

**М. С. Хайкин.** Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия. Принцип действия сканирующего туннельного микроскопа (СТМ)<sup>1</sup> состоит в сканировании по координатам  $X$ ,  $Y$  острия металлической иглы над исследуемой поверхностью проводника на расстоянии  $z = 5\text{--}10 \text{ \AA}$ , обеспечивающем протекание туннельного тока  $j$ . Постоянная величина  $j$  поддерживается электронной схемой, регулирующей расстояние  $z$ ; запись регулирующего напряжения в координатах  $X$ ,  $Y$  изображает поверхность  $S(x, y)$  постоянного туннельного тока  $j = j_0 \exp(-Az\varphi^{1/2})$ , где  $A \approx 1 \text{ \AA} (\text{эВ})^{1/2}$ . При постоянной локальной высоте потенциального барьера (работе выхода электронов)  $\varphi$  поверхность  $S$  соответствует геометрической поверхности исследуемого образца.

Если  $\varphi$  не постоянно по поверхности образца, то величину  $\varphi$  в точке поверхности, находящейся под иглой, можно определить, моделируя расстояние  $z$  с частотой  $\nu$  более высокой, чем полоса частот регулирования  $z$ . Сигнал на частоте  $\nu$  пропорционален величине  $\varphi^{1/2} = \partial \ln j / \partial z$ . Таким образом, в результате сканирования иглы над исследуемым участком поверхности образца одновременно получают карту профиля поверхности  $S(x, y)$  и карта распределения по  $S$  локальной высоты потенциального барьера  $\varphi(x, y)$ .

Описанный способ измерения  $\varphi$  есть один из целого ряда путей применения СТМ для изучения локализованных энергетических состояний электронов в поверхностном слое образца, объединяемых общим именем сканирующей туннельной спектроскопии (СТС). Примеры такого рода исследований можно найти в докладах последней конференции по СТМ<sup>2</sup>; один из примеров будет приведен ниже.

Пространственная разрешающая способность СТМ и СТС достигает  $\sim 2 \text{ \AA}$  в плоскости  $X$ ,  $Y$  и  $\sim 0,02 \text{ \AA}$  по нормали к ней  $Z$ , что позволяет измерять положения отдельных атомов и — с таким же разрешением — локализовать особенности электронных свойств образца<sup>2, 3</sup>. На рис. 1 приведена записанная в ходе эксперимента с СТМ топограмма (глубиной  $\sim 1 \text{ \AA}$ ) кристаллической поверхности пиролитического графита<sup>4</sup>; светлые пятна — выступающие на поверхности атомы углерода; шумы записи могут быть устранены последующей обработкой при помощи ЭВМ. Режим записи — характерный для СТМ: напряжение на промежутке игла-образец 10 мВ, туннельный ток 5 нА, длительность записи  $\sim 20$  с. Поверхность образца должна быть чистой; графит очень удобен в этом отношении, так как его обнаженная скальванием поверхность долгое время остается чистой даже в атмосфере. В иных случаях, например при исследовании кремния<sup>3</sup>, необходима очистка и отжиг поверхности в вакууме. Погружение в газ или жидкость не препятствуют работе СТМ, и их наличие существенно только для обеспечения необходимой обработки или состояния поверхности образца<sup>5</sup>.

Режим применения СТМ с разрешающей способностью, пониженной до  $10\text{--}20 \text{ \AA}$  по  $X$ ,  $Y$ , осуществляется гораздо легче, чем с предельно высокой, в частности, потому, что допускает работу в условиях менее совершенной изоляции от вибрационных помех. Однако и в этом случае СТМ позволяет решить множество задач научного и технологического характера, не разрешимых иными методами<sup>2, 6</sup>.

Особенно интересным и важным представляется применение СТМ для исследований сверхпроводимости, в частности, для изучения свойств высо-

котемпературных сверхпроводников. На рис. 2 приведено распределение величины энергетической щели  $n = 2\Delta/kT_c$  по поверхности микрокристалла  $YBa_2Cu_3O_x$  вблизи его границы с нормальной областью образца, где  $n = 0$ , полученное при 4 К методом СТС<sup>7</sup>. Сканирование иглы вдоль поверхности образца при исследовании веществ этого класса оказалось невозможным, так как они покрываются непроводящим слоем толщиной 100–200 Å, по-видимому, вследствие потери части кислорода и для достижения туннельного контакта игла погружается в поверхностный слой. В эксперименте игла перемещалась следующим образом: по окончании измерения в какой-либо точке игла отодвигалась от образца по Z, затем совершала шаг по X и снова

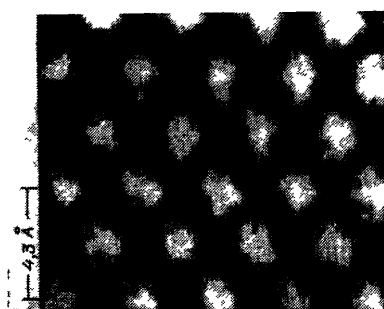


Рис. 1

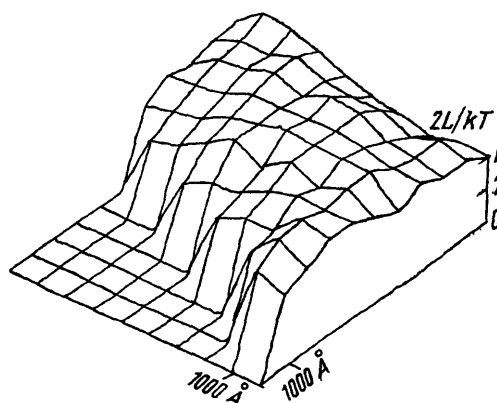


Рис. 2

приближалась по Z к новой точке измерения. В общепринятом режиме работы СТМ игла также «шагает» вдоль поверхности образца под управлением ЭВМ, но движения по Z происходят только под управлением системы обратной связи, поддерживающей постоянным туннельный ток, без отходов по Z на значительное расстояние.

Приведенные примеры иллюстрируют совершенно необычайные возможности методов исследований при помощи СТМ, СТС и их вариантов, которые будут иметь решающее значение для прогресса всех разделов физики и техники поверхностей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Binnig G., Rohrer H.//*Helv. Phys. Acta.* 1982. V. 55. P. 726.
2. *Proc. of the 2nd Conference of STM (STM'87).*—Oxnard, Cal., USA, July 20–24, 1987.
3. Becker R. S., Golovchenko J. A., McRae E. G., Schwartentruber R. S.//*Phys. Rev. Lett.* 1985. V. 55. P. 2028.  
Hammers R. J., Tromp R. M., Demuth J. E.//*Ibidem.* 1986. V. 56. P. 1972.
4. Хайкин М. С., Володин А. П., Трояновский А. М., Эдельман В. С.//*ПТЭ.* 1987. № 4. С. 231.
5. Sonnefeld R., Schneir J., Drake V., Hansma P. K., Asprnes D.E.//*Appl. Phys. Lett.* 1987. V. 50. P. 1742.
6. Хайкин М. С., Трояновский А. М., Эдельман В. С., Пудалов В. М., Семенчинский С. Г.//*Письма ЖЭТФ.* 1986. Т. 44. С. 193.
7. Володин А. П., Хайкин М. С.//*Ibidem.* 1987. Т. 43.

538.93(048)

**В. Г. Вакс, С. П. Кравчук, А. В. Трефилов.** Микроскопическая теория ангармонических эффектов в щелочных и ОЦК щелочноземельных металлах. Ангармонические эффекты (АЭ) в динамике и термодинамике металлов важны для их высокотемпературных свойств, в физике мягких мод и в других явлениях. Количественных данных об АЭ пока немного, а теоретические оценки часто