

УДК 548.314.5

Задача 3

Визуализация атомной решетки графита

© О.В. Синицына, Г.Б. Мешков, И.В. Яминский

Описание задачи физического практикума “Визуализация атомной решетки графита”. Цель работы: Приобретение навыков работы на сканирующем туннельном микроскопе с атомным разрешением. Студенты знакомятся со сканирующим туннельным микроскопом и режимами работы для получения атомного разрешения на поверхности графита. Анализируют структуру атомной решетки поверхности графита. При выполнении работы используется туннельный микроскоп ФемтоСкан, выпускаемый Центром перспективных технологий и программа для обработки изображений ФемтоСкан Онлайн.

1. Введение

Исторически первым среди сканирующих зондовых микроскопов был сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), изобретенный в 1981 году Г. Биннигом и Г. Рорером.

Его работа основана на явлении туннелирования электронов через узкий потенциальный барьер между металлическим зондом и проводящим образцом во внешнем электрическом поле. Туннельный эффект находит свое объяснение только в рамках квантовой физики.

Пространственное разрешение СТМ по нормали к поверхности при сканировании атомарно–гладких поверхностей достигает долей ангстрема и позволяет визуализировать отдельные атомы. Латеральное разрешение зависит от качества иглы и определяется не столько макроскопическим радиусом закругления, сколько локальным распределением атомов на острие. При правильной подготовке иглы латеральное разрешение порядка единиц ангстрем, что обеспечивает визуализацию отдельных атомов на гладких поверхностях. Графит — один из немногих материалов, на котором удастся достичь атомного разрешения на воздухе при комнатной температуре.

Цель данной лабораторной работы — освоение базовых принципов работы на СТМ и получение атомарного разрешения на поверхности графита.

2. Принцип работы СТМ

В СТМ проводящий зонд подводится на расстояние несколько ангстрем к поверхности. При этом образуется потенциальный барьер, который можно в первом приближении считать прямоугольным с высотой, равной средней работе выхода материалов иглы и образца (Рис. 1.). Вероятность туннелирования электрона через прямоугольный потенциальный барьер:

$$W = \frac{|A_1|^2}{|A_0|^2} \cong e^{-k\Delta z} \quad (1),$$

где A_0 — амплитуда волновой функции падающего электрона, A_1 — амплитуда волновой функции прошедшего барьер электрона, k — константа затухания волновой функции в области потенциального барьера, Δz — ширина барьера. Подробный вывод этой формулы можно найти в [1].

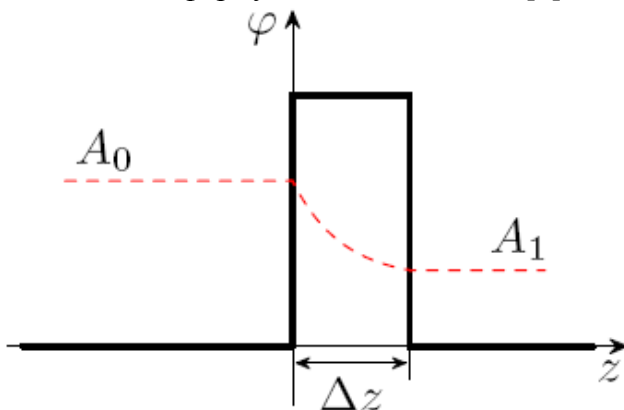


Рис.1. Изображение потенциального барьера и туннелирующего через него электрона.

Константу k в случае контакта двух металлов можно представить в виде: $k = \frac{4\pi\sqrt{2m\frac{(\varphi_1+\varphi_2)}{2}}}{h}$, где m — масса электрона, φ_1, φ_2 — работа выхода электронов из металлов, h — постоянная Планка.

Зная формулу для вероятности можно получить выражение для плотности туннельного тока, возникающего при приложении напряжения V [2]. Но для оценок и качественных рассуждений, как правило, пользуются упрощенной формулой:

$$j_1 = j_0(V) e^{-\frac{4\pi}{h}\sqrt{2m\varphi^*}\Delta z},$$

где $j_0(V)$ — величина падающего тока, $\varphi^* = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$ — средняя работа выхода электрона из металлов, составляющий туннельный контакт. Типичное значение $\varphi^* = 4$ эВ дает значение константы затухания $k = 2 \text{ \AA}^{-1}$. Это означает, что при изменении ширины туннельного контакта Δz на $1 \text{ \AA}$, величина тока изменится на порядок. Таким образом, СТМ оказывается чувствителен даже к очень маленьким изменениям расстояния между зондом и образцом (Подробнее см. в [3]).

2.1. Получение профиля поверхности в СТМ

Изображение рельефа может быть сформировано одним из двух методов. Первый — это режим постоянного тока. В нем зонд при помощи обратной связи перемещается над поверхностью так, чтобы величина туннельного тока оставалось постоянной, а в качестве профиля поверхности регистрируется перемещение пьезосканера по оси Z . Второй метод отслеживания рельефа — это режим постоянной высоты, в котором игла движется все время на одной и той же высоте над поверхностью, а рельеф восстанавливается по изменению туннельного тока. Этот метод оказывается более эффективен при сканировании атомарно-гладких поверхностей.

Как уже было сказано, высокое разрешение СТМ связано с локальным распределением атомов на острие иглы и с экспоненциальной зависимостью тока от ширины туннельного барьера. На Рис. 2 схематически изображено атомарное строение зонда и исследуемой поверхности. Считается, что при сканировании хорошей иглой, с поверхностью реально взаимодействует только один атом острия (Рис. 2. а) и разрешение в этом случае очень высокое. Если же игла сломана и имеет другую форму, то изображение будет недостаточно резким (Рис. 2. б) или даже искаженным из-за формы иглы.

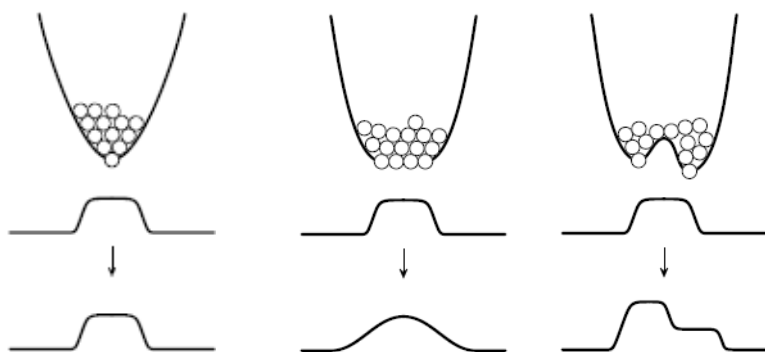


Рис. 2. Влияние формы иглы на изображение.

2.2. Получение атомарного разрешения в СТМ и возникающие артефакты

Для получения атомарного разрешения в СТМ сканирование необходимо вести в режиме постоянной высоты с отключенной обратной связью или со скоростью, превышающей скорость реакции обратной связи.

При сканировании неизбежно происходит локальный нагрев образца за счет работы прибора. Разные части микроскопа имеют разный коэффициент температурного расширения, вследствие этого можно наблюдать так называемый температурный дрейф. То есть при повторном сканировании одного участка происходит смещение образца. Этот эффект практически не заметен при сканировании участков большой площа-

ди (больше 100 мкм^2), но существенен на малых полях сканирования.

3. Атомная решетка графита

Графит — слоистый кристаллический материал, состоящий из атомов углерода. Эта аллотропная модификация углерода наиболее устойчива при нормальных условиях. В каждом слое атомы углерода упорядочены в гексагональную решетку. Каждый такой «двумерный» слой в отдельности представляет собой материал, называемый графеном. Внутри одного слоя атомы связаны между собой посредством сильных σ -связей. Между собой слои связаны более слабыми π -связями, поэтому графит легко расслаивается в продольном направлении с образованием атомарно-гладких поверхностей значительной протяженности. В зависимости от того, как располагаются друг относительно друга соседние слои графита, выделяют гексагональный и ромбоэдрический графит (Рис. 3.). Характерные параметры трехмерной кристаллической решетки (вид элементарной ячейки) в этих двух случаях различаются, а вот периодичность атомов в слое остается одной и той же. Пространственная группа симметрии гексогонального графита $R\bar{6}_3/mmc$, параметры ячейки: $a = 2,416$, $c = 6,7078 \text{ \AA}$. Элементарная ячейка содержит 4 атома. В слое два соседних атома углерода не являются эквивалентными (см. Рис. 4.). Три атома из шести имеют соседей в слое, лежащем ниже (позиция А). Другие три атома углерода располагаются над дырками (центрами шестиугольников, позиция Б).

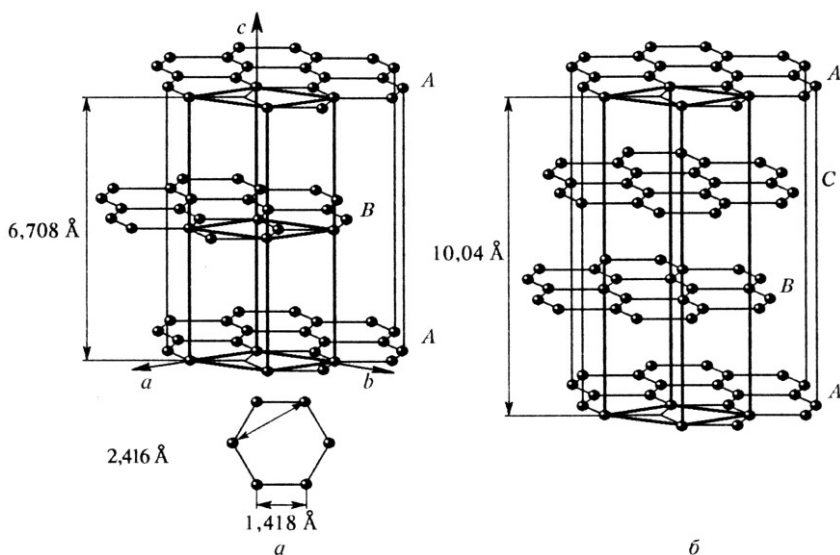


Рис. 3. Структура гексагонального (а) и ромбоэдрического (б) графита.

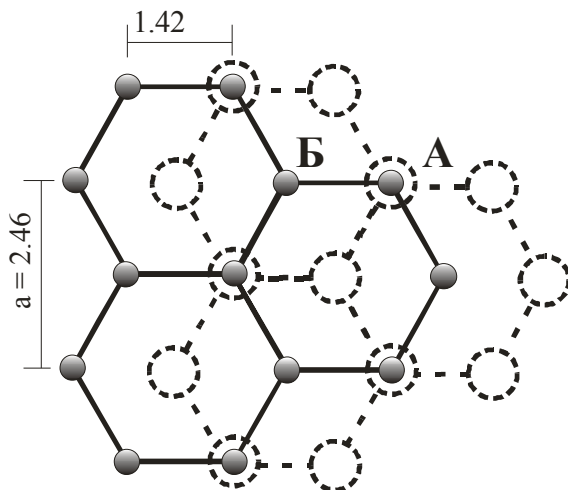


Рис. 4. Расположение атомов в двух соседних слоях графита. Параметры решетки указаны в ангстремах.

Между соседними слоями действуют слабые ван-дер-ваальсовы силы, обуславливающие анизотропию свойств гра-

фита: вдоль слоев электро- и теплопроводность значительно выше, чем в поперечном направлении (Табл. 1.).

В природе кристаллы графита высокого качества встречаются редко, и в настоящее время большинство исследований проводят на высокоориентированном пиролитическом графите (ВОПГ), который получают путем пиролиза газообразных углеводородов при температурах выше 2000°С. Такой графит является поликристаллическим, однако направления осей *c* всех кристаллитов почти совпадают (средний угол разориентации кристаллитов для пиролитического графита высокого качества составляет 0,4°, размеры кристаллитов могут достигать нескольких десятков микрон).

Сопротивление, Ом×м	ВОПГ	Монокристалл графита
Вдоль слоев	$3,5 \cdot 10^{-7} - 4,5 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$
Поперек слоев	$0,15 \cdot 10^{-2} - 0,25 \cdot 10^{-2}$	$0,01 \cdot 10^{-2} - 1,0 \cdot 10^{-2}$

Теплопроводность, Вт×м ⁻¹ ×К ⁻¹	ВОПГ	Монокристалл графита
Вдоль слоев	1600 - 2000	200 - 500
Поперек слоев	7 - 9	40 - 80

Табл. 1. Электросопротивление и теплопроводность для ВОПГ и для монокристаллического графита.

3.1. Атомное разрешение СТМ на поверхности графита

На Рис. 5 показано изображение поверхности графита с атомным разрешением, полученное при работе микроскопа на воздухе. Можно выделить две основные особенности СТМ-изображений поверхности графита: большая гофрировка поверхности (до 24 Å) и асимметрия максимумов, соответствующих атомам углерода в позициях А и Б.

По данным экспериментов по рассеянию гелия реконструкции поверхности графита не происходит, ее гофрировка составляет 0,2 Å. Завышенные значения гофрировки, получаемые по данным СТМ микроскопии, объясняются как особенностями электронного строения графита, так и силовым

воздействием иглы микроскопа на поверхность при сканировании. Увеличение напряжения, приложенного между образцом и иглой, приводит к уменьшению значений гофрировки.

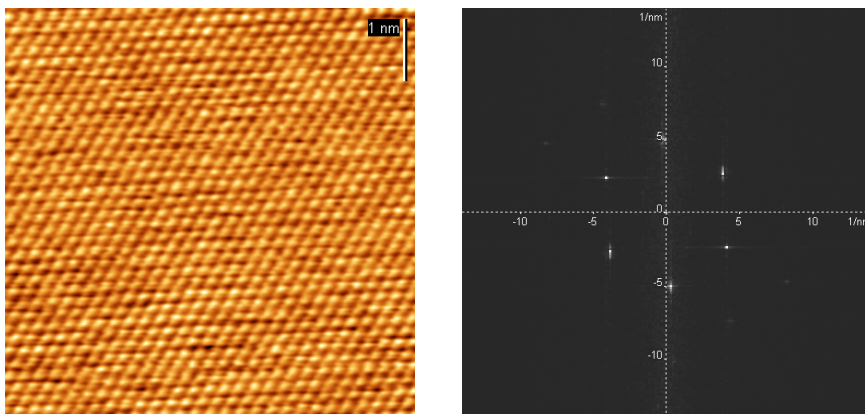


Рис. 5. Изображение поверхности графита в СТМ (слева) и фурье-образ этого изображения (справа).

Большой интерес представляет вторая особенность СТМ-изображений поверхности графита — неэквивалентность максимумов, соответствующих соседним атомам углерода. Асимметрия туннельного тока при низких напряжениях связана с различием локальной плотности состояний, которое в случае графита определяется межслоевым взаимодействием и структурной неэквивалентностью атомных позиций. Расчеты показали, что максимумы на СТМ изображении соответствуют атомам в позиции Б. Асимметрия туннельного тока уменьшается при увеличении напряжения и не зависит от полярности приложенного к образцу напряжения.

В некоторых экспериментах асимметрия оказывается настолько большой, что удастся зарегистрировать только три атома из шести. Редко удастся наблюдать все шесть атомов с одинаковой интенсивностью. Отсутствие асимметрии может объясняться сдвигом верхнего слоя относительно субстрата в процессе сканирования. Действительно, изменение характера изображений в большинстве случаев сопряжено с изменением

условий сканирования на более «жесткие»: а именно, увеличение туннельного тока или уменьшение туннельного напряжения между иглой и образцом. Легче всего смещение слоя должно происходить вблизи дефекта (дислокации, вакансии). Так как сканируется очень маленький участок поверхности, вероятность того, что он находится вблизи дефекта, весьма небольшая, что объясняет редкое появление сотообразной структуры. Существуют и другие теории, объясняющие отсутствие асимметрии.

3.2. Дефекты на поверхности графита

Наиболее достоверно истинность атомного разрешения СТМ подтверждается способностью визуализировать дефекты в атомной структуре графитового слоя.

На поверхности ВОПГ различного качества концентрация точечных дефектов в нормальных условиях составляет от 0,1 до 20 мкм⁻². Дефекты проявляются яркими пятнами на СТМ-изображениях, но при сильном приближении иглы к поверхности они перестают быть видимыми, так как в данных условиях основной вклад в туннелирование вносят объемные состояния графита. По вольтамперным характеристикам туннельного контакта можно определить энергетический спектр электронов и установить тип примесного атома. Для каждого типа внедренного атома характерна своя зависимость высоты дефекта от расстояния между иглой и поверхностью. Вакансии могут быть легко визуализированы с помощью СТМ, т.к. вблизи них локальная плотность состояний возрастает.

На СТМ изображениях графита вблизи точечных дефектов, а также краев ступеней наблюдается образование интерференционной сверхрешетки, ее появление не связано с реконструкцией поверхности, а объясняется возникновением фриделевских осцилляций.

Из линейных дефектов графита могут быть обнаружены ступени, межзеренные границы и дислокации.

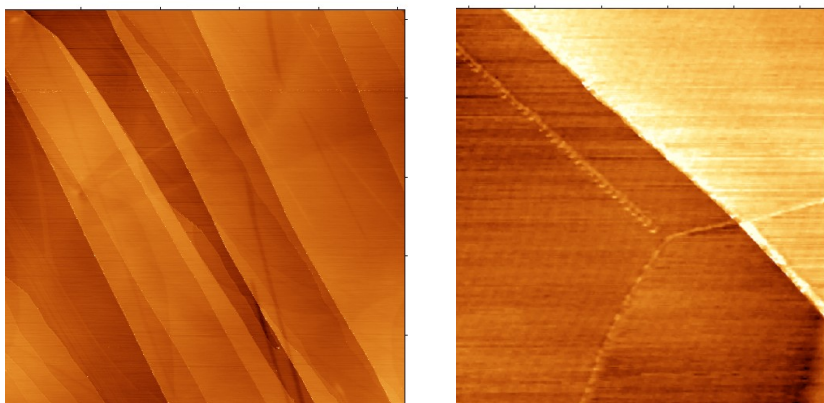


Рис. 6. Изображение поверхности графита, размер кадра $3,5 \times 3,5$ мкм² (слева). Справа — Стык трех зерен, видна спиралеобразная периодическая структура грани.

Ступени образуются на поверхности исследуемого образца графита в результате его скола. Доказательством этого служит зависимость направления ступеней от направления скола. На Рис. 6 слева можно видеть, что все ступени скола имеют одинаковое направление. На поверхности графита могут быть найдены изогнутые ступени, высота которых часто меньше межатомного расстояния в графите. Подобные ступени возникают, если обрыв углеродного слоя произошел под поверхностью в процессе получения графита.

Границы зерен на СТМ-изображениях графита проявляются в виде спиралеобразных или точечных протяженных периодических структур. Чем больше угол разориентации двух кристаллитов, тем меньше период структуры, возникающей на их границе. В месте стыка трех зерен границы встречаются под углом близким к 120° , что объясняется тригональной симметрией графитовых слоев (Рис. 6 справа).

На поверхности графита часто наблюдаются полосы с высотой $1 - 2 \text{ \AA}$ и шириной до 100 нм, которые соответствуют

рядам частичных дислокаций с вектором Бюргерса, лежащим в плоскости графитовых слоев. Полная дислокация в графите расщепляется на две частичных, между которыми образуется дефект упаковки. При сканировании игла может оказывать значительное давление на поверхность, особенно, если процесс сканирования происходит при большом токе (> 1 нА) и маленьком напряжении (< 40 мВ). Под силовым воздействием иглы дислокационные полосы могут перемещаться вдоль поверхности графита.

К двумерным дефектам, наблюдаемым на СТМ-изображениях поверхности графита, также можно отнести различные сверхрешетки. Пример сверхрешетки показан на Рис. 7 слева. Гексагональные сверхрешетки возникают на графите при разориентации верхних слоев. Визуализированы решетки с периодами от 1,7 до 44 нм и высотой от 0,5 до 20 Å. Причина данного явления аналогична причине появления муаров в оптике, возникающих при вращении одной периодической структуры относительно другой. Для данного типа сверхрешеток на изображении можно выделить два типа максимумов.

Гексагональные решетки с различной периодичностью можно создать искусственно на поверхности графита, сдвигая верхний слой. Потенциально они могут применяться в нанотехнологии для изготовления шаблонов, на которые затем будут адсорбированы различные наночастицы.

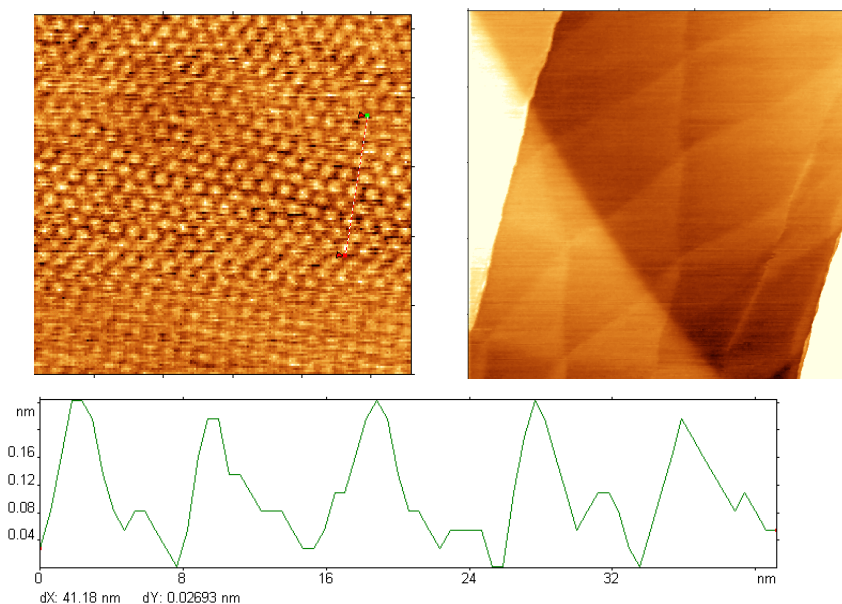


Рис. 7. Слева — гексагональная сверхрешетка на поверхности графита. Снизу показано ее сечение. Высота узлов решетки $2 - 2,5 \text{ \AA}$, период $(5,3 \pm 0,3) \text{ нм}$, угол разориентации графитовых слоев $\theta = (2,7 \pm 0,2)^\circ$. Справа — Дислокационная сетка. Светлые области соответствуют дефектным областям.

В заключение, рассмотрим сверхрешетки, причина возникновения которых — дислокационная сетка, расположенная вблизи поверхности графита. Чаще всего на СТМ изображениях наблюдают дислокационные сетки, состоящие из треугольных областей, размеры сторон которых от 50 до 300 нм (Рис. 7. справа). Границы треугольников соответствуют частичным дислокациям, разделяющим области с дефектом упаковки (ромбоэдрический графит) и нормальным графитом. Так как дефект упаковки энергетически невыгоден для кристалла, то треугольники с дефектным графитом имеют вогнутые стороны. СТМ-изображения дислокационных сеток меняются при варьировании параметров сканирования. Увеличение туннельного напряжения приводит к ослаблению

контраста между соседними треугольниками. Так как межслоевые расстояния в гексагональном и ромбоэдрическом графите одинаковы, и вектор Бюргерса, образующих сеть дислокаций лежит в плоскости $[0001]$, то возникающий в СТМ контраст между областями не связан с топографией поверхности, а объясняется различием в локальной плотности состояний между нормальным и ромбоэдрическим графитом.

4. Экспериментальная часть

Лабораторная работа выполняется на сканирующем туннельном микроскопе ФемтоСкан с использованием программного обеспечения ФемтоСкан Онлайн. Для успешного выполнения работы необходимо освоить простейшие навыки работы на СТМ и основные методы обработки СТМ-изображений.

В качестве исследуемых объектов для эксперимента используется свежесколотый высокоориентированный пиролитический графит (HOPG).

4.1. Порядок работы на микроскопе

В лабораторной работе используются образцы графита уже приклеенные на СТМ столик. Для скола графита используется липкая лента, кусочек которой наклеивается на поверхность образца графита. Затем она аккуратно разглаживается пинцетом для удаления пузырьков воздуха и обеспечения плотного прилегания липкой ленты к поверхности графита. Лента медленно удаляется с поверхности образца за один из свободных краев, при этом пинцетом следует придерживать СТМ столик. Необходимо убедиться, что вместе с липкой лентой с поверхности графита был удален верхний слой. Проверьте тестером

наличие электрического соединения между свежесколотой поверхностью образца и подвижным контактом СТМ столика.

Разместите на магнитном держателе механического блока столик с образцом графита. Подсоедините подвижный контакт СТМ столика к одноконтактному разъему механического блока.

Проверьте, что блок электроники выключен. Отсоедините СТМ головку от механического блока (При работе с СТМ головкой всегда берите ее только за корпус. Не допускайте случайных прикосновений к держателю иглы, из-за статического электричества это может привести к сгоранию усилителя головки). При замене игл вначале возьмите СТМ головку за корпус одной рукой, затем другой рукой с помощью пинцета вытащите старую иглу из держателя на СТМ головке, для этого нужно немного ослабить прижимной винт. Для приготовления игл используется платиново-иридиевая проволока (20% иридия). Перед скусыванием иглы убедитесь, что на поверхности проволоки, а также на лезвиях ножниц или кусачек отсутствуют загрязнения. При необходимости удалите загрязнения механически при помощи кусочка бумаги. Скусите проволоку ножницами или кусачками под 45° , оптимальная длина иглы 1 - 2 см. Вставьте иглу в держатель на СТМ головке (рис. 8), с небольшим усилием прижмите иглу винтом. Помните, одной рукой нужно держаться за корпус головки. Подсоедините СТМ головку к блоку механики, точка на разъеме кабеля должна совпадать с точкой на головке.

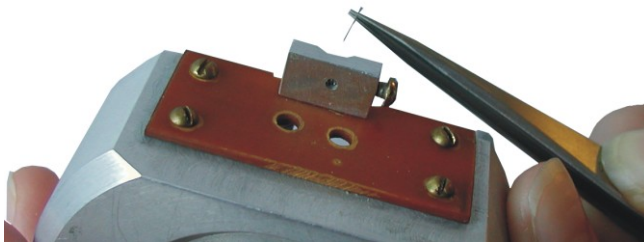


Рис. 8. Установка иглы в держатель СТМ головки

Включите блок электроники. Запустите программу ФемтоСкан, подключитесь в режиме **Master**. В меню **старт** выберите пункт **загрузка**. Приподнимите головку и попробуйте поставить ее над образцом так, чтобы игла не коснулась поверхности графита. Если этого не получается, то нужно отвести образец вниз (используйте кнопку **перемещение образца** в программе ФемтоСкан). Сдвигая головку, выберите место для сканирования (наиболее чистый и гладкий участок поверхности). Осуществите грубый подвод иглы с помощью кнопки перемещения образца, расстояние между иглой и образцом контролируйте визуально. После окончания грубого подвода должен оставаться видимый зазор между иглой и образцом. Аккуратно накройте микроскоп металлическим колпаком, заземлите колпак.

В окне **Параметры** выберите на левой панели режим сканирования **СТМ**, на правой панели режим **Топография**. Установите параметры съемки как в Табл. 2:

Образец	графит
Туннельный ток	500 пА
Туннельное напряжение	40 мВ
Интегральное звено обратной связи	0,03125
Пропорциональное звено обратной связи	0,03125

Табл. 2. Начальные параметры сканирования в СТМ.

Осуществите окончательный подвод образца (в меню **Старт** опция **Подвод**). Индикатор текущего положения образца (бегунок в центре окна **Параметры**) должен приподняться при приближении образца к игле.

Размер первого кадра лучше выбрать менее 2 мкм, а частоту сканирования – менее 1 Гц. Запустите сканирование (меню **Старт, Z(X,Y)**). Варьируя звенья обратной связи и другие параметры, добейтесь четкого изображения поверхности. Руководствуйтесь следующими правилами:

а. при увеличении размера поля следует понижать частоту сканирования для сохранения постоянной скорости;

б. при увеличении скорости сканирования следует увеличивать значения звеньев обратной связи;

в. при увеличении туннельного напряжения и уменьшении туннельного тока игла отдаляется от поверхности, поэтому значения звеньев обратной связи нужно увеличивать;

г. при маленьких звеньях обратной связи изображение будет расплывчатым или профили строк окажутся пилообразными;

д. при больших звеньях будет наблюдаться автогенерация в цепи обратной связи;

е. сложный профиль иглы (например, двойное острие) может приводить к удвоению элементов рельефа поверхности. В этом случае нужно остановить сканирование и заменить иглу.

Получите несколько обзорных кадров поверхности графита. Затем уменьшите поле сканирования до 30 нм и, постепенно увеличивая скорость сканирования, добейтесь атомного разрешения. Получите несколько кадров с атомной решеткой в разном масштабе (20×20 нм², 40×40 нм² и 80×80 нм²).

Если при прохождении практикума Вы не работали на реальном приборе, то преподаватель предложит Вам несколько изображений для дальнейшей обработки.

4.2. Обработка результатов эксперимента

Для выполнения этого задания вы можете использовать полученные изображения или открыть файлы sample_1a, sample_1b и sample_1c.

Внимательно рассмотрите изображение атомной решетки графита. В контекстном меню выберите режим курсора **Выделение**. Выделите наиболее совершенную область изображения и скопируйте ее в новое окно с помощью команды **Duplicate** (меню **Operations**). Постройте профили строки и столбца скопированного изображения, для этого в контекстном меню выберите режимы курсора **Выделить строку** и **Выделить столбец**. Чем отличаются профили строки и столбца? Если

изображение содержит горизонтальные ступеньки или общий наклон, то устраните эти дефекты с помощью команд **Усреднение по строкам** и **Выравнивание** в меню **Математика**. Какие изменения произошли с профилями после применения этих операций?

Закройте окна с профилями стоки и столбца. Выберите режим курсора **Сечение**. Проведите сечение по вершинам атомов. Для удаления шумов используйте **медианную фильтрацию** и фильтр **Усреднение** (меню **Математика**). Как фильтрация с использованием различных окон влияет на вид сечения и изображения?

4.3. Презентация изображений

В этом задании продолжаем работать с изображением, подготовленным в ходе выполнения задачи 1.

Выберите палитру, которая в большей мере подчеркивает детали изображения. Для этого щелкните правой кнопкой мыши на палитру, и перед вами появится список уже готовых палитр. Вы можете создать свою палитру. В контекстном меню палитры выберите пункт **Fixed scale** и, сузив цветовой диапазон, добейтесь увеличения контрастности изображения.

Постройте трехмерное изображение поверхности.

Примените к изображению фильтр **Подсветка**. Как изменился профиль поверхности после применения фильтра подсветки? Цвет точки на изображении уже не соответствует ее высоте, поэтому необходимо удалить цветовую шкалу из окна с изображением. Для этого в контекстном меню выберите пункт **Preferences** и в первой закладке **Общее** снимите галочку напротив пункта **Показать шкалу Z**.

4.4. Измерение параметров атомной решетки графита

Используйте одно из полученных самостоятельно изображений или откройте файл `sample_3.`, обработайте изображение (см. задачу 1).

Выберите режим курсора **Distance** и измерьте параметр решетки графита a (расстояние между соседними максимумами). Для большей точности следует измерять расстояние между пятью - десятью атомами и затем находить среднее. Объясните, почему отличаются расстояния между атомами, измеренные по разным направлениям.

Постройте преобразование Фурье для изображения атомной решетки графита (**Operations/Fourier**). По максимумам на Фурье-образе определите период решетки графита a .

Измерьте гофрировку поверхности графита по сечениям (разницу между высотой максимумов и минимумов). Атомам в какой позиции соответствуют максимумы на изображении?

Определите асимметрию максимумов, соответствующих атомам в разных позициях. Для этого нужно провести сечения вдоль ребер углеродных шестиугольников (см. рис. 4). Асимметрию следует вычислять по формуле: $(h(B) - h(A)) / (h(B) + h(A))$, где h – высота атома в соответствующей позиции. В чем причина неэквивалентности максимумов на СТМ - изображениях? Будут ли видны все углеродные атомы при сканировании графена (углеродного монослоя)?

4.5. Токовые изображения атомной решетки графита

Откройте и обработайте изображение `sample_4.`

Измерьте разницу в туннельном токе между максимумами и минимумами на изображении. В меню **Вид** выберите пункт **Параметры**. В открывшемся списке приведены параметры сканирования данного изображения. Найдите в списке параметров опорное значение туннельного тока (**stm.setpoint**). Определите, сколько процентов от этого значения составляют

вариации туннельного тока, связанные с гофрировкой атомного слоя.

Используя значение гофрировки поверхности графита, полученное в упражнении 4.4, оцените коэффициент чувствительности в методе СТМ. Как изменится коэффициент чувствительности, если уменьшить величину туннельного зазора между зондом и образцом при сканировании?

Для получения зачета по данной лабораторной работе необходимо предъявить печатный отчет, состоящий из изображений поверхности графита в крупном масштабе и с атомарным разрешением, построенных трехмерных изображений, сечений, расчетов периодичности атомной решетки, количество слоев графита, составляющих ступени на поверхности, температурного дрейфа.

5. Литература

1. Л.Д. Фаддеев, О.А. Якубовский, Лекции по квантовой механике для студентов–математиков, Л.: Издательство ленинградского университета (1980).
2. J.G. Simons, Generalized formula for the electric tunnel effect between similar electrodes separated by a thin insulating film, J. Appl. Phys., 34, 1793 (1963).
3. В.Л. Миронов, Основы сканирующей зондовой микроскопии, Н.Н. (2004)