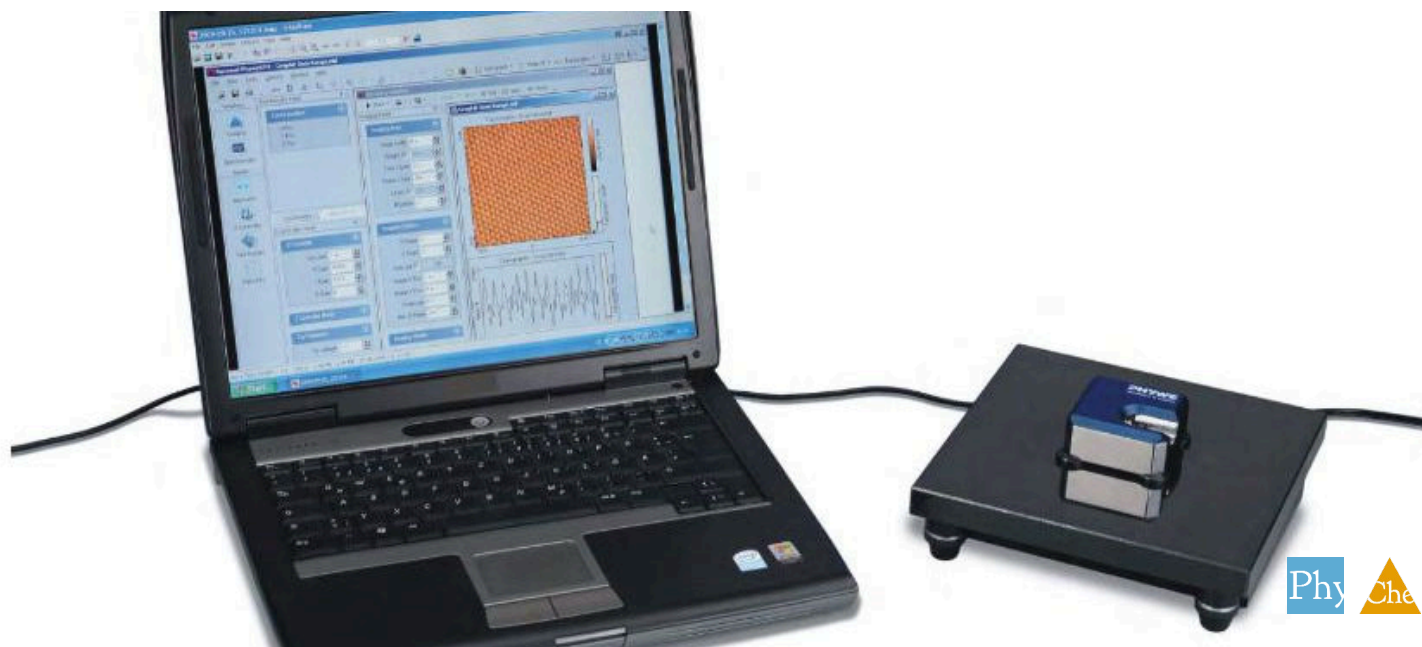


Атомное разрешение поверхности графита по STM (сканирующий туннельный микроскоп)



Физика

Современная физика

Нанотехнология

Химия

Неорганическая химия

Химия твердого тела и кристаллография

Прикладные науки

Инженерные
специальности

Материаловедение

Нанотехнология



Уровень сложности

твердый



Размер группы

2



Время подготовки

20 Минут



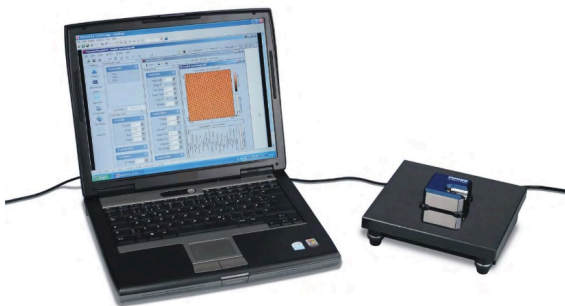
Время выполнения

45+ Минут

PHYWE
excellence in science

Общая информация

Приложение

PHYWE
excellence in science

Установка

Сканирующий туннельный микроскоп можно использовать для наблюдения за атомным составом поверхности твердых тел. Эти составы имеют важное значение в физике материалов, так как они влияют на поведение твердого тела.

Прочая информация (1/2)

PHYWE
excellence in science**До****знание****Главный
принцип**

Предварительные знания, необходимые для этого эксперимента, можно найти в разделе теории.

Приближение очень острого металлического наконечника к электропроводящему образцу с помощью электрического поля приводит к возникновению тока между наконечником и образцом без механического контакта. Этот так называемый туннельный ток используется для исследования электронной топографии на суб-нанометровом масштабе свежеприготовленной поверхности графита (HOPG). Путем сканирования наконечника линейно по всей поверхности изображаются атомы графита и гексагональная структура.

Прочая информация (2/2)

PHYWE
excellence in science**Обучение****цель****Задачи**

Целью этого эксперимента является изучение использования SMT.

1. Подготовьте Pt-Ir наконечник и образец графита (HOPG) и подойдите к образцу.
2. Исследуйте рельеф чистых террас и высоту ступеней между соседними террасами в режиме постоянного тока.
3. Изобразите расположение графитовых атомов на чистой террасе, оптимизируя параметры туннелирования и сканирования. Интерпретируйте структуру, анализируя углы и расстояния между атомами и атомными рядами, а также используя двухмерную и трехмерную графитовую модель.
4. Измеряйте и сравнивайте изображения в режиме постоянной высоты и постоянного тока.

Информация по вопросам безопасности

Внимание!

Уменьшение вибрации:

- Установите вашу систему на очень устойчивый стол.
- Экспериментируйте в спокойной, свободной от вибраций среде.
- Отделите этот эксперимент от других лабораторных курсов, по возможности, в отдельном помещении.

Теория (1/3)

Эффект туннелирования

Туннелирование - это концепция функционирования, которая возникает из квантовой механики. Классически, объект, попавший в непроницаемый барьер, не пройдет. Напротив, объекты с очень малой массой, такие как электрон, обладают волнообразными характеристиками, которые допускают такое событие, называемое туннелированием. Другими словами, вероятность найти электрон за барьером не равна нулю. Внутри барьера волновая функция электрона затухает экспоненциально.

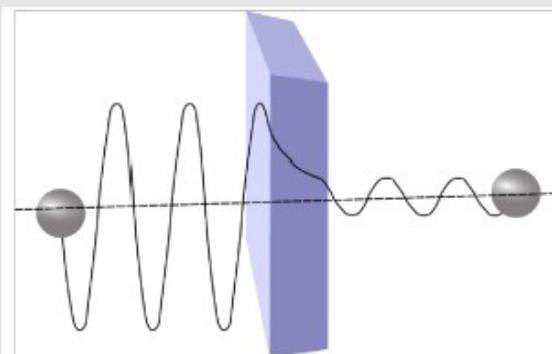


Рис. 1: Эскиз туннелирования электрона через барьер.

Теория (2/3)

PHYWE
excellence in science

Размер атома по отношению к кончику является размером мяча для гольфа в гору. В вашей измерительной системе PHYWE платина-иридиевый наконечник перемещается в трех измерениях с помощью пьезо-кристаллических трансляторов, которые приводятся в движение с суб-нанометрической точностью (рис. 2). Рассматриваемый образец приближается к наконечнику на расстоянии около 1 нанометра ($1 \text{ нм} = 1/1\,000\,000\,000 \text{ м}$). Классическая физика запрещает появление электронов в малом зазоре между наконечником и образцом, но если острый наконечник и проводящая поверхность находятся под низким напряжением ($U \sim 0,1 \text{ В}$), то очень малый туннельный ток ($I \sim 1 \text{ нА}$ с расстоянием между наконечником и образцом 1 нм), хотя может протекать между наконечником и образцом. Полученный туннельный ток является функцией положения наконечника, приложенного напряжения и локальной плотности состояний (LDOS) образца, эта информация отображается на мониторе компьютера в виде двухмерного цветного картированного изображения. Сила туннельного тока I экспоненциально зависит от расстояния между наконечником и образцом (d_z), обычно называемого z-расстоянием, применяемым смещением (U) и постоянными факторами (c_1 и c_2)

$$I \propto c_1 \cdot U \cdot \exp(-c_2 \cdot d_z) \quad (1)$$

Теория (3/3)

PHYWE
excellence in science

Эта крайняя зависимость от расстояния позволяет очень точно измерить движение наконечника-образец. Один из трех пьезокристаллов, z-пьезо, теперь может использоваться в петле обратной связи, которая поддерживает постоянный туннельный ток путем соответствующего изменения z-расстояния. Удлинение пьезокристалла пропорционально удельной константе прибора, которая является зависимым от температуры параметром, и приложенному напряжению (Удлинение = константа пьезо). Напряжение, например $\Delta I = 500 \text{ вечера/В} \cdot 10 \text{ В} = 5 \text{ нм}$).

Всегда помните о необходимости проведения измерений, предпочтительно при одной и той же комнатной температуре. Температурные зависимости создают неопределенность и погрешности в ожидаемых значениях ваших измерений.

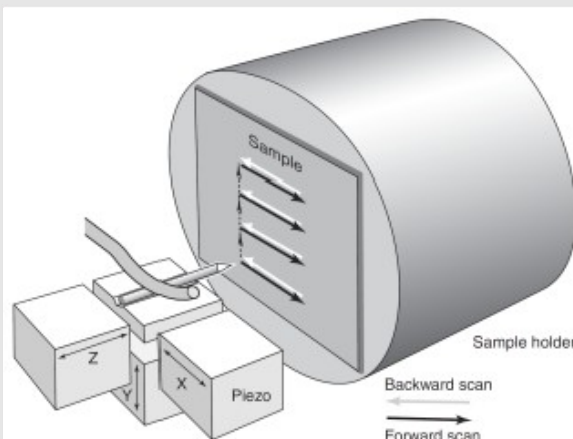
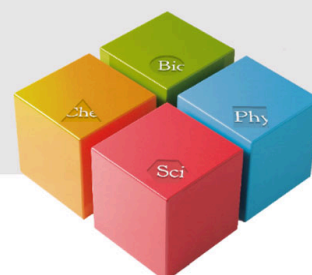


Рис. 2: Эскиз пьезоэлектрического устройства, управляющего движением

Оборудование

Позиция	Материал	Пункт No.	Количество
1	Компактный сканирующий туннельный микроскоп	09600-99	1
2	Графит, модель, 2D	09620-00	1
3	Набор для моделирования кристаллической решетки, графит	39840-00	1



Установка и процедура

Подготовка

Для подготовки свежего наконечника для измерений STM выполните указанные здесь действия или ознакомьтесь с Руководством по быстрому запуску или главой 5 Руководства по эксплуатации PHYWE STM соответственно. Убедитесь, что микроскоп уже установлен на очень устойчивом столе в тихой обстановке с низким уровнем вибрации здания (например, в подвале). Ваш микроскоп должен быть установлен на отдельном столе, а не на компьютере или ноутбуке. Держите на столе немного свободного места для подготовки образца и измерительных наконечников. Обратите внимание на руководство пользователя STM, убедитесь, что программное обеспечение запускается чисто и что вы установили соответствующие параметры для проведения измерений на графитовом образце ХОПГ (Глава: 5.3.3. в руководстве пользователя / например, Заданное значение = 1 нА, Напряжение наконечника = 50 мВ).

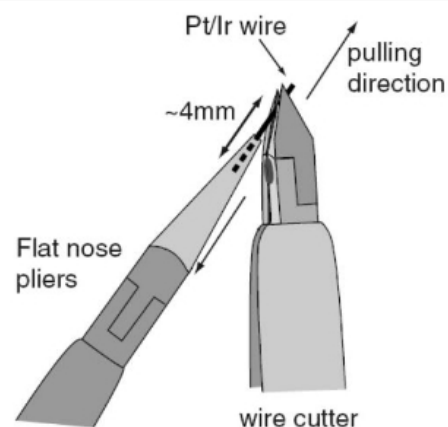


Fig. 3: Sketch of the tip preparation.

Рис. 3: Эскиз подготовки наконечника

Подготовка

PHYWE
excellence in science

Начните подготовку наконечника и образца, извлекая необходимые инструменты из ящика для инструментов. Вам понадобятся части с 6 по 12 из вышеперечисленного списка и немного клейкой ленты (скотч, не входит в комплект).

- С помощью острого пинцета осторожно снимите старый наконечник с держателя наконечника. Затем плотно держите конец проволоки плоскогубцами.
- Держа проволоку плоскогубцами, перемещайте кусачки на длину примерно 4 мм, как можно более наклонно (под очень острым углом). Затем закройте кусачки до тех пор, пока не почувствуете проволоку, но не перережьте ее.
- Для получения требуемой остроты наконечник необходимо оторвать, быстро оттянув кусачки от вас, вместо того, чтобы чисто резать по проволоке.
- Используйте заостренный пинцет, чтобы держать проволоку наконечника прямо за наконечником.
- Отпустите плоские плоскогубцы и перенесите наконечник на микроскоп.

Монтаж

PHYWE
excellence in science

- Положите проволоку для наконечников под зажим на держатель наконечника (A), параллельно канавке, и протолкните ее до конца. Сдвиньте проволоку наконечника в сторону до тех пор, пока она не окажется в канавке и не будет надежно закреплена под зажимом (B).
- Он должен высовываться примерно на 1-2 мм за держатель наконечника. См. также рис. 5 для пошаговых фотографий.

Теперь, когда Вы подготовили новый наконечник и вставили его в канавку держателя наконечника, приступите к подготовке поверхности образца.

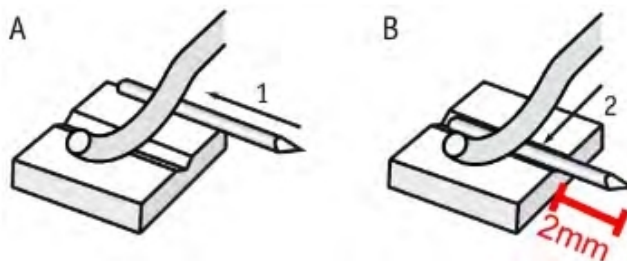


Рис. 4: Эскиз крепления наконечника

Монтаж наконечника

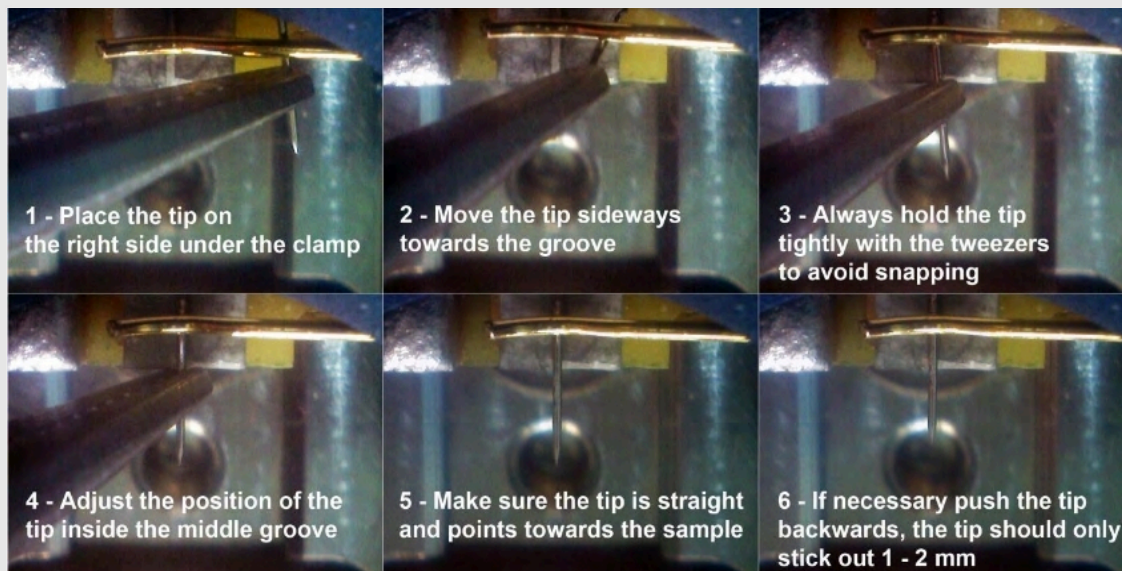
PHYWE
excellence in science

Рис. 5: Пошаговые фотографии крепления наконечника.

Подготовка образцов (1/2)

PHYWE
excellence in science

В большинстве случаев достаточно время от времени расщеплять графитовый образец. Если у вас возникли проблемы с поиском чистого участка или вы не получили хороших изображений с несколькими свежеприготовленными советами, очистите поверхность образца, как описано ниже. Высокоориентированный пиролитический графит (HOPG) состоит из слабо связанных слоев (связь Ван-дер-Ваальса). Благодаря такой слоистой структуре графита его легко расщеплять с помощью куска клейкой ленты:

- Положите образец на стол пинцетом.
- Приклейте кусок клейкой ленты к графитовой поверхности и надавите большим пальцем или концом пинцета очень слабо.
- С помощью пинцета подойдите под клейкую ленту и прижмите образец к столу.

Подготовка образцов (2/2)

PHYWE
excellence in science

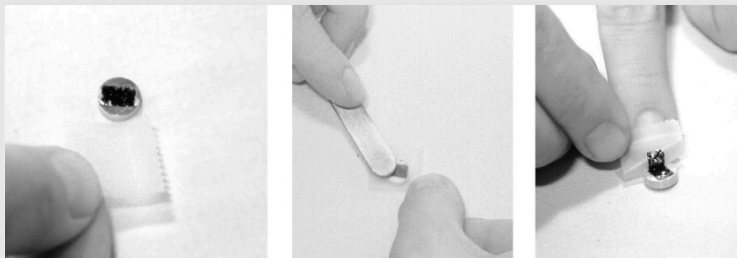


Рис. 6: Пошаговые снимки подготовки поверхности образца HOPG

- Осторожно снимите клейкую ленту. Верхний слой образца должен прилипнуть к клейкой ленте. Если Вас не устраивает раскол (например, поверхность выглядит неровной или осталось слишком много хлопьев), начните с самого начала. Середина поверхности образца должна быть очень плоской и зеркальной. Любые свободные чешуйки во внешних областях образца могут быть удалены пинцетом. Графитовый образец теперь готов к использованию и его больше нельзя трогать. Теперь, когда вы подготовили образец, его нужно прикрепить к держателю образца.

Монтаж образца и держателя образца (1/4)

PHYWE
excellence in science

- Распакуйте держатель образца, касаясь только его черной пластиковой ручки.
- С помощью пинцета вытолкните образец на край опорного магнита в упаковке с образцом.
- Возьмите образец пинцетом (как показано на рис. 7) и поместите его на магнит держателя образца.
- Положите держатель образца вниз на направляющие планки держателя образца сначала рис.8(a) и осторожно отпустите его на опору приближающегося двигателя (Будьте осторожны: магнит, который держит держатель образца на своем месте, может перетащить образец с держателя образца, убедитесь, что вы принесли образец за ним).

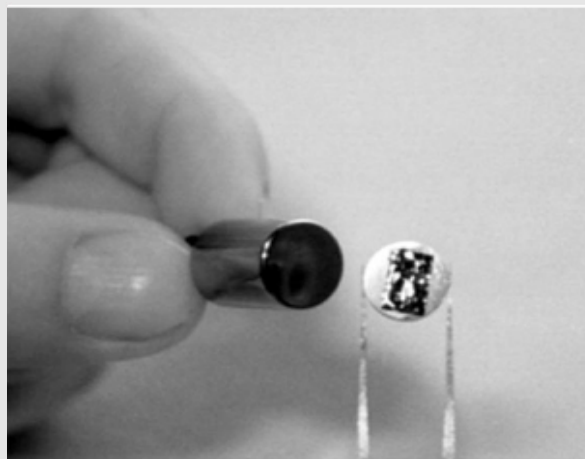


Рис. 7: Поместите образец в середину держателя образца.

Монтаж образца и держателя образца (2/4)

PHYWE
excellence in science

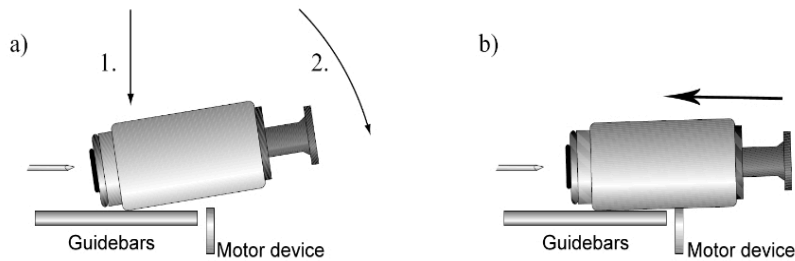


Рис. 8: Эскиз ручного подхода образца к наконечнику

- Осторожно надавите на держатель образца в направлении наконечника (b), но не дайте ему коснуться наконечника (расстояние 1 см). См. также пошаговые фотографии на Рис. 9.

Монтаж образца и держателя образца (3/4)

PHYWE
excellence in science

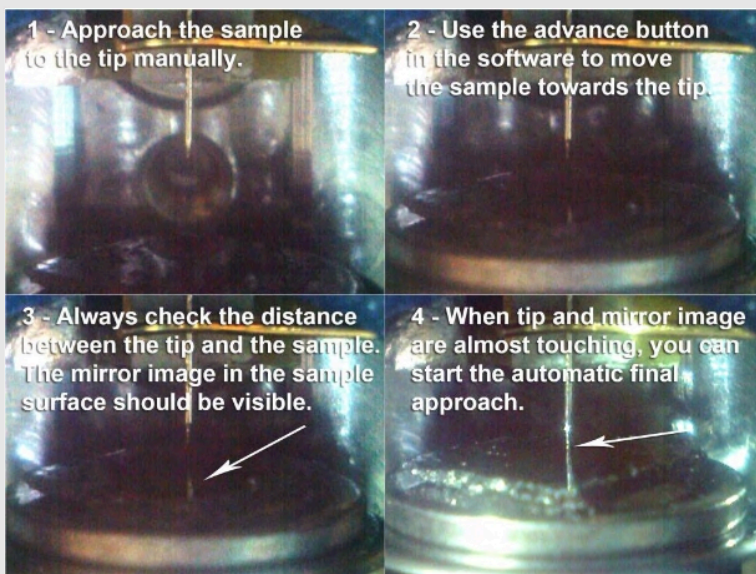


Рис. 9: Пошаговые снимки поддерживаемого программного обеспечения, приближающегося к наконечнику образца

Монтаж образца и держателя образца (4/4)

PHYWE
excellence in science

Теперь, когда вы приблизились к образцу вручную, используйте панель подхода в измерительном программном обеспечении, чтобы подвести образец к наконечнику (кнопка "Advance"). Чтобы определить расстояние между наконечником и образцом, отрегулируйте условия молнии таким образом, чтобы вы могли видеть зеркальное изображение наконечника на поверхности образца. Во время этой процедуры вы также должны проверить световой индикатор состояния зонда в программном обеспечении. Световой индикатор состояния должен быть оранжевым.

If статус зонда переключается в красный цвет, когда вы разбили образец на наконечник. Вы можете попробовать использовать кнопку "Извлечь", чтобы сдвинуть образец с небольшого шага назад и начать с финального подхода, но, скорее всего, Вам придется начать все сначала с подготовки нового наконечника. Когда наконечник и его зеркальное изображение вот-вот коснутся вас, вы можете начать с автоматического финального подхода (предварительно нажав кнопку "Подойти"). Автоматический подход может занять несколько минут, пожалуйста, будьте терпеливы, так как продолжительность

PHYWE
excellence in science

Оценка

Нахождение атомных террас на поверхности

PHYWE
excellence in science

Мы начнем с измерений на HOPG. Это самый простой образец. Для активации полного диапазона измерений вашего прибора нажмите кнопку **Full** визуализации. Для хороших результатов можно использовать изображения размером около 0,2 мкм. Если Вам повезет, то при первом измерении Вы найдете на поверхности образца террасу, которая является дефектом линии. Если это **Move** вы можете либо использовать инструмент в окне визуализации, чтобы начать измерение в другой точке на поверхности, либо вытянуть образец из наконечника и осторожно повернуть держатель образца с черной пластиковой ручкой. После этого вы снова подойдете к образцу.

Нахождение атомных террас на поверхности

PHYWE
excellence in science

На рис. 10 показаны примеры террасных конструкций в различных местах на поверхности образца HOPG. Убедитесь, что вы настраиваете параметры петли обратной связи для достижения хорошего качества изображения. Вы можете перейти на стандартный или расширенный уровень пользовательского интерфейса программного обеспечения ("Options" --> "Config User Interface"), чтобы получить возможность индивидуальной настройки P- и I-gain. Слишком высокие значения P- и I-усиления будут заметны на линейном графике как очень высокие пики и очень грубая линейная структура. **Photo** регулируйте значения коэффициента усиления для сглаживания линейного графика и вашего изображения соответственно. Когда вы будете удовлетворены, захватите хорошее изображение, нажав на кнопку. Теперь Вы можете применить некоторые фильтры для уменьшения шумов, регулировки уровня линий сканирования и устранения фонового искажения.

Нахождение атомных террас на поверхности образца

PHYWE
excellence in science

Рекомендуемая процедура будет такой:

- Apply фильтр глюков.
- Apply фильтр шума.
- Do фоновое вычитание и/или корректные уровни строк сканирования. .

Если вы не уверены, что исправленное изображение лучше, сделайте шаг назад и начните заново. Корректированное изображение должно быть почти без сильных градиентов, одна плоскость поверхности образца должна иметь один и тот же цвет в каждой точке.

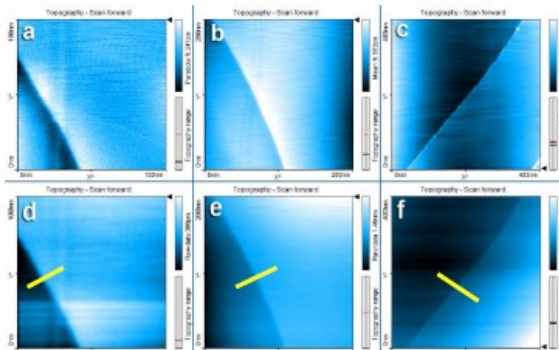


Рис. 12: Оригинальные изображения различных атомных террас (a, b, c) и их обработанные изображения (d, e, f). Желтые полосы, указывающие место сечения (см. ниже). (Время/ линия: 0,2 с, Заданное значение: 1,2 нА, P-gain: 1000, I-gain: 1200).

Оценка высоты ступеней террас (1/4)

PHYWE
excellence in science

Тогда вы можете начать анализировать свои данные. Сначала воспользуйтесь инструментом "Create Cross section". Поместите строку на изображение, которое вы хотите проанализировать. Если вы хотите оценить высоту ступеней террас, убедитесь, что линия перпендикулярна краю террасы. Нажмите на "Вырезать line". В результате будет создано новое изображение графика с z-информацией, соответствующей нарисованной линии поперечного сечения (Рис. 11). Избегайте создания поперечных сечений с проблемами со сканированием или коррекцией артефактов (странные уклоны или другие скачки в окраске поверхности). Теперь можно воспользоваться инструментом "Измерение Distance". Он позволяет нарисовать две прямые линии, между которыми измеряется расстояние. Преимущество использования измерения линии вместо точечного измерения состоит в том, что можно уменьшить влияние шероховатости или шумности поверхности, поместив линии между самым низким и самым высоким значениями для каждой террасы.

Оценка высоты ступеней террас (2/4)

PHYWE
excellence in science

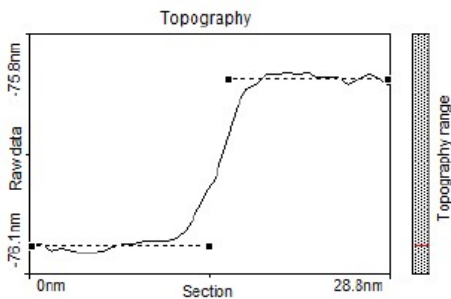


Рис. 11: Поперечное сечение изображения d (см. выше). Расстояние: $\Delta z=332.2$

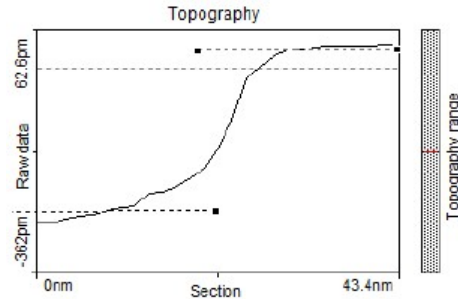


Рис. 12: Поперечное сечение изображения d (см. выше). Расстояние: $\Delta z=333.9$

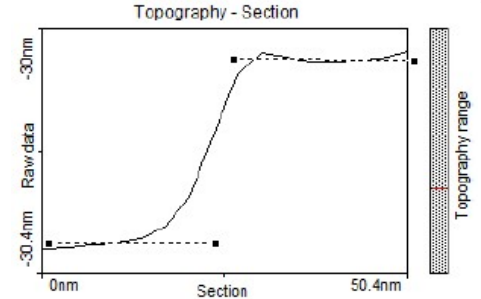


Рис. 13: Поперечное сечение изображения f (см. выше). Расстояние: $\Delta z=686.1$

Оценка высоты ступеней террас (3/4)

PHYWE
excellence in science

При проведении измерений помните, что на результаты всегда влияют ошибки. Погрешности возникают при самом сканировании (температурная зависимость пьезоэлектрического устройства), но еще больше из-за плохого z-уровня или коррекции фона. Ваши результаты не должны превышать относительной погрешности около 5% к литературным значениям (чем ниже, тем лучше). По завершении некоторых измерений рекомендуется рассчитать среднее значение ваших данных для каждого предлагаемого размера шага.

Суммируйте каждую ценность (v_j) и разделите сумму на количество добавленных значений.

$$\bar{m} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N v_j \quad (2)$$

Стандартное отклонение - это еще одно вычисление, которое говорит о точности ваших измерений.

$$s = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N \left(v_j - \bar{m} \right)^2 \quad (3)$$

Оценка высоты ступеней террас (4/4)

Это позволяет Вам быстро просмотреть результаты в этой $\bar{m} \pm s$ форме:

Измерение № (рис. 10)	Высота ступени Δz [pm]	Атомные слои	% Ошибка	Δz собственные данные за один шаг
d	332.2	1	-0.8	333.05 \pm 13.20
e	333.9	1	-2.6	
f	686.1	2	2.5	

Атомное разрешение по графиту (1/4)

Уменьшить площадь изображения: .

- Click цветная карта для ее активации. Теперь вокруг цветной карты нарисован синий квадрат .
- Click "Zoom" в верхней панели инструментов наведите курсор мыши на плоскую область (аналогичного цвета) на цветовой карте и нажмите на нее. Теперь программа нарисует квадрат, указывающий на новый диапазон сканирования. Размер нового диапазона сканирования отображается на панели "Инструмент Results" . .
- Change размер нового диапазона сканирования около 30-50 нм (рис. 14), щелчком мыши и перетаскиванием угла квадрата. .
- Double щелкните по цветной карте, когда новая область сканирования будет установлена так, как вы хотите (или нажмите "Zoom" на панели "Инструменты Result"). Настройки изображения теперь установлены таким образом, что новое измерение будет соответствовать области, которая была обозначена установленным квадратом. Пусть топография воспроизводится стабильно снова. .

Атомное разрешение по графиту (2/4)

PHYWE
excellence in science

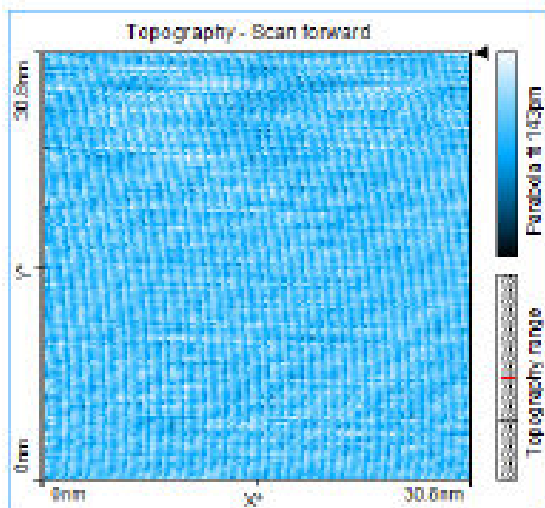


Рис. 14:
Размер изображения: 30 нм, Время/Линия: 0.13 с, Заданное значение: 1.2 нА, Р-образный коэффициент усиления: 1200, I-образный коэффициент усиления: 1500.

Для достижения атомного разрешения размер изображения должен быть еще больше уменьшен, учитывая, что один нанометр - это диаметр от четырех до восьми атомов. Атомные расположения обычно распознаются при размере изображения около 10 - 3 нм (рис. 15). Поэтому: Установите размер изображения на панели изображения 3 нм или используйте опцию "Увеличить" на последнем изображении (рис. 16). Некоторые части сканирующей головки реагируют на малейшие изменения температуры.

Атомное разрешение по графиту (3/4)

PHYWE
excellence in science

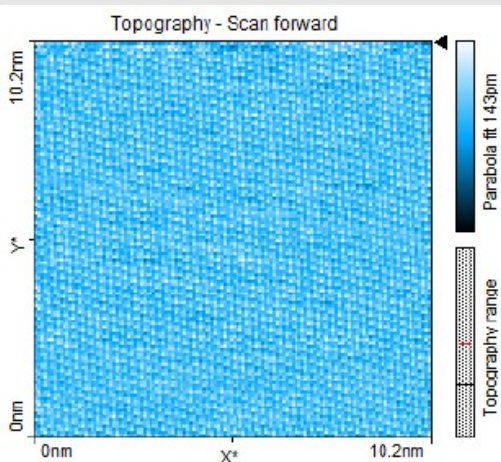
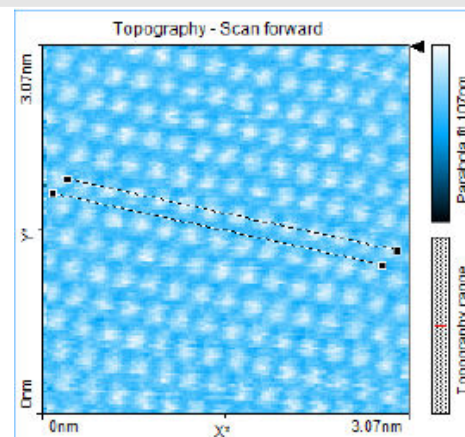


Рис. 15:
Размер изображения: 10 нм, Время/линия: 0,03 с, Заданное значение: 1,2 нА, Р-образный коэффициент усиления: 1200, I-образный коэффициент усиления: 1500.

Рис. 16:
Размер изображения: 3 нм, Время/линия: 0,03 с, Заданное значение: 1,2 нА, Р-образный коэффициент усиления: 1300, I-образный коэффициент усиления: 850.



Атомное разрешение по графиту (4/4)

PHYWE
excellence in science

Поскольку эти тепловые колебания влияют на измерение нанометрического масштаба, образец необходимо сканировать как можно быстрее: Установите "Время/Линия" в панели изображения на 0,03 с (с 128 "Точками/Линиями") для атомного разрешения. С хорошим наконечником и правильно заданными параметрами вы должны иметь возможность наблюдать за атомным расположением, как показано на рисунках. Изображенные данные соответствуют топографическому представлению LDOS (вблизи края Ферми) поверхностных атомов в образце HOPG.

Перед тем, как приступить к интерпретации изображений, давайте посмотрим на атомное расположение HOPG и спросим, какие яркие выступы в изображениях мы наблюдаем.

Гексагональные конструкции (1/4)

PHYWE
excellence in science

Решетчатая структура графита - это так называемая гексагональная наиболее близкая упаковка (h.c.p) с рисунком "ABA". Взгляните на 3D модель графитовой решетки, чтобы привыкнуть к расположению соседних атомов и графеновых листов (один слой). Соберите 3D модель в соответствии с инструкциями (рис. 17). Графеновый лист состоит из атомов углерода (черных шариков в вашей 3D модели) в их спирали.² - гибридное состояние с углом 120° для каждого соединения в x-и-плоскости (рис. 18).

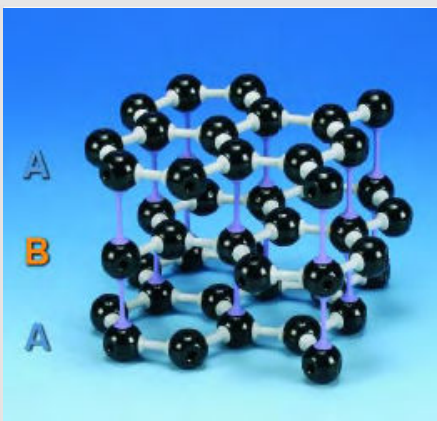


Рис. 17: PHYWE 3D модель графитовой решетки (Набор кристаллических решеток: графит, 39840.00)

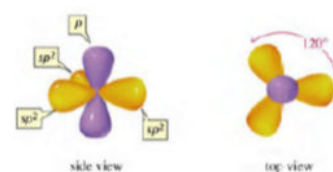


Рис. 18: Эскиз sp^2 -гибридные атомы углерода.

Гексагональные конструкции (2/4)

PHYWE
excellence in science

Это ковалентные связи (обозначенные белыми соединительными частями) от атома к атому в пределах одного слоя (C_6 -кольца). Из одного слоя в другой мы наблюдаем электростатические взаимодействия - силы Ван-дер-Ваальса. В 3D модели эта свободная связь от р-орбитального отталкивания обозначается фиолетовыми соединительными частями.

Расстояние между двумя соседними графеновыми листами в графитовой решетке составляет 0.3348 нм (334.8 пм) (см. рис. 19).

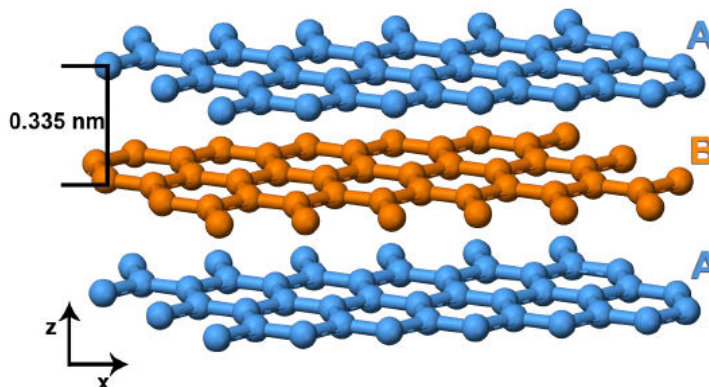


Рис. 19: 3D эскиз графитовой решетчатой структуры (вид сбоку).

Гексагональные структуры (3/4)

PHYWE
excellence in science

Вторым средством, с помощью которого можно обойтись в атомном масштабе, является двухмерная модель графита (рис. 20). Начните с подгонки фольги поверх бумаги, маркер должен показать два круга. Затем переведите диагональ фольги. После этого маркеры должны показывать три круга, что свидетельствует о правильном переводе. Атомы из поверхностного слоя с соседом в нижнем слое выглядят темнее, так как атомы без прямого соседа выглядят ярче. Этот вид соответствует данным визуализации образца HOPG, который вы собираете с помощью STM.

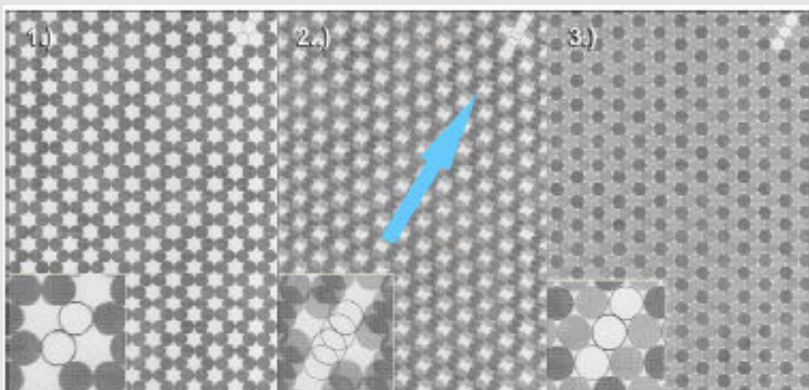


Рис. 20: PHYWE 2D модель (09620.00) атомов поверхности графита и подложки из графенового листа (вид сверху)

Гексагональные структуры (4/4)

PHYWE
excellence in science

Расстояние между двумя рядами атомов одного и того же типа составляет 245 пикометров. От одного атома до следующего его соседа это расстояние составляет 140 пикометров (рис. 21).

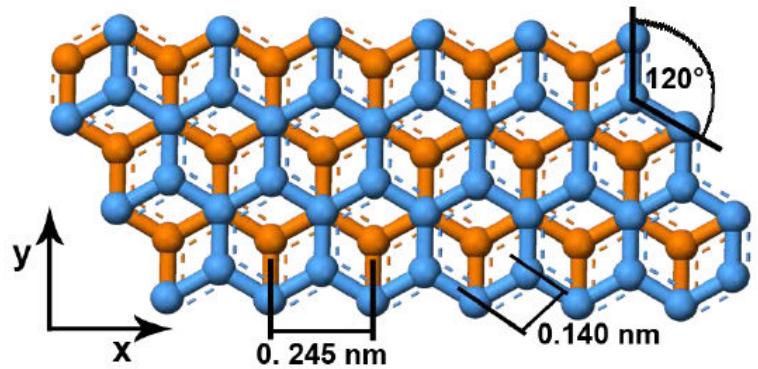


Рис. 21: 2D эскиз структуры графитовой решетки (вид сверху).

Измерения на атомных станциях (1/4)

PHYWE
excellence in science

Имейте в виду, что вы не можете видеть каждый атом "С". 6-кольцо (как светлое пятно), но каждую секунду. Используйте 2D модель поверхности графита, чтобы сравнить ее с полученными изображениями (также см. Рис. 22).

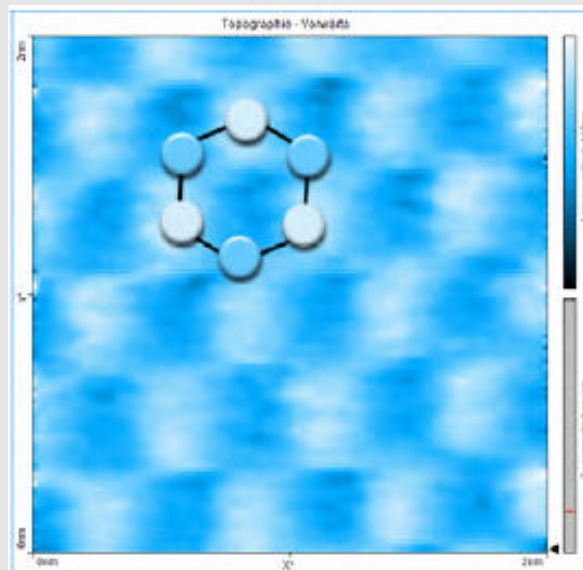


Рис. 22: Гексагональный рисунок показывает электронную и топографическую структуру поверхностных атомов

Измерения расположения атомов (2/4)

PHYWE
excellence in science

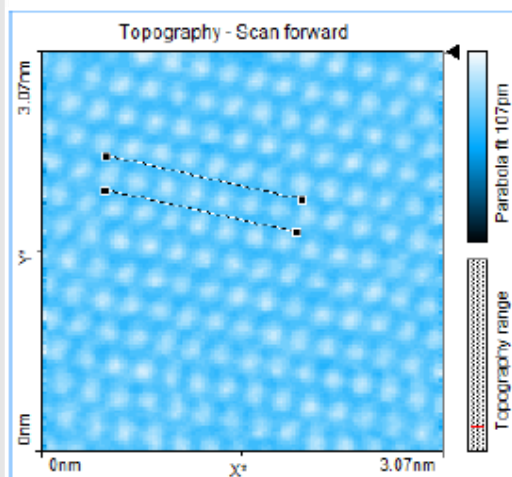


Рис. 23:
Измерение
расстояния.
Расстояние
между
линиями:
 $d=252,7$

Каждый второй атом имеет соседа в слое под ним. Каждый атом из верхнего слоя теряет электронную плотность к прямому соседу в слое под ним, что делает их более темными на изображениях STM. Атомы без прямого соседа в нижнем слое имеют полную электронную плотность и появляются в виде светлых пятен. Как упоминалось выше, полезно выполнять измерения с помощью линий ("Измерение расстояния") вместо измерения от точки к точке ("Измерение длины"). Теперь определите расстояние между атомами. Можно нарисовать линии для измерения между соседними атомами (Рис. 21) или между атомами следующей строки (Рис. 23).

Измерения расположения атомов (3/4)

PHYWE
excellence in science

Желаемую информацию можно также получить из поперечного сечения. Нарисуйте линию через ряд атомов и выполните измерение расстояния на изображении графика. Здесь можно снова решить, нужно ли измерять от одного атома к другому (от холма к долине, расстояние припл. $d = 140 \text{ pm}$) или от атома до атома (от холма до холма см. рис. 24 или от долины до долины, расстояние ок. $d = 245$ вечера). Для повышения точности измерений и уменьшения систематических погрешностей измерьте расстояние от 5 до 10 рядов и разделите его на количество рядов, и в итоге вы также получите расстояние от ряда к ряду. Например, единичное измерение на рис. 23 дает расстояние от ряда к ряду, равное $d=248,5$, делая одну и ту же меру за 5 рядов ($d=1231,5$ вечера) уменьшает это значение до $d=246.3$ Для сравнения постоянного тока и режима постоянной высоты измерьте расстояние от вершины холма до долины (на рис. 26 - расстояние. $\Delta z=15.3$).

Измерения атомных механизмов (4/4)


 PHYWE
 excellence in science

Сделайте измерения как можно более точными, минимальные различия при прорисовке линии (всего несколько пикселей) могут сильно повлиять на итоговые значения. Для дальнейшей поддержки результатов сделайте быструю оценку средних значений (см. выше) от трех до пяти измерений (больше увеличит точность еще больше). Угол связи между атомами можно определить с помощью инструмента "Измерение угла" (рис. 25).

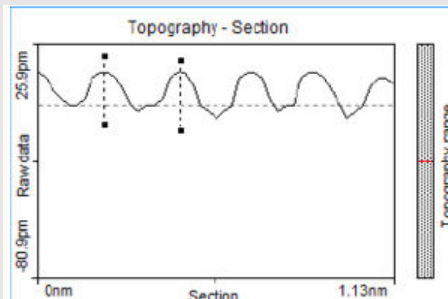


Рис. 24: Поперечное сечение через ряд атомов (см. Рис. 15). Расстояние между линиями: $d=248,5$ нм (от холма до холма). $\Delta z=15,3$ нм (от вершины холма до

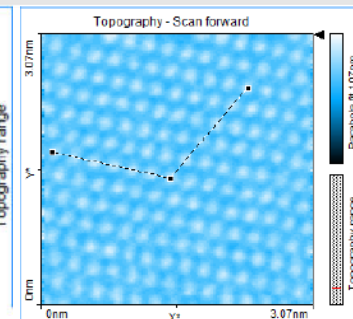


Рис. 25: Измерение угла. Угол между линиями: $\alpha=118,8$

Съемка в режиме постоянной высоты (1/8)


 PHYWE
 excellence in science

Все изображения до сих пор были получены в режиме постоянного тока, где ток между наконечником и образцом остается постоянным. Расстояние между ними пропорционально протекающему туннельному току, поэтому расстояние также поддерживается постоянным. Измеряемый сигнал здесь - это удлинение z-пьезо, которое управляет движением наконечника и следует за рельефом поверхности. Перейдем теперь в режим постоянной высоты. Это расширенный режим измерения, в котором высота наконечника над поверхностью образца фиксируется до определенного значения. Сигнал измерения - это ток наконечника, протекающий между наконечником и образцом.

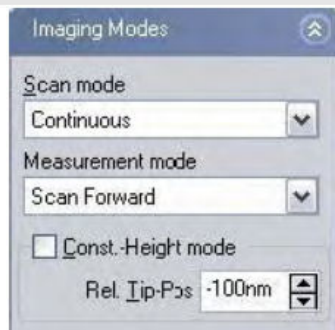
Будь осторожен: При слишком резком изменении параметров сканирования вполне вероятно, что вы врежете наконечник в образец.

Сначала включите расширенный пользовательский интерфейс программного обеспечения ("Опции → Настройка пользовательского интерфейса"). Теперь вы найдете несколько опций и параметров для настройки. Для проведения измерения в режиме постоянной высоты проверьте "Режим Const.-Height" на панели "Режимы съемки" в окне съемки (рис. 26).

Изображение в режиме постоянной высоты (2/8)

PHYWE
excellence in science

Рис. 26:
Панель
режимов
визуализации
в окне
визуализации



Теперь ты можешь настроить "Rel. Tip-Pos." - это расстояние, на которое переносится наконечник или по направлению к образцу из положения, соответствующего заданной точке. Отрицательная установка сместит наконечник от образца.

Теперь сканер сканирует по прямой, которая должна быть параллельна поверхности образца. Наклон линии определяется параметрами x- и y- наклона в секции параметров изображения на панели изображений. Высота линии определяется в начале каждой линии сканирования: Сначала включается z-контроллер. После того, как положение наконечника стабилизировалось, z-контроллер выключается и наконечник удаляется от образца на расстояние, заданное параметром "Rel. Tip-Pos.". Начните съемку с относительно большого размера изображения 40 - 60 нм и привыкайте к этому режиму (рис. 27).

Изображение в режиме постоянной высоты (3/8)

PHYWE
excellence in science

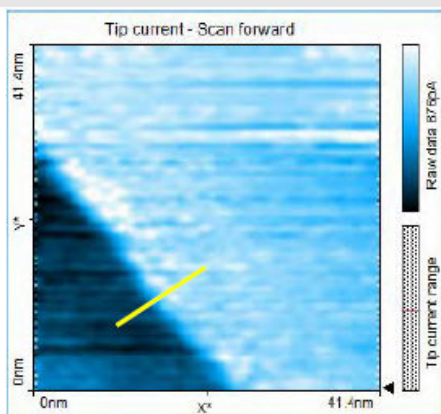


Рис. 27: Изображение постоянной высоты. Размер изображения: 40 нм, Время/Линия: 0.2 с, Заданное значение: 1.2 нА. Rel. Tip-Pos.: -0.05 нм.

Переключитесь на соответствующий измерительный сигнал (Tip Current) в выпадающем меню "Выбор сигнала", расположенном на главной панели инструментов. В большинстве случаев для получения хорошего значения относительного положения наконечника требуется несколько попыток. Начните с безопасных значений около -25 нм, если вы закончите с пустым (черным) окном изображения, вы можете уменьшить значение с небольшим шагом (до -15, -5, -1, -0.5, -0.25, -0.125, -0.075 нм и т.д.). Внимательно посмотрите в окно визуализации и подождите, пока не получите воспроизводящийся сигнал тока наконечника. Регулировку сканирования можно произвести только путем изменения тока наконечника (уставки), напряжения наконечника и относительного положения наконечника над поверхностью образца.

Изображение в режиме постоянной высоты (4/8)

PHYWE
excellence in science

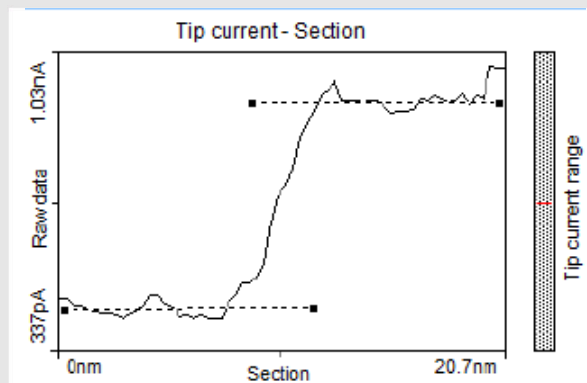


Рис. 28: Размер шага соответствует разнице в туннельном токе 578,6 pA (или 334,8 pm, один атомный слой).

Похоже, что на получаемые изображения шум влияет гораздо больше, чем на изображения, сделанные в режиме постоянного тока, так как контур обратной связи отключен, и малейшие топографические различия дают изменение сигнала тока наконечника. Некоторые другие особенности Вашего образца, такие как специальные электронные состояния поверхностных атомов, могут быть видны только в этом режиме.

Высота ступеней террас не может быть измерена непосредственно в этом режиме, потому что у вас есть ток наконечника в виде z-сигнала. Значения тока наконечника можно соотнести с высотой ступеней террасы, которую вы измеряли ранее в режиме постоянного тока, по сечению. Для этого с помощью инструмента "Измерение длины" можно просмотреть значения Δz , отображаемые на панели "Результаты работы инструмента" (см. Рис. 28).

Съемка в режиме постоянной высоты (5/8)

PHYWE
excellence in science

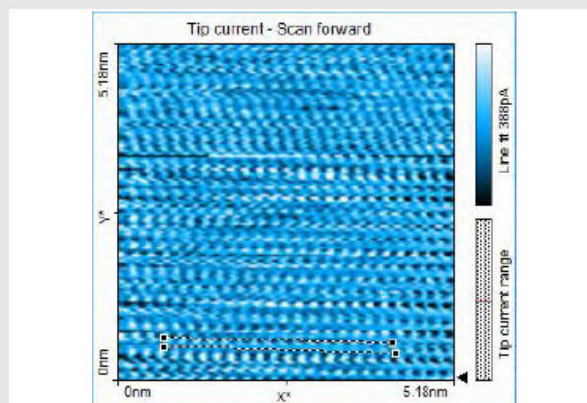


Рис. 29: Изображение постоянной высоты. Размер изображения: 5 нм, Время/Линия: 0.03 с, Заданное значение: 1.2 нА, Rel. Tip-Pos.: -0.14 нм. Расстояние между линиями: $d=150.1$ вечера.

Измерение расстояний производится по той же процедуре, что и выше. Выбирайте точки измерения с умом, избегайте наклонных плоскостей и сканирования артефактов. Запомните экспоненциальную зависимость тока туннелирования и расстояния между ними:

$$I \propto c_1 \cdot U \cdot \exp(-c_2 \cdot d_z)$$

Измерение разности тока на фиг. 28 дает $\Delta I=578,6$ pA и соответствует высоте ступени одной атомной террасы с $\Delta z=334,8$ вечера. Поперечное сечение через атомный ряд (рис. 30) показывает, что разница в течении от вершины холма до долины составляет $\Delta I=81,68$ pA и соответствует $\Delta z=15,3$ вечера мы нашли ранее (рис. 24). Разность высот (расстояние между наконечниками образца) 0.1 нм увеличит измеряемый ток примерно на один порядок величины.

Съемка в режиме постоянной высоты (6/8)

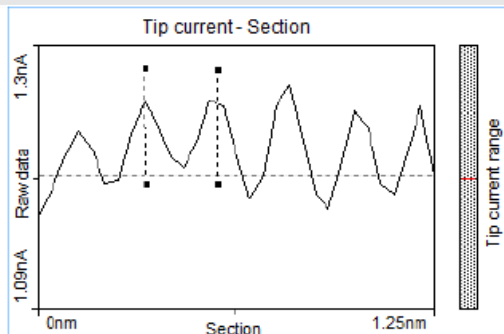

 PHYWE
 excellence in science


Рис. 30: Поперечное сечение: Расстояние между линиями: $d=235.1$ pm (от холма до холма, от холма до долины дает: $d=117.4$ pm. Расстояние z от вершины холма до долины соответствует измеренному току: $\Delta I=81.68$ pA

На рис. 29 в примере измерения от одной строки к другой (атом к атому) дается расстояние от $d=150.1$ вечера. Здесь мы находим

ап погрешность около 6% и не соответствует ожидаемым значениям из теории (140 часов вечера). Повторите свои измерения, чтобы иметь возможность уменьшить ошибки и получить лучшие значения путем усреднения данных (см. выше). Используйте второй метод для измерения расстояния в несколько рядов (здесь 5, $d=720,5$ вечера) уменьшает значение до 144,1 вечера с погрешностью 2%.

Съемка в режиме постоянной высоты (7/8)

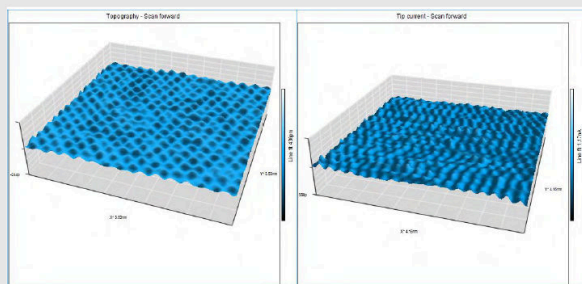

 PHYWE
 excellence in science


Рис. 31: Трехмерное представление постоянных текущих данных (слева) и постоянных данных высоты (справа).

Если вас не устраивает качество изображения, попробуйте настроить ток наконечника и относительную высоту над образцом. Уменьшение тока наконечника приведет к тому, что наконечник окажется на большем расстоянии от образца, уменьшая вероятность того, что наконечник столкнется с препятствиями на поверхности образца (увеличение относительной высоты будет иметь аналогичный эффект, не уменьшая взаимодействия образца наконечника с образцом).

По окончании измерений Вы также имеете возможность представить Ваши данные в формате 3D (рис. 31) (см. главу 4.4.3 и 4.5 руководства пользователя). Выберите "3D View" в выпадающем меню "Выбрать диаграмму Type". Затем отрегулируйте внешний вид до тех пор, пока Вы не будете удовлетворены внешним видом:

Изображение в режиме постоянной высоты (8/8)

Всегда нажимайте и удерживайте левую кнопку мыши на 3D-видокарте при изменении 3D-видоискателя. При нажатии левой кнопки мыши поверхность становится менее сложной. Нажмите следующие дополнительные кнопки/кнопки, чтобы определить, какое свойство графика изменено: .

- Surface поворотная мышь слева/right
- Surface наклон мыши вверх/вниз.
- Size отображаемая поверхность "Ctrl"- клавиша + мышь вверх/down .
- Surface позиция "Shift"-key + мышь вверх/вниз/лево/право Увеличение по Z-балльной шкале левая кнопка мыши + правая кнопка мыши + мышь вверх/down .
- Light направление источника (360°) "Shift"+"Ctrl"-клавиша + мышь слева/right .
- Light высота источника (0°-90°) "Shift"+"Ctrl"-key + mouse up/down .