

$z \approx 3-10 \text{ \AA}$ . Такое расстояние достаточно мало для туннелирования электронов через контакт, т.е. для протекания туннельного тока  $j \approx 1-10 \text{ нА}$  между остриём и образцом, при разности потенциалов  $V$  между ними от единиц мВ до неск. В (в зависимости от материалов электродов и целей). При этом цепь обратной связи поддерживает значение  $j$  постоянным, соответственно изменяя  $z$ . Синхронная со сканированием запись сигнала обратной связи  $V_z$  (на двухкоординатном самописце — в виде кривых, на экране телевиз. трубки — в виде карты и т. п.) представляет собой увеличенную запись профиля поверхности постоянного туннельного тока  $j(x, y)$ . Она совпадает с геом. поверхностью образца  $S(x, y)$ , если высота потенц. барьера (работа выхода) электронов  $\phi$  одинакова по всей поверхности  $S$ , поскольку  $j = j_0 \exp(-A\phi^{1/2})$ , где  $A \approx 1 \text{ \AA}^{-1} (eV)^{1/2}$ . В ином случае распределение  $\phi(x, y)$  может быть получено путём модуляции расстояния на частоте, более высокой, чем полоса пропускания цепи обратной связи и измерения возникающей на этой частоте модуляции  $j$ , амплитуда к-рой пропорциональна  $\phi^{1/2} = \partial \ln j / \partial z$ . Т. о., в результате сканирования острия над участком исследуемой поверхности получаются одновременно её профиль  $S(x, y)$  и распределение работы выхода  $\phi(x, y)$ .

С. т. м. изобретён Г. Биннингом и Г. Рорером в 1982 [1]. Увеличение его определяется отношением размеров записи кадра (на бумаге или экране трубки) к размерам сканируемого участка поверхности, последние могут составить от единиц  $\text{ \AA}$  до десятков мкм. Разрешающая способность микроскопа по  $x, y$  достигает  $\sim 1 \text{ \AA}$ , а по  $z$  порядка  $0,01 \text{ \AA}$ . Прибор может работать в вакууме, газе или жидкости, поскольку  $z$  имеет величину порядка межатомных расстояний в жидкости. Выбор среды определяется конкретной задачей, прежде всего условиями подготовки и поддержания чистоты (или сохранности)

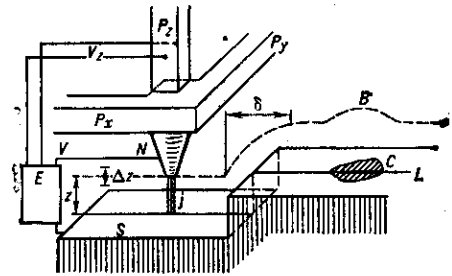


Рис. 1. Схема устройства туннельного микроскопа:  $V_z$  — напряжение обратной связи, регулирующее величину  $z$ ; пунктир — траектория острия, записываемая регистрирующей системой при движении острия над линией  $L$ ;  $\delta$  — сглаженная запись ступеньки;  $B$  — запись участка  $C$  с пониженной работой выхода;  $\Delta z$  — модуляция  $z$  с целью определения работы выхода.

образца. Малая величина  $j$  и низкая энергия туннелирующих электронов исключают опасность повреждения образца током. Длительность записи одного кадра от  $\sim 0,03 \text{ с}$  до 30 мин.

Схема устройства С. т. м. приведена на рис. 1. Пьезоэлектрич. пластины  $P_x, P_y, P_z$  свободными концами (вне рис. 1) закреплены на станине прибора и при приложении к ним электрич. напряжения двигают остриё вдоль соответствующей координаты за счёт собств. деформации (пьезодвигатели). Устройства сближения образца и острия до малого расстояния, перекрываемого пьезодвигателем, осуществлены в разл. вариантах [2]. Блок-схема туннельного микроскопа приведена на рис. 2.

Атомная структура поверхности свежего скола монокристалла графита (долго остающегося чистым на воздухе) часто служит в качестве тест-объекта (рис. 3). Это фотография экрана телевиз. трубки, представляющая собой результат сканирования образца, при к-ром

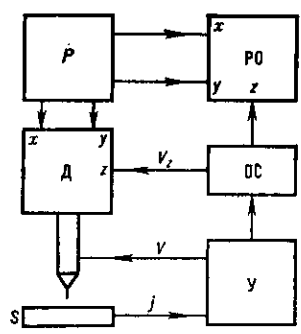


Рис. 2. Блок-схема туннельного микроскопа: У — усилитель туннельного тока; ОС — схема обратной связи; Д — пьезодвигатель острия; РО — устройство регистрации и обработки данных.

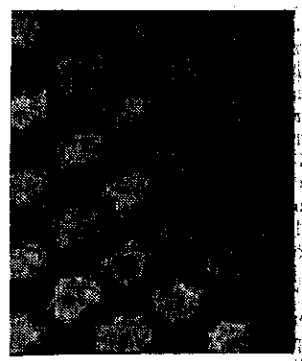


Рис. 3. Атомная структура поверхности ориентированного пиролитического монокристалла графита.

сигнал обратной связи  $V_z$  модулирует яркость пятна, перемещающегося по кадру. Светлые пятна — атомы  $C$ , выступающие над ср. плоскостью поверхности, тёмные места — углубления между ними.

Одно из первых исследований — изучение реконструиров. структуры поверхности (111) монокристалла Si; на рис. 4 границы элементарной ячейки ( $7 \times 7$ ) показаны ромбом, одна сторона к-рого лежит на ступени

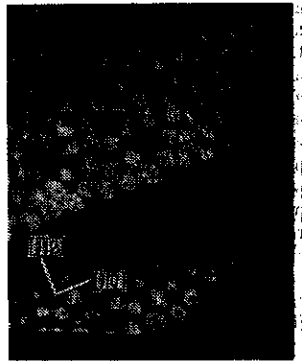


Рис. 4. Атомная структура реконструированной поверхности (111) монокристалла Si.

высотой в один слой атомов [3, 4]. При меньшей разрешающей способности ( $\sim 10 \text{ \AA}$ ) можно изучать состояние поверхности образца на участках большего размера; на рис. 5 показан записанный на двухкоординатном самописце профиль обработанной поверхности (100) кристалла Si (применённого в МДП-структуре для исследования квантового Холла эффекта [5]).

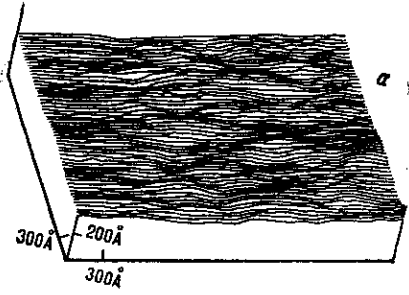


Рис. 5. Поверхность (100) монокристалла Si, обработанная по высшему классу точности.

Успех С. т. м. вызвал появление аналогичных методов исследования поверхностей посредством электрич., световых и др. датчиков. Среди них наиб. интересен сканирующий атомно-силовой микроскоп, основанный