

М. С. Хайкин. Сканирующая тунNELьная микроскопия и спектроскопия. Принцип действия сканирующего туннельного микроскопа (СТМ)¹ состоит в сканировании по координатам X , Y остряя 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 $j = j_0 \exp(-Az\phi^{1/2})$, где $A \approx 1 \text{ \AA} (\text{эВ})^{1/2}$. При постоянной локальной высоте потенциального барьера (работе выхода электронов) ϕ поверхность S соответствует геометрической поверхности исследуемого образца.

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

Описанный способ измерения ϕ 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 СТМ²; 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 — локализацию особенностей электронных свойств образца^{2, 3}. На рис. 1 приведена записанная в ходе эксперимента с СТМ топограмма (глубиной $\sim 1 \text{ \AA}$) кристаллической поверхности пиролитического графита⁴; 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 ~ 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 кремния³, 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 образца⁵.

Режим применения СТМ с разрешающей способностью, пониженнной до 10—20 \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^{2, 6}.

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 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ вблизи его границы с нормальной областью образца, где $n = 0$, полученное при 4 К методом СТС⁷. 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 совершила шаг по X и снова

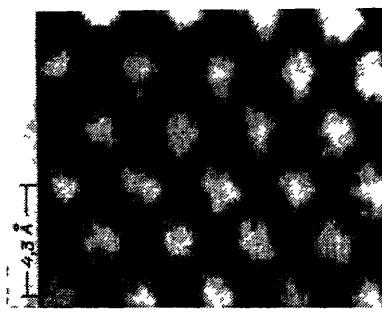


Рис. 1

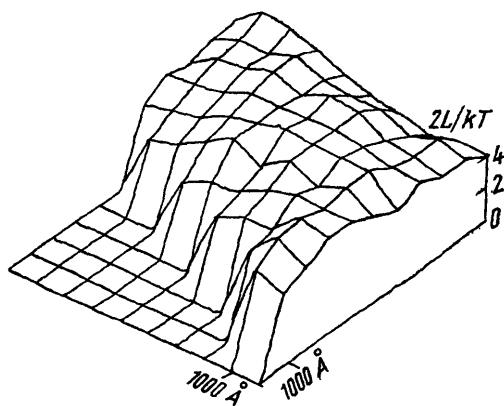


Рис. 2

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., Rohrger 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.
4. Намегс R. J., Тромп R. M., Демут J. E.//Ibidem. 1986. V. 56. P. 1972.
5. Хайкин М. С., Володин А. П., Троиновский А. М., Эдельман В. С.//ПТЭ. 1987. № 4. С. 231.
6. Хайкин М. С., Троиновский А. М., Эдельман В. С., Пудлов 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