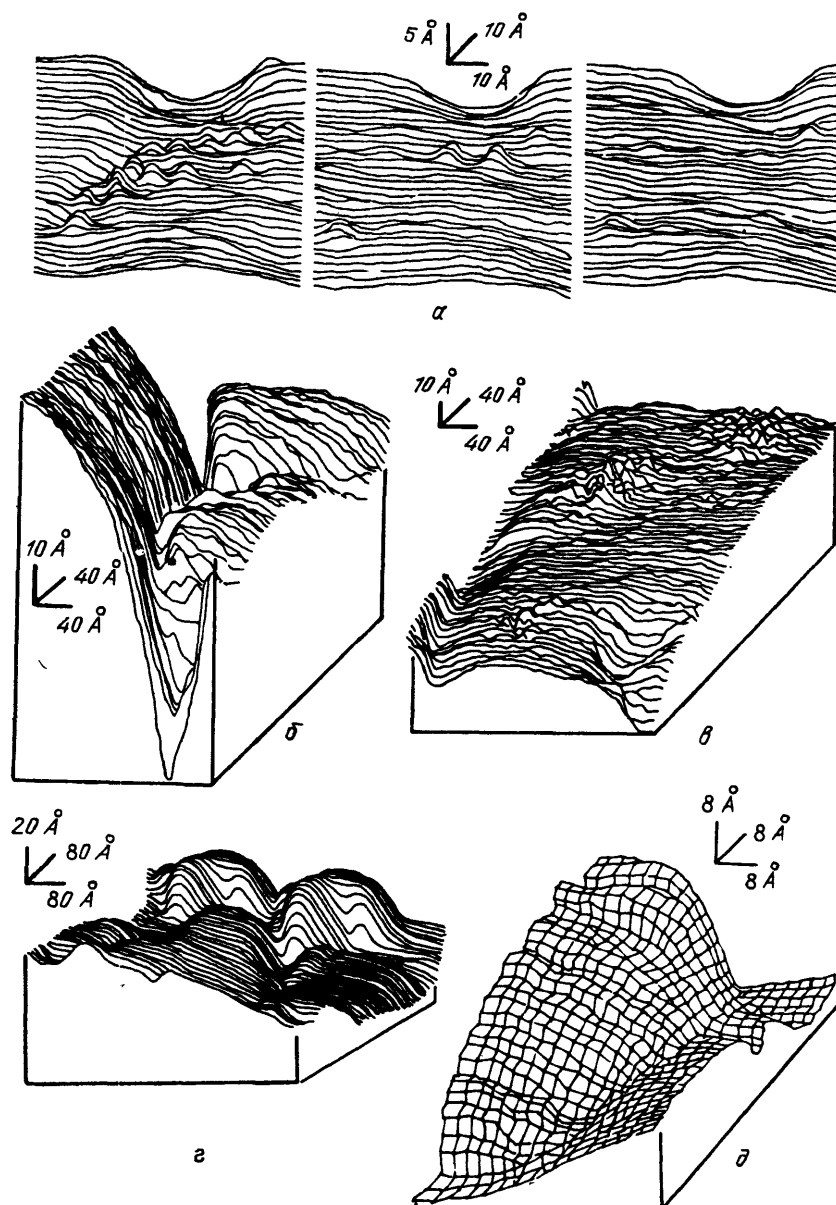


В. И. Панов. Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия поверхности. Создание сканирующего туннельного микроскопа (СТМ)¹ дало возможность распространить методы туннельной спектроскопии для исследования рельефа и локальной плотности электронных состояний поверхности металлов, полупроводников и туннельно-прозрачных диэлектрических слоев в атомных масштабах. Рекордно высокое разрешение СТМ ($\sim 10^{-2}$ Å по нормали к поверхности и ~ 1 Å в ее плоскости), реализуемое как при сверхвысоком вакууме, так и с диэлектрическими средами в туннельном промежутке, стимулировало использование СТМ для диагностики чистых и реальных поверхностей, спектроскопии электронных состояний, изучения явлений адсорбции и катализа, исследования биологических объектов и для целей микроэлектроники. Описание работ, которые выполнены различными группами исследователей с использованием СТМ, приведены в обзоре² и трудах первых международных конференций STM ' 86³ и STM ' 87⁴.

В докладе сообщено о результатах применения СТМ высокого разрешения^{5, 6} для изучения микрорельефа неупорядоченных поверхностей, исследования биологических объектов, наблюдения структурных изменений поверхности атомного масштаба во времени, а также продемонстрировано использование сил межатомного (межмолекулярного) взаимодействия между зондирующим острием и поверхностью для целей спектроскопии поверхности диэлектриков¹⁰.

1. На примере исследования поверхностной самодиффузии адатомов Ag показана возможность применения СТМ для изучения **временных** изменений состояния поверхности с атомным масштабом. На последовательности картинок рис. а показана эволюция во времени микроскопического рельефа одного



и того же участка поверхности Ag вследствие самодиффузии адатомов (которые на рисунке выделяются в виде выпуклостей). Процесс диффузии приводит к постепенному залечиванию микроскопического углубления $5\text{--}8\text{ \AA}$ в местах локализации адатомов на поверхности серебра. Углубление было создано прикосновением острия зондирующей иглы к поверхности. Наблюдаемые эффекты не связаны с вариациями локальной высоты туннельного барьера и не зависят от изменения туннельного тока I_t . Время получения каждого рисунка $\sim 30\text{ с}$.

2. С помощью СТМ были выявлены механизмы поверхностного усиления нелинейно-оптических явлений при отражении света от шероховатой поверх-

ности металлов. Эффекты усиления, заключающиеся в возрастании интенсивности отраженной второй гармоники (ВГ) и сечения комбинационного рассеяния (КР) света, существенно зависят от геометрических параметров, плотности распределения неоднородностей рельефа и электронных свойств поверхности^{7, 8}. Генерация гигантской ВГ наблюдалась, в частности, на пленках серебра, напыленных в сверхвысоком вакууме на охлажденную до 77 К подложку, а также при электрохимическом монослойном окислении поверхности серебра с последующим восстановлением окисленного слоя. Исследование их микрорельефа и электронных свойств дало возможность установить электромагнитную природу усиления гигантского КР. На рис. б, в приведены изображения одного из межкристаллитных разломов (б), оставшихся в пленке Ag (напыленной при 77 К) после ее отогрева до комнатной температуры при давлении $P = 10^{-7}$ Па, и восстановленная поверхность (в) с гранулярной шероховатостью, содержащей в отдельной микронеоднородности $\lesssim 10^2$ атомов. Изображения получены при параметрах $I_T = 0,5$ нА и $V_T \approx 10^{-2}$ В.

3. Применение СТМ, в отличие от других методов, позволяет получить информацию о структурных, химических и электронных (ионных) свойствах биологически активных систем в атомных масштабах, не вызывая нарушения исследуемого объекта. С помощью СТМ изучались молекулы внутриклеточного фермента обратной транскриптазы. Молекулы, растворенные в жидкости, были помещены в зазор между электродами туннельного промежутка (между острием и проводящей поверхностью подложки, на которую молекулы осаждались). В процессе сканирования острие зондирующей иглы находилось в растворе. Полученные изображения двух молекул исследуемого фермента приведены на рис. г. Фрагмент этого фермента в атомных масштабах показан на рис. д. Измерения проводились при $I_T = 0,5$ нА и $V_T \approx 10^{-2}$ В. Результаты демонстрируют перспективность использования СТМ для изучения биологических объектов с атомным разрешением.

4. Возможности СТМ, ограниченные изучением проводящих веществ, стимулировали поиск методов анализа локальных характеристик поверхности диэлектриков. Для этой цели в работе⁹ было предложено и продемонстрировано использование сил межатомного (межмолекулярного) взаимодействия между поверхностью и острием, подносимым к ней на $\sim 1-100$ Å. Метод получил название сканирующей атомной силовой микроскопии (АСМ). Он позволяет получить информацию о рельефе и локальных межатомных взаимодействиях на поверхности любых веществ с атомным разрешением. В докладе сообщено об использовании АСМ¹⁰, созданного на основе СТМ⁵, для исследования микрорельефа поверхности диэлектрического монокристалла Al_2O_3 , сколотого в плоскости $\{10\bar{1}1\}$, и наблюдения на поверхности скола локализованных дефектов.

Совместное применение СТМ и АСМ даст возможность, по-видимому, получать исчерпывающую информацию о состоянии и физико-химических свойствах поверхности многих веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E. // Phys. Rev. Lett. 1982. V. 49, P. 57; 1983. V. 50, P. 120; Appl. Phys. Lett. 1982. V. 40. P. 178.
2. Hansma P., Tersoff J. // J. Appl. Phys. 1987. V. 61. No. 2. P. R1.
3. Proc. of the 1st Conference of STM (STM'86) // Surf. Sci. 1987. V. 181. No. 1/2.
4. Proc. of the 2nd Conference of STM (STM'87). — Oxnard, Cal., USA, July 20—24, 1987.
5. Васильев С. И., Леонов В. Б., Панов В. И. // Письма ЖТФ. 1987. Т. 13. С. 937.
6. Васильев С. И., Леонов В. Б., Панов В. И., Савинов С. В. // ДАН СССР. 1987. Т. 297. С. 1351.
7. Chen C. K., de Castro A. R. B., Shen Y. R. // Phys. Rev. Lett. 1981. V. 46. P. 145.

8. Акципетров О. А., Дубинина Е. М., Еловиков С. С., Есиков Д. А., Мишина Е. Д., Фоминых Н. Н. // Письма ЖЭТФ. 1986. Т. 44. С. 371.
9. Binnig G., Quate C. F., Gerber Ch. // Phys. Rev. Lett. 1986. V. 56. P. 930.
10. Васильев С. И., Леонов В. Б., Моисеев Ю. Н., Панов В. И. Атомная силовая микроскопия поверхности диэлектриков // Препринт физ. фак-та МГУ № 2/1988. — Москва, 1988. — С. 5.

538.971(048)

М. С. Хайкин. Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия. Принцип действия сканирующего туннельного микроскопа (СТМ)¹ состоит в сканировании по координатам X , Y острия металлической иглы над исследуемой поверхностью проводника на расстоянии $z = 5-10 \text{ \AA}$, 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 ν более высокой, чем полоса частот регулирования z . Сигнал на частоте ν пропорционален величине $\phi^{1/2} = \partial \ln j / \partial z$. Таким образом, в результате сканирования иглы над исследуемым участком поверхности образца одновременно получают 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, пониженной до $10-20 \text{ \AA}$ 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^{2, 6}.

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