

2-я лекции

ОБОРУДОВАНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ

Всякая технология, будь то обработка материала на макро-, микро-, или наноуровне, не может обходиться без средств измерения соответствующих величин.

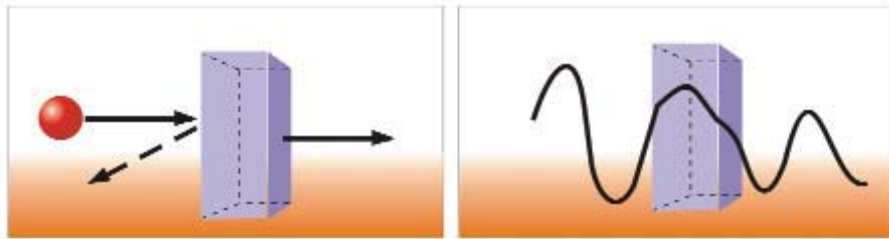
Как мы знаем оптический микроскоп позволяет видеть мелкие детали величиной до 0,25 мкм. Дальнейшие способы улучшения микроскопа, работающего на принципах оптики, привели к созданию его электронного варианта, с помощью которого удается наблюдать предметы с размерами порядка нанометра. Электронный микроскоп позволяет различать даже атомные решетки, но вот обнаружить в них дефекты он уже не может. А ведь для целей нанотехнологии нужно хорошо визуализировать отдельные атомы!

Поэтому когда все возможности данного устройства были исчерпаны, ученые принялись искать новые пути решения поставленной задачи. И вот в начале XX века появилась оригинальная идея изучать вещество, не увеличивая визуально исследуемую площадь его поверхности, а как бы трогая её. Здесь пригодился открытый к тому времени туннельный эффект, на основе которого в 1981 году был создан первый сканирующий туннельный микроскоп (СТМ). Подробным изучением СТМ и туннельного эффекта мы займемся позже, а пока лишь в общих чертах раскроем их суть. *Туннельный эффект* является принципиально квантово-механическим эффектом, не имеющим аналога в классической физике, и потому представляет огромный интерес для исследователей. Он основан на корпускулярно-волновом дуализме – двойственной природе элементарных частиц.

С точки зрения классической механики очевидно, что никакое материальное тело, имеющее энергию E , не может преодолеть потенциальный барьер высотой V_0 , если $V_0 > E$. Например, если принять за материальное тело мяч, а за потенциальный барьер – очень высокий бетонный забор, то понятно, что если кинуть мяч в сторону забора недостаточно высоко – так, что его энергии не хватит на перелет стоящего перед ним барьера, то он, ударившись о преграду, отскочит назад.

Однако если в качестве материального тела рассмотреть электрон, то оказывается, что даже если высота потенциального барьера выше, чем собственная энергия электрона, то он с определенной вероятностью может оказаться с другой стороны барьера, лишь незначительно изменив свою энергию, как если бы в “заборе” оказалась некая “дырка” или туннель.

Это необъяснимое, на первый взгляд, туннелирование является следствием того, что электрону присущи как корпускулярные, так и волновые свойства. Будь электрон классической частицей, обладающей энергией E , он, встретив на своем пути преграду, требующую для преодоления большей энергии, должен был бы отразиться от этой преграды. Однако, будучи одновременно и волной, он проходит сквозь эту преграду, подобно тому, как рентгеновские волны свободно проходят сквозь материальные объекты.



Таким образом, над поверхностью любого проводника или полупроводника всегда наблюдается некоторое количество свободных электронов, “вышедших” за его пределы не в результате термоэлектронной эмиссии, а благодаря туннельному эффекту. Если взять два проводящих вещества, расположить их на расстоянии 0,5 нм друг от друга и приложить к ним сравнительно малую разность потенциалов (0,1-1 В), то между ними возникнет электрический ток, обусловленный туннельным эффектом, который называется туннельным током.

Если повторить тот же опыт, но к поверхности интересующего тела поднести острый предмет, например, очень тонкую иглу с кончиком в атом толщину, то, проводя ею над изучаемым объектом (сканируя его поверхность) можно получать информацию о строении объекта на атомном уровне.

В 1981 году сотрудники компании IBM Г. Бининг и Г. Рорер на основе этого явления построили первый *сканирующий туннельный микроскоп* (СТМ) и в 1982г. с его помощью впервые в истории получили изображение поверхности золота, а затем и кремния с атомарным разрешением.

Принцип работы СТМ-а. В сканирующих зондовых микроскопах исследование микрорельефа поверхности и ее локальных свойств проводится с помощью специальным образом приготовленных зондов в виде игл. Рабочая часть таких зондов (острие) имеет размеры порядка десяти нанометров. Характерное расстояние между зондом и поверхностью образцов в зондовых микроскопах по порядку величин составляет 0,1 – 10 нм. В основе работы зондовых микроскопов лежат различные типы взаимодействия зонда с поверхностью. Так, работа туннельного микроскопа основана на явлении протекания туннельного тока между металлической иглой и проводящим образцом. Работа в СТМ проводится в 2-х режимах: режим постоянного тока и режим постоянной высоты.

Режим постоянного тока — наиболее часто используемый режим получения картин СТМ. В этом режиме игла движется вдоль поверхности образца при постоянных значениях напряжения и тока. Для поддержания постоянной величины тока при фиксированном напряжении система слежения постоянно подстраивает вертикальное положение иглы, варьируя напряжение V .

В режиме постоянной высоты сканирование поверхности иглой проводят при постоянном напряжении V , а измеряют туннельный ток I как функцию положения иглы. Напряжение V между иглой и образцом поддерживается

постоянным. В этом случае выпуклости на поверхности будут отражаться в повышенных значениях туннельного тока, когда над ними будет проходить игла.

За это открытие и изобретения СТМ в 1985 году ученые были удостоены Нобелевской премии, а дальнейшее развитие сканирующей микроскопии привело к бурному развитию нанотехнологий. По иронии судьбы, огромные возможности СТМ были осознаны далеко не сразу: некоторые научно-популярные издания даже не хотели брать в печать статью Бининга и Рорера, содержащую описание изобретения, на основании того, что это якобы “недостаточно интересно”! (впрочем, то же наблюдалось и десять лет спустя в ряде российских изданиях).

Туннельный микроскоп позволил ученым исследовать поверхности на атомном уровне. Однако этот прибор имеет и ряд ограничений. Основанный на туннельном эффекте, он может применяться только для изучения материалов, хорошо проводящих электрический ток.

Но прогресс не стоит на месте, и в 1986 г в лаборатории Цюрихского отделения ИВМ были созданы микроскопы следующего поколения – *атомно-силовые* (АСМ). АСМ тоже позволяет исследовать поверхности с атомной точностью, но уже вовсе необязательно электропроводящие. Сегодня именно он представляет наибольший интерес для исследователей.

Принцип работы АСМ-а. Принципы действия атомно-силового и туннельного микроскопов практически одинаковы, только в отличие от туннельного работа атомно-силового микроскопа основана на использовании сил межатомных связей. В качестве зонда используется наноразмерное острие, располагающееся на конце упругой консоли, называемой кантилевером. Сила, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли. Появление возвышенностей или впадин под острием приводит к изменению силы, действующей на зонд, а значит, и изменению величины изгиба кантилевера. Таким образом, регистрируя величину изгиба, можно сделать вывод о рельефе поверхности.

Под силами, действующими между зондом и образцом, в первую очередь подразумевают дальнедействующие силы Ван-дер-Ваальса, которые сначала являются силами притяжения, а при дальнейшем сближении переходят в силы отталкивания. В зависимости от характера действия силы между кантилевером и поверхностью образца выделяют три режима работы атомно-силового микроскопа:

1. Контактный (англ. *contact mode*)
2. «Полуконтактный» (англ. *semi-contact mode* или *tapping mode*)
3. Бесконтактный (англ. *non-contact mode*)

При контактном режиме расстояние от иглы до образца составляет порядка нескольких десятых нанометра. Таким образом, игла АСМ находится в мягком физическом контакте с образцом и подвержена действию сил отталкивания.

В этом случае взаимодействие между иглой и образцом заставляет кантилевер изгибаться, повторяя топографию поверхности. Топографические изображения в АСМ обычно получают в одном из двух режимов:

- режим постоянной высоты;
- режим постоянной силы.

При бесконтактном режиме (режиме притяжения) кантилевер с помощью пьезокристалла колеблется над изучаемой поверхностью с амплитудой ~ 2 нм, превышающей расстояние между зондом и поверхностью. По изменению амплитуды или сдвигу резонансной частоты колебаний в ходе сканирования поверхности определяется сила притяжения и формируется изображение поверхности.

Полуконтактный режим аналогичен бесконтактному режиму с тем отличием, что игла кантилевера в нижней точке своих колебаний слегка касается поверхности образца.

При использовании АСМ в нанолитографии работа ведется в контактном режиме с контролируемым перемещением острия зонда по заданной схеме.

При использовании специальных кантилеверов можно также изучать электрические и магнитные свойства поверхности.

Дальнейшее развитие зондовой микроскопии привело к созданию целого ряда различных подвидов микроскопов, носящих общее название – сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ). Сегодня наиболее известны следующие их разновидности:

- туннельные зонды;
- атомно-силовые зонды;
- оптические зонды ближнего поля;
- магнитные силовые зонды;
- электростатические силовые зонды и др.