

СТМ ИЗОБРАЖЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ (001) РЬ С АТОМНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

А.М.Трояновский, В.С.Эдельман*

*Институт физических проблем им. П.Л.Капицы РАН
117334 Москва, Россия*

**Институт физики высоких давлений РАН
142092 Троицк, Московская обл., Россия*

Поступила в редакцию 25 февраля 1993 г.

Сообщается о наблюдении методом сканирующей туннельной микроскопии на поверхности (001) свинца атомно гладких террас размерами в несколько сотен ангстрем, разделенных ступенями с высотой, равной межплоскостному расстоянию, и атомной картины поверхности с амплитудой атомной гофрировки, достигающей $1,4 \text{ \AA}$.

Механизм формирования изображения в сканирующем туннельном микроскопе (СТМ) с атомным разрешением теоретически исследовался во многих работах (см. обзоры ^{1,2}). В полупроводниках электроны, принимающие участие в туннелировании, достаточно сильно локализованы на ионах решетки, что приводит к значительной гофрировке поверхностей их постоянной плотности. Соответственно вариации δz положения по координате z , заканчивающегося одним атомом острия СТМ при сканировании вдоль поверхности, отслеживающего эту гофрировку, составляют порядка ангстрема. Иначе обстоит дело в металлах, где электроны проводимости делокализованы, и ожидаемая амплитуда δz на не реконструированных гранях должна быть мала ¹. Тем не менее, на целом ряде металлов Au ³, Ag ⁴, Ga ⁵ надежно наблюдалась атомная структура поверхности с $\delta z \sim 0,2 - 0,5 \text{ \AA}$. Более того, для алюминия ⁶ δz достигает 1 \AA , а для графита может в зависимости от условий эксперимента даже превосходить межплоскостное расстояние ⁷. Для объяснения такого аномального поведения привлекают соображения, основанные на учете силового взаимодействия острия с атомами поверхности. Для графита с его малой жесткостью усиление эффекта из-за деформации под воздействием острия представляется правдоподобным ⁷. В то же время, объяснение большой амплитуды эффекта на алюминии тем, что за изображение ответственны легко деформируемые микрочастицы, прилипающие к кончику острия ⁶, представляется искусственным. В свете изложенного нам кажутся интересными результаты по наблюдению атомно разрешенных изображений поверхности свинца, изложенные в данной работе.

Измерения проводились на монокристаллах свинца размерами $4 \times 2 \times 1 \text{ мм}$, отрезанных на искровом станке от больших плоских кристаллов, изготовленных методом направленной кристаллизации из расплава в разборной кварцевой оптически полированной форме из исходного материала чистотой на уровне $10^{-4}\%$. Ранее на этих кристаллах исследовался циклотронный резонанс ⁸, наблюдение которого свидетельствует о высоком их качестве. Нами изучалась поверхность кристалла, не подвергавшаяся искровой обработке. Перед установкой в СТМ образец обрабатывался в полирующем растворе $\text{H}_2\text{CO}_3 + 20\% \text{H}_2\text{O}_2$ для удаления образовавшегося за время хранения окисного слоя толщиной в

несколько микрон. Кристалл устанавливался в СТМ⁹ в держателе образцов, который можно было прогревать "in situ" до температуры плавления свинца. Измерения проводились в вакууме до 10^{-9} торр. Для получения атомно-чистой поверхности свинца он обрабатывался в течение нескольких часов ионами Ag^+ с энергией 4 кВ, падающими на поверхность под углом $10-20^\circ$. Плотность ионного тока была порядка $0,1 \text{ мкА/мм}^2$. Одновременно образец нагревался до температуры $250-300^\circ\text{C}$ для отжига дефектов, возникающих при ионной бомбардировке. После охлаждения образца до комнатной температуры снимались СТМ-изображения различных участков его поверхности.

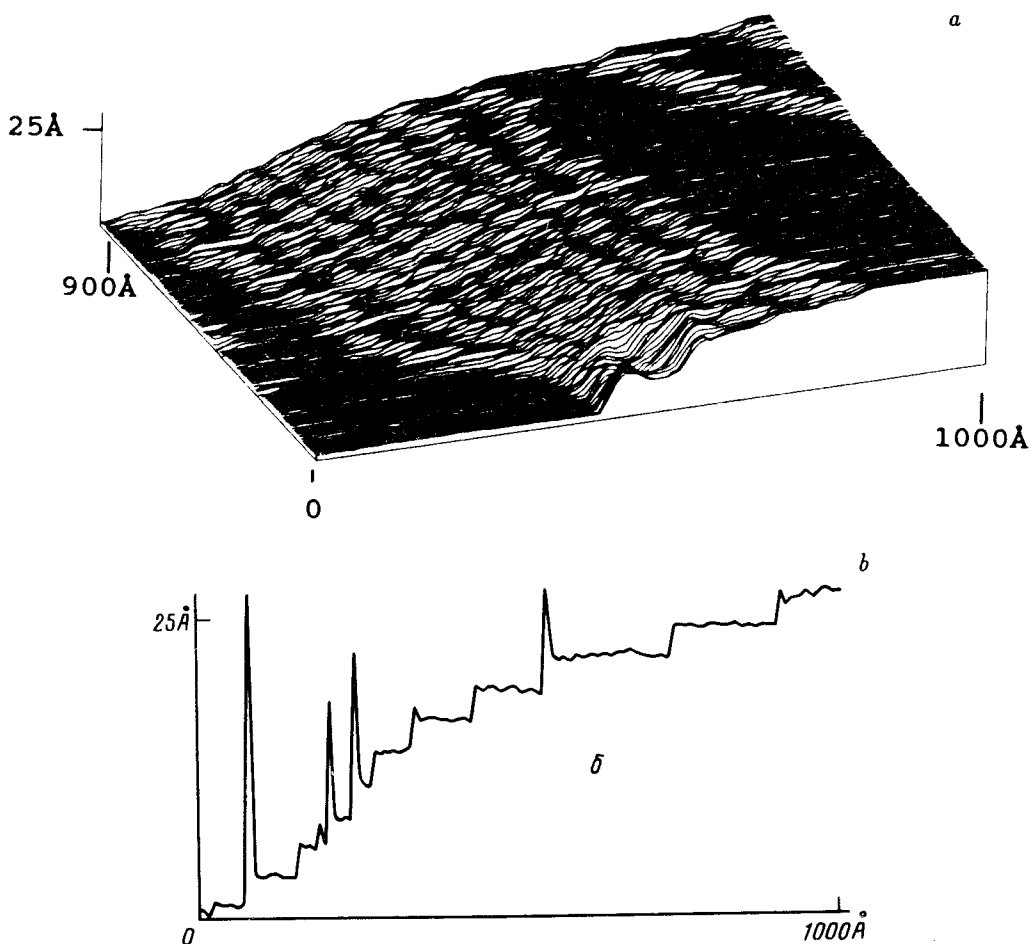


Рис.1. *a* – Топограмма участка поверхности (001) свинца, сглаженная для уменьшения шума; *b* – сечение топограммы вдоль самой дальней строки (без математической обработки). Видны ступени с высотой, равной межплоскостному расстоянию в свинце $2,48 \text{ \AA}$. Напряжение острие – образец – 7 мВ , ток – $0,13 \text{ нА}$

После проведенной обработки поверхности образца наблюдались изображения поверхности, составленной из отдельных атомно гладких террас с размерами в несколько десятков – сотен ангстрем (рис.1). По высоте ступеней между террасами, равной межплоскостному расстоянию в свинце $2,48 \text{ \AA}$, была произведена калибровка нашего СТМ по оси z . Отметим, что на границе террас

сигнал становился нестабильным – наблюдались броски тока и, соответственно, положения острия, хорошо видные на рис.1*b*. Вследствие нестабильности границы террас выглядят несколько размытыми. Причина этого явления пока не ясна, однако захват атомов на острие можно исключить, поскольку сохраняются уровни террас в направлении, перпендикулярном строчной развертке, и при смене направления строчной и кадровой разверток изображения неплохо воспроизводятся.

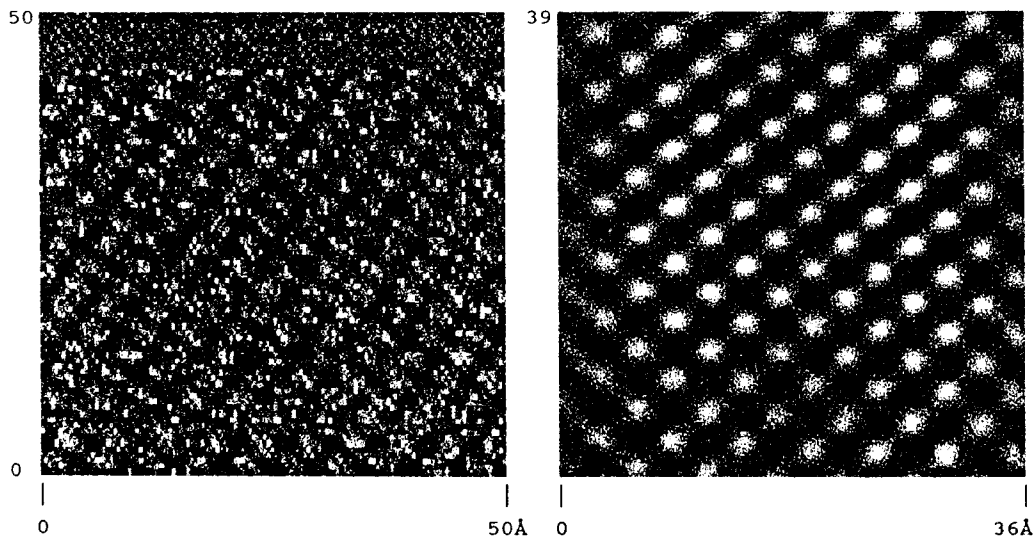


Рис.2. СТМ-изображения, демонстрирующие атомную картину двух участков на поверхности (001) свинца; *a* – экспериментальная запись без фильтрации шума. Вверху кадра видно исчезновение атомной картины при переходе от одной строки развертки к другой. Искажение углов связано с дрейфом за время измерений; *b* – картина другого участка. Для уменьшения шума проведена фурье-обработка. Перепад от светлого участка к темному – 2 \AA (*a*) и 1 \AA (*b*). Время регистрации кадра – 200 с (*a*) и 44 с (*b*). Напряжение игла-образец – 7 мВ (*a*) и 11 мВ (*b*), ток – 0,13 нА (*a*) и 0,1 нА (*b*)

В пределах отдельных террас характерный уровень шума составлял $\sim 0,1\text{ \AA}$, и во многих случаях на СТМ-изображениях отчетливо проявлялась периодическая структура, отвечающая симметрии плоскости (001) (рис.2). Амплитуда атомной гофрировки δz изменялась от опыта к опыту, при этом проявлялась корреляция амплитуды с условиями опыта: при уменьшении сопротивления туннельного промежутка от 110 до 25 МОм максимальная при фиксированном сопротивлении амплитуда увеличилась от 0,6 до $1,4\text{ \AA}$. Однако при постоянном сопротивлении она могла меняться в несколько раз. Более того, даже в ходе одного опыта δz могло измениться скачком (при этом среднее расстояние z практически не изменялось). Так, на верхней части рис.2*a* атомной структуры не видно вовсе, причем ее исчезновение произошло при переходе от одной строки развертки к другой. Скорее всего, это отвечает изменению конфигурации кончика острия при случайном захвате или потере отдельных атомов с поверхности образца, или из-за диффузии их по острию.

Таким образом, в случае свинца амплитуда гофрировки СТМ-изображений может превышать 1 \AA . В то же время, можно предложить аргумент, отвергающий усиление благодаря механическому взаимодействию. В ходе опытов

мы для контроля чистоты поверхности модулировали положение образца по координате z с частотой ~ 2 кГц, превышающей быстродействие обратной связи. При этом амплитуда модуляции туннельного тока становилась сравнимой с самим током при размахе $z_\nu \approx 0,5 - 1 \text{ \AA}$, что близко к ожидаемому исходя из известной работы выхода для свинца и вольфрама (материал острия). Приняв, например, ван-дер-ваальсово взаимодействие, легко оценить, что если механическая жесткость системы столь мала, что возникает десятикратное усиление наблюдаемой атомной гофрировки, то при расстоянии образец - острие порядка межатомного на тот же (или более) порядок величины необходимо увеличить z_ν , чтобы увидеть модуляцию туннельного тока.

В работе ¹⁰ показано, что усиление может вызываться перестройкой электронных волновых функций в зазоре из-за взаимодействия атомов острия и поверхности образца. Отметим, однако, что в отличие от опытов ^{3,6,7}, в которых δz становилось большим $0,3 \text{ \AA}$ при сопротивлениях туннельного промежутка $R < 10 \text{ МОм}$, в нашем случае подобная амплитуда реализуется при $R \approx 100 \text{ МОм}$. Если учесть, что значение R характеризует перекрытие волновых функций, представляется, что надо искать иной, чем предложено в ¹⁰, механизм явления. В этой связи хотелось бы обратить внимание на расчет, предложенный в ¹¹, согласно которому уже при температуре, вдвое меньшей температуры плавления, амплитуда тепловых колебаний атомов поверхности становится сопоставимой с межатомным расстоянием. При этом надо иметь в виду, что, аналогично случаю туннелирования электронов из жидкого гелия в вакуум ¹², спадающая по экспоненте вероятность застать атом на расстоянии от поверхности, заметно превышающем среднюю амплитуду тепловых колебаний, перекрывается ростом вероятности туннелирования. Поэтому атомы, далеко отошедшие от среднего положения, дают основной вклад в туннельный ток, и тем самым можно ожидать, что большие значения δz в свинце обязаны тепловому движению.

Мы благодарны А.Ф.Андрееву за интерес к работе. Мы отдаем дань памяти М.С.Хайкина, инициировавшего работы по СТМ в нашей лаборатории, и Р.Т.Миной, изготовившего кристаллы свинца. Г.С.Чернышеву мы благодарны за техническую помощь.

-
1. P.K.Hansma and J.Tersoff, J. Appl. Phys. **61**, (2), R1 (1987).
 2. В.С.Эдельман, ПТЭ N5, 25 (1989); N1, 24 (1991).
 3. V.M.Hallmark, S.Chiang, J.F.Rabolt et al., Phys. Rev. Lett. **59**, 2879 (1987).
 4. W.Obretenov, H.Höpfner, W.J.Lovens et al., Surface Sci **271**, 1/2, 191 (1992).
 5. O.Züger and U.Dürig, Phys. Rev. B **46**, 7319 (1992).
 6. J.Wintterlin, J.Wiechers, H.Brune et al., Phys. Rev. Lett. **62**, 59 (1989).
 7. J.M.Soler, A.M.Baro, N.Garcia and H.Rohrer, Phys. Rev. Lett. **57**, 444 (1986).
 8. М.С.Хайкин, Р.Т.Мина, ЖЭТФ **42**, 35 (1962).
 9. V.S.Edelman, A.M.Troyanovskii, M.S.Khaikin et al., J. Vac. Sci. Technol, B **9**(2), 618 (1991).
 10. S.Ciraci, A.Baratoff, and I.P.Batra, Phys. Rev. B **42**, 7618 (1990).
 11. X.J.Chen, F.Ercolessi, A.C.Levi, and E.Tosatti, Surface Sci, **264**, 207 (1992).
 12. G.W.Rayfield and W.Shoepe, Low Temperature Physics - LT 13, New-York - London: Plenum Press 1974, p.469.