вплоть до долей ангстрема.

В сканирующих зондовых микроскопах исследование микро-рельефа поверхности и ее локальных свойств проводится с помощью специальным образом приготовленных зондов в виде игл. Рабочая часть таких зондов (острие) имеет размеры порядка десяти нанометров. Характерное расстояние между зондом и поверхностью образцов в зондовых микроскопах по порядку величин составляет 0,1–10 нм. В основе работы зондовых микроскопов лежат различные типы взаимодействия зонда с поверхностью. Так, работа туннельного микроскопа основана на явлении протекания туннельного тока между металлической иглой и проводящим образцом; различные типы силового взаимодействия лежат в основе работы атомно-силового, магнитно-силового и электросилового микроскопов. Рассмотрим общие черты, присущие различным зондовым микроскопам. Пусть взаимодействие зонда с поверхностью характеризуется некоторым параметром  $P$ . Если существует достаточно резкая и взаимно однозначная зависимость параметра  $P$  от расстояния зонд – образец  $P = P(z)$ , то данный параметр может быть использован для организации системы обратной связи (ОС), контролирующей расстояние между зондом и образцом. На рис. 1 схематично показан общий принцип организации обратной связи сканирующего зондового микроскопа.

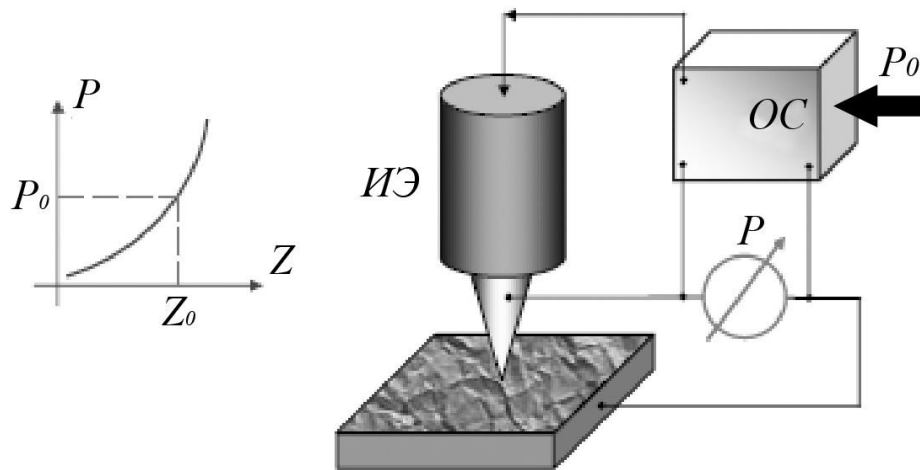


Рис. 1. Схема организации системы обратной связи зондового микроскопа

Система обратной связи поддерживает значение параметра  $P$  постоянным, равным величине  $P_0$ , задаваемой оператором. Если расстояние зонд – поверхность изменяется (например, увеличивается), то происходит изменение (увеличение) параметра  $P$ . В системе ОС формируется разностный сигнал, пропорциональный величине  $\Delta P = P - P_0$ , который усиливается до нужной величины и подается на исполнительный элемент ИЭ. Исполнительный элемент отрабатывает данный разностный сигнал, приближая зонд к поверхности или отодвигая его до тех пор, пока разностный сигнал не станет равным нулю. Таким образом можно поддерживать расстояние зонд – образец с высокой точностью. В существующих зондовых микроскопах точность удержания расстояния зонд – поверхность достигает величины  $\sim 0.01 \text{ \AA}$ . При перемещении зонда вдоль поверхности образца происходит изменение параметра взаимодействия  $P$ , обусловленное рельефом поверхности. Система ОС отрабатывает эти изменения, так что при перемещении зонда в плоскости  $X, Y$  сигнал на исполнительном элементе оказывается пропорциональным рельефу поверхности. Для получения СЗМ изображения осуществляют специальным образом организованный процесс сканирования образца. При сканировании зонд вначале движется над образцом вдоль определенной линии (строчная развертка), при этом величина

сигнала на исполнительном элементе, пропорциональная рельефу поверхности, записывается в память компьютера. Затем зонд возвращается в исходную точку и переходит на следующую строку сканирования (кадровая развертка), и процесс повторяется вновь. Записанный таким образом при сканировании сигнал обратной связи обрабатывается компьютером, и затем СЗМ изображение рельефа поверхности  $Z = f(x, y)$  строится с помощью средств компьютерной графики. Наряду с исследованием рельефа поверхности, зондовые микроскопы позволяют изучать различные свойства поверхности: механические, электрические, магнитные, оптические и многие другие.

### ***Формирование и обработка СЗМ изображений***

Процесс сканирования поверхности в сканирующем зондовом микроскопе 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, формируемых цифроаналоговыми преобразователями. Регистрация информации о рельефе поверхности производится, как правило, на прямом проходе.

Информация, полученная с помощью сканирующего зондового микроскопа, хранится в виде СЗМ кадра – двумерного массива целых чисел  $ij$  а (матрицы). Физический смысл данных чисел определяется той величиной, которая оцифровывалась в процессе сканирования. Каждому значению пары индексов  $ij$  соответствует определенная точка поверхности в пределах поля сканирования.

Координаты точек поверхности вычисляются с помощью простого умножения соответствующего индекса на величину расстояния между точками, в которых производилась запись информации:

$$x_i = x_0 i, y_j = y_0 j. \quad (1)$$

Здесь  $x_0$  и  $y_0$  – расстояния между соседними точками вдоль оси  $X$  и  $Y$ , в которых производилась запись информации. Как

правило, СЗМ кадры представляют собой квадратные матрицы, имеющие размер  $2n$  (в основном  $256 \times 256$  и  $512 \times 512$  элементов).

Визуализация СЗМ кадров производится средствами компьютерной графики в основном в виде трехмерных (3D) и двумерных яркостных (2D) изображений. При 3D визуализации изображение поверхности  $Z = f(x, y)$ , соответствующей СЗМ данным, строится в аксонометрической перспективе с помощью пикселей или линий. В дополнение к этому используются различные способы подсвечивания пикселей, соответствующих различной высоте рельефа поверхности. Наиболее эффективным способом раскраски 3D изображений является моделирование условий подсветки поверхности точечным источником, расположенным в некоторой точке пространства над поверхностью. При этом удастся подчеркнуть мелкомасштабные неровности рельефа. Также средствами компьютерной обработки и графики реализуются масштабирование и вращение 3D СЗМ изображений. При 2D визуализации каждой точке поверхности  $Z = f(x, y)$  ставится в соответствие цвет.

СЗМ изображения, наряду с полезной информацией, содержат также много побочной информации, искажающей данные о морфологии и свойствах поверхности.

На рис. 2 схематически представлены возможные искажения в СЗМ изображениях поверхности, обусловленные неидеальностью аппаратуры и внешними паразитными воздействиями.

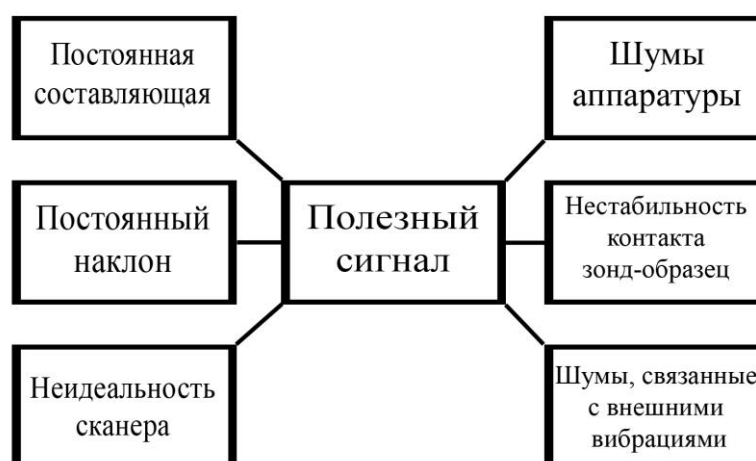


Рис. 2. Возможные искажения в СЗМ изображениях

### ***Вычитание постоянной составляющей***

СЗМ изображения, как правило, содержат постоянную составляющую, которая не несет полезной информации о рельефе поверхности, а отражает точность подвода образца в середину динамического диапазона перемещений сканера по оси Z. Постоянная составляющая удаляется из СЗМ кадра программным способом, так что новые значения высот рельефа в кадре равны

$$Z'_{ij} = Z_{ij} - \bar{Z}, \quad (2)$$

$$\text{где } \bar{Z} = \frac{1}{N^2} \sum_{ij} Z_{ij}.$$

### ***Вычитание постоянного наклона***

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; 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. Для этого на первом этапе методом наименьших квадратов находится аппроксимирующая плоскость  $P^{(1)}(x,y)$ , имеющая минимальные отклонения от рельефа поверхности  $Z = f(x,y)$  (рис. 3). Затем производится вычитание данной плоскости из СЗМ изображения. Вычитание целесообразно выполнять различными способами в зависимости от природы наклона. Если наклон в СЗМ изображении обусловлен наклоном образца относительно оси зонда, то целесообразно произвести поворот плоскости на угол, соответствующий углу между нормалью к плоскости  $n_T$  и осью Z; при этом координаты поверхности  $Z = f(x,y)$  преобразуются в соответствии с преобразованиями пространственного поворота. Однако при данном преобразовании возможно получение

изображения поверхности в виде многозначной функции  $Z = f(x, y)$ . Если наклон обусловлен термодрейфом, то процедура вычитания наклона сводится к вычитанию  $Z$ -координат плоскости из  $Z$ -координат СЗМ изображения:

$$Z'_{ij} = Z_{ij} - P_{ij}^{(1)} \quad (3)$$

Это позволяет сохранить правильные геометрические соотношения в плоскости  $X, Y$  между объектами в СЗМ изображении. В результате получается массив с меньшим диапазоном значений, и мелкие детали изображения будут отображаться большим количеством цветов, становясь более заметными.

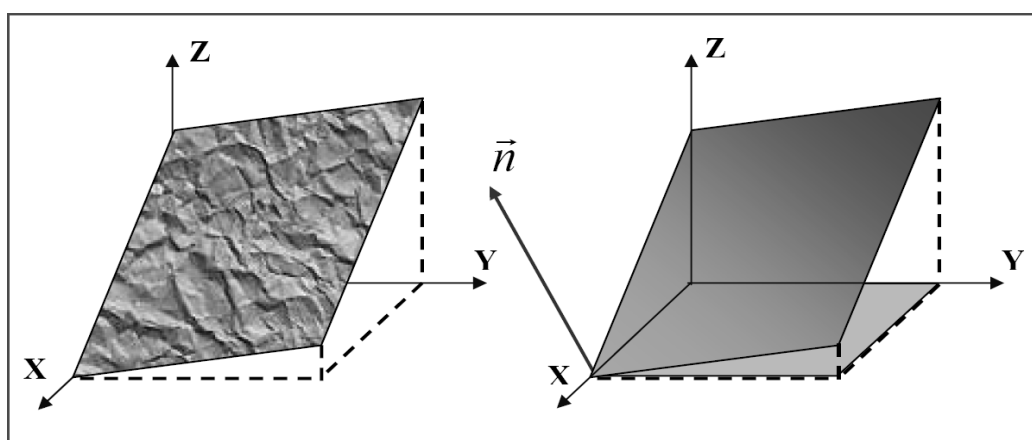


Рис. 3. Вычитание постоянного наклона из СЗМ изображения поверхности

### ***Устранение искажений, связанных с неидеальностью сканера***

Неидеальность свойств пьезосканера приводит к тому, что СЗМ изображение содержит ряд специфических искажений. Частично неидеальности сканера, такие как неравноправность прямого и обратного хода сканера (гистерезис), крип и нелинейность пьезокерамики компенсируются аппаратными средствами и выбором оптимальных режимов сканирования. Однако, несмотря на это, СЗМ изображения содержат искажения, которые трудно устранить на аппаратном уровне. В частности, поскольку движение сканера в плоскости образца влияет на положение зонда над поверхностью (по оси  $Z$ ), СЗМ изображения представляют собой суперпозицию реального рельефа и некоторой поверхности второго (а часто и более высокого) порядка (рис. 4).



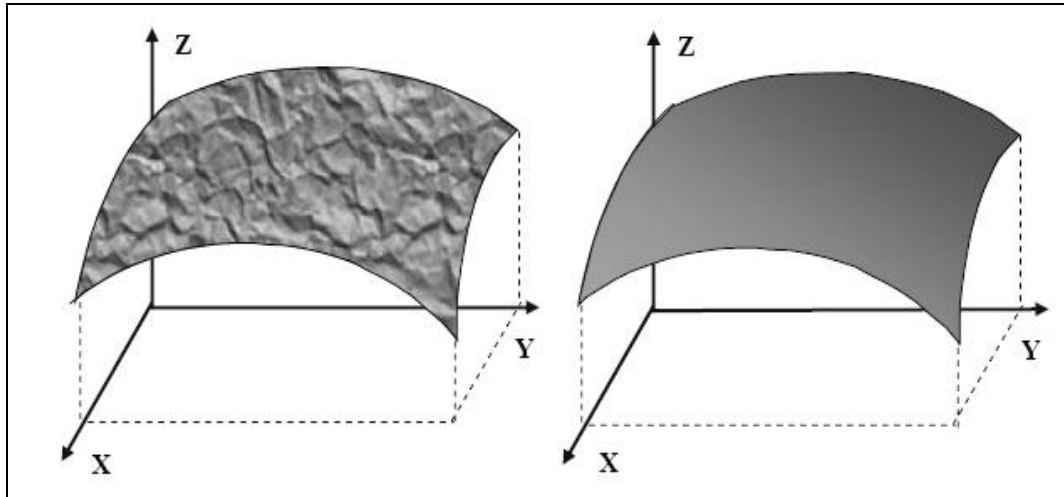


Рис. 4. Вычитание поверхности второго порядка из СЗМ изображения поверхности

Для устранения искажений такого рода методом наименьших квадратов находится аппроксимирующая поверхность второго порядка  $P^{(2)}(x,y)$ , имеющая минимальные отклонения от исходной функции  $Z = f(x,y)$ , и затем данная поверхность вычитается из исходного СЗМ изображения:

$$Z'_{ij} = Z_{ij} - P^{(2)}_{ij}. \quad (4)$$

Еще один тип искажений связан с нелинейностью и неортогональностью перемещений сканера в плоскости X, Y. Это приводит к искажению геометрических пропорций в различных частях СЗМ изображения поверхности. Для устранения таких искажений производят процедуру коррекции СЗМ изображений с помощью файла коэффициентов коррекции, который создается при сканировании конкретным сканером тестовых структур с хорошо известным рельефом.

### ***Фильтрация СЗМ изображений***

Шумы аппаратуры (в основном это шумы высокочувствительных входных усилителей), нестабильности контакта зонд-образец при сканировании, внешние акустические шумы и вибрации приводят к тому, что СЗМ изображения, наряду с полезной информацией, имеют шумовую составляющую. Частично шумы СЗМ изображений могут быть удалены программными средствами.

## ***Медианная фильтрация***

Хорошие результаты при удалении высокочастотных случайных помех в СЗМ кадрах дает медианная фильтрация. Это нелинейный метод обработки изображений, суть которого можно пояснить следующим образом. Выбирается рабочее окно фильтра, состоящее из  $n \times n$  точек (для определенности возьмем окно  $3 \times 3$ , т. е. содержащее 9 точек (рис. 5).

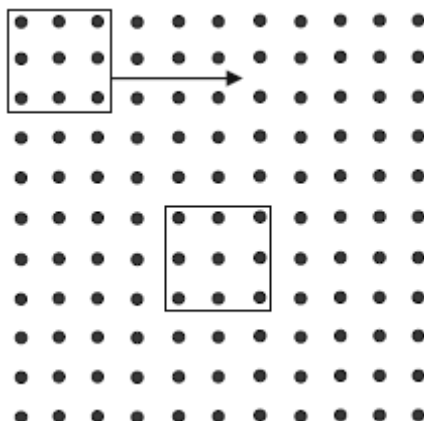


Рис. 5. Принцип работы медианного фильтра с окном  $3 \times 3$

В процессе фильтрации это окно перемещается по кадру от точки к точке, и производится следующая процедура. Значения амплитуды СЗМ изображения в точках данного окна выстраиваются по возрастанию, и значение, стоящее в центре отсортированного ряда, заносится в центральную точку окна. Затем окно сдвигается в следующую точку, и процедура сортировки повторяется. Таким образом, мощные случайные выбросы и провалы при такой сортировке всегда оказываются на краю сортируемого массива и не войдут в итоговое (отфильтрованное) изображение. Заметим, что при такой обработке по краям кадра остаются нефильтрованные области, которые отбрасываются в конечном изображении.

## ***Усреднение по строкам***

Процесс сканирования поверхности в сканирующем зондовом микроскопе происходит таким образом, что частота регистрации информации в строке сильно (по крайней мере, в 100 раз) отличается от частоты регистрации строк. Это приводит к тому, что высокочастотные шумы содержатся в основном в строках СЗМ изображе-

ния, а низкочастотные шумы изменяют положение строк относительно друг друга. Кроме того, часто во время сканирования изменяется расстояние зонд-образец вследствие микродвижений в элементах конструкции измерительной головки микроскопа или вследствие изменения состояния рабочей части зонда (например, захвата кончиком зонда микрочастицы с поверхности и др.). Это приводит к тому, что на СЗМ изображении появляются ступеньки, параллельные направлению сканирования, связанные со смещением одной части СЗМ кадра относительно другой (рис. 6 (а)). Избавиться от таких дефектов СЗМ изображений можно с помощью процедуры выравнивания кадра по строкам. В каждой строке сканирования находится среднее значение рельефа:

$$\bar{Z}_j = \frac{1}{N} \sum_i Z_{ij}. \quad (5)$$

А затем из значений в каждой строке кадра вычитаются соответствующие средние значения:

$$Z'_{ij} = Z_{ij} - \bar{Z}_j, \quad (6)$$

так что в новом кадре в каждой строке среднее будет равно нулю. Это приводит к тому, что ступеньки, связанные с резкими изменениями среднего значения в строках, будут удалены из кадра. На рис. 6 представлен результат выравнивания по строкам реального СЗМ изображения поверхности.

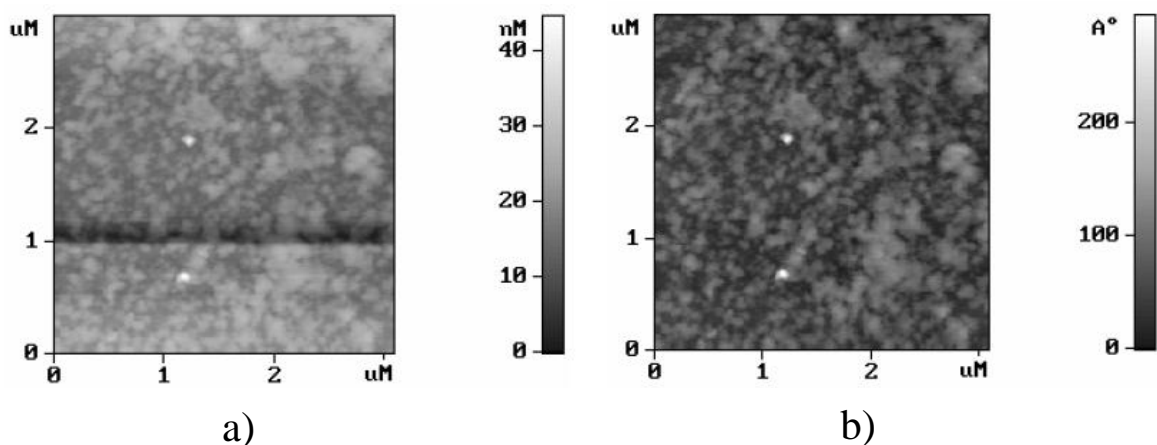


Рис. 6. СЗМ изображения поверхности образца  
(а) – до усреднения по строкам; (б) – после усреднения

## Фурье-фильтрация СЗМ изображений

Одним из мощных методов коррекции СЗМ изображений является спектральная фильтрация на основе преобразований Фурье. Как известно, любая функция может быть представлена в виде интеграла Фурье. В случае СЗМ кадра преобразование Фурье производится над дискретными величинами. Фурье-образ поверхности можно получить по следующим формулам (через  $v$  обозначена мнимая единица  $\sqrt{-1}$ ):

$$F_{\alpha\beta} = \frac{1}{N^2} \sum_{ij} Z_{ij} \exp \left[ 2\pi v \left( \frac{\alpha \cdot i}{N} + \frac{\beta \cdot j}{N} \right) \right]. \quad (7)$$

Соответственно обратное преобразование Фурье:

$$Z_{ij} = \sum_{\alpha\beta} F_{\alpha\beta} \exp \left[ -2\pi v \left( \frac{\alpha \cdot i}{N} + \frac{\beta \cdot j}{N} \right) \right]. \quad (8)$$

При Фурье-фильтрации производятся преобразования над пространственным спектром поверхности. Преобразованный Фурье-образ поверхности можно записать в виде:

$$F'_{\alpha\beta} = F_{\alpha\beta} \cdot H_{\alpha\beta}, \quad (9)$$

где  $H_{\alpha\beta}$  представляет собой спектральную функцию применяемого фильтра. Тогда отфильтрованное изображение получается в результате обратного преобразования Фурье для обработанного спектра поверхности:

$$Z'_{ij} = \sum_{\alpha\beta} F_{\alpha\beta} H_{\alpha\beta} \exp \left[ -2\pi v \left( \frac{\alpha \cdot i}{N} + \frac{\beta \cdot j}{N} \right) \right]. \quad (10)$$

Наиболее распространенными являются фильтры низких и высоких частот с круговыми и квадратными окнами. Для фильтров низких частот спектральные функции фильтров определяются в виде:

$$H_{\alpha\beta}^{cir} = 1 \text{ для } \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \leq R \quad (11)$$

$$H_{\alpha\beta}^{cir} = 0 \text{ для } \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} > R \quad (12)$$

$$H_{\alpha\beta}^{sqr} = 1 \text{ для } \sqrt{\alpha^2} \leq A; \sqrt{\beta^2} \leq A \quad (13)$$

$$H_{\alpha\beta}^{sqr} = 0 \text{ для } \sqrt{\alpha^2} > A; \sqrt{\beta^2} > A, \quad (14)$$

где величины  $R$  и  $A$  представляют собой соответственно радиус кругового и размер квадратного окна функции фильтра. По аналогии для фильтра высоких частот имеем:

$$H_{\alpha\beta}^{cir} = 1 \text{ для } \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \geq R \quad (15)$$

$$H_{\alpha\beta}^{cir} = 0 \text{ для } \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} < R \quad (16)$$

$$H_{\alpha\beta}^{sqr} = 1 \text{ для } \sqrt{\alpha^2} \geq A; \sqrt{\beta^2} \geq A \quad (17)$$

$$H_{\alpha\beta}^{sqr} = 0 \text{ для } \sqrt{\alpha^2} < A; \sqrt{\beta^2} < A. \quad (18)$$

Для устранения нежелательных эффектов, связанных с резким изменением спектральной функции на краю фильтра и на границах кадра, применяют фильтры с более сложной спектральной функцией. На основе Фурье-образа можно рассчитать ряд полезных характеристик поверхности. В частности, спектральная плотность мощности определяется в виде

$$S_{\alpha\beta} = |F_{\alpha\beta}|^2 = F_{\alpha\beta} F_{\alpha\beta}^*. \quad (19)$$

Полезно также указать формулы для расчета автокорреляционной функции поверхности:

$$C_{ij} = \sum_{ij} F_{\alpha\beta} F_{\alpha\beta}^* \exp \left[ 2\pi i \left( \frac{\alpha \cdot i}{N} + \frac{\beta \cdot j}{N} \right) \right]. \quad (20)$$

Таким образом, стандартное программное обеспечение зондовых микроскопов включает в себя достаточно широкий набор средств по визуализации и обработке СЗМ данных. Кроме того, изображения, полученные на сканирующем зондовом микроскопе, могут быть сохранены в одном из графических форматов, что позволяет использовать дополнительные возможности, предоставляемые современными пакетами компьютерных программ по обработке и коррекции изображений.

## **Физические основы работы туннельных микроскопов**

Исторически первым в семействе зондовых микроскопов появился сканирующий туннельный микроскоп. Принцип работы СТМ основан на явлении туннелирования электронов через узкий

потенциальный барьер между металлическим зондом и проводящим образцом во внешнем электрическом поле.

В качестве зонда в СТМ используется остро заточенная металлическая игла. Предельное пространственное разрешение СТМ определяется в основном радиусом закругления острия (которое может достигать долей нанометра) 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.

Главной частью микроскопа является сенсор с высоким пространственным разрешением. Эти сенсоры обычно позволяют измерять расстояния с точностью 0,01 нм. Туннельный сенсор (

Рис. 7) измеряет ток, протекающий между металлическим острием и образцом.

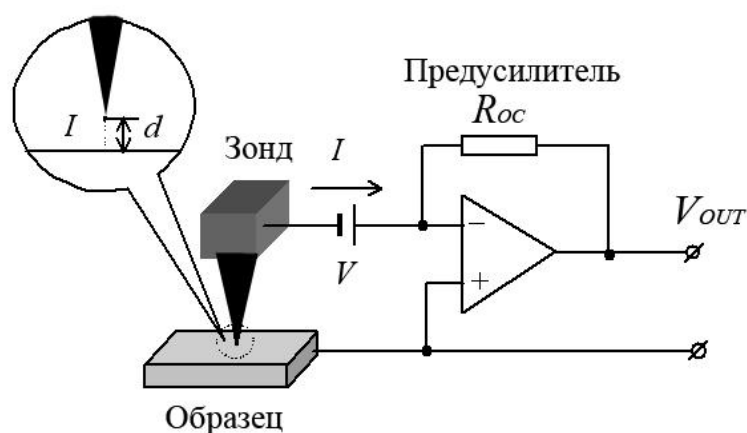


Рис. 7. Схема туннельного сенсора

### ***Одномерная модель протекания туннельного тока***

Предположим, что образец – сплошная электропроводящая среда и к его свободной поверхности на расстояние  $S \sim 0,2 \div 0,3$  нм подведено металлическое острие, заканчивающееся одним атомом. Энергетическая диаграмма туннельного контакта двух проводников показана на рис. 8.

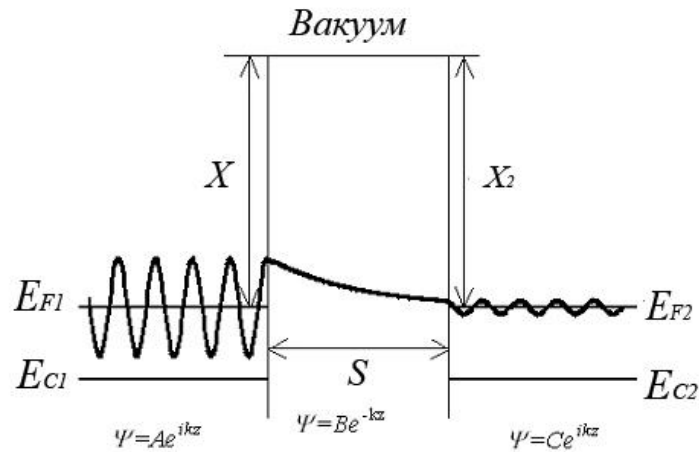


Рис. 8. Зонная диаграмма туннельного контакта двух проводников и огибающие волновые функции электронов в металле и в барьере в приближении эффективной массы

При приложении разности потенциалов  $V \approx 0,1 \div 1$  В между образцом и острием в цепи появится ток, обусловленный туннельным эффектом. Вероятность туннелирования в квазиклассическом приближении по порядку величины

$$T \cong \exp\left(-\frac{2}{\hbar} S \sqrt{2mX}\right), \quad (21)$$

где  $X$  – характерная работа выхода  $\sim 5$  эВ,  $m \approx 10^{-27}$  г – масса электрона проводимости,  $\hbar$  – постоянная Планка. Учитывая экспоненциальную зависимость  $T(S)$ , для оценки туннельного тока  $I$  будем считать, что он целиком проходит через самый кончик острия, т. е. площадь туннельного контакта  $R \approx 10^{-16}$  см<sup>2</sup>. Приняв плотность электронов проводимости  $\rho \approx 10^{22}$  см<sup>-3</sup>/В и их скорость  $v \approx 10^8$  см/с, получим оценку туннельного тока

$$I \sim e\rho v R T V \approx 1 \div 10 \text{ нА}, \quad (22)$$

т. е. вполне измеримую величину. В соответствии с (21) при увеличении зазора ток экспоненциально уменьшается примерно на порядок на каждый ангстрем перемещения острия по нормали к образцу.

Из этих оценок понятна работа СТМ при изучении топографии поверхности проводников: пусть острие укреплено на пьезоэлементе, изменяющем свои размеры под воздействием управляющего

напряжения в цепи обратной связи  $V_{oc}$  (рис. 1). Если теперь подвести его к образцу на расстояние, обеспечивающее протекание туннельного тока  $I$ , и сканировать вдоль поверхности, поддерживая системой обратной связи постоянство тока  $I$  (так называемый режим постоянного туннельного тока), то зависимость  $V_{oc}(X, Y)$  отражает рельеф поверхности, если ее электронные свойства (т. е. работа выхода) однородны.

### ***Многомерные модели протекания туннельного тока. Получение СТМ изображения***

В приближении теории возмущений туннельный ток через промежуток между образцом и зондом можно записать как

$$I = (2\pi e / \hbar) \sum_{\mu\nu} f(E_\mu) [1 - f(E_\nu + eV)] |M_{\mu\nu}|^2 \delta(E_\mu - E_\nu), \quad (23)$$

где  $f(E)$  – функция распределения Ферми,  $E_F$  – энергия Ферми,  $eV$  – приложенное напряжение,  $M_{\mu\nu}$  – туннельный матричный элемент между невозмущенными состояниями  $\psi_\mu$  зонда и  $\psi_\nu$  поверхности,  $E_\mu$  – энергия состояния  $\psi_\mu$  в отсутствие туннелирования. В пределе малых напряжений и температур это выражение может быть упрощено:

$$I = (2\pi e^2 / \hbar) V \sum_{\mu\nu} |M_{\mu\nu}|^2 \delta(E_\nu - E_F) \delta(E_\mu - E_F). \quad (24)$$

В приближении сингулярного точечного зонда волновая функция зонда относительно локализована и матричный элемент  $M_{\mu\nu}$  просто пропорционален амплитуде волновой функции образца  $\psi_\nu$  в положении  $r_0$  зонда. В этом приближении туннельный ток может быть записан как

$$I \propto \sum_\nu |\psi_\nu(r_0)|^2 \delta(E_\nu - E_F) = \rho(r_0, E_F), \quad (25)$$

где  $\rho(r_0, E_F)$  – локальная поверхностная плотность состояний на уровне Ферми в точке расположения зонда. Таким образом, в приближении точечного зонда можно сказать, что *СТМ зонд огибает поверхность равной плотности состояний*.

Максимальное разрешение в плоскости  $x$ - $y$  определяется, прежде всего, точностью позиционирования зонда. Важное значение имеет геометрия острия зонда. При сканировании предельно пло-



ских (атомно-плоских) поверхностей разрешение лимитируется диаметром атома на самом конце иглы (так называемый эффект последнего атома, рис. 9). Таким образом, для оценки предельного разрешения можно принять, что туннелирование происходит с единственного атома. Макроскопическая геометрия зонда не является определяющей для атомного разрешения.

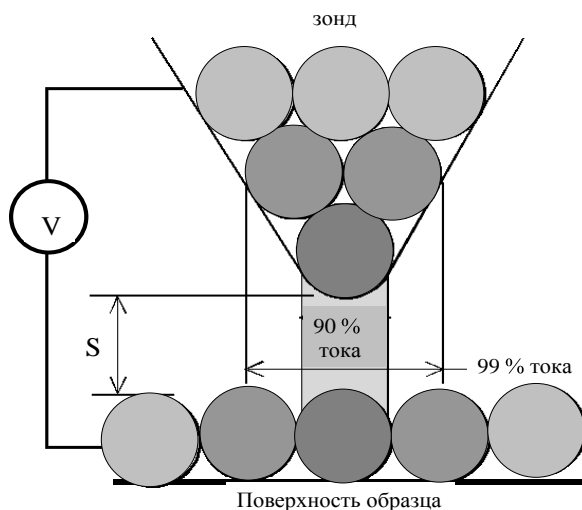


Рис. 9. Распределение плотности туннельного тока между образцом и пирамидальным СТМ зондом

Однако, как показали численные расчеты, на поверхности образца можно раздельно наблюдать только атомы, разнесенные не менее чем на  $\sim 0,4$  нм. Поэтому достижение атомного разрешения на плотноупакованных нереконструированных поверхностях даже с помощью зонда с одним атомом на конце теоретически невозможно. Однако для реконструированных поверхностей, когда расстояние между атомами верхнего слоя может заметно превышать межплоскостное расстояние в объеме кристалла, раздельное наблюдение атомов вполне возможно.

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. 10, 11).

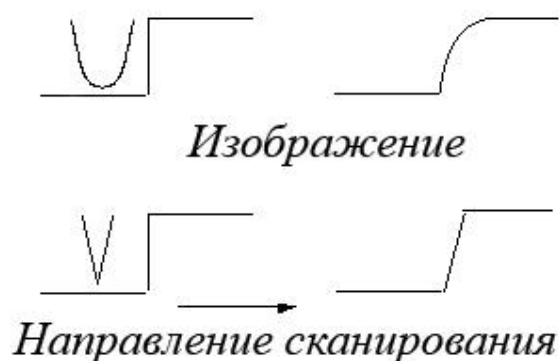


Рис. 10. Искажение изображения профиля поверхности вследствие конечной величины отношения аспекта и радиуса закругления острия

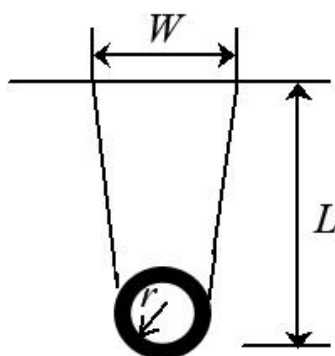


Рис. 11. Параметры геометрии зонда

### ***Режимы постоянного тока и постоянной высоты***

Изображение рельефа поверхности в СТМ формируется двумя методами (рис. 12). По методу постоянного туннельного тока зонд перемещается вдоль поверхности, осуществляя растровое сканирование; при этом изменение напряжения на Z-электроде пьезоэлемента в цепи обратной связи (с большой точностью повторяющее рельеф поверхности образца) записывается в память компьютера в виде функции  $Z = f(x, y)$ , а затем воспроизводится средствами компьютерной графики.

Альтернативный метод регистрации, применимый при исследовании малых достаточно плоских участков, – работа в режиме с очень большой постоянной времени цепи обратной связи, так что при сканировании поддерживается среднее расстояние острие – образец и регистрируются быстрые изменения туннельного

тока («токовое изображение»). Этот способ позволяет максимально использовать быстродействие системы регистрации и получать изображения «в реальном времени».

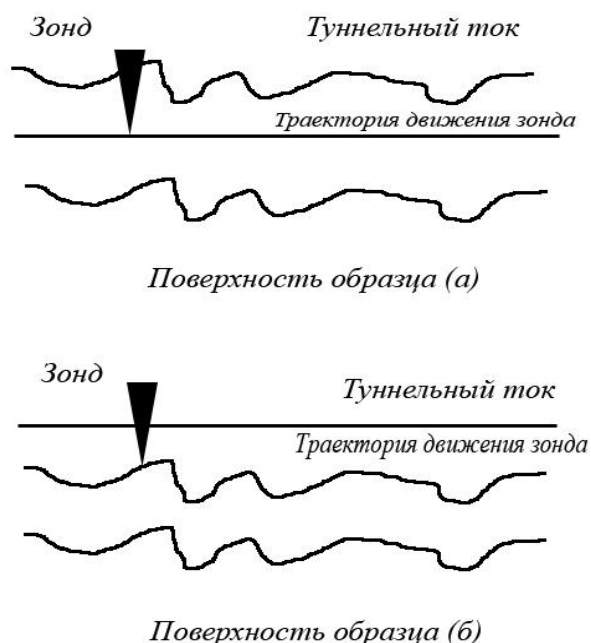


Рис. 12. Режимы постоянной высоты (а) и постоянного тока (б)

### **Туннельная спектроскопия**

Туннельный эффект широко используется в физике твердого тела для спектроскопии электронных состояний. В основе метода лежит зависимость туннельного тока от числа состояний в образующих туннельный контакт полупроводниках в интервале энергий от 0 до  $eV$ , отсчитываемых от уровня Ферми  $E_F$  ( $V$  – напряжение на туннельном промежутке). Для СТМ надо учитывать координатную зависимость плотности состояний, благодаря которой открывается возможность проведения сканирующей туннельной спектроскопии с высоким пространственным разрешением.

При выполнении спектроскопических исследований на полупроводниковых образцах приложенное напряжение  $V$  обычно порядка 1–2 В, что не является малым в сравнении с  $kT$  (26 мэВ при комнатной температуре), поэтому выражение (24) не вполне

справедливо. В этом случае туннельный ток в фиксированной точке  $r_o$  над поверхностью равен:

$$I(r_o, V) \propto \int_{E_F}^{E_F + eV} dE \rho_T(E + eV) \rho_S(r_o, E) T(r_o, E, eV), \quad (26)$$

где  $\rho_T(E + eV)$  – плотность состояний, связанная с атомом зонда,  $\rho_S(r_o, E)$  – плотность состояний образца при  $r_o$ ,  $T(r_o, E, eV) = e^{-2kS}$  – вероятность туннелирования электрона. Здесь  $k$  – константа затухания в вакууме,  $S(r_o)$  – расстояние тип-образец.

Таким образом, туннельный ток представляет собой свертку плотности состояний зонда и образца. Однако, как правило, состояния образца доминируют в спектре. В предположении постоянства плотности состояний зонда изменение туннельного тока с напряжением может быть получено дифференцированием выражения (26):

$$dI/dV \propto e \rho_S(eV) T(eV, eV) + e \int_0^{eV} \rho_S(E) \frac{d}{d(eV)} T(E, eV) dE, \quad (27)$$

которое может быть нормализовано

$$\frac{dI/dV}{I/V} \propto \frac{e \rho_S(eV) + e \int_0^{eV} \frac{\rho_S(E)}{T(eV, eV)} \frac{d}{d(eV)} T(E, eV) dE}{\frac{1}{eV} \int_0^{eV} dE \rho_S(E) \frac{T(E, eV)}{T(eV, eV)}}. \quad (28)$$

В этом выражении первый член – это поверхностная плотность состояний образца, второй член появляется благодаря зависимости коэффициента туннелирования от напряжения.

Если считать, что энергетический спектр материала острия не содержит особенностей плотности состояний, то дифференциальная проводимость

$$\frac{dI}{dV} = \rho(x, y, E_F + eV) T(x, y, E_F + eV). \quad (29)$$

Особенности в плотности состояний материала острия так же отражаются на проводимости, но в некоторых случаях, например для пары вольфрам – полупроводник, наиболее интересные особенности в спектре объемных или поверхностных состояний полупроводника лежат при энергиях  $\sim E_F = 1-2$  эВ, где плотность состояний вольфрама не имеет особенностей.

СТМ изображение поверхности существенно зависит от величины и полярности приложенного к туннельному контакту напряжения. Это связано с особенностями туннелирования электронов из иглы в свободные состояния образца или из заполненных состояний образца в иглу (рис. 13).

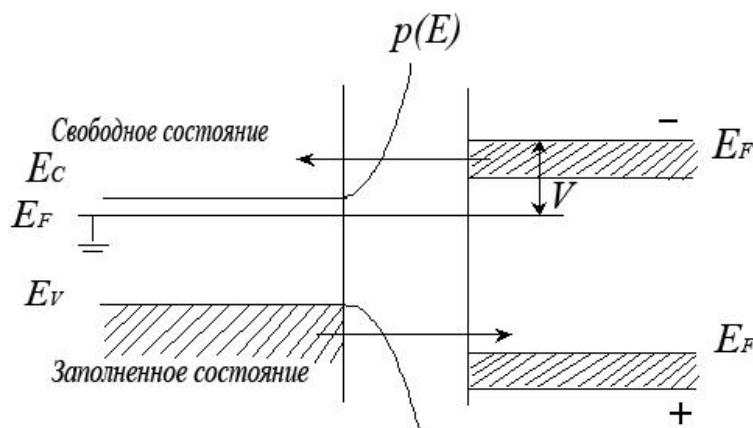


Рис. 13. Туннелирование между свободными и заполненными состояниями

### ***V-модуляция***

В методе V-модуляции помимо постоянного напряжения смещения  $V_{\pm}$  к туннельному контакту прикладывается малое переменное напряжение  $V_{\sim}$ . Переменная часть туннельного тока:

$$I_{\sim} = \frac{dI}{dV} \propto \rho(X, Y, E_F + eV_{\pm}). \quad (30)$$

При этом обратная связь держится на постоянном сигнале, а переменная составляющая туннельного тока используется для формирования спектроскопического изображения. Таким образом, одновременно с измерением топографии возможно топографирование локальной плотности состояний.

### ***Z-Модуляция***

Вариации работы выхода, вообще говоря, приведут к искажениям картины, которые, правда, малы и составляют единицы ангстрем при изменении  $V$  в разумных пределах ( $2 \div 5$  эВ). К тому же в принципе их можно учесть, измерив в том же самом эксперименте зависимость  $V(X, Y)$ . Для этого расстояние острие –

образец надо промодулировать на малую величину  $\delta$  и измерить переменную компоненту туннельного тока, амплитуда которой:

$$I_{\sim} = I_{\tau} \frac{\delta}{2} dI_{\tau} / dZ = I_{\tau} \frac{\delta}{\hbar} \sqrt{2mV}. \quad (31)$$

Таким образом, возможно не только измерять топографию, но и разделять области разного состава, различающиеся значениями работы выхода.

### ***Методики изготовления СТМ зондов***

Изготовление игл для СТМ может осуществляться путем механической, химической или электрохимической обработки. Для исследования атомно-плоских поверхностей макроскопическая геометрия зонда не важна, поэтому заострение проволоки осуществляется путем ее обрезания под углом 45 градусов.

Химическое и электрохимическое изготовление СТМ зондов берет свое начало от полевой ионной микроскопии, где необходимы игольчатые образцы-эмиттеры с радиусом кривизны острий  $10^{-8}$ – $10^{-7}$  м. Очень острые иглы получаются путем электрохимического травления тонкой проволоки (диаметром  $\sim 0,2$  мм) в щелочном растворе (1- или 0,5-молярный водный раствор КОН или NaOH) при воздействии переменного напряжения. В качестве материала для второго электрода при этом используется палладий. Травление происходит довольно однородно по всей поверхности погруженной части проволоочки, за исключением мениска на поверхности раствора, где травление идет быстрее. В итоге в области мениска образуется тонкая шейка, и нижняя часть проволоочки отваливается. Электронно-микроскопическое изображение кончика иглы, полученной таким способом, показано на рис. 14а. Для получения игл с малым радиусом острия в сочетании с их высокой механической жесткостью была разработана методика, в основе которой лежит метод ступенчатой вытяжки проволоочки при электрохимическом травлении (рис. 14б).

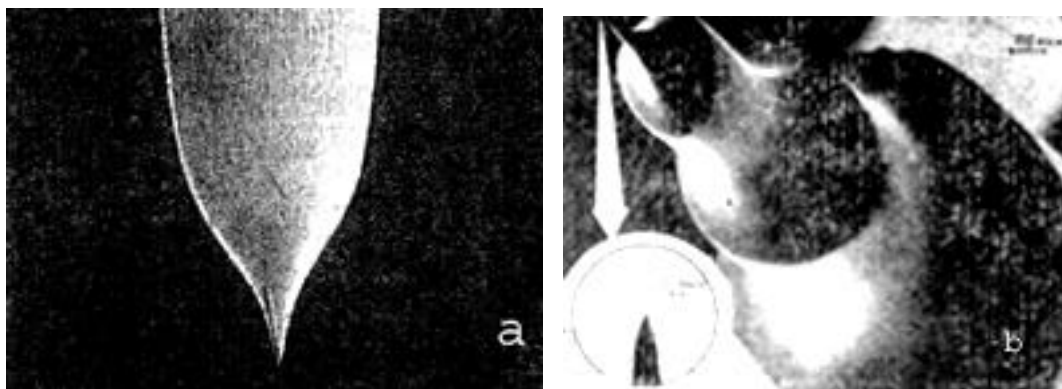


Рис. 14. Электронно-микроскопические изображения электрохимически заостренного СТМ зонда

Для окончательной подготовки и очистки иглы до начала работы СТМ иглу можно приблизить к поверхности образца и подать на нее импульс напряжения. При сверхсильных электрических полях уменьшаются потенциальные барьеры, определяющие переход атомов из одного поверхностного состояния в другое, что приводит к возникновению поверхностного диффузионного потока атомов и очистке иглы. Таким же способом удастся восстанавливать поверхность СТМ зонда после его соприкосновения с поверхностью.

## **Конструкция микроскопа СММ-2000**

### ***Конструкция головки микроскопа***

Микроскоп СММ-2000 состоит из тяжёлого (1.2 кг) литого латунного тела – якоря – со сложными пазами и четырьмя выступами, на котором собрана прецизионная кинематика микроскопа. Из-за высокой теплопроводности латуни на неё всегда приходится небольшой перепад градиента температур, что в совокупности с центральной симметричностью якоря и всей конструкции микроскопа обеспечивает низкий температурный дрейф по X и Y (не более 1 нм/гр.). Жёсткость отлитого якоря и его небольшие размеры (50 мм по высоте) определяют высокую частоту его основного механического резонанса (8 кГц), что обеспечивает невосприимчивость микроскопа к вибрациям и звуковым помехам. Если установить микроскоп на отдельном столике, то даже без использования

встроенной в микроскоп виброподвески микроскоп обеспечивает разрешение на уровне 10 Ангстрем.

В центре внутри к якорю прикреплён сканер, представляющий собой пьезотрубку с разделёнными X-, Y- и Z-электродами и верхним фланцем, к которому прикручивается держатель образца с образцом. Сканер осуществляет сканирование образцом относительно подающейся к поверхности образца игле, в результате чего формируется кадр. Игла укрепляется на столике, а столик стоит на «опорах» – шариках, вклеенных в верхние фланцы трёх пьезотрубок, стоящих на цилиндрическом «ползуне». Столики могут скользить по шарикам вбок на 3 мм в каждую сторону, т. к. имеют снизу полированные сапфировые пластинки, которыми они стоят на шариках. Передвигать столики вбок оператор может как вручную, так и точными шагами (0.1–2 мкм) от компьютера, подающего при этом на систему из трёх пьезотрубок управляющие напряжения. Передвигая столики, оператор таким образом ориентирует иглу на нужное место на образце, видя горизонтально лежащую поверхность образца и подводимую сбоку иглу в оптический микроскоп типа МБС-10, под который ставится микроскоп СММ-2000.

Для подачи иглы по вертикали к образцу или от образца служит система из 6 пьезотрубок, укреплённых на якоре. На конце они имеют фланцы с аналогично вклеенными шариками, которыми они давят на три вертикальные полированные сапфировые направляющие, укреплённые на ползуне, по две трубки снизу и сверху на каждую направляющую. Давление дозировано пружинами так, что массы ползуна со столиком не хватает для проскальзывания их вниз из-за действующей на них силы тяжести. Подача на эти 6 пьезотрубок особых управляющих напряжений приводит к пошаговому поднятию или опусканию ползуна и, таким образом, к подводу или отводу иглы относительно образца.

При сканировании напряжения на шести пьезотрубках поднятия-опускания ползуна и на трёх пьезотрубках перемещения столика по ХУ обнуляются, и эти пьезотрубки в это время представляют собой пассивные элементы конструкции. Отсутствие люфтов в системе подачи иглы и отсутствие выделения тепла на пьезотрубках, в отличие от люфтов и тепловыделения на электромоторах, приме-



няемых в других конструкциях СТМ/АСМ, обеспечивает дополнительную невосприимчивость конструкции к вибрациям.

Внутри корпуса микроскопа на четырёх пружинах подвешена тяжёлая плита (1.5 кг), на которую в свою очередь подвешен латунный якорь со сканером и системой подачи иглы. Из-за такой двойной подвески частота, на которой колеблется якорь при ударе или других воздействиях на корпус или стол, на котором стоит микроскоп, составляет всего 2 Гц. Виброгашение достигает 60 дБ, т. е. в 1000 раз. Такой результат был достигнут особым расчётом виброподвески, с учётом дополнительного резонансного эффекта погашения вибраций при равенстве произведений жёсткости на массу для обеих ступеней подвески. Это даёт в итоге разрешение вплоть до атомарного на сканере с полем до 16/16 мкм.

При переносе или перемещении микроскопа якорь и плиту необходимо прикрутить к корпусу микроскопа, что делается двумя длинными винтами (якорь) снизу дна около центра и двумя короткими (плита) за ними.

Работать с использованием виброподвески рекомендуется только в исключительных случаях, так как и без неё достигается разрешение примерно до 10 Ангстрем, а работать с виброподвеской более сложно – колеблется и образец, и столик с иглой. На время установки образца и столика при этом необходимо закрутить накидную латунную «гайку» якоря сверху на корпусе микроскопа, что приведёт к опусканию внутри микроскопа четырёх ножек, которые надавят на выступы якоря и прижмут его к дну основания.

На подвесной плите внутри микроскопа смонтирована вся электроника микроскопа – плата поддержания заданного значения сигнала (плата обратной связи), предусилитель туннельного тока, плата управления атомно-силовым столиком, процессорная плата XYZ-перемещениями столиков, блок питания и плата высоковольтных усилителей. Блок питания представляет собой преобразователь напряжения питания от компьютера, к которому подключается микроскоп, в прецизионные низковольтные и высоковольтные питания для схем микроскопа и имеет высокий коэффициент полезного действия (около 90%). Высоковольтные усилители собраны из дискретных элементов по специально разработанной

сверхнизкопотребляющей схеме (ток покоя 0.1 мА при напряжении питания 300 В и частотном диапазоне до 50 кГц).

Подключение микроскопа осуществляется посредством шнура с процессорной РСМСІА-платой аналого-цифрового ввода-вывода «SMM-2000 I/O РСМСІА card» на другом конце, вставляющейся в ноутбук без выключения питания последнего. Для подключения к настольному компьютеру внутрь него на шину РСІ предварительно вставляется плата «РСІ-РСМСІА bridge», организующая такое же гнездо подключения, как и в ноутбуке (РСМСІА).

### ***Программное обеспечение микроскопа***

Программное обеспечение микроскопа «Scan Master», кроме сканирования и двух-/трёхмерного просмотра кадров в редактируемых палитрах, производит практически все возможные виды обработки и анализа кадров и является наиболее полнофункциональным пакетом для зондовой микроскопии, применяемым и для микроскопов других видов и других производителей.

Описание всех функций обработки кадров (процентильная, медианная, матричная, конволюция, гауссовы и сдвиговые фильтры, межкадровая арифметика, сшивка кадров, спецфункции устранения наклона кадров и сбоя иглы, вычитания N-мерной функции подложки, вычленения мелких деталей и др.), а также всех видов анализа изображений (Фурье, полный морфологический, корреляционный, автокорреляционный, фрактальный, анализ параметров шероховатости, гистограмм высот и др.) находится во встроенной контекстно-зависимой функции Help. Если необходима помощь в использовании какой-либо опции программного обеспечения, необходимо щёлкнуть мышью на знак вопроса в меню программы и далее курсором, ставшим после этого по виду как знак вопроса, щёлкнуть на любом окне и любом параметре. При этом возникнет не только справка в виде относящейся именно к нужному окну одной из более чем 200 страниц гипертекста, но и примерный вид нужного окна, на котором при щелчке мыши выдаются объяснения любого параметра окна. Такой уникальный вид объяснения параметров в любом окне даёт возможность чрезвычайно быстрого на-

хождения помощи – объяснения по нужному вопросу, быстрее, чем чтение гипертекста.

Функция помощи (Help) не выдаётся только на окне управления микроскопом («SMM-2000N Control Panel»), вместо функции помощи из-за большей сложности необходимо использовать описание.

## **Методические указания и порядок выполнения работы**

*Цель работы – получение практических навыков работы на микроскопе СММ-2000 в режиме СТМ и исследование поверхности различных образцов.*

Для достижения данной цели необходимо:

1. Научиться качественно выполнять работу по подготовке прибора и образца к сканированию.
2. Изучить панель управления и основные параметры, которыми можно управлять до и во время сканирования.
3. Создать папку со своими сканами на компьютере, по которым вести отчет.
4. Научиться управлять функциями микроскопа: создавать кадры с неодинаковыми параметрами туннельного тока и напряжения и объяснять влияние изменения параметров на качество кадров.
5. Научиться осуществлять сканирование большого участка образца, выбор интересного участка, сканирование отдельно этого участка, изучение его ВАХ, снятие графиков высоты рельефа.
6. Добиваться максимально качественных кадров путем управления функциями микроскопа, объяснять, почему именно такие параметры позволяют получать лучший кадр для данного образца.

### **Подготовка к сканированию**

1. Снимите защитный полиэтилен и включите подсветку МБС-10.
2. Выберите образец для исследования.
3. Выполните проверку проводимости образца с помощью тестера, который прилагается к каждому микроскопу. Для этого установите тестер в режим прозвонки (значок «сигнала»). Легко прикоснитесь щупами к поверхности образца в двух точках на расстоянии 1–2 мм друг от друга, не притирая их к образцу. При-

кладываемый в комплект микроскопа тестер дает звуковой сигнал, если сопротивление менее 1 кОм. При таком сопротивлении режим СТМ будет работать.

4. Закрепите образец. Вам понадобится держатель образца и пружинка. Возьмите пружинку, положите сверху образец (исследуемой поверхностью вниз), а на него держатель. Слегка придавите, чтобы дугообразная часть пружинки слегка прогнулась. Отрежьте ножницами полоски крепления, чтобы в придавленном состоянии торчали концы примерно 1 мм, и загните эти концы под прямым углом к держателю. Для того чтобы вынуть образец, нужно немного отогнуть один конец пружинки и сместить образец, чтобы точно так же вышел и другой конец пружинки.



Рис. 15. Крепление СТМ-образца пружинкой (вид сверху и снизу), пружинка (вид сверху и снизу)

5. Аккуратно вкрутите образец во фланец (крепежный элемент посередине) сканера. НЕЛЬЗЯ прилагать при этом боковых усилий на сканер, так как он представляет собой тонкостенную трубку, которая может треснуть у основания. В конце необходимо приложить небольшое усилие финального затягивания.



Рис. 16. Установленный СТМ-образец, без СТМ-столика

6. Возьмите СТМ – столик. Столик берется двумя руками – одной держите столик за зеркало (за торцы), второй придерживайте пружинку, предохраняя её от растяжения.

7. Поставьте столик на ровную, чистую поверхность и проверьте длину иглки. Она не должна быть слишком короткой. В среднем её длина должна составлять 10–12 мм. Если её длина менее 8 мм, обратитесь к лаборанту.

8. Выполните обновление иглы. Обновление состоит в обрезании кончика иглы ножницами. Ножницы возьмите в ящике стола. Ножницы надо держать перпендикулярно диску СТМ-столика, закусить ими примерно на середине их лезвий небольшой кончик (0.1–0.5 мм) платиновой проволоки, слегка потянуть ножницами за кончик иглы и, удерживая натяг, отрезать кончик. При этом сразу после обрезания ножницы из-за натяжения должны немного отскочить от иглы, что необходимо для того, чтобы они не задели и не замяли обновленный кончик платиновой иглы.

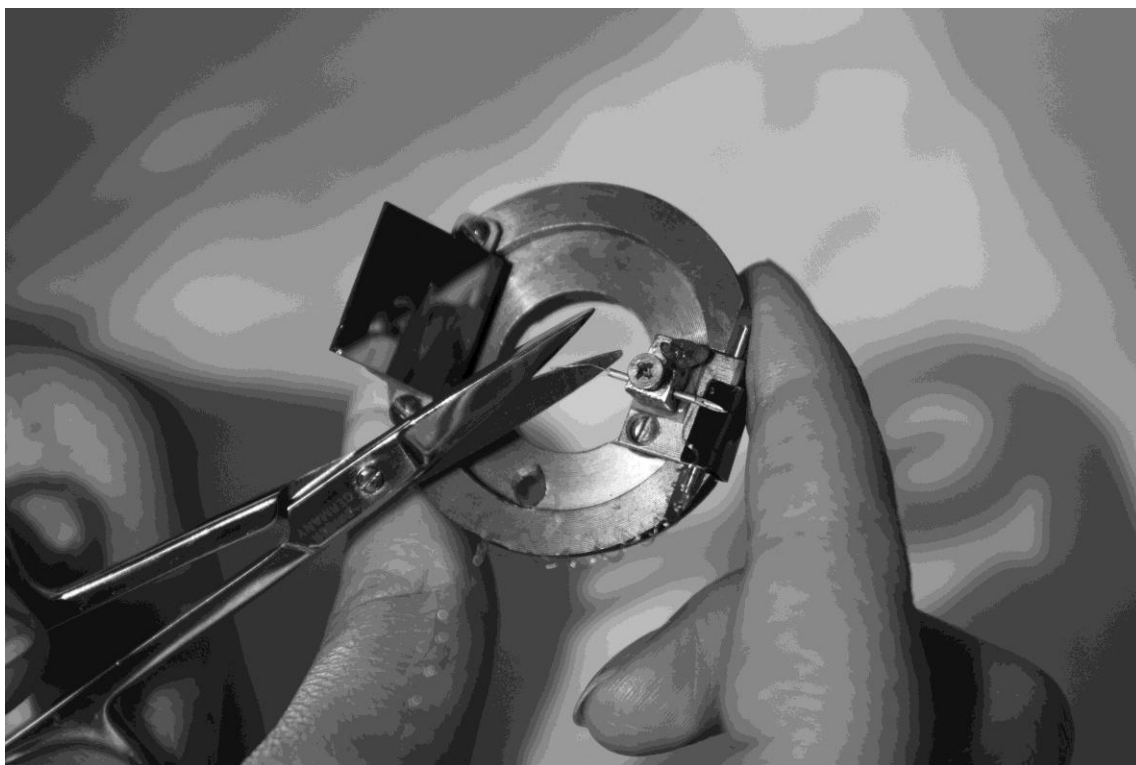


Рис. 17. Обновление СТМ-иглы на СТМ-столике



Рис. 18. Процесс рассекания – растяжения при обрезании иглы

9. Аккуратно установите столик. Для этого возьмите его двумя руками, одной за боковые торцы зеркала, другой за штекер, чтобы предотвратить растяжение пружины. Установите столик так, чтобы игла находилась примерно над центром образца. Штекер осторожно вставьте в гнездо.

10. С помощью МБС-10 выберите примерную область сканирования. Выбирайте область без видимых царапин и ближе к центру образца.

11. Проверьте, чтобы между иглой и образцом было расстояние 0.5–1 мм. При необходимости подкрутите винт каретки иглы отверткой (находится в ящике стола) вверх или вниз.



Рис. 19. Зазор между иглой и образцом

12. Накройте защитной крышкой микроскоп (от помех).

### ***Знакомство и работа с панелью управления микроскопа***

1. Включите компьютер, запустите программу SMM-2000.
2. Выберите меню Scan – SMM-2000N Control Panel.
3. Внимательно рассмотрите открывшуюся панель, убедитесь, что перед вами панель для СТМ режима. Она должна выглядеть следующим образом (рис. 20).

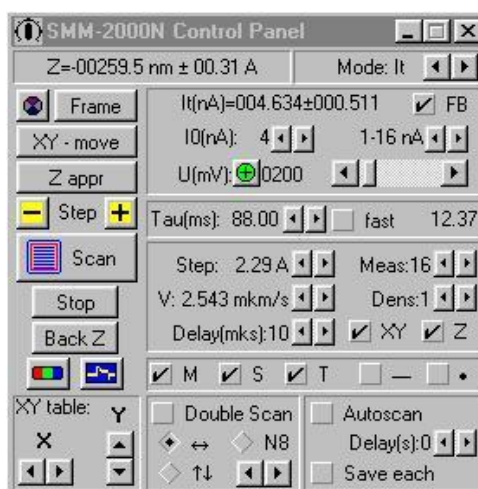


Рис. 20. Панель управления

На этой панели находятся все необходимые органы управления микроскопом. Далее работа осуществляется с помощью этой панели. Слева находится «столбовая дорога оператора». Этот шуточный термин означает, что последовательная работа с этими кнопками и представляет собой работу оператора.

4. Посмотрите на знак z-координаты (верхняя строчка). Если он положительный, значит при установке вы воткнули иглу в образец и вам необходимо проделать процедуру обновления иглы и быть более аккуратным при установке столика.

5. Кнопка FB должна быть включена всегда для устранения опасности въезжания иглы при дрейфе или сканировании.

6. Также включите кнопки M (Median), S(Step) и T(Tilt). Это функции обработки кадра при сканировании. Вы можете поэкспериментировать с работой этих кнопок, например, выключив все их или оставив одну-две включенными. Это позволит вам лучше понять, для чего нужны эти кнопки.

7. В строке  $I_t(nA)$  отображается его среднестатистическое значение и среднеквадратичное отклонение.

8. При выборе значения туннельного тока и напряжения нет строгих критериев, так как лучшие значения те, при которых получился лучший кадр; пробуйте разные значения и того и другого – представьте сканы при разных значениях в своем отчете и попробуйте объяснить, почему лучший кадр получился при таком значении параметров. Есть определенные советы, которыми можно руководствоваться при сканировании различных материалов. Об этом вы можете прочитать дополнительно.

### ***Начало сканирования***

1. Выберите область сканирования. Для этого нажмите кнопку Frame на панели управления. На экране появится виртуальный кадр-сетка (рис. 21), размеры которого соответствуют максимально возможному кадру на данном микроскопе.



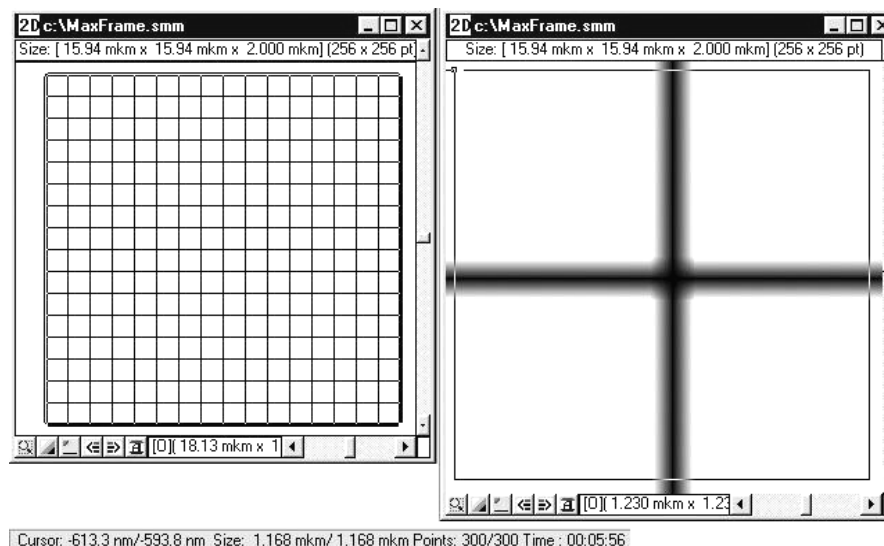


Рис. 21. Виртуальный кадр-сетка

2. Размеры сетки данного микроскопа составляют 16x16x2 мкм. Сетка состоит из 16/16 ячеек, поэтому на каждую ячейку приходится поле кадра 1/1 мкм.

3. При первом сканировании выбирайте небольшую область. Во-первых, время сканирования кадра пропорционально физическому размеру кадра (в мкм), и, чтобы оценить как идёт сканирование и подобрать параметры, лучше сделать поменьше рамку, которая будет сканироваться быстрее. Во-вторых, вам нужно проверить, насколько хорошо вы подготовили иглу – а это можно понять только после сканирования хотя бы десятка строчек. При большой области сканирования это может занять длительное время.

4. Для того чтобы назначить первую область сканирования с физическим размером меньше максимального кадра, надо увеличить кадр-сетку. Для этого надо щёлкнуть на кнопке в левом нижнем углу окна-сетки в виде лупы (курсор приобретёт вид лупы, а кнопка – вид перечёркнутой лупы) и левой кнопкой щёлкнуть, например, 3 раза, примерно в центре кадра-сетки. При каждом щелчке левой кнопкой будет происходить «цифровое» увеличение кадра в 2 раза в стороны от точки щелчка лупой (при щелчке правой кнопкой кадр уменьшается в 2 раза к точке щелчка лупой). В итоге в 2D-окне останется примерно 4 ячейки сетки. После достижения требуемого увеличения для возможности других операций надо вернуть нормальный вид курсора, щёлкнув на той же кнопке.

5. Рекомендуется сделать ещё одну операцию – подвести курсор на нижний правый угол 2D-окна (курсор при этом примет вид косой двусторонней стрелки), нажать на левую кнопку, удерживая её, немного растянуть 2D-окно и отпустить. При этом произойдёт растяжение 2D-окна и центрирование кадра. В центре кадра микроскоп работает с маленькими рабочими напряжениями на сканере, здесь лучше линейность и меньше искажения объектов.

6. Выберите рамку. Для этого необходимо в любом месте внутри 2D-окна щелкнуть два раза левой кнопкой. Курсор при этом поменяет вид. Есть несколько видов курсоров – вы можете менять их щелчком правой кнопки мыши. Меняя курсор, вы меняете программу сканирования с горизонтальной на вертикальную и наоборот. Вы можете поэкспериментировать с этим, но не забывайте, что вид объектов будет немного различным при горизонтальном и вертикальном сканировании.

7. Далее необходимо подвести иглу к образцу. На панели управления нажмите кнопку XY move. Со скоростью, заданной параметром V, сканер перемещает по XY образец так, чтобы итоговые поданные на сканер XY координаты управления стали равны XY координатам начальной точки заданной рамки сканирования. Во время подвода сканер издает характерное потрескивание. В это время нельзя нажимать никакие кнопки, необходимо дожидаться короткого низкого звукового сигнала.

8. Следующая функция особенно важна в работе с зондовым микроскопом. Это подвод иглы по Z-координате. Выполняется кнопкой Zappr. В верхней строчке панели проконтролируйте значение Z в данный момент. Так как игла ещё далеко от образца, среднее значение должно быть близко к максимальному значению отклонения сканера по Z, т. е. в районе 900 – 999 нм. Знак среднего значения должен быть «минус». Если знак «плюс» то выполнять подвод иглы не нужно. Скорее всего, при установке столика вы «въехали» иглой в образец. В таком случае ни о каком сканировании не может идти речь, необходимо повторить все процедуры заново. Нажмите Zappr. Вы услышите уже знакомое потрескивание, опять же необходимо дождаться окончания процедуры, о чем скажет низкий звуковой сигнал. Среднее значение Z-координаты сканера после подвода должно находиться около

«–200 nm» – «–500 nm». При необходимости кнопку Zappr можно нажимать несколько раз, пока значение не будет приемлемым.

При подводе иглы могут возникать различные трудности, связанные как с установкой образца, иглы и столика, так и с исправностью самого микроскопа.

9. После успешного подвода можно нажимать кнопку Scan. При этом появляется новое 2D-окно с серым кадром, равным по размеру назначенной рамке сканирования. Индикатор Z сканера в окне управления микроскопом («SMM-2000N Control Panel») через небольшое время (время сканирования одной строчки кадра) меняет вид. Там перестаёт отражаться среднеквадратичное отклонение, и выводится только одно число – средняя величина координаты Z сканера от всех точек измерения по выполненной одной строчке сканирования. Несмотря на то что в этом индикаторе числа меняются, что говорит о том, что сканируется строчка за строчкой, в 2D-окне некоторое время ничего не появляется. Во время сканирования постарайтесь не облакачиваться на стол. Помните, что вы работаете с высокоточным устройством, на результаты работы которого могут повлиять несильные, на ваш взгляд, колебания.

### ***Снятие вольтамперной характеристики (ВАХ) туннельного промежутка***

1. Для снятия ВАХ туннельного промежутка включите режим спектроскопии. Включение режима спектроскопии производится нажатием синей кнопки с изображением осциллограммы, находящейся справа под кнопкой «Back Z» в контрольной панели микроскопа «SMM-2000N Control Panel» (рис. 20). Предварительно, перед включением режима спектроскопии, обычно производится сканирование какого-либо участка образца. При включении режима спектроскопии под контрольной панелью микроскопа появляется окно спектроскопии «STN Oscilloscope» (рис. 22), на котором находятся органы управления – кнопки выбора режимов и их параметров, сохранения и загрузки результатов, кнопка старта и окно графиков, в котором отображаются все полученные зависимости и спектры.

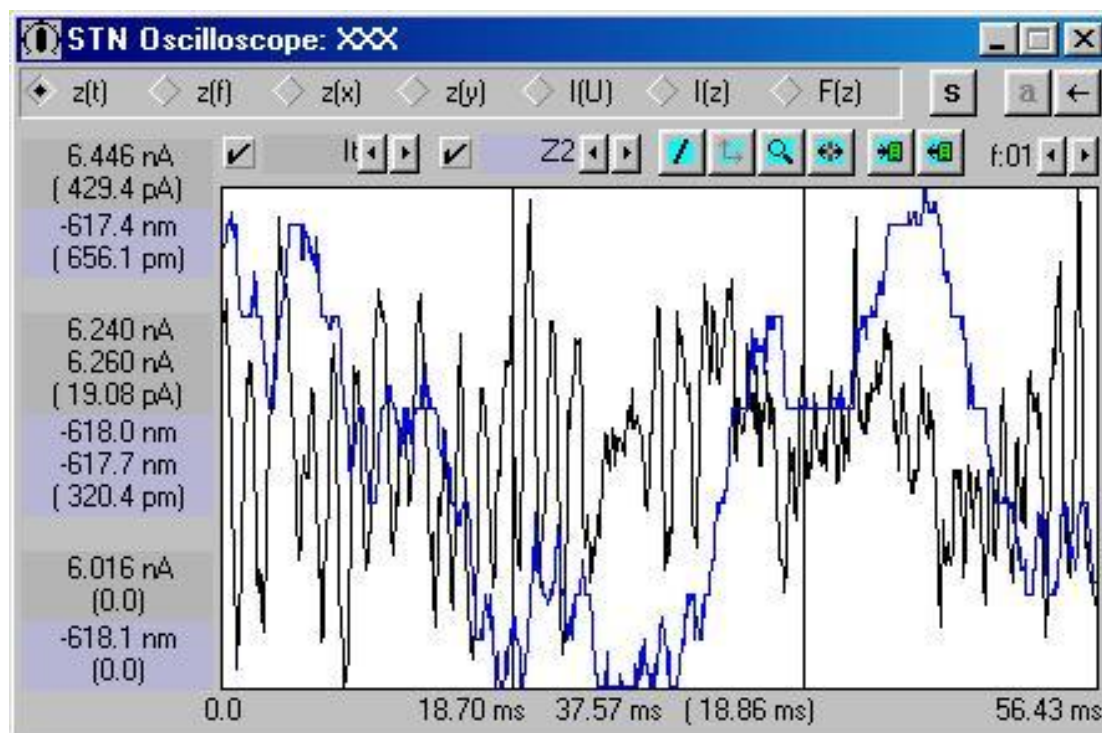


Рис. 22. Окно спектроскопии в микроскопе СММ-2000

2. Задайте точку на скане, в которой будет сниматься ВАХ – это начальная точка рамки сканирования (можно оставить имеющуюся рамку или назначить новую).

3. Выберите канал  $I(U)$ , нажав соответствующую кнопку.

4. С помощью кнопки «а» задайте режим снятия – «циклический» или «однократный» (буква «а» чёрная – циклический режим).

5. Нажмите кнопку «s» и ожидайте окончания отработки процедуры. Ожидание может быть достаточно длительным (до 2000 с). На время отработки процедуры гаснут кнопки выбора режима.

### ***Задание***

1. Выберите образец для исследования и закрепите его на СТМ столике. В случае необходимости обновите иглу.

2. Для получения обзорного изображения поверхности снимите СТМ-изображение достаточно большого участка поверхности в режиме постоянного тока.

3. Для получения детального изображения поверхности снимите СТМ-изображение участка поверхности размером не более  $1 \times 1$  мкм.

4. В произвольной точке поверхности снимите вольт-амперную характеристику (ВАХ) туннельного контакта в диапазоне значений напряжения  $V = -5 \div +5$  В. Постройте полученную ВАХ в координатах  $I(V)$ ,  $dI/dV$  и  $dI/dV / (I/V)$ .

### **Контрольные вопросы**

1. Назовите основные компоненты СТМ и их назначение.
2. Объясните принцип работы СТМ на примере туннельного контакта двух проводников.
3. От каких физических характеристик зонда и образца зависит величина туннельного тока?
4. Объясните влияние направления туннелирования электронов на изображение поверхности кремния.
5. Что такое режим постоянного тока и постоянной высоты?
6. Что такое V- и Z-модуляция? Для чего они применяются?
7. Поясните устройство и принцип действия туннельного сенсора.
8. Назовите факторы, определяющие качество изображения в СТМ.
9. Какие требования предъявляются к СТМ-зонду?
10. Опишите способы подготовки СТМ-зондов.

### **Литература**

1. Миронов, В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: учеб. пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений / В. Л. Миронов. – Нижний Новгород: Институт физики микроструктур, 2004. – 110 с.
2. Логинов, Б. А. Сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопия: пособие по работе на микроскопе СММ-2000 / Б. А. Логинов. – М.: ГОУ МИФИ (ГУ), 2007. – 92 с.
3. Панов, В. И. Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия поверхности / В. И. Панов // УФН. – 1988. – Т. 155, № 1. – С. 155–158.
4. Эдельман, В. С. Сканирующая туннельная микроскопия / В. С. Эдельман // Приборы и техника эксперимента. – 1989. – № 5. – С. 25–49.

5. Эдельман, В. С. Развитие сканирующей туннельной и силовой микроскопии / В. С. Эдельман // Приборы и техника эксперимента. – 1991. – № 1. – С. 24–42.

6. Быков, В. А. Сканирующая зондовая микроскопия для науки и промышленности / В. А. Быков, М. И. Лазарев, С. А. Саунин // Электроника: наука, технология, бизнес. – 1997. – № 5. – С. 7–14.

7. Володин, А. П. Новое в сканирующей микроскопии. / А. П. Володин // Приборы и техника эксперимента. – 1998. – № 6. – С. 3–42.

8. Неволин, В. К. Основы туннельно-зондовой нанотехнологии: учеб. пособие / В. К. Неволин. – М.: МГИЭТ (ТУ), 1996. – 91 с.

9. Рыков, С. А. Сканирующая зондовая микроскопия полупроводниковых материалов и наноструктур / С. А. Рыков. – СПб.: Наука, 2001. – 53 с.

10. Бахтизин, Р. З. Физические основы сканирующей зондовой микроскопии / Р. З. Бахтизин, Р. Р. Галлямов. – Уфа: БашГУ, 2003. – 82 с.

## **Оглавление**

Сканирующая зондовая микроскопия .....	3
Принципы работы сканирующих зондовых микроскопов .....	3
Формирование и обработка СЗМ изображений.....	5
Вычитание постоянной составляющей .....	7
Вычитание постоянного наклона.....	7
Устранение искажений, связанных с неидеальностью сканера..	8
Фильтрация СЗМ изображений.....	9
Медианная фильтрация.....	10
Усреднение по строкам.....	10
Фурье–фильтрация СЗМ изображений.....	12
Физические основы работы туннельных микроскопов .....	13
Одномерная модель протекания туннельного тока.....	14
Многомерные модели протекания туннельного тока. Получение СТМ изображения .....	16
Режимы постоянного тока и постоянной высоты .....	18
Туннельная спектроскопия.....	19
V-модуляция .....	21

Z-Модуляция.....	21
Методики изготовления СТМ зондов.....	22
Конструкция микроскопа СММ-2000 .....	23
Конструкция головки микроскопа.....	23
Программное обеспечение микроскопа .....	26
Методические указания и порядок выполнения работы .....	27
Подготовка к сканированию.....	27
Знакомство и работа с панелью управления микроскопа.....	31
Начало сканирования .....	32
Снятие вольтамперной характеристики (ВАХ) туннельного промежутка .....	35
Задание .....	36
Контрольные вопросы.....	37
Литература .....	37

Учебное издание

# **СКАНИРУЮЩАЯ ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ**

*Методические указания  
по выполнению лабораторных работ*

Составители:

**Кривелевич** Сергей Александрович  
**Насонова** Марина Олеговна

Редактор, корректор М. В. Никулина  
Верстка М. В. Никулина

Подписано в печать 26.11.12. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Усл. печ. л. 2,32. Уч.-изд. л. 2,0.  
Тираж 20 экз. Заказ .

Оригинал-макет подготовлен  
в редакционно-издательском отделе ЯрГУ.

Отпечатано на ризографе.  
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова.  
150000, Ярославль, ул. Советская, 14.