

© 1991

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ТРЕНИЯ
НА АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИЮ.Н. М о и с е е в, В.И. П а н о в,
С.В. С а в и н о в

Развитие методов изучения поверхности привело к созданию силовых микроскопов, принцип действия которых основан на измерении малых сил (10^{-6} – 10^{-12})Н, действующих между поверхностью образца и острием, подносимым к поверхности на расстояние (0.1–10)нм [1].

Среди силовых микроскопов наилучшим разрешением обладает атомно-силовой микроскоп (АСМ), использующий межатомное взаимодействие между острием и поверхностью. Важной особенностью АСМ является возможность исследовать с его помощью поверхности любых веществ, включая диэлектрики и биологические объекты, а также определять зависимость межатомных сил от расстояния между острием и поверхностью и находить константы этих взаимодействий [2]. Вместе с тем возможность применения АСМ для диагностики поверхности раскрыты неполностью, а получение атомного пространственного разрушения остается достаточно сложной проблемой.

По этим причинам в настоящей работе изучалось влияние сил трения, возникающих между зондирующим острием и поверхностью, на пространственное разрушение и получаемое с помощью АСМ изображение, а также продемонстрирована возможность исследовать силы трения в атомных масштабах и энергию связи атомов поверхности.

Объектом исследования служила поверхность скола высокоориентированного пиролиитического графита. Проведенные ранее в работах других авторов [3–5] исследования показали, что амплитуда гофрировки, характеризующая расстояние между минимумом и максимумом в поверхностной решетке графита, может составлять от 0.15 до 2 Å. В частности, в работе [6] такая аномалия наблюдалась при измерении сил трения между поверхностью графита и острием. В нашей работе для изучения структуры поверхности графита использовался усовершенствованный вариант атомно-силового микроскопа, описанного ранее в [7]. В качестве кронштейна, на котором крепилось зондирующее острие атомно-силового микроскопа, использовался серебряный цилиндрический стержень диаметром 40 мкм и длиной 2.5 мм, покрытый тонким (~ 1 мкм) слоем золота. Кронштейн обладал механической жесткостью $K_{\mu} =$

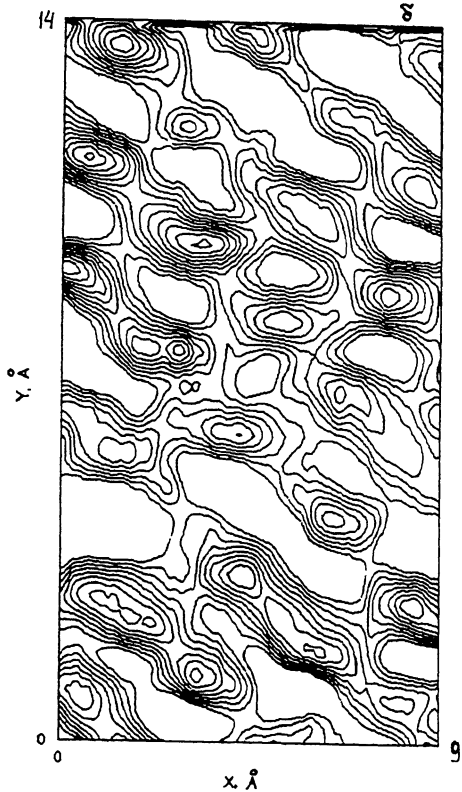
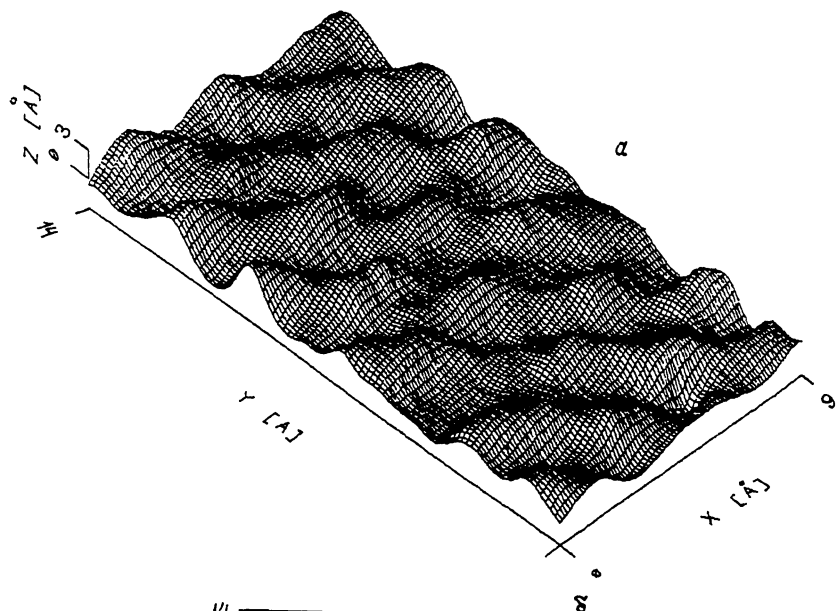


Рис. 1. Изображение участка поверхности графита. Размер кадра $14 \times 9 \text{ \AA}$ (а, б).

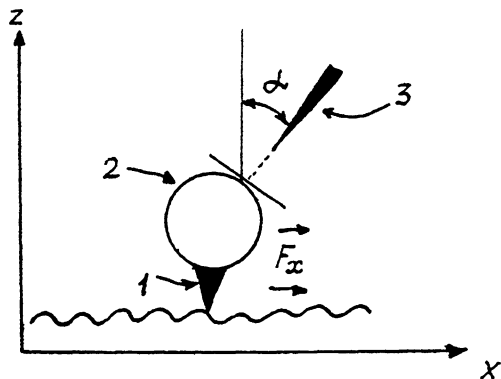


Рис. 2. Схема относительного расположения элементов АСМ. 1 — острое атомно-силового микроскопа, 2 — кронштейн, 3 — игла туннельного датчика.

$=2\text{Н/м}$, а его резонансная частота $\omega = 9.8$ кГц. Острие атомно-силового микроскопа было изготовлено из лейкосапфира (Al_2O_3) и приклеено к кронштейну эпоксидным клеем. Положение кронштейна регистрировалось с помощью туннельного датчика перемещений, имеющего чувствительность не хуже 0.1 \AA . В процессе измерений туннельный ток между кронштейном и Pt-Ir иглой туннельного датчика устанавливался на уровне 0.5 нА .

Исследуемый образец закреплялся в держателе на трехкоординатном пьезоманипуляторе. Электронная цепь обратной связи была замкнута на пьезоманипулятор таким образом, чтобы при сканировании образца под острием регистрировалась поверхность постоянной силы. Перед измерениями образец высокоориентированного графита был очищен на воздухе путем скола с помощью липкой ленты.

На рис. 1, а, б приведено изображение поверхности графита размером $14 \times 9 \text{ \AA}$, полученного с помощью атомно-силового микроскопа. Из рисунка видно, что наблюдаемая в настоящем эксперименте амплитуда гофрировки составляет 4.2 \AA . Расстояние между максимумами гофрировки хорошо соответствует расстоянию между A -атомами в поверхностной решетке графита — 2.46 \AA и составляет $\sim 2.5 \text{ \AA}$. АСМ изображение атомной решетки графита получено при среднем значении силы отталкивания между острием атомно-силового микроскопа и поверхностью графита равной $F_N \approx 10^{-7} \text{ Н}$. При этом значении силы F_N изображение воспроизводилось без дефектов на повторных кадрах изображения одного и того же участка поверхности.

Наблюдаемое anomalно большое значение амплитуды гофрировки может быть объяснено наличием силы трения, возникающей между острием АСМ и поверхностью при сканировании. На рис. 2 показано относительное расположение иглы туннельного датчика и

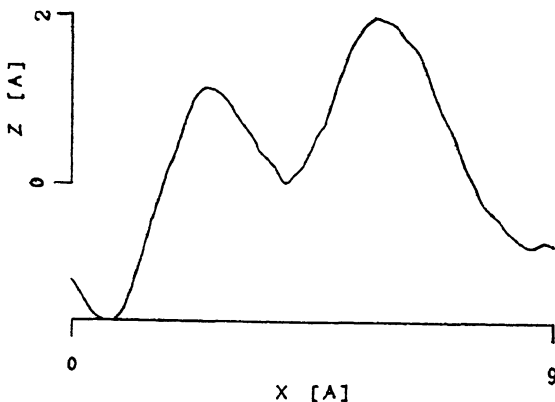


Рис. 3.

измерительного кронштейна атомно-силового микроскопа. Игла туннельного датчика размещена под углом $\alpha \approx 30^\circ$ к направлению Z , перпендикулярному к плоскости сканирования. При таком расположении изменения туннельного тока, протекающего между иглой и поверхностью кронштейна обусловлены как вертикальной (в направлении Z), так и горизонтальной составляющими перемещений кронштейна. Вертикальная составляющая перемещения кронштейна определяется непосредственно рельефом поверхности. Появление горизонтальной составляющей обусловлено наличием трения между иглой и поверхностью графита.

В самом деле, при сканировании кронштейн отклоняется в направлении Z за счет изменения реальной высоты рельефа $\Delta z = a(x, y)$ и на величину Δx в направлении x за счет силы трения, возникающей при взаимодействии атомов острья и поверхности. В такой схеме измерений регистрируемое туннельным датчиком изменение расстояния между острием и кронштейном

$$\Delta S = \Delta z \cdot \cos \alpha + (\Delta F_x / K) \sin \alpha.$$

Отсюда следует, что наличие силы трения ΔF_x может значительно увеличивать регистрируемую амплитуду ΔS изображения рельефа поверхности. Запись силы локального трения при движении острья вдоль одного из сканов приведена на рис. 3. В наших экспериментах наблюдалось изображение атомной структуры графита с высотой „рельефа“ до $\Delta S(x, y) \approx 4.2 \text{ \AA}$. При жесткости кронштейна $K_{\mu} \approx 2 \text{ Н/м}$ такое значение ΔS отвечает (в соответствии с формулой (1)) средней величине силы трения $\Delta F \approx 2 \cdot 10^{-9} \text{ Н}$ и коэффициенту трения $\eta = F_N / \Delta F_x \approx 0.02$. Необходимо отметить, что эти величины относятся к атомным масштабам.

Полученное изображение атомной структуры графита указывает на то, что силовое взаимодействие осуществлялось между единичными атомами острья и поверхности графита. Это позволяет оценить

энергию деформации E_x , приходящуюся на единичный атом поверхности вследствие действия силы ΔF_x . В условиях эксперимента ее величина составляла $E_x = K_{\mu} \cdot \Delta x^2 / 2 \approx 1.5$ эВ, что не превышает ни энергии связи α - и β -атомов в решетке графита, ни энергии связи атомов материала острия и, следовательно, позволяет получать воспроизводимое в атомных масштабах изображение.

В то же время изменением K_{μ} и F_N можно создавать условия, при которых за счет действия силы F_x будет осуществляться разрыв межатомных связей для тех поверхностных атомов, которые непосредственно взаимодействуют с острием. Это даст возможность использовать АСМ также для экспериментального определения энергии межатомных связей в поверхностной решетке исследуемого вещества.

Наши предварительные результаты продемонстрировали возможность таких измерений как для единичных атомов решетки, так и кластеров, находящихся на поверхности графита.

Таким образом, проведенные исследования демонстрируют возможность использования сканирующих силовых микроскопов для определения энергии связи поверхностных атомов, кластеров и др. для изучения сил трения в нанометровых масштабах и для „контрастирования“ получаемых с помощью АСМ изображений рельефа поверхности.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] B i n n i g G., R o h r e r H. // Phys. Rev. Lett. 1986. V. 56. P. 930.
- [2] Моисеев Ю.Н., Мостепаненко В.М., Панов В.И., Соколов И.Ю. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 20. С. 5.
- [3] M a r t i O., D r a k e B., G o u l d S. and H a n s m a K. // J. Vac. Sci. and Technol. 1986. A6. P. 287.
- [4] A l b r e c h t T.R., O u a t e C.F. // J. Appl. Phys. 1987. V. 62. P. 2599.
- [5] S u g a w a r a Y., I s h i z a k a T., M o r i t a S. et al. // Jap. J. of Appl. Phys. 1990. V. 29. P. L502.
- [6] M a t e C.M., M c C l e l l a n d G.M., E r l a n d s s o n R., C h i a n g S. // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 59. P. 1942.
- [7] Васильев С.И., Леонов В.Б., Моисеев Ю.Н., Панов В.И. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. С. 727.

Московский
государственный
университет
им. М.В. Ломоносова

Поступило в Редакцию
4 марта 1991 г.