

## СКАНИРУЮЩАЯ МИКРОСКОПИЯ ПОВЕРХНОСТИ, ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ СИЛЫ МЕЖАТОМНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

С.И. Васильев, В.Б. Леонов,  
Ю.Н. Моисеев, В.И. Панов

При изучении рельефа поверхности изолирующих веществ до недавнего времени использовались контактные, оптические или емкостные профилометры [1, 2], которые обладают невысоким продольным разрешением  $\Delta \sim 1000 - 5000 \text{ \AA}$ . Однако, для решения многих задач физики поверхности и микроэлектроники требуется производить детальный анализ локальных микроскопических характеристик поверхности диэлектриков в атомных масштабах, включая распределение микронеоднородностей, заряженных и нейтральных дефектов, дислокаций и др. Для этих целей в работе [3] было предложено использовать силы межатомного (межмолекулярного) взаимодействия, возникающие между исследуемой поверхностью и подносимым к ней на расстояние  $\sim (1-10^2) \text{ \AA}$  острием. Первые эксперименты такого рода с использованием нового метода (атомной силовой микроскопии (АСМ)) [3, 4] продемонстрировали возможность получения информации о состоянии поверхности проводящих и диэлектрических веществ с разрешением, приближающимся к разрешению сканирующих туннельных микроскопов (СТМ) [5], которые не могут использоваться для исследования поверхности диэлектриков.

В настоящем сообщении кратко изложена методика исследования микрорельефа поверхности, основанная на применении межатомных силовых взаимодействий. Измерения проводились по схеме, описанной в [3] и показанной на рис. 1. В этой схеме основным элементом служит диэлектрическое, либо проводящее острие 1, к которому с помощью трехкоординатного пьезоманипулятора 2 подводится поверхность исследуемого образца 3. Острие закреплено на пружине 4, изготовленной в виде кронштейна с малой механической жесткостью  $K_{\mu}$ . С противоположной стороны кронштейна к нему подведено проводящее острие 5 иглы туннельного микроскопа, используемое для регистрации механических перемещений или колебаний кронштейна. В результате приближение поверхности образца к острию вызывает отклонение кронштейна от положения равновесия на величину  $d(z) = F(z)/K_{\mu}$  и изменяет его собственную частоту  $\omega_{\mu}$  вследствие нелинейной зависимости от расстояния сил взаимодействия  $F(z)$ . Вариации  $d$  и  $\omega_{\mu}$ , преобразованные в электрический сигнал обратной связи, управляют перемещением образца, удерживая его поверхность при помощи пьезоманипулятора на расстоянии  $z(F)$  от острия в процессе сканирования.

В данной работе использовался АСМ, который был создан на базе ранее описанного в [6] сканирующего туннельного микроскопа. Зондирующее острие АСМ радиусом  $R \lesssim 0,3 \text{ мкм}$ , изготовленное из монокристалла  $Al_2O_3$ , было закреплено на металлизированном

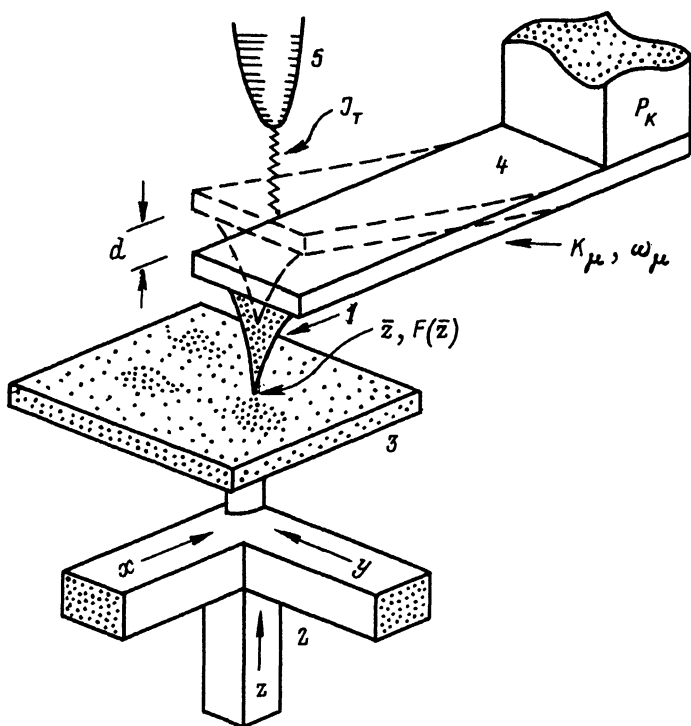


Рис. 1. Схема работы атомного силового микроскопа.

1 - зондирующее острие, 2 - пьезоманипулятор, перемещающий образец, 3 - образец, 4 - пружинящий кронштейн, 5 - проводящее острие туннельного датчика смещений.

кварцевом кронштейне длиной 1 мм и диаметром 30 мкм. Его механическая жесткость  $K_{\mu} \approx 30 \text{ Н/м}$  частота собственных колебаний  $\omega_{\mu} \approx 9 \text{ кГц}$  и добротность  $Q_{\mu} \approx 250$ . При этих параметрах АСМ дает возможность регистрировать величину силы  $\delta F \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ Н}$ , что значительно превышает предельное значение  $F_{\varphi} \approx 5 \cdot 10^{-12} \text{ Н}$ , получаемое из оценки термодинамических флуктуаций, действующих на кварцевый кронштейн. Такая чувствительность к силе позволяет реализовать продольное разрешение АСМ в пределах десяти ангстрем в воздушной среде. (Следует отметить, что наличие жидкого адсорбата на поверхности повышает пространственное разрешение АСМ [4], но приводит к изменению ее микроскопических характеристик.)

С помощью АСМ была исследована структура поверхности монокристалла лейкосапфира ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), сколотого вдоль плоскости спайности  $\{10\bar{1}1\}$  (плоскость морфологического ромбоэдра).

На рис. 2,а приведено изображение одного из участков поверхности скола, полученного в воздушной среде. Кадр размером  $280 \text{ \AA} \times 280 \text{ \AA}$  снят при скорости сканирования  $U_g = 1$  строк/с. Структурные неоднородности, наблюдаемые в виде цепочек пиков шириной

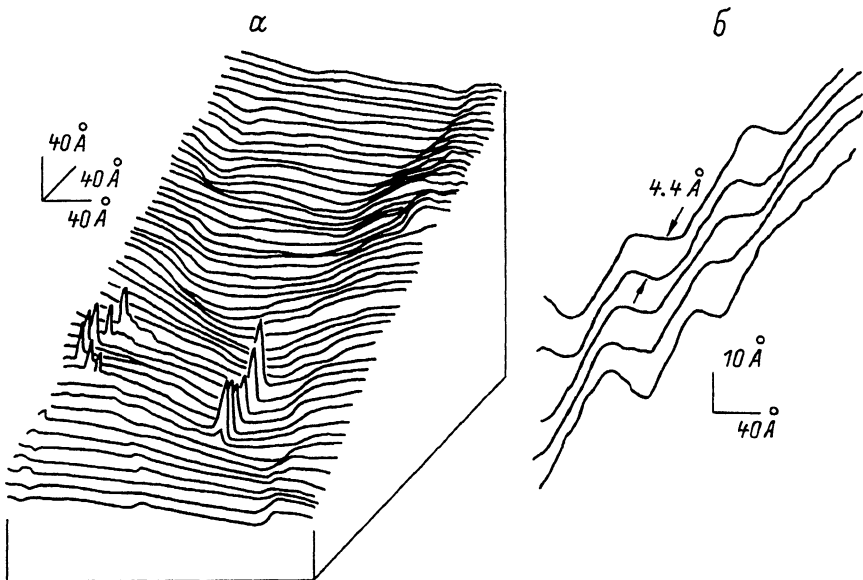


Рис. 2.

$\sim 10 \text{ \AA}$  и длиной  $(50-80) \text{ \AA}$ , по-видимому, связаны с изменением характера силового взаимодействия острия с поверхностью в местах локализации линейных дефектов. Это находит подтверждение в резких вариациях величины  $\omega_{\mu}$  кронштейна над этими участками поверхности. (Анализ физических результатов и их интерпретация будут опубликованы в подробной статье). На рис. 2,б дана запись нескольких строк изображения рельефа, полученных сканированием вдоль участка поверхности скола с неоднородным рельефом. Расстояние между строками  $\delta y = 4.4 \text{ \AA}$ . Из записей можно оценить пространственное разрешение, которое реализуется на данной модели АСМ. В направлении нормали к поверхности оно соответствует уровню шумовой амплитуды, которая для приведенных записей не превышает  $\delta z \approx (1-3) \text{ \AA}$ . Достоверную оценку продольного разрешения  $\Delta$  получить сложнее, поскольку для этого требуется исследовать участки поверхности с заранее известным рельефом. Из рис. 2,а,б следует, что в этой серии измерений величина  $\Delta$  была не хуже  $(10-15) \text{ \AA}$ .

Полученное разрешение АСМ определяется радиусом зондирующего острия и тем расстоянием  $\bar{z}$ , на которое конец острия приближен к поверхности. На расстояниях порядка единиц ангстрем между острием и поверхностью действуют, в основном, экспоненциально спадающие с расстоянием силы  $\sim (10^{-6}-10^{-7}) \text{ Н}$ , и основное силовое взаимодействие осуществляется лишь с той частью атомов острия, которые наиболее близко расположены к исследуемой поверхности. В этом случае продольное разрешение может достигать еди-

ниц ангстрем [7]. С ростом  $\bar{z}$  основной вклад в работу АСМ начинают давать взаимодействия с энергией  $E \sim (10^{-1}-10^{-2})$  эВ, имеющие степенную зависимость от расстояния. Это приводит к уменьшению абсолютного значения  $F(z)$ , увеличению размеров области взаимодействия острия с поверхностью и в результате вызывает ухудшение продольного разрешения  $\Delta$ .

Представленные выше результаты получены для промежуточной области расстояний между острием и поверхностью, что связано с относительно большой жесткостью кронштейна. Кроме того, смещение кронштейна регистрировалось туннельным датчиком перемещений с чувствительностью  $\approx 10^{-1}$  Å в полосе частот 0.5 кГц [6]. Уменьшение жесткости  $K_{\mu}$  при сохранении  $\omega_{\mu}$  и переход от туннельного к оптическим, либо емкостным датчикам, способным регистрировать перемещения до  $\sim (10^{-18}-10^{-19})$  м [8], дают возможность повысить разрешение АСМ в направлении нормали к поверхности.

Резюмируя сказанное, следует обратить внимание на тот факт, что метод АСМ применим (в отличие от СТМ) для бесконтактного исследования микрорельефа поверхностей любых веществ (диэлектриков, полупроводников и металлов) и позволяет изучать локальные межатомные (межмолекулярные) взаимодействия с атомным пространственным разрешением. Совместное применение этих методов даст наибольшую информацию о состоянии и физико-химических свойствах исследуемой поверхности.

Авторы благодарят Л.В. Келдыша за поддержку работы, Ю.С. Бараша и Г.И. Салистру за стимулирующие дискуссии.

### Л и т е р а т у р а

- [1] G v e n t h e r K.H., W i e r e r P.G., B e n n e t t J.M. - Appl. Opt., 1984, v. 23, p. 3820-3836.
- [2] M a t e y J.R., B l a n c J. - J. Appl. Phys., 1985, v. 57, p. 1437-1444.
- [3] B i n n i n g G., G e r b e r Ch., Q u a t e C.F. - Phys. Rev. Lett., 1986, v. 56, p. 930-933.
- [4] M a r t i O., D r a k e B., H a n s - m a P.K. - Appl. Phys. Lett., 1987, v. 51, N 7, p. 484-486.
- [5] B i n n i n g G., R o h r e r H. - J. Res. Develop., 1986, v. 30, N 4, p. 355-369.
- [6] В а с и л ь е в С.И., Л е о н о в В.Б., П а н о в В.И. - Письма в ЖТФ, 1987, т. 13, в. 15, с. 937-941.
- [7] A l b r e c h t T.R., Q u a t e C.F. - J. Appl. Phys., 1987, v. 62, N 7, p. 2599-2602.

[8] Брагинский В.Б., Панов В.И., Попельнюк В.Д. - Письма в ЖЭТФ, 1981, т. 33, с. 423-425.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступило в Редакцию  
30 ноября 1987 г.

В окончательной редакции  
21 января 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 8

26 апреля 1988 г.

## СВЧ-ГАШЕНИЕ ОСТАТОЧНОЙ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$

Б.А. Акимов, Н.Б. Брандт,  
Д.Р. Хохлов, С.Н. Чесноков

Обнаружение эффекта остаточной фотопроводимости (ОФП) в сплавах  $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$  [1] открывает большие перспективы для их использования в качестве счетчиков фотонов далекого ИК-диапазона. Однако существование долговременной фотопамяти в  $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$  приводит и к возникновению значительных трудностей при попытках применить указанные материалы как базовые элементы приемных ИК-систем. Методы теплового [1] и контактного электротермического [2] гашения ОФП не являются удовлетворительными в силу их большой инерционности (характерное время гашения  $\approx 10^{-3}$  с). Электронный механизм [3] обеспечивает гашение ОФП за  $\sim 10^{-7}$  с, однако оно является неполным и неоднородным по образцу и связано с формированием домена сильного поля.

В настоящей работе описан новый бесконтактный метод гашения ОФП в сплавах  $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$  с помощью импульса СВЧ.

В качестве рабочего материала использовались монокристаллы  $Pb_{0.75}Sn_{0.25}Te + 0.5$  ат.%  $In$ , находящиеся в диэлектрическом состоянии [4] при низких температурах. Образец помещался внутрь индуктивности колебательного контура, на который периодически подавались прямоугольные импульсы СВЧ длительностью  $\Delta T$  от  $10^{-6}$  до  $10^{-1}$  с. Частота СВЧ-колебаний в импульсе составляла  $\sim 400$  МГц. ИК-подсветка образца осуществлялась с помощью теплового источника излучения, нагреваемого до температур  $10 \text{ K} \lesssim T^* \lesssim 300 \text{ K}$ . Измерения проводились в охлаждаемой жидким гелием вакуумируемой металлической камере, полностью экранирующей образец от фонового излучения.

Установлено, что для каждой фиксированной температуры источника ИК-излучения  $T^*$  и мощности в СВЧ-импульсе  $P$  существует характерная длительность импульса  $\Delta T_0$  такая, что при  $\Delta T > \Delta T_0$  происходит стабильное и полное гашение ОФП, а если  $\Delta T < \Delta T_0$ , то гашение становится нестабильным, и образец постепенно переходит