
2. Исследование поверхности твердых тел методом сканирующей туннельной микроскопии

Содержание

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ТУННЕЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ.....	2-1
2.1. ЦЕЛИ РАБОТЫ.....	2-2
2.2. ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЯ	2-2
2.3. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ	2-2
2.4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	2-12
2.5. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ.....	2-12
2.6. ЗАДАНИЕ	2-12
2.7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	2-16
2.8. ЛИТЕРАТУРА	2-16

Лабораторная работа была разработана Санкт-Петербургским государственным университетом информационных технологий механики и оптики и Нижегородским Государственным Университетом им. Н.И. Лобачевского

2.1. Цели работы

1. Изучение основ сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии;
2. Изучение принципов работы датчика туннельного тока в приборе NanoEducator и измерение его основных параметров.
3. Получение топографии поверхности исследуемого образца в режиме постоянного туннельного тока.

2.2. Информация для преподавателя¹

Измерение основных параметров датчика туннельного тока, получение СТМ изображения и обработка экспериментальных данных выполняется каждым студентом индивидуально. Практическая часть работы выполняется на одном занятии и занимает 4 часа.

Образец для исследования: дифракционная решетка покрытая пленкой золота или любой другой по выбору преподавателя.

До начала работы необходимо измерить основных параметров датчика туннельного тока, подобрать зонды для каждого студента и получить изображение поверхности исследуемого образца на одном из приборов.

2.3. Содержание работы

Определение основных параметров датчика туннельного тока (коэффициент преобразования туннельного тока в напряжение, максимальный и минимальный измеряемый ток). Спектроскопия (зависимость туннельного тока от приложенного напряжения).

Получение топографии поверхности исследуемого образца в режиме постоянного туннельного тока.

Основы сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии

Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) – первый из сканирующих зондовых микроскопов. Он был создан в 1981 году Гердом Биннигом и Генрихом Рорером в научно-исследовательской лаборатории фирмы ИВМ в Цюрихе. Пятью годами позже за это изобретение им присудили Нобелевскую премию по физике [Лит. 2-1]. СТМ был первым инструментом, который позволил получить изображение поверхности кремния с атомным разрешением.

¹ Прибор NanoEducator полноценно работает только в учетной записи пользователя «Администратор компьютера».

В основе СТМ лежит явление квантово-механического туннельного эффекта, заключающегося в способности частиц преодолевать потенциальные барьеры, высота которых больше полной энергии частицы. Туннельный эффект связан с волновыми свойствами частиц. Явление туннельного эффекта можно описать с помощью модели энергетических состояний свободных электронов в металле. В рамках этой модели внутри проводника электронный газ считается свободным, то есть энергия электронов описывается соотношением $E = \frac{p^2}{2m}$, где p – импульс электрона, а m – его масса. Максимальную энергию, которую может иметь электрон в металле при температуре абсолютного нуля, называют уровнем Ферми (E_F). Весь объем металла является для электронов проводимости потенциальной ямой. Основной вклад в туннельный ток вносят электроны, имеющие наибольшую энергию, то есть находящиеся на уровнях, близких к E_F . Вблизи поверхности металла, то есть около границы раздела металл – вакуум, электроны проводимости оказываются вблизи края потенциальной ямы, который служит для них потенциальным барьером, высота которого определяется работой выхода ϕ .

Согласно классическим представлениям, прохождение электроном потенциального барьера, имеющего высоту U , большую полной энергии электрона E , означает появление у него мнимого импульса: $p = \sqrt{2m(E - U)}$. Однако, согласно квантово-механическим представлениям, положение электрона в пространстве описывается волновой функцией, являющейся решением уравнения Шредингера: $\Psi(z) \sim \exp\left(\frac{ipz}{h}\right)$, где z – координата в направлении по нормали к поверхности металла, h – постоянная Планка. Тогда мнимый импульс определяет волновую функцию электрона, экспоненциально затухающую в направлении, перпендикулярном к поверхности металла:

$$\Psi(z) \sim \exp\left(-\frac{pz}{h}\right). \quad (1)$$

Прозрачность потенциального барьера в квазиклассическом приближении определяется вероятностью прохождения частицы сквозь него, вычисляемой как отношение числа прошедших частиц к количеству частиц, упавших на барьер. Для барьеров сложной формы эта величина равна: $D = D_0 \exp\left(-\frac{2}{h} \int_{z_1}^{z_2} \sqrt{2m(V(z) - E)} dz\right)$.

При сближении двух металлов на расстояние, меньшее расстояния, на котором волновые функции покинувших потенциальные ямы электронов затухают (1), возникает туннельный контакт металл – вакуум – металл (Рис. 2-1).

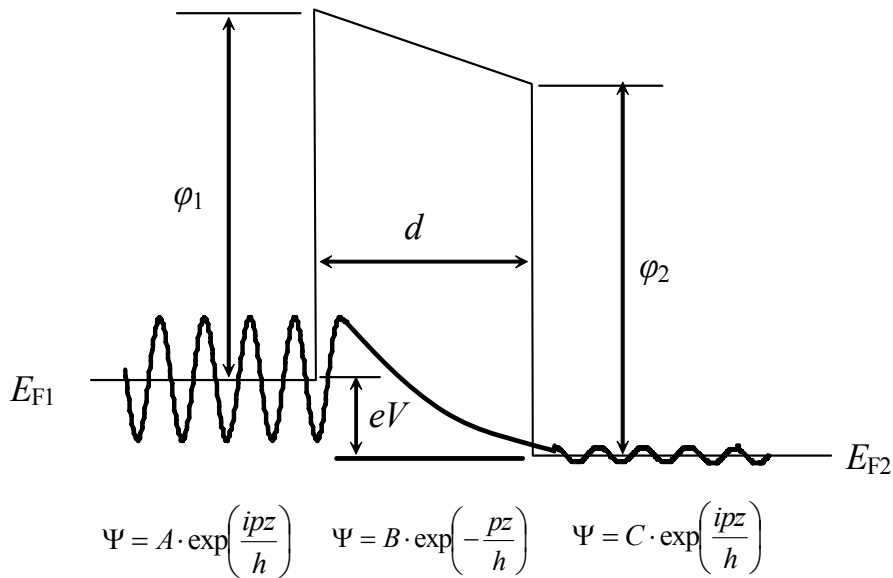


Рис. 2-1. Зонная диаграмма туннельного контакта двух проводников и огибающие волновые функции электронов в металле и в барьере в приближении эффективной массы

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

$$I_T = AVe^{-b\sqrt{\phi}d}, \tag{2}$$

где d – расстояния 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) можно получить, что увеличение ширины туннельного барьера на 1\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 (которое 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\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).

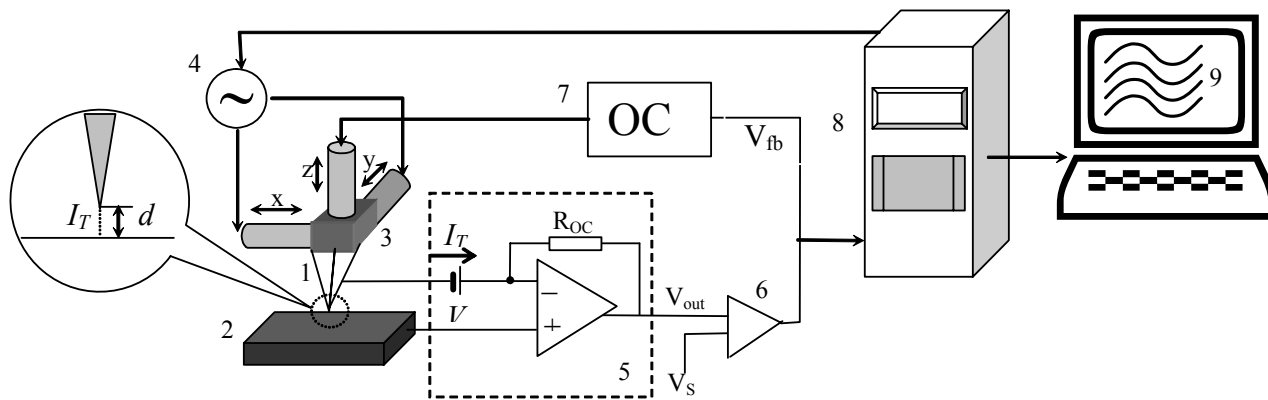


Рис. 2-2. Схема сканирующего туннельного микроскопа. Обозначения:
 1 – зонд; 2 – образец; 3 – пьезоэлектрические двигатели x, y, z; 4 – генератор развертки x, y;
 5 – туннельный сенсор; 6 – компаратор; 7 – электронная цепь обратной связи;
 8 – компьютер; 9 – изображение z(x,y)

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».

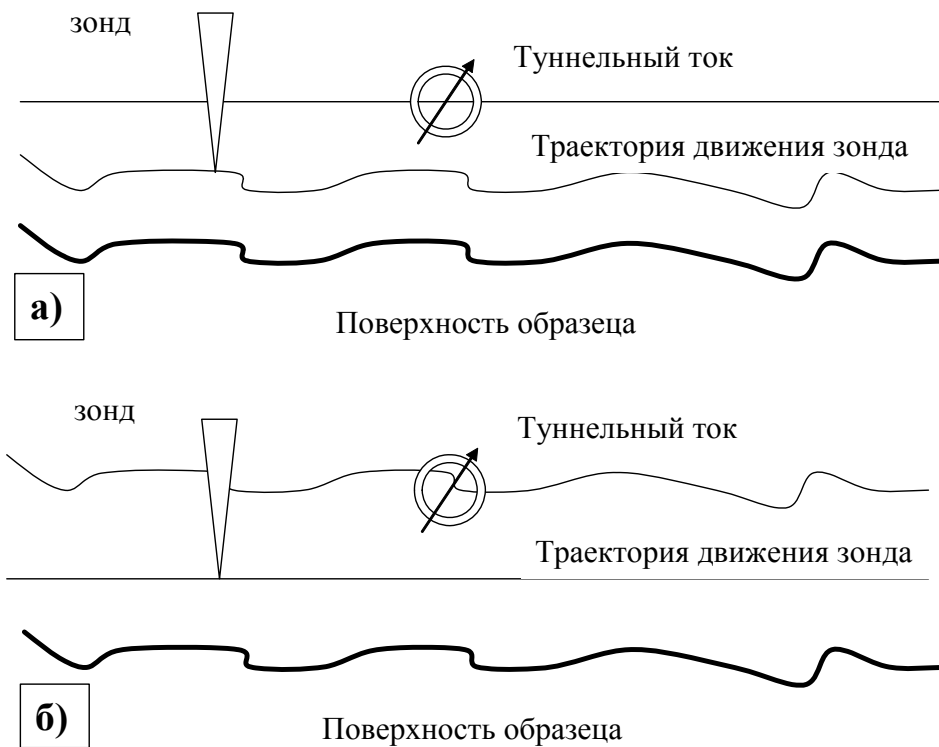


Рис. 2-3. Режимы постоянного тока (а) и постоянной высоты (б)

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 материалах в интервале энергий от 0 до eV , отсчитываемых от уровня Ферми E_F (V – напряжение на туннельном промежутке). Сканирующий туннельный микроскоп позволяет получать вольт-амперные характеристики (ВАХ) туннельного контакта зонд-поверхность в любой точке поверхности и, следовательно, исследовать локальные электрические свойства образца, (сканирующая туннельная спектроскопия с высоким пространственным разрешением).

Выражение для туннельного тока в приближении квазинепрерывного спектра электронов в некоторой точке r_0 на поверхности образца может быть представлено в следующем виде [Лит. 2-2]:

$$I(r_0, V) \propto \int_0^{eV} dE \rho_T(E) \rho_S(r_0, E) D(r_0, E), \quad (3)$$

где $D(r_0, E)$ – прозрачность барьера, $\rho_T(E)$ – плотность состояний, связанная с зондом, $\rho_S(r_0, E)$ – плотность состояний образца в точке r_0 .

Таким образом, туннельный ток представляет собой свертку плотности состояний зонда и образца. Однако, как правило, состояния образца доминируют в спектре. В простейшем случае прямоугольного барьера при низких температурах и в предположении, что плотность состояний вблизи уровня Ферми в металле зонда практически постоянна, выражение (3) для тока можно записать в виде:

$$I(r_0, V) \propto \int_0^{eV} \rho_S(r_0, E) dE.$$

В этом случае зависимость туннельного тока от напряжения определяется, в основном, плотностью состояний в энергетическом спектре образца. На практике величину $\rho_S(r_0, E)$ оценивают по величине производной туннельного тока по напряжению:

$$\rho_S(eV) \propto \frac{\partial I}{\partial V}$$

Особенности в плотности состояний материала острей так же отражается 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.

Полупроводниковые образцы имеют сложную структуру энергетического спектра электронов. Наличие запрещенной зоны и примесных уровней в спектре полупроводниковых материалов делает ВАХ туннельного контакта металл-полупроводник сильно нелинейной (Рис. 2-4 а). Существенный вклад в туннельный ток дают также поверхностные состояния и уровни энергии, связанные с адсорбированными на поверхности чужеродными атомами. Поэтому исследования локальных туннельных спектров полупроводниковых материалов проводят в условиях высокого вакуума.

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.

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 (Free states) или из заполненных состояний образца (Filled states) в иглу (Рис. 2-4 б).

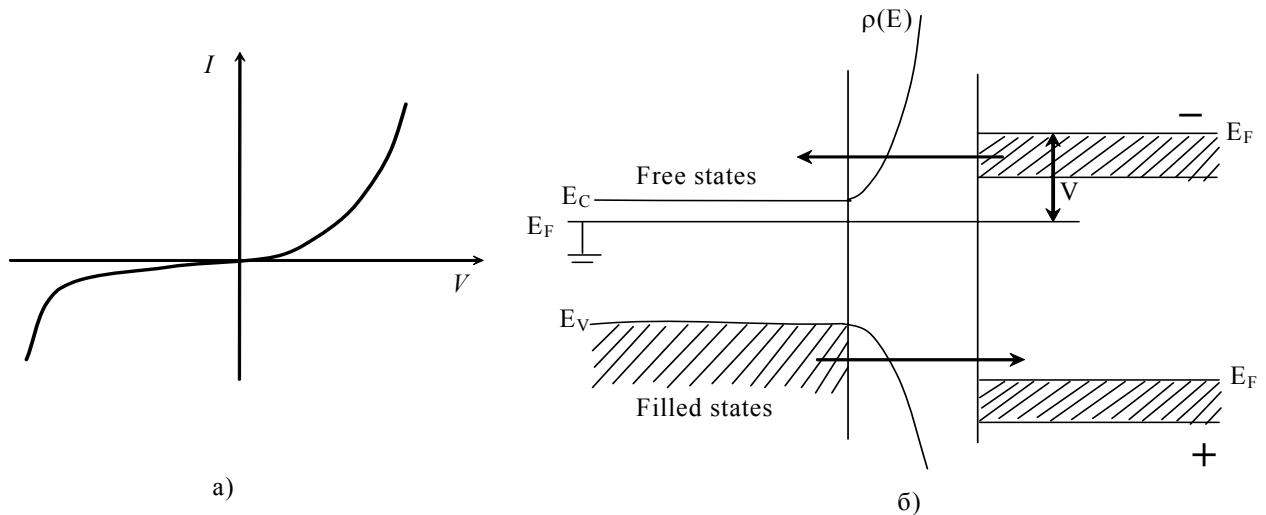


Рис. 2-4.

а) – схематическое изображение ВАХ туннельного контакта металл-полупроводник,
 б) – влияние направления туннелирования электронов

СТМ изображения реконструированной поверхности Si (111) – (7x7) при различных значениях приложенного к контакту напряжения показаны на Рис. 2-5.

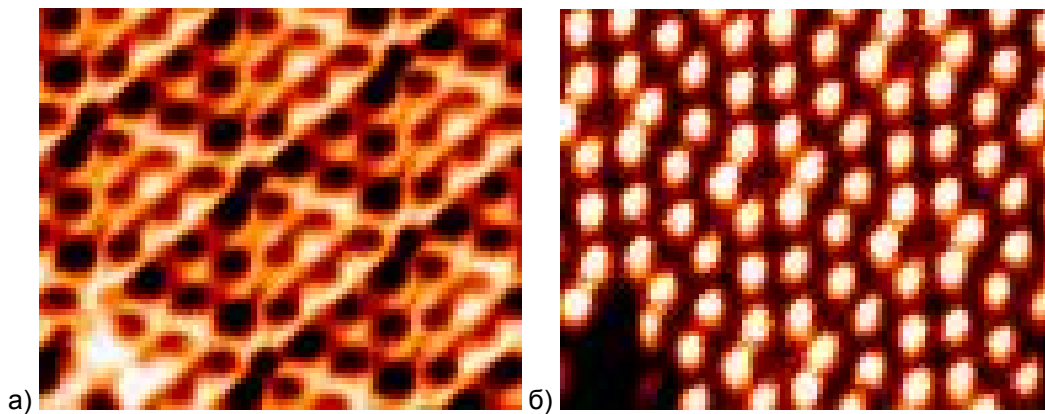


Рис. 2-5. СТМ изображения поверхности Si (111) при различных напряжениях на образце:
 а) +0.4 В, б) –1.4 В

V-модуляция

В методе V-модуляции помимо постоянного напряжения смещения V_0 к туннельному контакту прикладывается малое переменное напряжение V_{\sim} . Возникающая при этом переменная часть туннельного тока:

$$I_{\sim} = \frac{dI}{dV} \propto \rho(X, Y, E_F + eV_0).$$

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

При получении СТМ изображения поверхности в режиме постоянного туннельного тока, вариации работы выхода, вообще говоря, могут приводить к искажениям картины. Эти искажения, правда, малы и составляют единицы ангстрем при изменении V в разумных пределах ($2 \div 5$ эВ), но и их можно учесть, измерив в том же самом эксперименте зависимость $\varphi(X, Y)$. Для этого расстояние острие – образец надо промодулировать на малую величину δ и измерить переменную компоненту туннельного тока, амплитуда которой:

$$I_{\sim} = I_T \frac{\delta}{2} dI_T / dZ = I_T \frac{\delta}{\hbar} \sqrt{2m\varphi}.$$

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

Факторы, влияющие на качество изображения СТМ

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

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

Разрешение СТМ по нормали к поверхности образца для атомно-чистых поверхностей достигает в благоприятных случаях сотых долей ангстрема. 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.

Максимальное разрешение в плоскости x - y определяется, прежде всего, точностью позиционирования зонда. Важное значение имеет геометрия острия зонда. При сканировании предельно плоских (атомно-плоских) поверхностей разрешение лимитируется диаметром атома на самом конце иглы (так называемый эффект последнего атома, Рис. 2-6). 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.

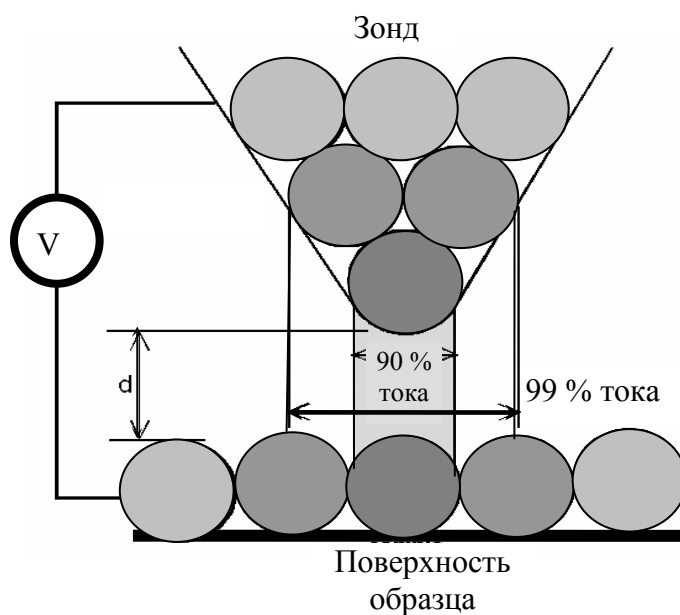


Рис. 2-6. Схематическое изображение взаимодействия кончика иглы с образцом

При выявлении сравнительно больших геометрических деталей качество изображений определяется геометрией острия. Критическими являются следующие параметры: радиус закругления конца иглы r и отношение аспекта $A_r = L/W$ (отношение высоты зонда к диаметру основания) (Рис. 2-7).

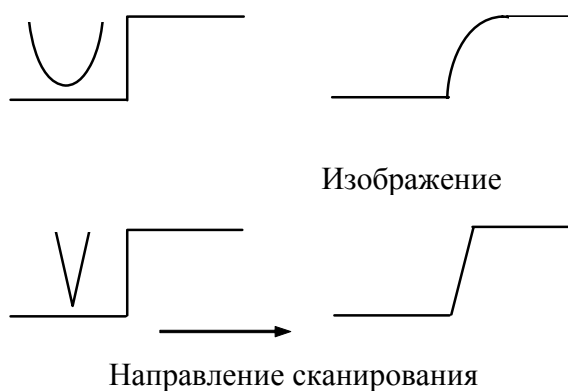


Рис. 2-7. Искажение изображения профиля поверхности вследствие конечной величины отношения аспекта и радиуса закругления острия

Конструкция датчика туннельного тока сканирующего зондового микроскопа NanoEducator

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 (Рис. 2-8). Преобразователь, изображенный на рисунке, вырабатывает электрическое напряжение U_T , обуславливающее протекание туннельного тока I и выдает напряжение U пропорциональное этому току в электронный блок.

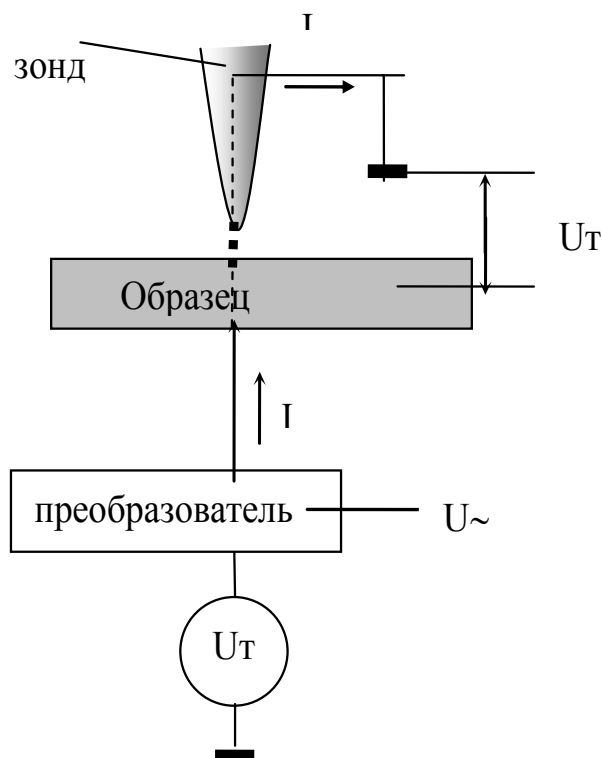


Рис. 2-8. Принцип регистрации туннельного тока

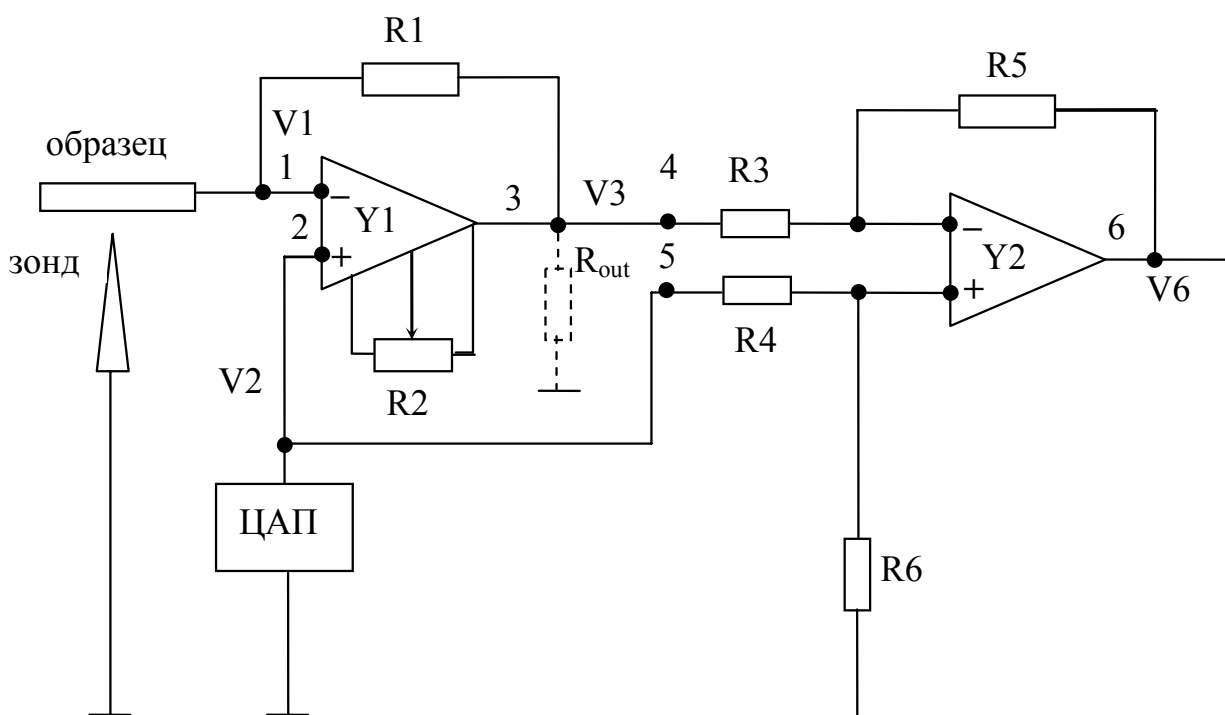


Рис. 2-9. Электрическая схема преобразователя ток-напряжение прибора NanoEducator

Электрическая схема преобразователя ток-напряжение, собранного на двух операционных усилителях У1 и У2, показана на Рис. 2-9. В процессе работы преобразователя благодаря отрицательно обратной связи, выполненной на резисторе R1, потенциал в точке 1 поддерживается равным потенциалу в точке 2, который задается ЦАП опорного напряжения (см. рисунок). Туннельный ток возникает благодаря потенциалу U1. Путь протекания тока следующий: образец - острие - «земля»- Rout- R1, где Rout – выходное сопротивление операционного усилителя У1. Из схемы видно, что

$$V_3 - V_1 = R_1 I ,$$

То есть величина протекаемого туннельного тока пропорциональна разности напряжений

$$V_3 - V_{11}$$

На операционном усилителе У2 построен дифференциальный усилитель, который в случае равенства величины резисторов $R_3 = R_4 = R_5 = R_6$ вырабатывает напряжение

$$V_6 = V_3 - V_2 = V_3 - V_1 = R_1 I ,$$

Таким образом, коэффициент преобразования тока в напряжение можно рассчитать по формуле

$$K = \frac{V_6}{I} = R_1 .$$

Подстроечный резистор R_2 используется для установки нулевого сигнала на выходе усилителя У1, или установки необходимого смещения в точке 3 относительно потенциала земли. В идеальном случае в отсутствие туннельного тока (большое расстояние между зондом и образцом) потенциал в точке 3 равен напряжению смещения на образце относительно заземленного зонда. Это напряжение смещения задает ЦАП, управляемый компьютером. Однако в реальном случае, в измерительной цепи возможны токи утечки, соизмеримые с туннельным током (10^{-10} - 10^{-11} А). Это приводит к тому, что даже в отсутствие туннельного тока потенциал в точке 3 будет отличаться от потенциала, выставяемого ЦАП, на величину $R_1 I'$ (где I' - токи утечки), а на выходе измерительной схемы в точке 2 появится потенциал, пропорциональный токам утечки. Для устранения влияния токов утечки на измерение туннельного тока используется подстроечное сопротивление R_2 , с помощью которого потенциал в точке 3 смещается таким образом, чтобы при большом зазоре между зондом и образцом потенциал в точке 3 был бы равен потенциалу в точке 2, а напряжение на выходе U_6 было бы нулевым.

Коэффициент преобразования K преобразователя ток-напряжение определяется выражением:

$$K = \frac{U_6}{I} . \tag{4}$$

Принципиальные ограничения на минимальную величину измеряемого тока накладывают «дробовые» флуктуации

$$I^2 = 2eI\Delta f,$$

связанные с дискретностью заряда электрона и «найквистовские» флуктуации

$$I^2 = \frac{4kT\Delta f}{R_1},$$

обусловленные тепловыми шумами, где

e – заряд электрона,

T – температура,

k – постоянная Больцмана,

Δf – полоса частот измеряемого тока.

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

2.4. Методические указания

Прежде чем приступить к работе на сканирующем зондовом микроскопе NanoEducator следует изучить руководство пользователя прибора, а так же руководство пользователя к программе Oscilloscope.

2.5. Техника безопасности

Прибор управляется напряжением 220 В. Эксплуатацию сканирующего зондового микроскопа NanoEducator производить в соответствии с ПТЭ и ПТБ электроустановок потребителей напряжением до 220 В.

2.6. Задание

1. Измерение коэффициента преобразования K преобразователя ток-напряжение (ПТН).
 - 1.1. Вставьте держатель с эталонным резистором вместо датчика взаимодействия в гнездо измерительной головки прибора NanoEducator (Рис. 2-10). Ток, протекающий через высокоомный эталонный резистор, имитирует туннельный ток. Эталонный резистор закреплен на основании датчика взаимодействия вместо пьезотрубки. Один конец резистора заземлен, второй конец предназначен для подключения напряжения смещения, для чего его необходимо подсоединить к держателю образца.





- 1.2. Предварительно посмотрите номинал резистора, указанный на его корпусе, или измерьте сопротивление эталонного резистора с помощью мегомметра. Согните ножку резистора так, чтобы ее можно было с помощью пинцета аккуратно вставить в отверстие на держателе образца.



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

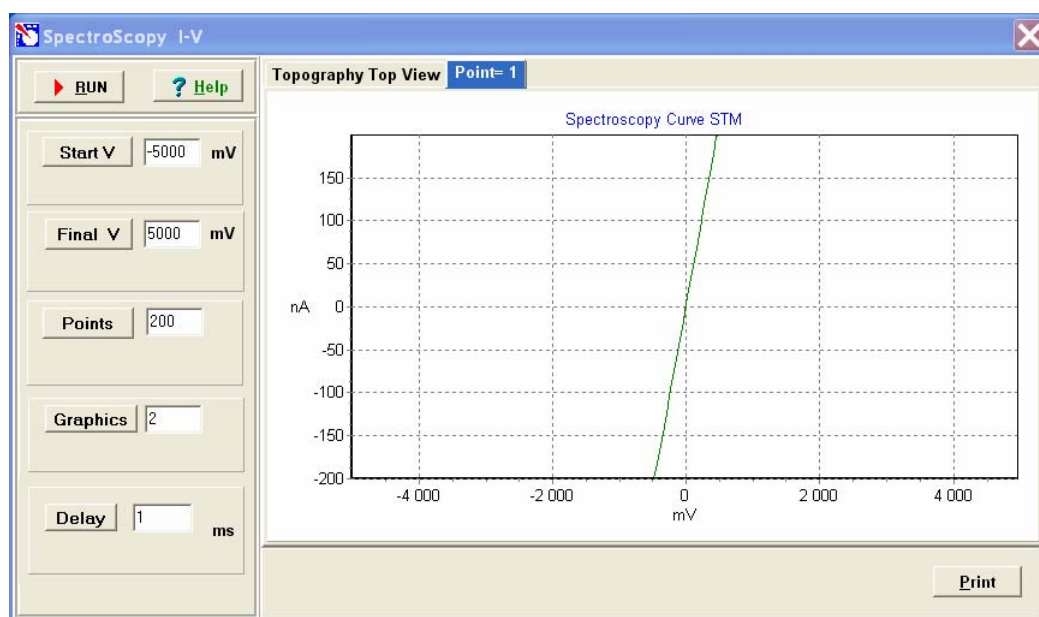


Рис. 2-10. Подключение эталонного резистора



- 1.3. Запустите режим туннельного микроскопа, выбрав **STM** на панели управления программы NanoEducator.
 - 1.4. Войдите в меню **Landing**, нажав кнопку  панели управления прибором и выбрав  в появившемся выпадающем меню. Установите величину напряжения **Bias Voltage** $V \sim 100$ мВ. Вычислите величину протекающего тока $I = V/R$, где R – сопротивление эталонного резистора. Посмотрите величину реально протекающего тока через резистор на индикаторе величины туннельного тока (**Tunnel Current**) в окне **Landing**. В случае их различия объясните возможные причины.
 - 1.5. Запустите виртуальный осциллограф, нажав кнопку  на приборной панели, или запустите файл `oscilloscope.exe` из папки, в которой установлена программа NanoEducator. Установите сигнал **ADC-Current-mV** на одном из каналов осциллографа. На этом канале индицируется величина напряжения на выходе ПТН (точка б на Рис. 2-9).
 - 1.6. Определите по виртуальному осциллографу величину напряжения на выходе ПТН. Вычислите коэффициент преобразования по формуле (4).
2. Определение максимального измеряемого тока.
- 2.1. Для выполнения этого пункта необходимо реализовать процедуру снятия вольт-амперных характеристик (определение зависимости величины протекающего через резистор тока от величины приложенного напряжения) – **Spectroscopy**. Для перехода к этой процедуре нажмите кнопку **Cancel** в окне **Landing** и войдите в меню **Scanning**, нажав кнопку  на приборной

панели (программа информирует об отсутствии взаимодействия зонд-образец, т.к. не было осуществлено сближение). Произведите предварительное сканирование не менее 5 линий. После окончания сканирования закройте полученную картинку (в данной работе она не нужна).

- 2.2. Перейдите к процедуре **Spectroscopy**, выбрав соответствующую закладку на правом поле окна **Scanning**. Поставьте курсор на правое поле окна **Scanning** и щелкните мышью, указывая программе точки для снятия вольт-амперных характеристик. Выберете две точки.
- 2.3. Нажмите кнопку **RUN**. При этом откроется окно управления режимом **Spectroscopy**. Установите начальное и конечное значение напряжения для получения вольт-амперной характеристики: **Start V**, **Final V** (-5000 мВ, 5000 мВ), количество точек измерения в одном графике – **Points** (например, 200) и количество графиков, снимаемых в одной пространственной точке – **Graphycs** (например, 5). Задержка в измерениях между точками **Delay** оставьте установленной по умолчанию (1 мс).
- 2.4. Нажмите кнопку **RUN** окна управления спектроскопией. 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 (в нашем случае через 10 мВ). Программа визуализирует графики зависимости $I(V)$. Полученный график представляет собой прямую, отражающую закон Ома. Графики, измеренные в обеих точках, совпадают. Сохраните один из них для представления в отчете.
- 2.5. 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.
- 2.6. Полученные графики будут иметь горизонтальные участки там, где происходит ограничение измерительной схемы. Определите по графику максимальный измеряемый прибором ток.



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 во избежание электрических наводок. При этом ПТН будет измерять токи утечки.
 - 3.2. Установите сигнал ADC-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 ADC-Current. Минимальное значение измеряемого тока определяется величиной шумов аппаратуры.

4. Получение топографии поверхности в режиме постоянного туннельного тока.
 - 4.1. Установите на держатель образца исследуемый образец.
 - 4.2. Установите зондовый датчик в гнездо измерительной головки прибора NanoEducator.
 - 4.3. Запустите управляющую программу прибора NanoEducator. Выберите режим сканирующего силового микроскопа (ССМ). 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, т.к. исследуемые в СТМ образцы на воздухе могут быть частично окислены.
 - 4.4. Определите амплитудно-частотную характеристику зондового датчика и установите рабочую частоту.
 - 4.5. Осуществите сближение зонда с образцом с помощью винта ручного подвода до расстояния примерно 1 мм.
 - 4.6. Осуществите захват взаимодействия в режиме ССМ.
 - 4.7. Закройте окно **Landing**. Перейдите в режим туннельного микроскопа, выбрав у «STM» на панели управления программы NanoEducator.
 - 4.8. Нажмите кнопку  панели управления прибором и выберите  в появившемся выпадающем меню. Выполните захват взаимодействия в режиме туннельной микроскопии (если при переключении между режимами взаимодействие было потеряно) при следующих параметрах:

Set point	0.5 nA;
Integrator delay (в меню Options)	1000 ms;
Feed Back Loop Gain	3;
Bias Voltage	0.2 V.
 - 4.9. Откройте окно сканирования. Задайте необходимые параметры сканирования, исходя из предварительных сведений об исследуемом образце. Начните измерение топографии поверхности в режиме постоянного туннельного тока.

- 4.10. 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:

Feed Back Loop Gain **1 – 3;**
Set Point **0.2 – 1 nA;**
Bias Voltage **0.2 – 1 V.**

Если величина **Z** на индикаторе **Scanner Protraction** начнет уменьшаться, увеличьте один из параметров **Feed Back Loop Gain** или **Set Point** пока величина **Z** не восстановится.

Осуществите измерение топографии поверхности в режиме постоянного туннельного тока. Сохраните полученные результаты.

- 4.11. После окончания эксперимента закройте окно сканирования и осуществите отвод зонда от образца.

2.7. 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? Что такое V- и Z-модуляция? Для чего они применяются?
4. Туннельная спектроскопия. Объясните влияние направления туннелирования электронов на изображение поверхности кремния.
5. Назовите факторы, определяющие качество изображения в СТМ. Какие требования предъявляются к СТМ-зонду?

2.8. Литература

- Лит. 2-1. Г. Бинниг, Г. Рорер. Сканирующая туннельная микроскопия – от рождения к юности – Нобелевские лекции по физике – 1996. УФН, т. 154 (1988), вып.2, с. 261.
- Лит. 2-2. J.A. Kubby, J.J. Boland. Scanning Tunneling Microscopy of Semiconductor Surfaces. Eslevier, 1996 (Surface Science Reports, 26 (1996) 61-204).