

суперпарамагнитное состояние, в этом случае тепловые колебания начинают оказывать размагничивающее влияние на вектор намагниченности малых кристаллитов. В качестве альтернативы могут выступать многослойные антиферромагнитные структуры с плотностью записи  $5,4 \text{ Гбит/см}^2$ , например, два слоя сплава  $\text{Co} - \text{Pt} - \text{Cr} - \text{B}$ , разделенные прослойкой рутения. Толщина промежуточного слоя  $\text{Ru}$  – три атомных слоя; размер кристаллитов в основных слоях 8,5 нм. В Японии предложено использовать дополнительный подслой  $\text{Co} - \text{Ru} - \text{Co}$  и сообщается, что плотность записи с этом случае может быть повышена до  $50 \text{ Гбит/см}^2$ .

## 2.5. Сканирующая туннельная микроскопия

Сканирующий туннельный микроскоп был предложен Г. Биннигом и Х. Рорером в 1981 г. (эта работа в 1986 г. была удостоена Нобелевской премии).

Принцип действия сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) довольно прост, но кардинально отличается от всех предшествующих методик, применявшихся в физике поверхности. Тонкое металлическое острие, смонтированное на электромеханическом приводе, который обеспечивает перемещения по  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , служит зондом для исследования участков поверхности образца (рис. 2.13, *a*). Когда такое острие подводится к поверхности на расстояние  $\leq 1 \text{ нм}$ , то при приложении между острием и образцом небольшого напряжения смещения  $V$  (от 0,01 до 10 В), через вакуумный промежуток  $\delta_z$ , начинает протекать туннельный ток  $I$  порядка  $10^{-9} \text{ А}$ . Полагая, что электронные состояния (орбитали) локализованы на каждом атомном участке, при сканировании поверхности образца в направлении  $X$  и/или  $Y$  с одновременным измерением выходного сигнала в цепи можно получить картину поверхностной структуры на атомном уровне. Эта структура может быть отображена в двух режимах: измеряя туннельный ток и поддерживая расстояние  $\delta_z$  от острия до поверхности образца или измеряя

изменения в положении острия (то есть расстояние до поверхности образца) при постоянном туннельном токе (второй режим используется чаще).

Все это делает СТМ уникальным микроскопом, который не содержит линз (а значит, изображение не искажается из-за аберраций). Энергия электронов, формирующих изображение, не превышает нескольких электронвольт (т. е. меньше энергии типичной химической связи), что обеспечивает возможность неразрушающего контроля объекта, тогда как в электронной микроскопии высокого разрешения она достигает нескольких килоэлектронвольт и даже мегаэлектронвольт, вызывая образование радиационных дефектов.

Вообще СТМ можно рассматривать как сочетание трех концепций: сканирования, туннелирования и локального зондирования. Само сканирование как средство отображения объекта широко применяется и в других типах микроскопов, например в растровом электронном микроскопе, а также в телевизионной технике.

Несмотря на кажущуюся простоту конструкции, разработка и изготовление СТМ до сих пор остается трудной задачей.

Все СТМ можно разделить на две основные группы: работающие на воздухе (или в другой среде) и в условиях сверхвысокого вакуума. Выделяют также низкотемпературные СТМ, работающие в условиях криогенных температур. В дальнейшем будем говорить только о сверхвысоковакуумных СТМ, работающих при комнатной температуре. Перечислим основные проблемы, стоящие перед разработчиками: 1) изоляция от акустических и механических вибраций; 2) создание быстродействующей малощумящей электроники, работающей в широком динамическом диапазоне; 3) обеспечение надежных сверхвысоковакуумных условий, допускающих различные манипуляции с образцом; 4) изготовление зондов в виде острия с атомногладкой поверхностью.

Проблему вибрации удалось решить, используя специальную подвеску в вакууме всего микроскопа на длинных пружинах и разместив сканирующий

узел на массивном виброизолирующем столике. Для подвода острия-зонда к образцу на расстояние, равное нескольким нанометрам, и сканирования вдоль поверхности использовался двигатель на основе пьезоэлектриков – материалов, которые изменяют свои размеры под действием управляющего напряжения (рис. 2.13,а).

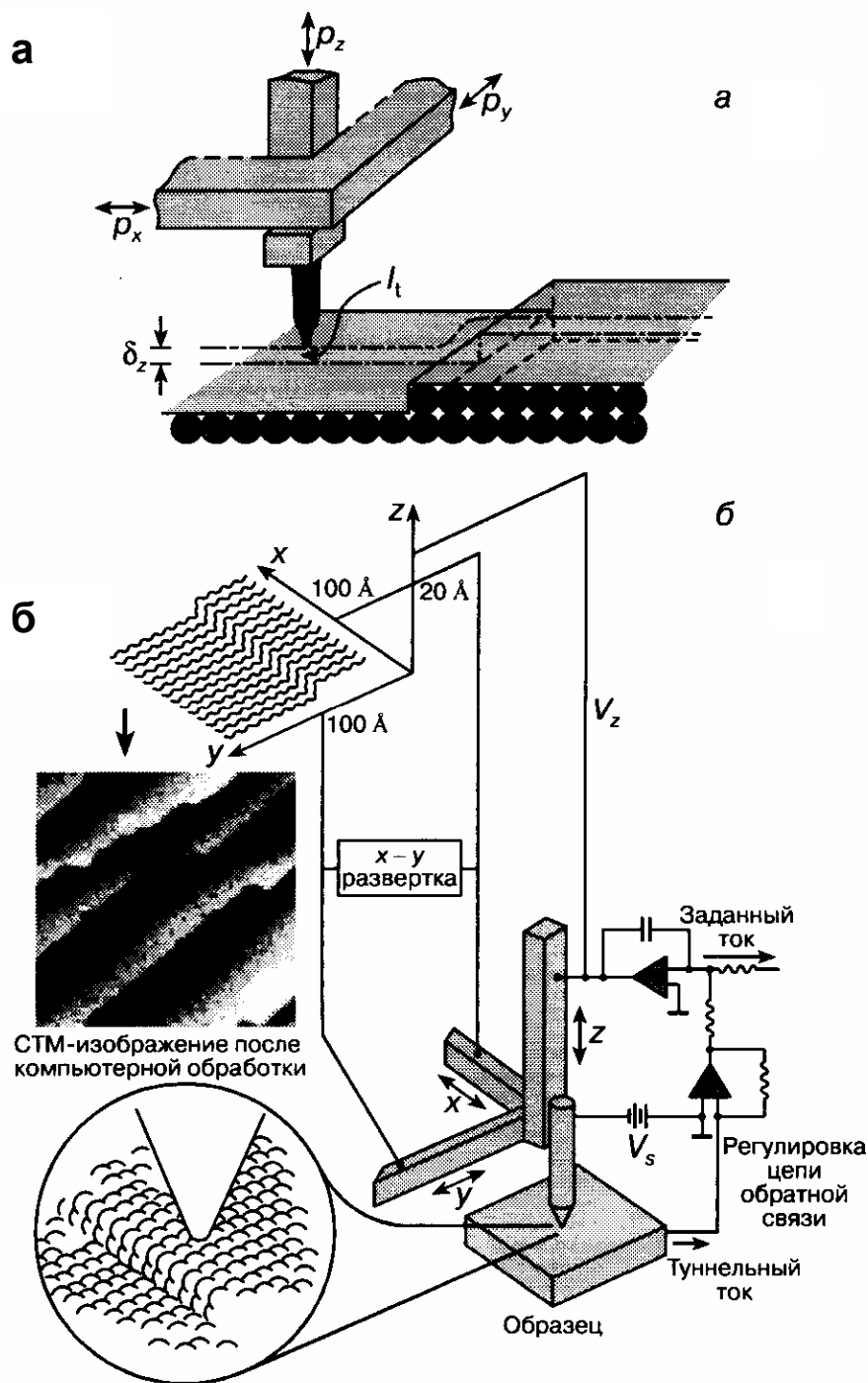


Рис. 2.13. Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ): а – принцип действия СТМ;  $p_x$ ,  $p_y$ ,  $p_z$  – пьезоэлементы;  $\delta_z$  – туннельный вакуумный промежуток между острием-зондом и образцом;  $I$  – туннельный ток; б – схема, иллюстрирующая работу СТМ

Схема, демонстрирующая устройство СТМ и его работу, приведена на рис. 2.13,б. Туннельный ток, возникающий при приложении напряжения  $V$ , поддерживается постоянным за счет цепи обратной связи, которая управляет положением острия с помощью пьезоэлемента  $p_z$ . Запись осциллограммы напряжения  $V_z$  в цепи обратной связи при одновременном воздействии пилообразного напряжения развертки вдоль осей  $x$  и  $y$  образует туннельное изображение, являющееся своего рода репликой поверхности образца. На пьезоэлемент  $p_z$  подается напряжение с выхода усилителя обратной связи, которое определяет величину зазора между образцом и острием и тем самым величину туннельного тока. Сам туннельный ток должен быть все время пропорционален заданному току, что поддерживается благодаря управляемой компьютером цепи обратной связи.

Применение СТМ позволило изучать реальную структуру поверхности твердых тел. Очевидно, что расположение атомов в поверхностном слое, вообще говоря, не такое, как внутри кристалла. В объеме идеального кристалла все валентные связи насыщены, но в процессе образования поверхности, например при раскалывании кристалла, связи между атомами разрываются, а создававшие их электронные пары распадаются на независимые электроны, готовые образовать новые связи — их называют оборванными связями. Такая ситуация энергетически очень невыгодна, поэтому, стремясь к равновесию, поверхностные электроны будут образовывать дополнительные связи между атомами на самой поверхности с тем, чтобы число оборванных связей существенно сократилось. В частности, соседние атомы, образуя дополнительные связи между собой, объединяются в пары — димеры, вследствие чего атомы каждого димера сближаются друг с другом, удаляясь от соседних атомов. В результате на поверхности в одном атомном слое изменяется порядок кристаллической решетки и образуется новая сверхструктура (в физике поверхности принят термин «происходит реконструкция»).

Одной из наиболее важных проблем в физике поверхности более 30 лет была структура поверхности Si (111). Этот материал является основой современной электроники. До применения СТМ было установлено, что эта реконструкция характеризуется периодом, превышающим период объемной решетки в 7 раз, и элементарной ячейкой, содержащей 49 атомов, однако детальное расположение этих атомов в ячейке оставалось неопределенным, а многочисленные (свыше двух десятков) модели этой структуры зачастую противоречили друг другу.

На рис. 2.14 приведена модель Такаянаги поверхности Si (111), построенная на основе туннельного изображения в прямом (а не обратном) пространстве: показана ячейка, содержащая 12 выступов (так называемые адатомы, обозначенные крупными кружочками) и 9 димеров. Угловая ямка и 12 адатомов являются характерными особенностями ромбической элементарной ячейки поверхности Si.

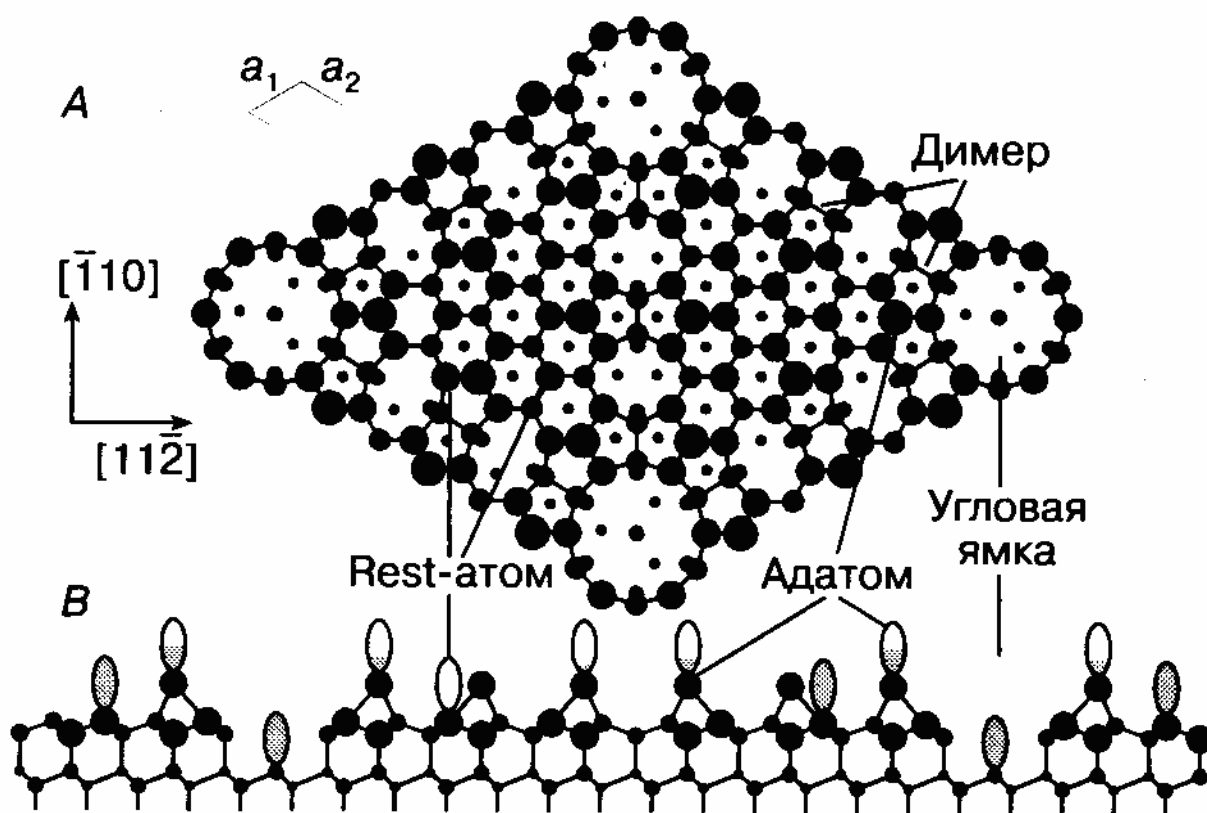


Рис. 2.14. Модель Такаянаги поверхности кремния Si (111):  
А – вид сверху; В – вид сбоку

Впоследствии изображение поверхности Si (111) стало использоваться в качестве своего рода эталона для проверки работоспособности СТМ.

Заметим, что СТМ позволяет наблюдать не сами атомы, а распределение плотности электронов различной энергии в пространстве вокруг атомов и дает не саму топографию, а скорее изображение электронной структуры поверхности в окрестности уровня Ферми. Это обстоятельство, с одной стороны, существенно повышает информативность метода, с другой — затрудняет расшифровку истинных поверхностных атомных структур.

С помощью сканирующего туннельного микроскопа можно не только осуществлять собственно микроскопические исследования с подробной аттестацией поверхностной структуры. Зондом можно перемещать отдельные атомы по поверхности, т.е. проводить модификацию поверхности. Например, в 1990 г. в рекламных целях на грани (110) никелевого монокристалла сотрудниками фирмы IBM был выложен логотип фирмы из 35 атомов ксенона, что демонстрировало осуществимость сборки изделий на атомном уровне.

В настоящее время все острее встает проблема миниатюризации различных устройств. Например, в настоящее время уже имеются опытные образцы микродвигателей с размером ротора около 1 мм, развивающие 40 тыс. об/мин. Многочисленные исследования проводятся в области создания электромеханических систем размером менее 100 нм. Это могли бы быть суперминиатюрные сенсоры, электромоторы, датчики, вентили, клапаны, преобразователи, конденсаторы, резонаторы.

Существуют, по крайней мере, два подхода к конструированию наноустройств. Это, с одной стороны, создание сверхмалых копий известных макрообъектов и, с другой, разработка принципиально новых образцов, не имеющих традиционных аналогов. Более 40 лет назад в известном докладе, посвященном миниатюризации, Р. Фейнман обращал внимание на трудности, возникающие при попытках микрокопирования механических устройств. Эту проблему иллюстрирует следующий пример. Допустим, при общем размере

микроавтомобиля 1 мм чистота обработки поверхностей должна быть атомного уровня, потребуются детали, размер которых соответствует 10 атомам. Возникает также проблема смазки в нанозазорах, необходимость создания электропривода из нанопроводов и др., не говоря уже о проблемах сборки автомобиля как целого. Такого рода построения перестают быть областью чистой теории, поскольку в руках исследователя появились приборы, позволяющие осуществлять манипуляции в наноструктурных масштабах. Туннельные сканирующие микроскопы – это один из примеров реализации нанотехнологических операций макроустановками.