

[6] Mukherjee S., Kumor V., Bennemann K.H. - Surf. Sci., 1986, v. 167, p. 210-218.

Московский инженерно-физический институт

Поступило в Редакцию  
10 марта 1987 г.  
В окончательной  
редакции  
5 февраля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 8

26 апреля 1988 г.

### СКАНИРУЮЩИЙ ТУННЕЛЬНЫЙ МИКРОСКОП С АТОМНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ НА ВОЗДУХЕ

В.К. Адамчук, А.В. Ермаков,  
И.В. Любинецкий

В данном сообщении приведены основные конструктивные особенности и результаты испытаний на воздухе сканирующего туннельного микроскопа, созданного для изучения поверхностей и межфазовых границ твердых тел в условиях сверхвысокого вакуума с атомным разрешением. В качестве объекта исследований была выбрана грань (0001) кристалла высокоориентированного пиролитического графита, поверхность которого химически инертна и практически свободна от поверхностных загрязнений после получения ее раскальванием.

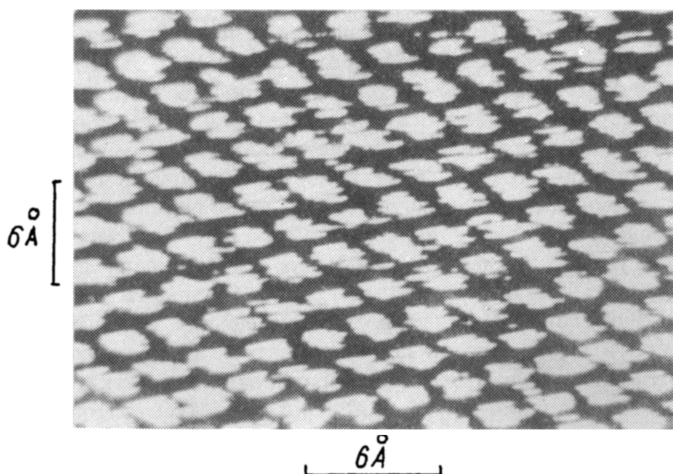
Общие принципы построения конструкции созданного СТМ соответствуют модели, разработанной Биннигом и Роэром [1, 2]. Пьезоманипулятор точного перемещения острия и позиционер, перемещающий образец к острию до расстояния  $\sim 50-500 \text{ \AA}$ , расположены на едином основании микроскопа, выполненном из легированного кварцевого стекла с минимальным коэффициентом температурного расширения ( $\sim 2 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-1}$ ) Г-образной формы. Чтобы обеспечить большую жесткость и компактность по сравнению с ранее разработанной конструкцией [3], механический позиционер был заменен на пьезодвигатель, подобный описанному в работе [4]. Пьезодвигатель представляет собой Т-образную пластину, толщиной 1 мм из пьезокерамики ПКР-7 [5] с двумя областями металлизации для задания двух независимых взаимоперпендикулярных областей сжатия пьезокерамики. Пластина жестко закреплена на трех стойках из кварцевого стекла, на нижние полированные поверхности которых нанесен слой алюминия толщиной  $\sim 100 \text{ нм}$ , покрытый сверху изолирующим слоем окиси кремния  $\sim 700 \text{ нм}$ . Позиционер перемещается по полированной поверхности кварцевого основания с таким же покрытием. Управляющие импульсы разности потенциалов в 130 В между слоями алюминия прижимают поочередно стойки к основанию. Согласно с управлением на пьезокерамику подается напряжение

„сжатия” от 20 до 120 В, что обеспечивает перемещение позиционера со средним шагом соответственно  $\sim 20\text{--}300$  нм. Частота шагов 2–20 в секунду. Для перемещения позиционера по заданной траектории на стойки и пьезокерамику двигателя подаются импульсы управляющего напряжения в определенной последовательности [4]. Образец крепится механически на одной из кварцевых стоек позиционера, что уменьшает чувствительность к вибрации и термодрейфу.

Пьезоманипулятор точного перемещения острия по координатам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , осуществляющий сканирование при заданном туннельном токе, представляет собой монолитный крестообразный в поперечном сечении стержень, изготовленный из пьезокерамики ПКР-6 [5]. Чувствительность манипулятора по координатам  $X$ ,  $Y$  определена, согласно полученному изображению дифракционной решетки, с известным периодом и составила  $\Delta x(y) = 13.8 \text{ \AA}/\text{В}$ . Чувствительность по координате  $Z$ , направленной вдоль оси острия перпендикулярно поверхности образца, определенная согласно пьезомодулю керамики [5], составила  $\Delta z \sim 3.5 \text{ \AA}/\text{В}$ . Манипулятор с размещенным на нем держателем острия размещен в металлическом корпусе (с отверстием для острия) и закреплен на кварцевом основании. Виброизоляция прибора обеспечивается жесткостью конструкции, использованием компактного, монолитного манипулятора положения острия, что обеспечивает его высокие собственные резонансные частоты ( $\sim 60$  кГц вдоль оси стежня и  $\sim 12$  кГц по нормали к оси), и применением одноступенчатой пневморазвязки с собственной частотой  $\sim 2$  Гц.

Уменьшение влияния термодрейфа в плоскости поверхности образца обеспечивает симметричная по координатам  $X$ ,  $Y$  структура пьезоманипулятора острия. Электронная схема управления микроскопом позволяет поддерживать заданную величину туннельного тока в диапазоне 0.1 нА–50 нА при напряжениях между острием и образцом от  $-5$  В до  $+5$  В и при ширине полосы пропускания до 5 кГц. Изображения поверхности записываются в реальном времени непосредственно на запоминающий осциллограф (с модуляцией яркости управляющим напряжением по вертикали) без предварительной обработки (фильтрации шумов, накопления и усреднения и т. п.). Частота сканирования по  $X$  составляет 1–100 Гц. Для уменьшения влияния гистерезиса пьезокерамики запись производится лишь при одном направлении сканирования. Острие изготавливается из вольфрамовой проволоки диаметром 0.1 мм путем электрохимического травления. Акустическая изоляция прибора осуществляется внешним стеклянным экраном.

На рисунке приведено полученное на СТМ изображение участка размером  $27 \text{ \AA} \times 25 \text{ \AA}$  поверхности скола вдоль грани (0001) пиролитического графита. Изображение записано с частотой сканирования 10 Гц за 20 с при туннельном токе 0.2 нА, напряжении 10 мВ. Изображение хорошо воспроизводилось при повторной записи, а также при различных скоростях сканирования и размерах „окна” сканирования. Можно видеть наличие гексагональной атомной структуры, общий вид которой, а также расстояние между ближайшими соседями ( $\sim 2.5 \text{ \AA}$ ), хорошо согласуются с данными, полученными



Изображение поверхности скола грани (0001) пиролитического графита, полученное с помощью СТМ. Полной модуляции яркости соответствует  $1.5 \text{ \AA}$ .

в условиях вакуума и на воздухе [6–8]. Высота „выступающих“ атомов графита составляет  $\sim 1.5 \text{ \AA}$ . Необходимо отметить несколько искаженную форму гексагональных ячеек, что, кроме небольшого различия в масштабах по осям X и Y, может быть связано с остаточным термодрейфом и гистерезисом. Изображение поверхности графита хорошо воспроизводилось для различных острий и образцов, а также сохранялось без видимых изменений на воздухе в течение нескольких часов. Размеры атомарно-гладких участков поверхности (0001) графита составляли сотни ангстрем, где хорошо просматриваются также точечные дефекты (при меньшем в 3 раза, чем на рисунке, увеличении).

Полученные изображения поверхности пиролитического графита позволяют оценить разрешение созданного сканирующего туннельного микроскопа:  $\leq 0.2 \text{ \AA}$  по нормали к поверхности и  $\leq 2 \text{ \AA}$  вдоль поверхности. Эти величины получены в обычных атмосферных условиях без специального термостатирования и при характерных для обычной лаборатории уровнях шумов и вибраций.

Авторы благодарят Г.А. Житомирского и А.Е. Панича за предоставленную пьезокерамику.

### Л и т е р а т у р а

- [1] Binnig G., Rohrer H. – Surf. Sci., 1983, v. 126, N 1–3, p. 236.
- [2] Binnig G., Rohrer H. – IBM J. Res. Dev., 1986, v. 30, N 4, p. 355.
- [3] Адамчук В.К., Александров В.М., Ермаков А.В., Любинецкий И.В. – Письма в ЖТФ, т. 14, 1988 г.

- [4] M a m i n H.J., A b r a h a m D.W., G a n z E.,  
C l a r k e J. - Rev. Sci. Instr., 1985, v. 56,  
N 11, p. 2186.
- [5] Ф е с е н к о Е.Г., Д а н ц и г е р А.Д., Р а з у м о в -  
с к а я О.Н. Новые пьезокерамические материалы, Ростов-на-  
Дону, 1983.
- [6] B i n n i g G., F u c h s H., G e r b e r Ch.,  
R ö h r e r H., S t o l l e E., T o s a t t i E. -  
Europhys. Lett., 1986, v. 1, N 1, p. 31.
- [7] B r y a n t A., S m i t h D.F.E., Q u a t e C.F. -  
Appl. Phys. Lett., 1986, v. 48, N 13, p. 832.
- [8] Х а й к и н М.С., В о л о д и н А.П., Т р о я н о в -  
с к и й А.М., Э д е л ь м а н В.С. - ПТЭ, 1987, № 4,  
с. 231-232.

Ленинградский государственный  
университет им. А.А. Жданова

Поступило в Редакцию  
30 декабря 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 8

26 апреля 1988 г.

## СПЕКТР НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗБУЖДЕНИЙ КВАНТОВОГО АНГАРМОНИЧЕСКОГО ОСЦИЛЛЯТОРА

М.И. К л и н г е р, В.Г. К у д р я в ц е в,  
Т.Н. К р у п е н ь к и н

В данной работе будет рассмотрен ряд результатов, касающихся энергетического спектра одномерного квантового ангармонического осциллятора (АО) вида:

$$V(x) = x^4 + K_2 x^3 + K_1 x^2, \quad (1)$$

где  $K_1, K_2$  - произвольные вещественные параметры. Задача поиска собственных значений стационарного уравнения Шредингера с потенциалом вида (1) имеет определенный интерес для ряда физических приложений, таких как теория поля [1], атомная и молекулярная физика и физика твердого тела.

В качестве примера актуальной задачи из области физики твердого тела можно привести модель "критических" потенциалов, предложенную недавно [2] для описания низкотемпературных аномалий в стеклах. Для последних в рамках указанной модели определяющую роль играет атомная динамика в "критических" потенциалах вида (1) при  $|K_1| \ll 10^2$  и  $|K_2| \ll 10^2$  ( $K_1 \geq 0, K_2 \geq 0$ ). Заметим, что потенциал (1) может быть в этом случае как одно-, так и двухямным [2]. Число работ, посвященных АО весьма велико (см. например, [1, 3, 4]), однако практически все они рассматривают симметричные потенциалы (1) при  $K_2=0$ .