

будут пространственно разнесены (рис. 1). Коэффициент отражения для Е- и Н-поляризаций при этом равен коэффициенту отражения этих поляризаций в случае компланарного рассеяния [3].

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] R e b u f f i L. Metallic plates lens focalizing a high power microwawe beam, CEA EURATOM, EUR - CEA - FC - 1332, aout, 1987.
- [2] Б о р н М., В о л ь ф Э. Основы оптики, М.: Наука, 1970.
- [3] Electromagnetic theory of gratings / Ed. by R. Petit Berlin - Heidelberg - N.Y.: Springer - Verlag, 1980.
- [4] В а й н ш т е й н Л.А., С у к о в А.И. // Радиотехн. и электрон. 1984. Т. 29. В. 8. С. 1472.

Институт прикладной
физики АН СССР,
Горький

Поступило в Редакцию
26 июля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 20

26 октября 1989 г.

02; 12

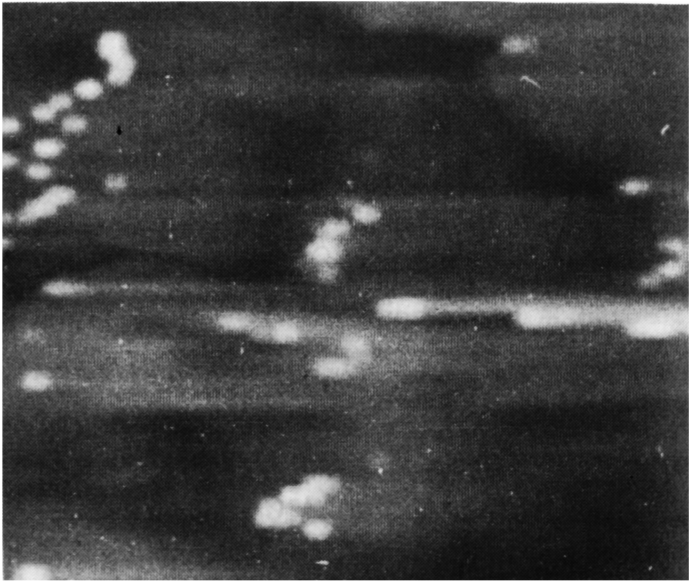
СПЕКТРОСКОПИЯ МЕЖАТОМНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Ю.Н. М о и с е е в, В.М. М о с т е п а н е н к о,
В.И. П а н о в, И.Ю. С о к о л о в

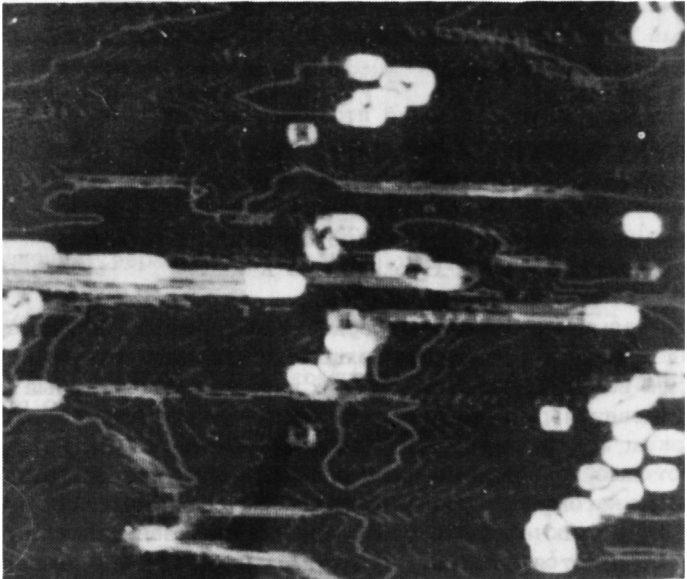
Метод атомно-силовой микроскопии, основанный на измерении сил Вандер-Ваальса между поверхностью твердого тела и подносимым к ней на расстояние нескольких ангстрем острием, был развит для исследования рельефа поверхности любых веществ с разрешением, близким к атомному [1-3].

В настоящей работе этот метод использован для локальной спектроскопии межатомных взаимодействий (такая возможность обсуждалась в [4]), включающей в себя определение зависимости межатомных сил от расстояния между острием и плоскостью и вычисление констант этих взаимодействий.

Измерения проводились по схеме, описанной ранее в [2, 3]. В этой схеме основным элементом служит острие, к которому с помощью трехкоординатного пьезоманипулятора подводится поверхность исследуемого образца. Острие закреплено на пружине, имеющей малую механическую жесткость, которая изгибается за счет силового взаимодействия между атомами острия и поверхности в процессе сканирования образца под иглой. Датчик, регистрирующий прогиб

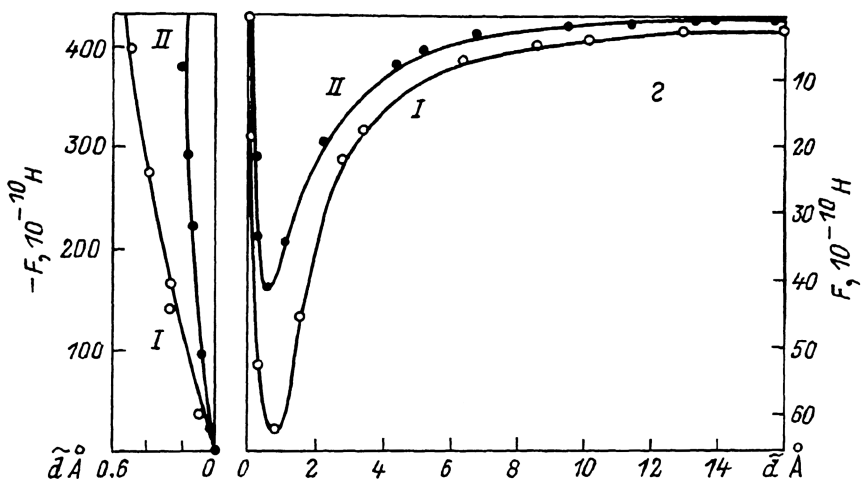
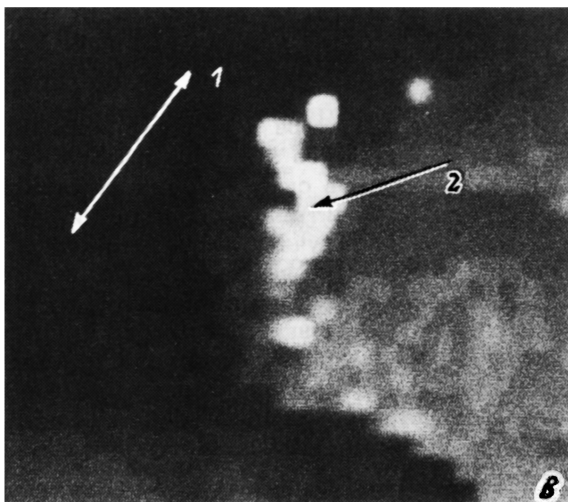


α



β

β - изображение участка 10×10 нм. Стрелками указаны области для которых измерялась зависимость $F(\alpha)$. Области, соответствующие: 1 - кривой I, 2 - кривой II (см. рисунок, γ).



Продолжение рисунка.

пружины, формирует изображение рельефа поверхности постоянной силы.

Определение силы взаимодействия между острием и выбранным участком поверхности от расстояния между ними производилось по величине прогиба пружины (в полосе частот 5 Гц при фиксированном в плоскости поверхности положении острья).

На рисунке, а приведено изображение рельефа поверхности стекла диэлектрического кристалла лейкосапфира, полученного при постоянной величине силового взаимодействия $F \approx 2.5 \cdot 10^{-9} \text{ Н}$. Участок поверхности имеет площадь $25 \times 25 \text{ нм}$, причем переход от темного поля к светлому соответствует перепаду высот 4 нм.

На рисунке, б для того же участка показано изображение вариаций силы по нормали к поверхности. Из рисунка, а, б видно, что поверхность имеет локализованные области размером 1 нм, над которыми происходит резкое изменение силового взаимодействия с острием АСМ.

С целью определения характера и констант межатомного взаимодействия для различных участков этой поверхности (см. рисунок, в) была измерена зависимость силы $F(\tilde{d})$ от расстояния \tilde{d} между острием и поверхностью, отсчитываемого от точки нулевой силы. Кривая I (см. рисунок, г) получена для бездефектного участка поверхности, кривая II измерена непосредственно над локализованным дефектом. Приведенные средние величины $F(\tilde{d})$ получены как при сближении, так и при удалении поверхности и острия. Разработанная методика позволяет найти основные константы, определяющие потенциальную энергию взаимодействия исследуемых веществ. С этой целью воспользуемся потенциалом Леннард-Джонса [5], описывающим взаимодействие Ван-дер-Ваальса между отдельными атомами (молекулами): $V(r) \sim \left(\frac{r_0}{r}\right)^{12} - b\left(\frac{r_0}{r}\right)^6$, где b - постоянная, зависящая от типа молекул, $r_0 \approx 0.3-0.4$ нм. Силы отталкивания, отвечающие первому слагаемому $V(r)$, быстро спадают с расстоянием и действуют только лишь при $r < 0.4$ нм между теми атомами острия и образца, которые непосредственно взаимодействуют друг с другом. Поэтому полная сила отталкивания может быть представлена в виде $\frac{dN}{d^{13}}$, где N - число атомов на конце острия, α - константа обменного взаимодействия. Если $d \gg 0.4$ нм, то отталкиванием можно пренебречь, а сила притяжения определяется суммированием потенциалов с зависимостью $\sim r^{-6}$, действующих между парами молекул острия и образца. Как показано в работе [3], она имеет вид $-\frac{\pi CR}{d^2}$ (R - радиус кривизны острия, C - константа ван-дер-ваальсовского взаимодействия) и сохраняется вплоть до $d \lesssim 10$ нм. В результате во всем диапазоне расстояний $0 < d \lesssim 10$ нм силовое взаимодействие между острием и поверхностью можно представить в виде

$$F = \frac{\alpha N}{d^{13}} - \frac{\pi CR}{d^2}. \quad (1)$$

Отметим, что в работе [6] первое слагаемое в формуле типа (1), полученное интегрированием потенциала $\sim r^{-12}$ по объему острия и образца, имеет зависимость от расстояния r^{-9} . Этот результат является ошибочным, так как зависимость $\sim r^{-12}$ имеет место лишь при $r \lesssim r_0$, а для $r > r_0$ вследствие более быстрого уменьшения обменных сил интегрирование по объему не дает вклада в силу отталкивания.

В формуле (1) расстояние d связано с измеряемым значением соотношением $d = \tilde{d} + \Delta$. Сдвиг шкалы расстояний Δ , под-

лежащий определению, включает в себя поправку, вызванную упругой деформацией острия и поверхности. Максимальная величина этой поправки, оцененная по методике работы [7], не превышает $1.5 \cdot 10^{-2}$ нм. Погрешность ее определения находится в пределах ошибки измерения $\tilde{\alpha}$.

Определение неизвестных параметров CR , αN и Δ в аналитической зависимости (1) производилось путем ее сопоставления с экспериментальными результатами $F(\tilde{\alpha})$, представленными для двух участков поверхности на рисунке, г.

Для тех областей поверхности исследуемого образца (см. рисунок, г, кривая 1), где отсутствуют дефекты, были получены следующие значения параметров:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= 0.24 \pm 0.01 \text{ нм,} \\ C_1 R &= (1.8 \pm 0.3) \cdot 10^{-28} \text{ Дж} \cdot \text{м,} \\ (\alpha N)_1 &= (7 \pm 2) \cdot 10^{-17} \text{ Н/нм}^{13}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для областей поверхности, расположенных непосредственно над локализованными дефектами (см. рисунок, г, кривая II), те же параметры имеют значения

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= 0.25 \pm 0.01 \text{ нм,} \\ C_2 R &= (1.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-28} \text{ Дж} \cdot \text{м,} \\ (\alpha N)_2 &= (11 \pm 2) \cdot 10^{-17} \text{ Н/нм}^{13}. \end{aligned} \quad (3)$$

Радиус острия R определялся по методике, описанной ранее в работе [3]. Его средняя величина в настоящих экспериментах составляла ≈ 10 нм. В результате численные значения констант ван-дер-ваальсовских взаимодействий C составили

$$C_1 = (1.8 \pm 0.3) \cdot 10^{-20} \text{ и } C_2 = (1.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-20} \text{ Дж.}$$

Проанализируем полученные результаты. Найденные константы указывают на увеличение отталкивания между острием и поверхностью, где наблюдаются локализованные аномалии. Кроме того, приведенное в настоящей работе значение константы C_1 отличается от рассчитанной в [8] величины $C = (0.88 \pm 0.05) \cdot 10^{-20}$ Дж для тех же взаимодействующих веществ $Al_2O_3 - Al_2O_3$. Совокупность этих результатов позволяет предположить присутствие дополнительных электрических зарядов одного знака на конце острия и в местах локализованных аномалий. В самом деле, такие заряды должны вызывать дополнительное притяжение и приводить к увеличению константы C над бездефектными участками поверхности, а над локализованными дефектами вызывать дополнительное купоновское отталкивание. Сопоставив наблюдаемое и рассчитанное значения C , можно определить величину избыточного заряда на конце зондирующего острия:

$$Q_0 = 2 \left[\frac{\epsilon + 1}{\epsilon - 1} \pi R (C_1 - C) \right]^{1/2} \approx 2 (1.9 \pm 0.4) \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \approx 2 \text{ e}$$

(ϵ — диэлектрическая проницаемость лейкосапфира). Аналогичная оценка, полученная с учетом не только потенциала изображения, но и кулоновского взаимодействия зарядов, может быть дана для заряда Q_n , локализованного на поверхности: $Q_n \approx (9.8 \pm 0.2)e$.

Таким образом, метод атомно-силовой микроскопии позволяет определять значения констант межатомных взаимодействий и выявлять наличие локализованных зарядов на поверхности твердого тела в масштабах, близких к атомным.

Авторы выражают благодарность Ю.С. Барашу и Л.В. Келдышу за консультации и стимулирующие дискуссии.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] B i n n i g G., Q u a t e C.F., C e r b e r C h. // Phys. Rev. Lett. 1986. V. 56. N 10. P. 930-933.
- [2] В а с и л ь е в С.И., Л е о н о в В.Б., М о и с е е в Ю.Н., П а н о в В.И. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 8. С. 727-731.
- [3] М о и с е е в Y u N., М о с т е п а н е н к о V.M., Р а н о у V.I., S o k o l o v I.Yu. // Phys. Lett. 1988. V. 132A. N 6, 7. P. 354-358.
- [4] М о и с е е в Ю.Н., М о с т е п а н е н к о В.М., П а н о в В.И. // Тез. докл. VI Всес. симп. по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел. Звенигород, 1989. С. 204.
- [5] H a r r i s o n W.A. // Phys. Rev. B. 1981. V. 23. N 10. P. 5230-5245.
- [6] Y a m a d a H., F u j i i T., N a k a y a m a K.J. // Vac. Sci. Technol. 1988. V. A6. N2. P. 293-295.
- [7] S o l e r J.M., B a r o A.M., G a r c i a N., R o h r e r H. // Phys. Rev. Lett. 1986. V. 57. N 4. P. 444-447.
- [8] K r u p p H., S c h n a b e l W., W a l t e r G. // J. Coll. J. Sci. 1972. V. 39. N 2. P. 421-423.

Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова

Поступило в Редакцию
31 июля 1989 г.