

02;11;12

Описание силовых поверхностей в атомно-силовой микроскопии с учетом подвижности атомов решетки

© Е.В. Благов¹, Г.Л. Климчицкая², В.М. Мостепаненко¹¹ Исследовательско-внедренческое предприятие "Модус",
125047 Москва, РоссияСеверо-западный заочный политехнический институт,
191186 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 12 августа 1997 г. В окончательной редакции 20 октября 1998 г.)

Расчитаны поверхности постоянной силы и профили горизонтальной составляющей силы при сканировании острия атомно-силового микроскопа над поверхностью решетки плотной упаковки в контактной моде с учетом подвижности атомов решетки. Показано, что при учете подвижности обнаруженные ранее разрывы на поверхности постоянной силы возникают при меньших силах сканирования острия над поверхностью, чем в приближении неподвижных атомов. Получены силовые поверхности, возникающие при сканировании над вакансией. Обсуждается возможность использования данных атомно-силовой микроскопии для диагностики точечных дефектов на поверхности твердого тела.

Введение

Метод атомно-силовой микроскопии широко применяется в последние годы при исследованиях микроструктуры поверхности (см., например, [1,2]). Наибольшее разрешение атомно-силового микроскопа (АСМ) по горизонтали к исследуемой поверхности достигается при работе в так называемой контактной моде [3], когда силовое взаимодействие между острием и поверхностью определяется в основном квантово-механическим отталкиванием обменной природы, действующим между их ближайшими атомами. Типичное расстояние между кончиком острия и поверхностью составляет при этом $d \approx (0.5-0.7)a$, где a — равновесное расстояние в невозмущенной кристаллической решетке.

Расчету поверхностей постоянной силы, вдоль которых сканирует острие АСМ, посвящено большое число работ, использующих как приближение неподвижных атомов решетки (см., например, [4-8]), так и учитывающих релаксацию атомов в процессе сканирования [4,9,10]. Как показано в [6-8], при сканировании моноатомного острия над решеткой плотной упаковки при достаточно малых начальных высотах поверхность постоянной силы претерпевает разрывы, сосредоточенные над межатомными промежутками кристаллической решетки. Наличие разрывов на поверхности постоянной силы приводит к утыканию острия АСМ в исследуемую поверхность в месте разрыва, что неоднократно наблюдалось разными авторами [9,11,12]. Это явление обсуждалось также в работе [13]. Для обеспечения непрерывного сканирования при любых начальных высотах необходимо использовать острие, на кончике которого находится кластер, содержащий несколько атомов [4,5,7,8,14].

Поскольку разрывы поверхностей постоянной силы имеют место при достаточно больших силах отталкивания, то представляет интерес изучить это явление, а также рассчитать непрерывные силовые поверхности, возникающие в случае кластерного кончика острия, с

учетом подвижности атомов решетки. Для описания смещений атомов в процессе сканирования без модификации исследуемой поверхности можно использовать простую модель, предложенную в [4]. Ее основные положения состоят в следующем. В самом общем виде потенциальную энергию системы острие АСМ плюс исследуемый образец U можно представить в виде суммы потенциальной энергии взаимодействия атомов острия и образца U_{ts} , а также энергий взаимодействия U_t и U_s атомов острия и образца между собой. В процессе сканирования координаты атомов острия и образца изменяются вследствие атомной релаксации. При заданном положении кончика острия относительно поверхности (при фиксированных x, y) поверхность постоянной силы $z = z(x, y, F_0)$ и координаты отдельных атомов могут быть получены при решении системы уравнений

$$-\frac{\partial U}{\partial z} = F_0, \quad \text{grad } \mathbf{r}_i U = 0, \quad (1)$$

где \mathbf{r}_i — радиус-векторы всех атомов острия и образца, подвижность которых учитывается.

Потенциал U_{ts} может быть получен как сумма парных потенциалов отталкивания Леннарда-Джонса [1], поскольку в контактной моде можно пренебречь всеми другими взаимодействиями, в частности силами притяжения [5]. Что касается потенциалов U_t и U_s , то в следующем разделе они, следуя [4], описываются в гармоническом приближении.

Поверхности постоянной силы над решеткой плотной упаковки с учетом атомной релаксации

Как было отмечено во Введении, поверхности постоянной силы при сканировании острия АСМ над поверхностью образца можно найти, решив систему уравне-

ний (1). Для проведения конкретных расчетов необходим явный вид полной потенциальной энергии системы острия плюс образец U . С целью получения результатов, не зависящих от значения полуэмпирической константы обменного взаимодействия, введем безразмерные координаты, силы и энергии $\tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{r}/a$, $\tilde{F} = F/F_0$, $\tilde{U} = U(F_0a)$, где $F_0 = 12\alpha/d^{13}$ — сила, действующая на моноатомное острие, расположенное на начальной высоте d над атомом поверхности. Тогда

$$\tilde{U}_{ts} = \frac{d^{13}}{12a^{13}} \sum_{i,j} \frac{1}{\tilde{r}_{ij}^{12}}, \quad (2)$$

где суммирование ведется по всем атомам острия и образца, \tilde{r}_{ij} — расстояние между атомами острия и образца.

Учитывая свойства симметрии решетки плотной упаковки, потенциальную энергию атомов образца U_s , рассматриваемую в рамках используемого нами подхода как энергию упругих колебаний решетки [15], можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{U}_s = \frac{1}{2} \sum_{i,k} \tilde{D}_s^{(i,k)} (\Delta \tilde{x}_{(s)i} \Delta \tilde{x}_{(s)k} \\ + \Delta \tilde{y}_{(s)i} \Delta \tilde{y}_{(s)k} + \Delta \tilde{z}_{(s)i} \Delta \tilde{z}_{(s)k}). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь величины $\Delta \tilde{x}_{(s)i} = \tilde{x}_{(s)i} - \tilde{x}_{(s)i}^{(\sigma)}$ и т.д. описывают смещения равновесных положений $\tilde{x}_{(s)i}$ атомов решетки, которые они занимают в процессе сканирования, от их равновесных положений $\tilde{x}_{(s)i}^{(0)}$ в решетке, не взаимодействующей с острием. Фигурирующие в (3) безразмерные константы выражаются через матрицу силовых констант рассматриваемого твердого тела согласно

$$\tilde{D}_s^{(i,k)} = \frac{ad^{13}}{12\alpha} D_s^{(i,k)}. \quad (4)$$

Совершенно аналогично (3) представляется и безразмерная потенциальная энергия атомов острия \tilde{U}_t (с заменой индекса s на t).

Ниже при расчете силовых поверхностей используются две модели острия АСМ: одноатомное острие, на кончике которого расположен только один атом, и кластерное острие, на кончике которого расположен кластер из семи атомов. В первом случае учет смещения единственного атома на кончике относительно остальных атомов острия, фактически не взаимодействующих с атомами образца, не оказывает никакого влияния на получаемые результаты и может вообще не учитываться. Суммирование в формуле (2) проводится при этом только по атомам образца. Во втором случае один из атомов кластера опущен на расстояние h относительно плоскости остальных шести, расположенных в виде шестиугольника со стороной b . Если предположить, что острие представляет собой параболоид вращения с радиусом кривизны $R = 5a/3$, то устойчивое сканирование при любых начальных высотах обеспечивается при $b = 0.85a$, $h = b^2/(2R) \approx 0.22a$ [7,8,16,17].

При решении системы (1) использовались два различных приближения. В рамках первого приближения предполагалось, что каждый атом поверхностного слоя образца смещается только под воздействием непосредственно со стороны острия, причем его смещения не приводят к смещениям соседних атомов решетки. Данное предположение, верное при достаточно малых смещениях, означает, что постоянные $\tilde{D}_s^{(i,k)}$ из (3) равны нулю при $i \neq k$. Поскольку из соображений симметрии следует также, что эти постоянные не зависят от номера атома, то целесообразно ввести обозначение $\tilde{D}_s^{(i,i)} \equiv \tilde{D}_s$. Параметр \tilde{D}_s удобно записать в виде $\tilde{D}_s = 1/\Delta \tilde{l}_s$, где величина $\Delta \tilde{l}_s$ имеет смысл упругого смещения атома образца под действием силы, равной силе сканирования.

На рис. 1 приведено двумерное изображение поверхности постоянной силы, полученное в результате решения системы (1) в рамках первого приближения при начальной высоте сканирования $d = 0.65a$ и подвижности атомов решетки $\Delta \tilde{l}_s = 0.05$ (под действием силы сканирования атом смещается на $0.05a$ от положения равновесия). Двумерное изображение здесь и далее представляет собой результат сечения соответствующих трехмерных поверхностей десятью горизонтальными плоскостями, проведенными с шагом $\Delta \tilde{h} = (\tilde{z}_{\max} - \tilde{z}_{\min})/10$. Более светлый тон соответствует большей высоте, более темный — меньшей. На рис. 1 ясно видны гладкие участки поверхности постоянной силы в областях над атомами исследуемой поверхности и резкие пики в областях между атомами, где поверхность постоянной силы претерпевает разрывы. Попытка решать систему (1) численными методами в области разрывов приводит к расходящемуся итерационному процессу. Отметим, что с учетом подвижности атомов образца начальные высоты сканирования, при которых поверхности постоянной силы являются разрывными, увеличиваются. Так, в приближении фиксированных атомов решетки условие отсутствия разрывов для одноатомного острия есть $d > 0.61a$ [7,8].

Второе, более точное, приближение, которое использовалось при решении системы (1), учитывало, что смещение атомов поверхности под непосредственным воздействием острия АСМ приводит к смещениям и их ближайших соседей, в том числе расположенных во втором атомном слое образца. Иными словами, учитывались смещения всех атомов, принадлежащих к первым координационным сферам тех атомов образца, которые находятся под прямым воздействием острия. Как и выше, предполагалось, что острие непосредственно смещает три атома поверхности, находящихся в вершинах правильного треугольника. Для упрощения расчетов с учетом малости смещений атомов в режиме без модификации поверхности предполагалось также, что смещения соседних с ними атомов не связаны между собой. Тогда безразмерную потенциальную энергию (3)

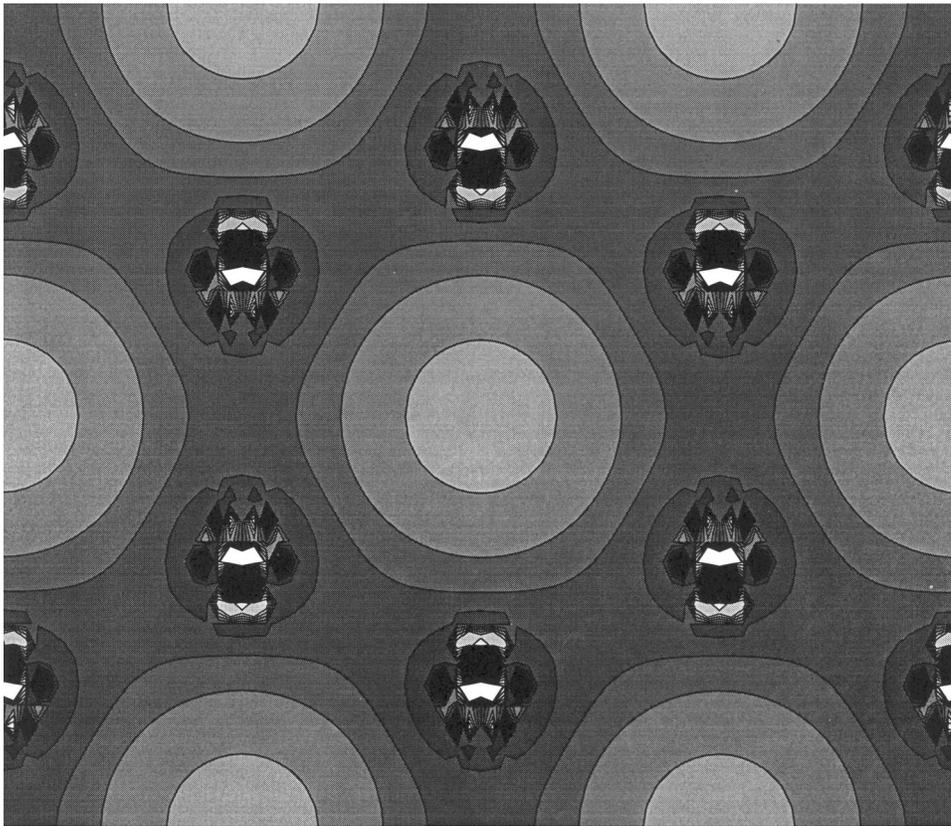


Рис. 1. Двумерное изображение разрывов на поверхности постоянной силы при сканировании одноатомного острья над поверхностью решетки плотной упаковки.

можно записать в виде

$$\begin{aligned} \tilde{U}_s = & \frac{1}{2} \tilde{D}_s \sum_i [(\Delta \tilde{x}_{(s)i})^2 + (\Delta \tilde{y}_{(s)i})^2 + (\Delta \tilde{z}_{(s)i})^2] \\ & + \tilde{D}_s^{(1)} \sum_{i=1}^3 \left(\Delta \tilde{x}_{(s)i} \sum_j \Delta \tilde{x}_{(s)j} + \Delta \tilde{y}_{(s)i} \sum_j \Delta \tilde{y}_{(s)j} \right. \\ & \left. + \Delta \tilde{z}_{(s)i} \sum_j \Delta \tilde{z}_{(s)j} \right) + \tilde{D}_s^{(2)} \sum_{i=1}^3 \left(\Delta \tilde{x}_{(s)i} \sum_k \Delta \tilde{x}_{(s)k} \right. \\ & \left. + \Delta \tilde{y}_{(s)i} \sum_k \Delta \tilde{y}_{(s)k} + \Delta \tilde{z}_{(s)i} \sum_k \Delta \tilde{z}_{(s)k} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь использованы обозначения $\tilde{D}_s^{(1)} \equiv \tilde{D}_s^{(i,j)}$, где индексы i и j нумеруют ближайшие соседние атомы в поверхностном слое решетки плотной упаковки, и $\tilde{D}_s^{(2)} \equiv \tilde{D}_s^{(i,k)}$, где i и k нумеруют ближайшие соседние атомы в поверхностном и втором слоях образца. Из очевидных геометрических соображений имеем $\tilde{D}_s^{(2)} = -\tilde{D}_s/6$, $\tilde{D}_s^{(1)} = -\tilde{D}_s/4$.

Использование более точного, второго, приближения к решению системы (1) еще более усугубляет ситуацию с разрывами поверхностей постоянной силы, возникающих при сканировании одноатомного острья над решеткой

плотной упаковки. Так, для $d = 0.7a$ при использовании первого приближения получаются непрерывные поверхности постоянной силы вплоть до подвижностей атомов, характеризуемых значением $\Delta \tilde{l}_s = 0.09$, а во втором случае обнаруживаются разрывы уже при $\Delta \tilde{l}_s = 0.05$. Этот разрыв шириной $\approx 0.05a$ имеет место в области над межатомным промежутком. В то же время в области, где оба приближения дают непрерывные поверхности постоянной силы, результаты оказываются практически одинаковыми. Для иллюстрации этого утверждения на рис. 2 приведены линии постоянной силы, рассчитанные в рамках первого приближения (штриховая кривая) и второго (сплошная кривая) при начальной высоте острья $d = 0.7a$ и $\Delta \tilde{l}_s = 0.04$.

Рассмотрим теперь сканирование кластерного острья над поверхностью решетки плотной упаковки при таких значениях параметров, когда невозможно обеспечить непрерывное сканирование, применяя модель одноатомного острья. Для простоты будем использовать первое приближение при решении системы (1) (при расчете непрерывных поверхностей постоянной силы, как проиллюстрировано выше, это не приводит к сколь угодно значительным ошибкам) и учитывать смещения одного атома из семи, находящегося на самом кончике острья, относительно шести остальных. Безразмерный

параметр \tilde{D}_t , связанный с силовой константой материала острия, удобно представлять в виде $\tilde{D}_t = 1/\Delta\tilde{l}_t$.

Было рассчитано трехмерное изображение поверхности постоянной силы при значениях параметров $d = 0.5a$ (все дальнейшие результаты приводятся при этом значении d), $\Delta\tilde{l}_s = 0.05$, $\Delta\tilde{l}_t = 0.01$. Кристаллографические оси кластера на кончике острия и поверхности предполагались параллельными и совпадающими с направлением сканирования. Данная поверхность лишь глубиной рельефа отличается от соответствующей поверхности в модели неподвижных атомов [8] (в данном случае перепад рельефа составляет $\Delta\tilde{z} = 0.411$ против $\Delta\tilde{z} = 0.39$ в предположении неподвижных атомов острия и образца). Интересно отметить, что учет подвижности атомов приводит также к некоторому изменению формы рельефа, заключающемуся в том, что на линии постоянной силы, соответствующей сканированию вдоль линии атомов решетки, при увеличении степени подвижности атомов перепад рельефа уменьшается. Для иллюстрации на рис. 3 приведены линии постоянной силы, полученные при различных подвижностях атомов образца и острия $\Delta\tilde{l}_s = 0.05$, $\Delta\tilde{l}_t = 0.05$ (сплошная кривая), $\Delta\tilde{l}_s = 0.1$, $\Delta\tilde{l}_t = 0.05$ (штриховая кривая 1), $\Delta\tilde{l}_s = 0.1$, $\Delta\tilde{l}_t = 0.1$ (штриховая кривая 2). В этом случае перепад рельефа равен соответственно $\Delta\tilde{z} = 0.239$, 0.288 , 0.213 , однако его изменение остается за пределами чувствительности АСМ.

Отметим, что результаты расчетов поверхностей постоянной силы зависят от ориентации острия. Для примера на рис. 4 приведены линии постоянной силы, полученные для значений параметров $\Delta\tilde{l}_s = 0.05$, $\Delta\tilde{l}_t = 0.01$ при параллельных кристаллографических осях острия и поверхности (сплошная кривая) и при угле 30° между ними (штриховая кривая). Как видно из рисунка, максимальное различие между двумя линиями по вертикали не превосходит $\Delta\tilde{z} = 0.12$, что может лишь слабо сказываться на экспериментальных поверхностях постоянной силы.

Обсудим теперь кратко результаты расчетов поверхностей постоянной силы при сканировании кластерного острия над поверхностью решетки плотной упаковки, содержащей точечный дефект типа вакансии. В соответствии со сказанным выше при расчете непрерывных силовых поверхностей результаты, полученные в рамках первого и второго приближения к решению системы (1), различаются несущественно. Поэтому в целях уменьшения трудоемкости расчетов здесь и в следующем разделе использовалось первое приближение.

Расчеты поверхности постоянной силы при сканировании кластерного острия с подвижностями атомов образца и острия $\Delta\tilde{l}_s = 0.05$, $\Delta\tilde{l}_t = 0.01$ показали, что полный перепад относительных высот составляет $\Delta\tilde{z} = 0.411$, а разница высот пиков над атомом поверхности и над вакансией — $0.13a$ (в модели неподвижных атомов решетки эти величины равняются соответственно $\Delta\tilde{z} = 0.43$ и $0.15a$ [8]). Отметим, что при сканировании над вакансией результаты более существенным образом зависят

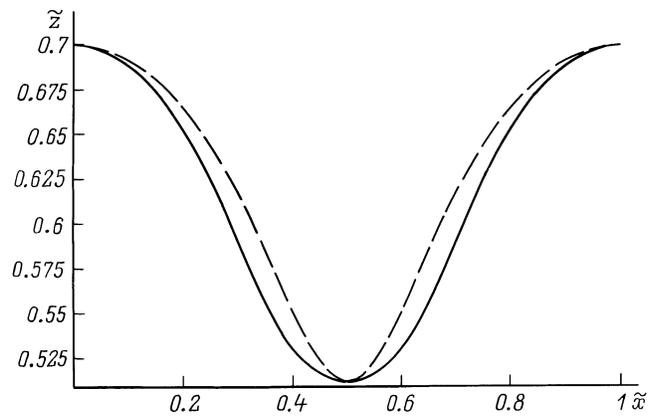


Рис. 2. Сравнение линий постоянной силы в случае сканирования одноатомного острия над линией атомов образца при различных подходах к описанию подвижности атомов.

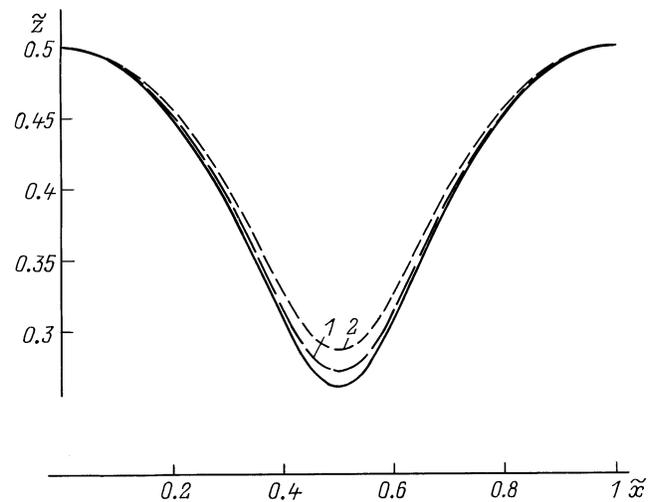


Рис. 3. Линии постоянной силы при сканировании кластерного острия вдоль линии атомов для различных подвижностей атомов образца и острия.

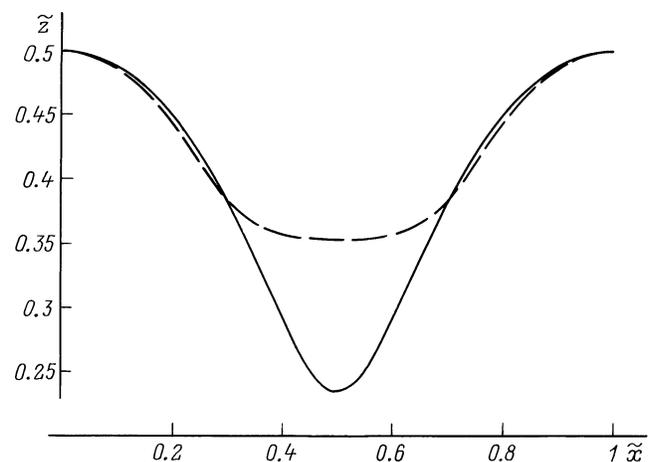


Рис. 4. Зависимость линий постоянной силы от ориентации кластера на кончике острия.

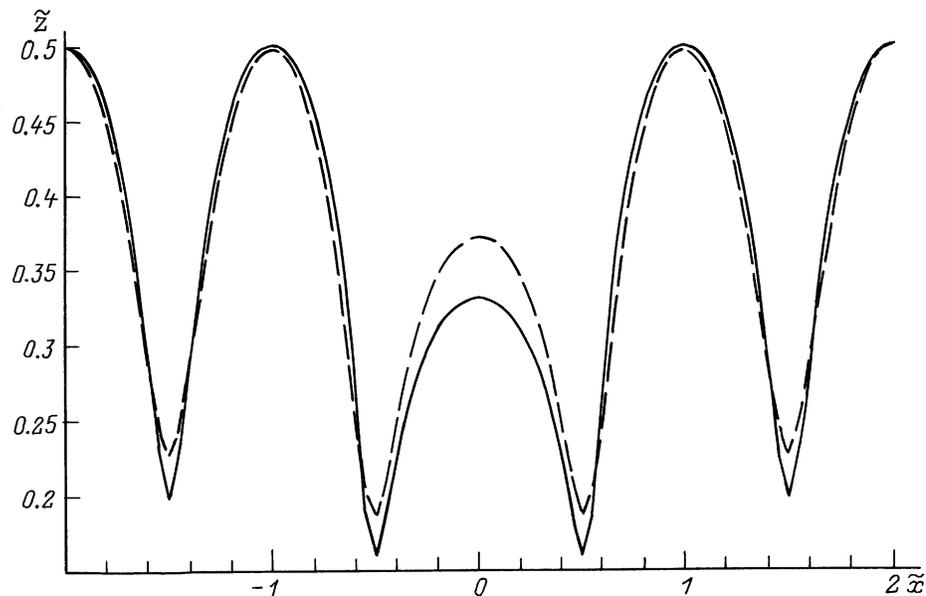


Рис. 5. Линии постоянной силы при сканировании кластерного острия над вакансией для различных подвижностей атома на кончике острия.

от подвижности атома острия, чем при сканировании над невозмущенной решеткой плотной упаковки. Для примера на рис. 5 приведены линии постоянной силы, рассчитанные для жесткого кластера на кончике острия ($\Delta\tilde{l}_i = 0$; сплошная кривая) и при подвижности атома на кончике острия $\Delta\tilde{l}_i = 0.05$ (штриховая кривая). В то же время, как и в случае невозмущенной решетки, учет возможной подвижности атомов в режиме сканирования без модификации исследуемой поверхности приводит лишь к незначительным изменениям поверхности постоянной силы, лежащим за пределами чувствительности АСМ. Это, разумеется, лишь подкрепляет заключение о том, что по характеру изменения поверхности постоянной силы над вакансией в решетке плотной упаковки можно ее обнаружить [6–8].

Влияние подвижности атомов на горизонтальную составляющую силы

Измерение горизонтальной составляющей силы при сканировании острия АСМ вдоль поверхности постоянной вертикальной составляющей дает существенную дополнительную информацию, которая может использоваться, в частности, для диагностики точечных поверхностных дефектов методом АСМ. Поэтому представляет интерес выяснение того, как сказывается подвижность атомов решетки на форме расчетных профилей горизонтальной составляющей силы.

Пусть в результате решения системы уравнений (1) при каждом положении острия относительно поверхности (\tilde{x}, \tilde{y}) найдены точка на поверхности постоянной силы \tilde{z} , координаты атомов образца $\tilde{x}_{(s)i}, \tilde{y}_{(s)i}, \tilde{z}_{(s)i}$, а также

острия $\tilde{x}_{(t)i}, \tilde{y}_{(t)i}, \tilde{z}_{(t)i}$. Тогда безразмерная горизонтальная сила определится выражением

$$\tilde{F}_x = \left(\frac{d}{a}\right)^{13} \sum_{ij} \frac{\tilde{x} + \tilde{x}_{(t)j} - \tilde{x}_{(s)i}}{\tilde{r}_{ij}^{14}} \quad (6)$$

а аналогичным выражением для y -составляющей.

На рис. 6, *a* приведены зависимости горизонтальной составляющей силы \tilde{F}_x от x при сканировании вдоль линии атомов бездефектной поверхности с различными подвижностями атомов образца и острия: $\Delta\tilde{l}_s = 0.05$, $\Delta\tilde{l}_i = 0.05$ (сплошная кривая), $\Delta\tilde{l}_s = 0.1$, $\Delta\tilde{l}_i = 0.05$ (штриховая кривая 1) и $\Delta\tilde{l}_s = 0.1$, $\Delta\tilde{l}_i = 0.1$ (штриховая кривая 2) — (ср. с рис. 3 для линий постоянной силы). Как видно из рис. 6, *a*, горизонтальная составляющая силы обращается в нуль непосредственно над атомами исследуемой поверхности и в точках посередине между ними. Кроме того, для невозмущенной решетки плотной упаковки $|\tilde{F}_{x,\min}| = \tilde{F}_{x,\max}$, как это и должно быть из соображений симметрии. Эти результаты согласуются с полученными ранее в приближении неподвижных атомов [16,17]. Перепад значений силы $\tilde{F}_{x,\max} - \tilde{F}_{x,\min}$ для линий рис. 6, *a* равен соответственно 1.482, 1.390, 1.276. Таким образом, увеличение степени подвижности атомов приводит к уменьшению перепада силы, которое, однако, не может сказаться на интерпретации экспериментальных данных.

На рис. 6, *b* приведена зависимость горизонтальной составляющей силы \tilde{F}_x от x при сканировании вдоль линии атомов, содержащей вакансию, острия с жестким кластером на кончике (сплошная кривая) и при подвижности атома острия $\Delta\tilde{l}_i = 0.05$ (штриховая кривая). Подвижность атомов образца $\Delta\tilde{l}_s = 0.05$. На рис. 6, *b*

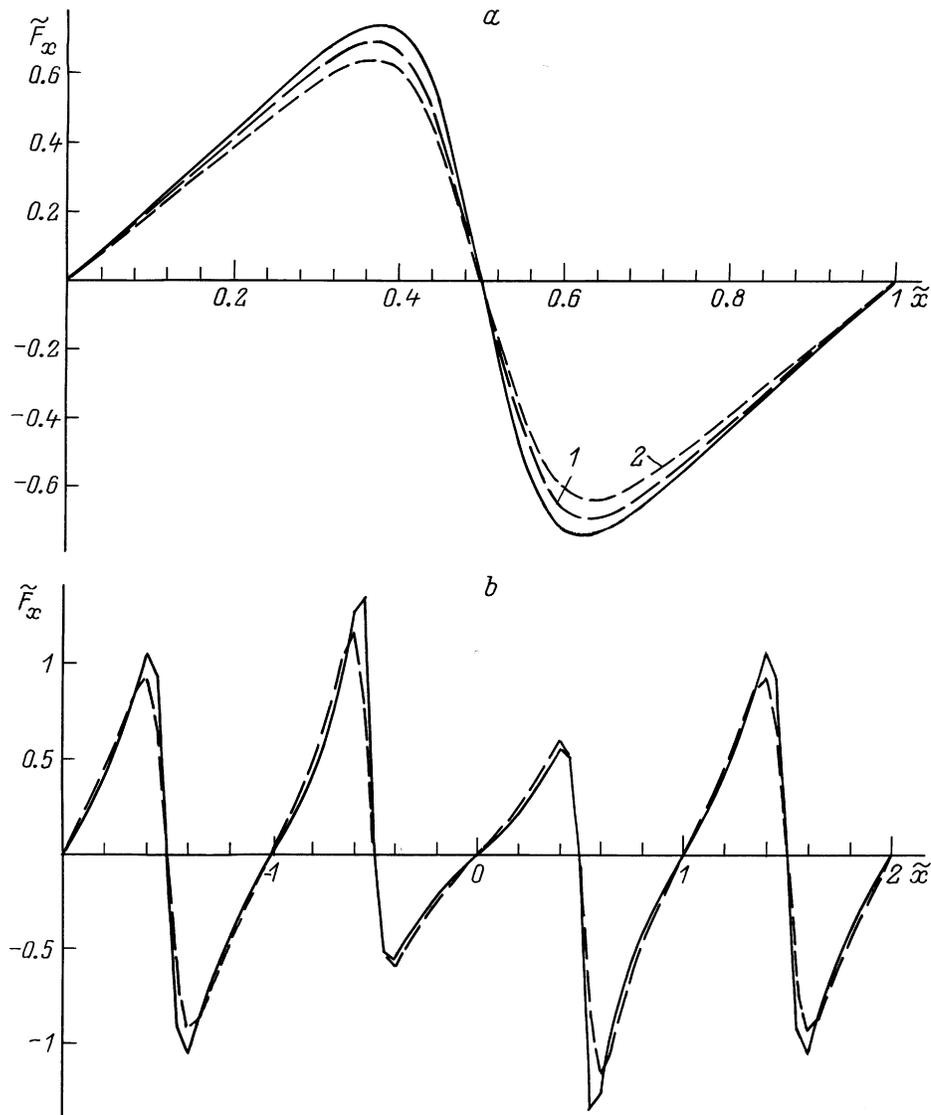


Рис. 6. Зависимость горизонтальной силы при сканировании кластерного острия вдоль линии атомов поверхности для различных подвижностей атомов.

отчетливо видны пики различной высоты. Таким образом, присутствие на исследуемой поверхности точечных дефектов заметно изменяет профиль горизонтальной составляющей силы. Однако изменение подвижности атома острия мало влияет на результат, как и в случае невозмущенной решетки.

До сих пор предполагалось, что кристаллографические оси поверхности и кластера на кончике острия параллельны. На рис. 7 для сравнения приведены зависимости горизонтальной составляющей силы \tilde{F}_x от \tilde{x} для случаев параллельных (сплошная кривая) и наклоненных под углом 30° осей (штриховая кривая) при сканировании над бездефектной поверхностью. Остальные параметры принимают значения $\Delta\tilde{l}_s = 0.05$, $\Delta\tilde{l}_t = 0.01$. Как видно из рис. 7, линии горизонтальной составляющей силы значительно более чувствительны к ориентации острия, чем

линии постоянной силы (ср. с рис. 4). Таким образом, по профилям горизонтальной силы ориентация кластерного острия относительно исследуемой поверхности в принципе может быть зафиксирована экспериментально.

Обсуждение результатов

В настоящей работе изучено влияние подвижности атомов решетки на поверхности постоянной силы и профили горизонтальной составляющей силы при сканировании острия АСМ над решеткой плотной упаковки.

Показано, что возникновение разрывов на поверхности постоянной силы существенно зависит от подвижности атомов образца. Если в приближении неподвижных атомов разрывы возникают лишь при достаточно малых начальных высотах сканирования ($d/a \leq 0.61$), то

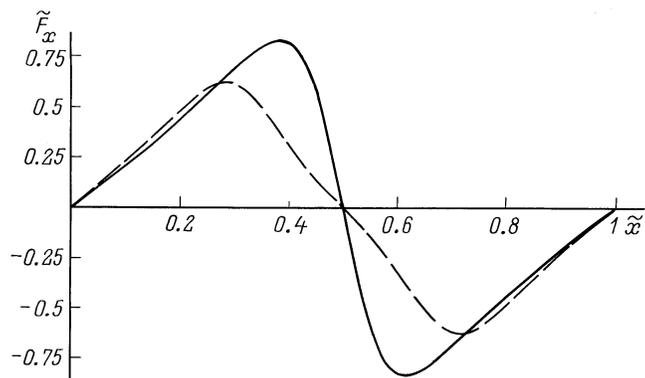


Рис. 7. Зависимость горизонтальной составляющей силы от ориентации кластера на кончике острия.

при реалистических значениях подвижности разрывы обнаруживаются и при $d \approx (0.7-0.8)a$ (качественно данный результат был предсказан в работе [8]). Это делает эффект разрывов более важным с точки зрения интерпретации результатов эксперимента.

Рассчитаны поверхности постоянной силы с учетом подвижности атомов образца и острия как над бездефектной поверхностью, так и над вакансией. Исследованы различные приближения к описанию подвижности атомов решетки и подтверждено, что в режиме непрерывного сканирования получаемые результаты различаются несущественно.

При расчете горизонтальной составляющей силы с учетом подвижности атомов продемонстрировано заметное изменение ее профиля в области вакансии по сравнению с бездефектным участком поверхности. Показано, что профили горизонтальной составляющей силы более чувствительны к взаимной ориентации исследуемой поверхности и кластера на кончике острия, чем поверхности постоянной силы.

Полученные результаты могут быть использованы для диагностики точечных дефектов методом атомно-силовой микроскопии (см. работу [18], где таким образом впервые зарегистрирована вакансия).

Авторы признательны В.И. Панову за интерес к данной работе и плодотворные обсуждения.

Список литературы

- [1] Sarid D. // Scanning Force Microscopy with Applications to Electric, Magnetic and Atomic Forces. New York: Oxford University Press, 1991.
- [2] Quate C.F. // Surf. Sci. 1994. Vol. 299/300. P. 980–995.
- [3] Albrecht T.R., Quate C.F. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1988. Vol. 6. N 2. P. 271–274.
- [4] Gould S.A.C., Burke K., Hansma P.K. // Phys. Rev. B. 1989. Vol. 40. N 8. P. 5363–5366.
- [5] Ciraci S., Baratoff A., Batra I.P. // Phys. Rev. B. 1990. Vol. 41. N 5. P. 2763–2775.

- [6] Благов Е.В., Климчицкая Г.Л., Лобашев А.А., Мостепаненко В.М. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. Вып. 3. С. 73–80.
- [7] Blagov E.V., Klimchitskaya G.L., Lobashov A.A., Mostepanenko V.M. // Surf. Sci. 1996. Vol. 349. P. 196–206.
- [8] Благов Е.В., Климчицкая Г.Л., Лобашев А.А., Мостепаненко В.М. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 6. С. 77.
- [9] Abraham F.F., Barta I.P. // Surf. Sci. 1989. Vol. 209. N 1/2. P. L125–L132.
- [10] Landman U., Luedtke W.D., Ribarsky M.W. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1989. Vol. 7. N 4. P. 2829–2839.
- [11] Howald L., Lüthi R., Meyer E., Güntherodt H.-J. // Phys. Rev. B. 1995. Vol. 51. N 8. P. 5484–5487.
- [12] Lüthi R., Meyer E., Howald L. et al. // Tribology Lett. 1995. Vol. 1. N 1. P. 129–137.
- [13] Good B.S., Banerjee A. // J. Phys. 1996. Vol. 8. N 10. P. 1325–1333.
- [14] Tang H., Joachim C., Devillers J. // Surf. Sci. 1993. Vol. 291. N 3. P. 439–450.
- [15] Born M., Huang K. // Dynamic Theory of Crystal Lattices. Oxford: Clarendon Press, 1968.
- [16] Благов Е.В., Климчицкая Г.Л., Мостепаненко В.М., Смирнов М.З. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 1. С. 134–137.
- [17] Blagov E.V., Klimchitskaya G.L., Mostepanenko V.M. // Surf. Rev. Lett. 1997. Vol. 4. P. 271–278.
- [18] Hahn J.R., Kang H., Song S., Jeon I.C. // Phys. Rev. B. 1996. Vol. 53. N 4. P. R1725–R1728.