

Сканирующая туннельная микроскопия

СТМ был впервые создан в 1981 году Гердом Биннингом и Хайнрихом Рором в цюрихском исследовательском центре фирмы IBM. Пять лет спустя Биннинг и Рор получили Нобелевскую премию по физике за это достижение. СТМ стал первым прибором, при помощи которого стало возможно получение изображений поверхностей с атомарным разрешением. Эта глава ставит своей **целью** описание главных принципов работы СТМ, позволяющих достигать столь высоких разрешений.

Принципы работы СТМ

Как известно из квантовой механики, электроны способны туннелировать через диэлектрические прослойки. В процессе туннелирования участвуют, в основном, электроны с энергией в окрестности уровня Ферми. Выражения для плотности одномерного туннельного тока получены в ряде работ, но они достаточно сложны и при этом все равно не дают точного описания происходящих процессов (это связано, в первую очередь, с тем, что туннельный ток неодномерен). Поэтому обычно приводят упрощенную формулу, которая хорошо работает для качественных суждений:

$$j = j_0(V) e^{-\frac{4\pi}{h} \sqrt{2m\phi^*} \Delta Z},$$

где $j_0(V)$ – величина, зависящая от напряжения между зондом и образцом, m – масса электрона, ϕ^* – работа выхода, ΔZ – ширина барьера. Ширина барьера в СТМ, т.е. зазор между зондом и поверхностью образца, составляет около 10 ангстрем. Результирующий туннельный ток изменяется в зависимости от расстояния между иглой и образцом экспоненциально, что определяет исключительную чувствительность СТМ. Например, если расстояние между иглой и образцом меняется на 10% от первоначального (порядка 1 ангстрема), туннельный ток изменяется на порядок величины.

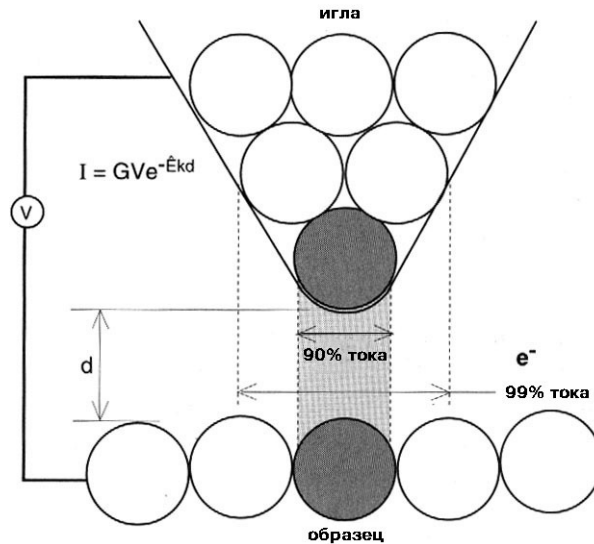


Рисунок 0-1 Схематическое изображение взаимодействия между иглой и образцом в СТМ.

Используя аппарат квантовой механики, можно показать, что 90% туннельного тока протекает через самый крайний атом иглы, а 99% – через кластер из крайних 3 – 4 атомов. Это обстоятельство дает возможность получать атомарное латеральное разрешение без применения каких-либо специальных методов заострения зонда. Таким образом, СТМ позволяет получать изображения поверхности образца с субангстремным вертикальным и атомарным латеральным разрешением. Для примера ниже приведено СТМ изображение поверхности кристалла кремния (111), ставшее классической иллюстрацией возможностей СТМ.

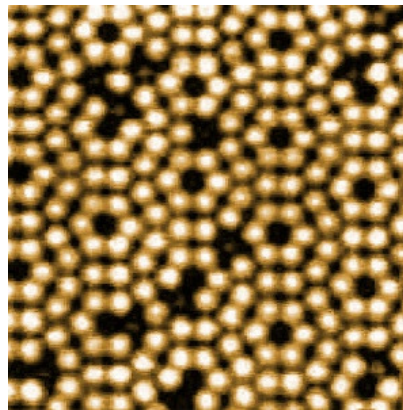


Рисунок 0-2 Реконструкция поверхности кремния (111) 7x7

В СТМ возможно сканирование образца в нескольких режимах: в режиме постоянной высоты или постоянной силы тока (см. рисунок 4-3).

В режиме постоянной высоты игла перемещается в горизонтальной плоскости над образцом. В зависимости от топографии и электронных свойств в той или иной точке поверхности образца туннельный ток изменяется. Данные о распределении силы туннельного тока в разных точках поверхности образца используются далее для построения изображения топографии поверхности.

В режиме постоянной силы тока СТМ использует обратную связь для поддержания значения туннельного тока постоянным за счет подстройки расстояния между поверхностью и зондом в каждой точке измерения. Например, когда система регистрирует увеличение туннельного тока, она подстраивает напряжение, подаваемое на пьезоэлектрический сканер для увеличения расстояния между иглой и образцом.

В режиме постоянной силы тока набор данных формируется исходя из перемещения сканера. Если система поддерживает значение туннельного тока постоянным с точностью до нескольких процентов, расстояние между иглой и образцом будет оставаться постоянным с точностью до нескольких сотых ангстрема.

Каждый из этих режимов имеет свои преимущества и недостатки. Режим постоянной высоты более быстрый, так как система не должна перемещать сканер вверх и вниз, но он дает полезную информацию только для относительно ровной поверхности. В режиме постоянной силы тока возможно измерение неоднородных поверхностей, но для проведения таких измерений требуется более продолжительное время.

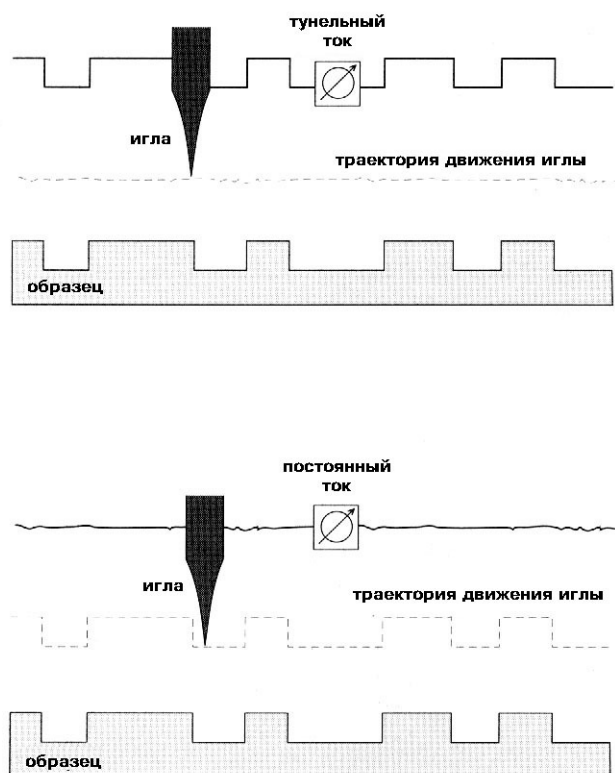


Рисунок 0-3 Сравнение режимов постоянной высоты (сверху) и постоянной силы тока (снизу) для СТМ.

Весьма упрощенно можно сказать, что контраст изображения, основанный на туннельном токе, является чисто топографическим (т.е. отображает только топографию образца). На самом деле, величина туннельного тока соответствует электронной плотности состояний

на поверхности. СТМ фактически определяют количество заполненных и незаполненных электронных состояний вблизи поверхности Ферми в пределах энергетического диапазона, задаваемого напряжением смещения (напряжением между иглой и образцом). Вместо того, чтобы измерять физическую топографию, он измеряет поверхность постоянной туннельной вероятности.

С пессимистической точки зрения, чувствительность СТМ к локальной электронной структуре может привести к ошибкам, если вы заинтересованы в получении топографии. Например, если какой-либо участок образца окислился, туннельный ток резко упадет при попадании иглы на этот участок. В результате игла может сделать углубление на поверхности.

С оптимистической точки зрения, однако, чувствительность СТМ к электронной структуре может быть огромным преимуществом. Другие методики получения информации об электронных свойствах образца предусматривают получение и усреднение данных, исходящих с относительно большого участка, шириной от нескольких микрон до нескольких миллиметров. СТМ могут использоваться в качестве приборов, зондирующих электронные свойства поверхности образца с атомарным разрешением.

Сканирующая туннельная спектроскопия

Сканирующая туннельная спектроскопия (СТС) применяется для изучения локальной электронной структуры поверхности образца. Электронная структура атома зависит не только от его атомного номера, но и от локального химического окружения (количество соседних атомов, вида этих атомов и их пространственного расположения).

СТС включает в себя несколько методов: получение “топографических” изображений (методом постоянной силы тока) путем приложения различного по величине напряжения и их сравнение; получение изображений (методом постоянной силы тока) на различной высоте; развертка напряжения смещения с регистрацией значений туннельного тока. Результатом использования последнего метода являются вольтамперные характеристики, характеризующие электронную структуру в конкретной точке поверхности. СТМ может быть настроен на получение вольтамперных характеристик в серии точек и создавать на основе полученных данных трехмерное графическое изображение электронной структуры. При помощи синхронного усилителя кривые зависимости dI/dV (проводимость) или dI/dz (работа выхода) от напряжения V могут быть получены непосредственно (без использования цифровой обработки на компьютере), что важно с точки зрения погрешностей и чувствительности.

Самое важное в этой главе

- В основе работы СТМ лежит квантовое явление туннелирования электронов через тонкую непроводящую прослойку, при котором сила туннельного тока экспоненциально зависит от толщины прослойки.
- СТМ дает реальное атомарное разрешение на некоторых объектах. Как правило, атомарное разрешение достигается при съемке в вакууме.
- Контраст СТМ-изображения, строго говоря, не чисто топографический. Контраст отображает плотность электронных состояний на поверхности.
- Развертка напряжения смещения в СТМ (сканирующая туннельная спектроскопия) дает возможность получать локальные вольтамперные характеристики и исследовать электронную структуру образцов.

Источники для самостоятельного изучения

- Иллюстрации работы СТМ содержатся на сайте www.ntmdt.ru
- Краткое изложение теории СТМ и некоторых практических аспектов можно найти на <http://lab.bmstu.ru/stm/>

Контрольные вопросы

- В каких случаях предпочтительно использовать метод постоянной высоты, а в каких – метод постоянной силы тока? Почему?
- Какие электроны вносят основной вклад в туннельный ток?
- Каким методом исследуют электронную структуру поверхности полупроводников?
- Почему в СТМ относительно просто получить реальное атомарное разрешение (в отличие от просвечивающей электронной микроскопии или АСМ)?

Дополнительные вопросы

- СТМ позволил впервые получить изображение реконструкции поверхности кремния 7x7. Что такое реконструкция поверхности кремния 7x7?
- Откуда следует, что 90% туннельного тока протекает через крайний атом СТМ зонда?
- Какой проводимостью должен обладать образец, чтобы исследовать его методом СТМ?
- Предположите, что изображено на приведенном СТМ-скане. Объясните, как сформировалось данное изображение. Как получают подобные образцы?



- Какие преимущества и недостатки у платиновых зондов по сравнению с вольфрамовыми? Почему предпочтительнее использовать зонды из платиново-иридиевого сплава, нежели зонды из чистой платины?