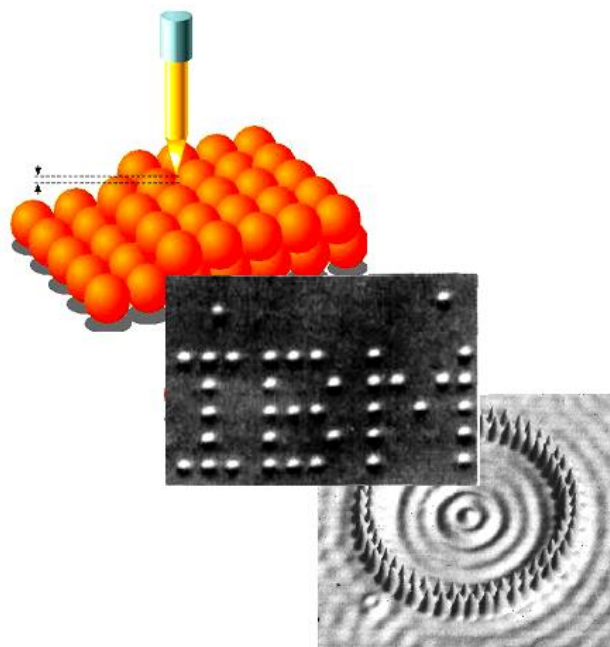


**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, МОЛОДЕЖИ И СПОРТА
УКРАИНЫ**

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»**



**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению практической работы
«МЕТОДЫ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ»
«Введение в нанотехнологии»,
«Технологии и техника наноуровня»,
«Нanomатериалы и нанотехнологии»**

Харьков 2011

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению практической работы
«МЕТОДЫ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ»
по курсам
«Введение в нанотехнологии»,
«Технологии и техника наноуровня»,
«Наноматериалы и нанотехнологии»

для студентов машиностроительных специальностей
дневной и заочной форм обучения

Утверждено
редакционно-издательским
советом университета,
протокол № 1 от 23.06 11 г.

Харьков 2011

Методичні вказівки до виконання практичної роботи «Методи скануючої зондової мікроскопії» з курсів «Введення до нанотехнологій», «Технології і техніка нанорівня», «Наноматеріали і нанотехнології» для студентів машинобудівних спеціальностей денної та заочної форм навчання / Уклад.: Л.І. Пупань. – Харків: НТУ «ХП», 2011. – 21 с. – Рос. мовою.

Укладач Л.І. Пупань

Рецензент Г.К. Крижний

Кафедра «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семка

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- ◆ ознакомиться с физической сущностью методов сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ);
- ◆ ознакомиться с устройством и основными характеристиками сканирующего туннельного микроскопа;
- ◆ ознакомиться с устройством и основными характеристиками сканирующего атомного силового микроскопа;
- ◆ рассмотреть возможности методов СЗМ при изучении наноматериалов.

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Особенности диагностики наноматериалов

Дальнейшее развитие нанотехнологий, достижения в разработке и изготовлении наноструктур в значительной степени определяются уровнем развития методов комплексной диагностики их структуры и свойств.

Особое внимание при этом уделяется созданию и применению взаимодополняющих высокоразрешающих методов практической диагностики наноструктур, обеспечивающих получение наиболее полной информации об основных физических, физико-химических и геометрических параметрах наноструктур и протекающих в них процессах.

Сегодня достигнут значительный прогресс в методах наблюдения и изучения структуры и свойств различных групп наноматериалов.

Вместе с тем, получение наноструктур, низкоразмерных систем и новых наноструктурированных материалов с заданными свойствами, ставит и новые диагностические задачи.

Для решения современных задач диагностики требуется адаптация к этим задачам традиционных методов (оборудования), а также развитие новых, прежде всего, локальных (до масштабов 0,1 нм) методов исследования и анализа свойств и процессов, присущих нанометровой геометрии и системам пониженной размерности.

Методы нанодиагностики должны быть по возможности неразрушаю-

щими и давать информацию не только о структурных свойствах нанообъектов, но и об их электронных свойствах с атомным разрешением.

Для разработки нанотехнологий решающим оказывается не только возможность контролировать атомные и электронные процессы *in situ* (диагностика, встроенная в технологию) с высоким разрешением, в идеале до времени, которое равно или меньше периода атомных колебаний (до 10^{13} с и менее).

Необходима также диагностика электронных, оптических, магнитных, механических и иных свойств нанообъектов на наноскопическом уровне.

Среди методов, применяемых для диагностики наноматериалов, применяются такие методы исследования поверхности, как *дифракция электронов* (дифракция медленных электронов, дифракция отраженных быстрых электронов), *полевые методы* (полевой электронный и ионный микроскопы), *методы сканирующей зондовой микроскопии* (сканирующая туннельная микроскопия, атомно-силовая и магнитно-силовая микроскопия), *рентгеновская спектроскопия и дифракция* (малоугловое рентгеновское рассеяние, рентгеновская спектроскопия поглощения), *электронная спектроскопия* (рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, ультрафиолетовая электронная спектроскопия, электронная Оже-спектроскопия), *оптическая и колебательная спектроскопия* (рамановская спектроскопия), *мессбауэровская* (гамма-резонансная) *спектроскопия*, *методы радиоспектроскопии* (ядерный магнитный резонанс, электронный парамагнитный резонанс).

Это далеко не полный перечень «наноинструментария». Создание новых методов изучения наноматериалов продолжается.

Дальнейшее развитие всевозможных методов диагностики, в частности, диагностики, встроенной в технологию, учитывающих специфику нанообъектов и их характерные размеры, является неотъемлемой частью развития высоких технологий получения и анализа свойств наноструктур нового поколения.

При этом формирование комплексных методов практической диагностики диктуется как технологическими задачами получения наноструктур и создания на их базе следующего поколения электронных и оптических устройств, так и специфическими физическими, физико-химическими и топологическими свойствами, часто не укладывающимися в рамки стандартных представлений о свойствах вещества.

Рассмотрим некоторые, наиболее информативные, методы анализа структуры и свойств наноматериалов.

2.2. Методы зондовой сканирующей микроскопии

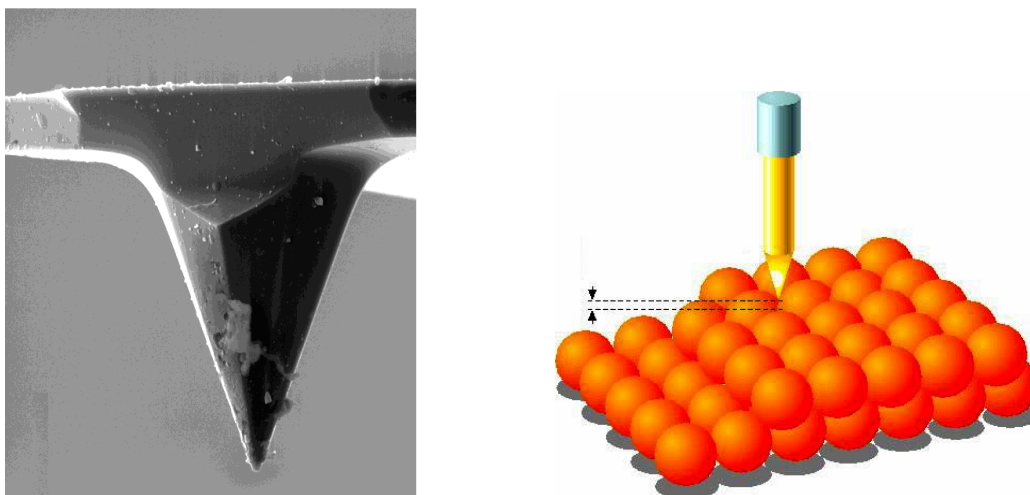
Мощнейшим инструментом развития нанотехнологий, играющем значительную роль в неудержимом исследовании наномира, является создание методов сканирующей зондовой микроскопии – *СЗМ (SPM, Scanning Probe Microscopy)* и, прежде всего, создание новой инструментальной техники – сканирующего туннельного микроскопа (Г. Биннинг, Г. Рорер, сотрудники компании *IBM*, 1981 г.) и сканирующего атомно-силового микроскопа (Г.Биннинг, К.Куатт, К. Гербер, сотрудники цюрихского отделения *IBM*, 1986 г.) изобретений, удостоенных Нобелевской премии за 1996 г.

Общим у методов зондовой сканирующей микроскопии является наличие зонда, рис. 2.1, *a* – чаще всего, заостренной иглы с радиусом при вершине ~ 10 нм и сканирующего механизма-манипулятора.

Обычно механический манипулятор изготавливают из пьезокерамического материала (*3D-пъезосканнер*), рис. 2.1, *b*, обладающего свойством пьезоэффекта (деформации под действием внешнего электрического поля), способного перемещать зонд над поверхностью образца в трех измерениях с высокой точностью – *по оси Z до тысячных долей нанометра, в плоскости образца – на уровне сотых долей нанометра*, см. рис. 2.1, *b*, рис.2.2.

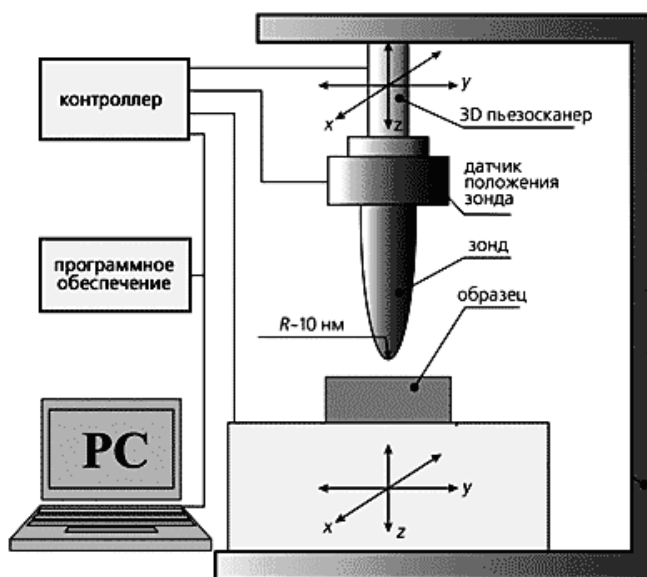
В основе работы зондовых микроскопов лежат различные виды взаимодействия зонда с поверхностью.

Так, принцип действия ***туннельного микроскопа*** основан на явлении протекания между металлической иглой и образцом туннельного тока, величина которого изменяется в зависимости от состояния изучаемой поверхности, например, наличия впадин и выступов; ***в атомном силовом микроскопе*** используются силы межатомного (межмолекулярного) взаимодействия между поверхностью и диэлектрической иглой; ***в магнитном силовом микроскопе зонд***, сканирующий поверхность, является магнитным и позволяет чувствовать локальную магнитную структуру (подобно считывающей головке винчестера или магнитофона); ***электростатический силовой микроскоп*** позволяет обнаруживать элементарные заряды; ***сканирующий фрикционный микроскоп*** дает возможность получать атомные изображения в режиме сил трения.



a

б



в

Рисунок 2.1 – Исследование структур с помощью сканирующей зондовой микроскопии:

a – электронная микрофотография (РЭМ) зонда СЗМ; *б* – расположение иглы сканирующего туннельного микроскопа над слоями атомов исследуемой поверхности; *в* – типовая схема зондовых сканирующих микроскопов

В работе всех сканирующих зондовых микроскопов используется принцип ближнего поля, который реализуется при размещении зонда малого размера на столь же малом расстоянии от образца ($\sim 0,1 \dots 10$ нм). Если размер острия зонда соответствует диаметру атома и расстояние до исследуемой поверхности таких же малых размеров, то и разрешение прибора оказывается равным одному атому.

Сигнал от зонда обрабатывается с помощью компьютера и преобразуется в трехмерное изображение, см. рис. 2.2. Для обработки снимаемых сигналов, их фильтрации и корректировки используются специальные пакеты программ.

Зонд закреплен на пьезоэлектрическом элементе, позволяющем точно устанавливать его в трехмерном пространстве, т.е. подавать требуемые электрические сигналы для его позиционирования в направлении X , Y , Z .

Координаты X и Y используются для построчного сканирования поверхности, а координата вдоль оси Z используется для регулирования расстояния между зондом и образцом. Эту величину подбирают так, чтобы взаимодействие между зондом и образцом, регулируемое либо величиной туннельного тока, либо силой межмолекулярного взаимодействия, оставалось постоянным. Зависимость выходного сигнала усилителя, измеряющего положение зонда по оси Z , от координат $X - Y$ позволяет построить (после обработки данных) изображение рельефа поверхности исследуемого образца.

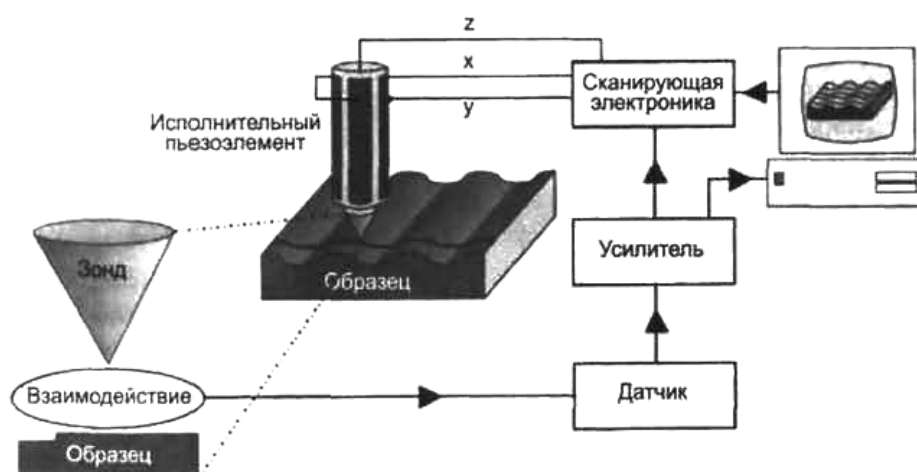


Рисунок 2.2 – Блок-схема СЗМ

СЗМ позволяют изучать не только топологию (геометрические свойства) исследуемых объектов, но и массу других характеристик: магнитные и электрические свойства, твердость, однородность состава; позволяют манипулировать объектами, обеспечивать захват отдельных атомов и переносить их в новую позицию, производить атомарную сборку и т.д.

Размеры зондовых микроскопов значительно ниже, чем у традиционных электронных, а возможностей даже больше: они могут работать при

комнатной, повышенной и даже криогенной температуре, на воздухе, в вакууме, в условиях действия сильных магнитных и электрических полей, СВЧ- и оптического излучения.

Зондовыми методами можно исследовать самые разнообразные материалы: проводящие, диэлектрические, полупроводниковые, биологические – без трудоемкой подготовки образцов.

Существует большое многообразие зондовых микроскопов, отличающихся по своим возможностям и конструкции.

2.3. Сканирующая туннельная микроскопия

Действие сканирующего туннельного микроскопа основано на туннелировании электронов через потенциальный барьер. Туннелирование (туннельный эффект) состоит в преодолении микрочастицей потенциального барьера в случае, если ее энергия меньше высоты барьера, рис. 2.3.

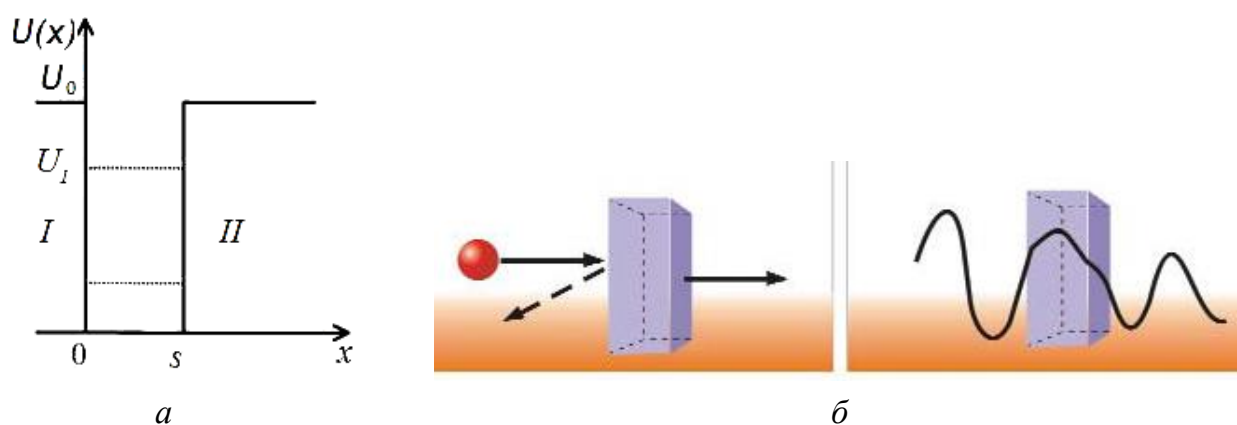


Рисунок 2.3 - Частица в потенциальной яме (а) и демонстрация туннельного эффекта (б)

Потенциальной ямой называется ограниченная область пространства, определяемая физической природой взаимодействия частиц, в которой потенциальная энергия частицы меньше, чем вне ее.

Термин «потенциальная яма» происходит от вида графика, изображающего зависимость потенциальной энергии U частицы в силовом поле от ее положения в пространстве (в случае одномерного движения – от координаты x).

Такая форма зависимости возникает в поле сил притяжения. Основное свойство потенциальной ямы – способность удерживать частицу, полная

энергия которой меньше U_0 ; такая частица внутри потенциальной ямы будет находиться в связанном состоянии.

При классическом описании движения частицы в потенциальной яме вероятность обнаружить ее с энергией U_1 в области, где $U < U_0$, равна нулю (области I, II). При квантовом описании частицы эта вероятность отлична от нуля благодаря тому, что частицы обладают волновыми свойствами (корпускулярно-волновой дуализм) и волновая функция ψ , описывающая движение частицы, отлична от нуля не только внутри потенциальной ямы, но и в областях, где энергия ниже потенциального барьера $U < U_0$.

Если яма имеет стенки конечной высоты и ширины, частица может покинуть яму, даже не обладая достаточной энергией для преодоления потенциального барьера. Это явление называется *туннелированием*, и оно является квантовым.

Принцип действия сканирующего туннельного микроскопа (СТМ, *STM*) кардинально отличается от всех предшествующих методик, применявшихся в физике поверхности, и состоит в следующем, рис. 2.4.

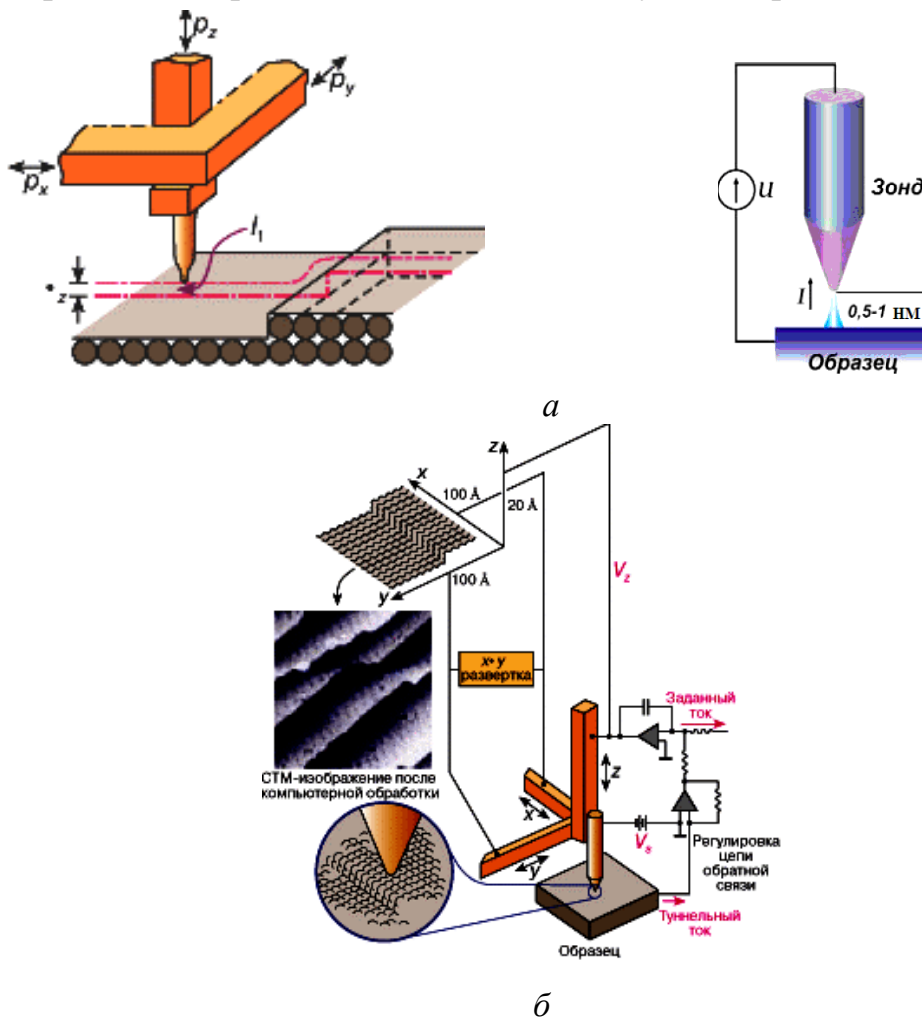
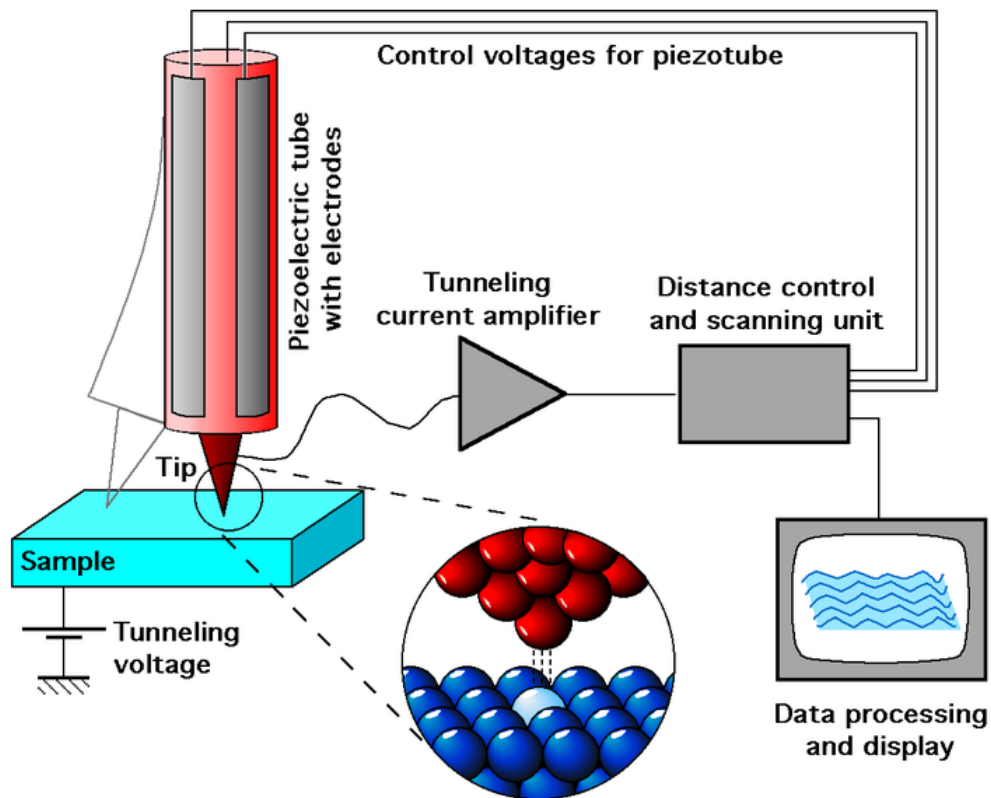
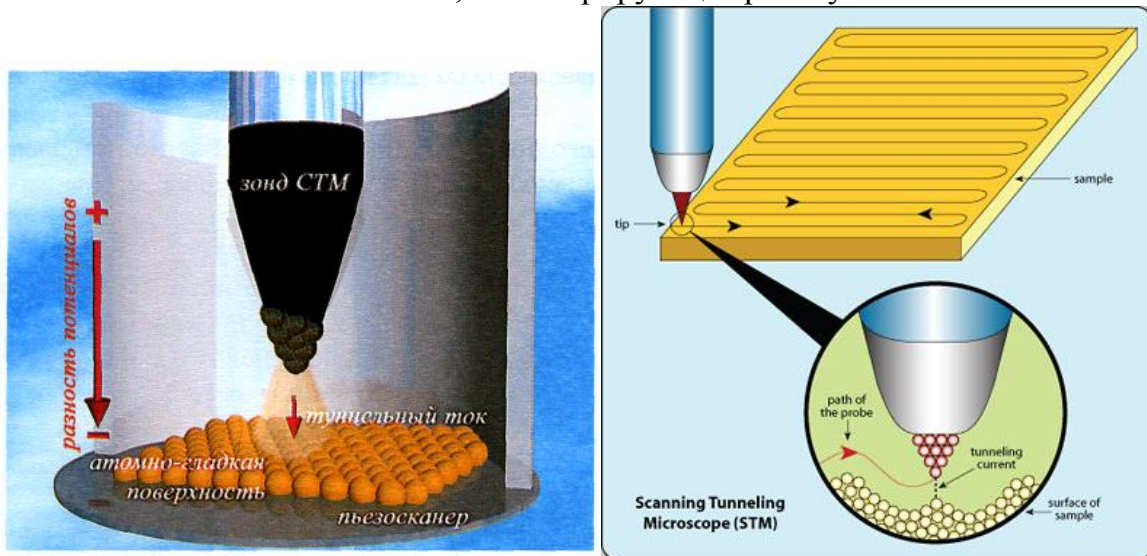


Рисунок 2.4 – Принцип реализации сканирующей туннельной микроскопии: *a* – принцип действия СТМ: p_x, p_y, p_z – пьезоэлементы; z – расстояние между острием-зондом и образцом; I_t – туннельный ток;

б – схема, иллюстрирующая работу СТМ



Тонкое металлическое острие, смонтированное на электромеханическом приводе (X, Y, Z - позиционере), служит зондом – рабочим инструментом для исследования участков поверхности образца, см. рис. 2.4, а. Когда острие подводится к поверхности на расстояние не более 10 \AA , то при приложении между острием и образцом небольшого (от 0,01 до 10 В) напряжения смещения V_s , см. рис. 2.5, б, через вакуумный промежуток Z начинает протекать туннельный ток $I_t \sim 10^{-9} \text{ А}$.

Туннельный ток экспоненциально зависит от расстояния между зондом и образцом, т.е. при увеличении расстояния лишь на 0,1 нм туннельный ток

уменьшается почти в 10 раз. Именно это обеспечивает высокую разрешающую способность микроскопа, поскольку незначительные изменения по высоте вызывают существенное изменение туннельного тока.

Для подвода острия-зонда к образцу на расстояние, равное нескольким ангстремам, и сканирования вдоль поверхности используется пьезодвигатель на основе пьезоэлектриков – материалов, которые изменяют свои размеры под действием управляющего напряжения, см. рис. 2.4, а.

Схема, демонстрирующая работу СТМ, приведена на рис. 2.4, б.

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. На пьезоэлементы p_x и p_y под управлением того же компьютера подаются пилообразные напряжения, формирующие строчную и кадровую развертку (растр) подобно тому, как это осуществляется в телевидении.

Осциллограммы напряжения V_z запоминаются компьютером, преобразуются в зависимость $Z(X, Y)$, отображающую траекторию движения острия и, таким образом, являющуюся туннельным изображением поверхности образца.

В СТМ возможна реализация двух режимов: при измерении туннельного тока и поддержании постоянного расстояния δ_z от острия до поверхности образца – режим постоянной высоты острия иглы или при измерении изменения положения острия (т.е. расстояния до поверхности образца) при постоянном туннельном токе – режим постоянного тока СТМ, рис. 5.

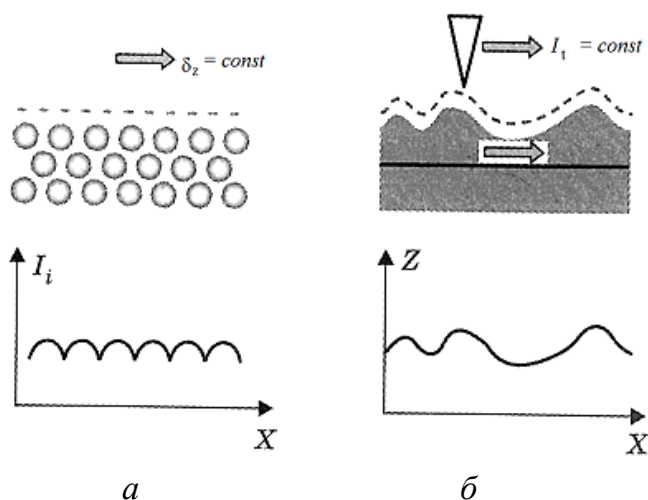


Рисунок 5 – Принципы формирования изображения в СТМ в режиме постоянного расстояния от зонда до поверхности (а) и в режиме постоянного

туннельного тока (б)

У каждого из режимов есть свои положительные и отрицательные стороны: режим постоянной высоты отличается экспрессностью, однако полезная информация может быть получена только с атомарно «гладких» поверхностей; режим постоянного тока требует больше времени, но позволяет исследовать нерегулярные поверхности.

Второй режим (постоянного тока) используется чаще.

Конструкция современных манипуляторов-пьезоэлементов обеспечивает диапазон перемещений зонда до 100...200 мкм в плоскости (с точностью в доли ангстрема) и до 5...12 мкм – по высоте.

Информация отслеживается компьютером и программно визуализируется, чтобы исследователь мог увидеть на экране объект с нужным разрешением.

Общий вид СТМ приведен на рис. 2.5.



Рисунок 2.5 – Общий вид СТМ:

a - СТМ фирмы *Solver*;

б – обучающий сканирующий туннельный микроскоп «УМКА» (Россия)

Исторически первое СТМ-изображение с атомным разрешением, полученное немецкими физиками Г. Биннингом и Г. Рорером, сотрудниками компании IBM (1981 г.) – изображение поверхности золота, на котором отчетливо видны ряды атомов, рис. 2.6.

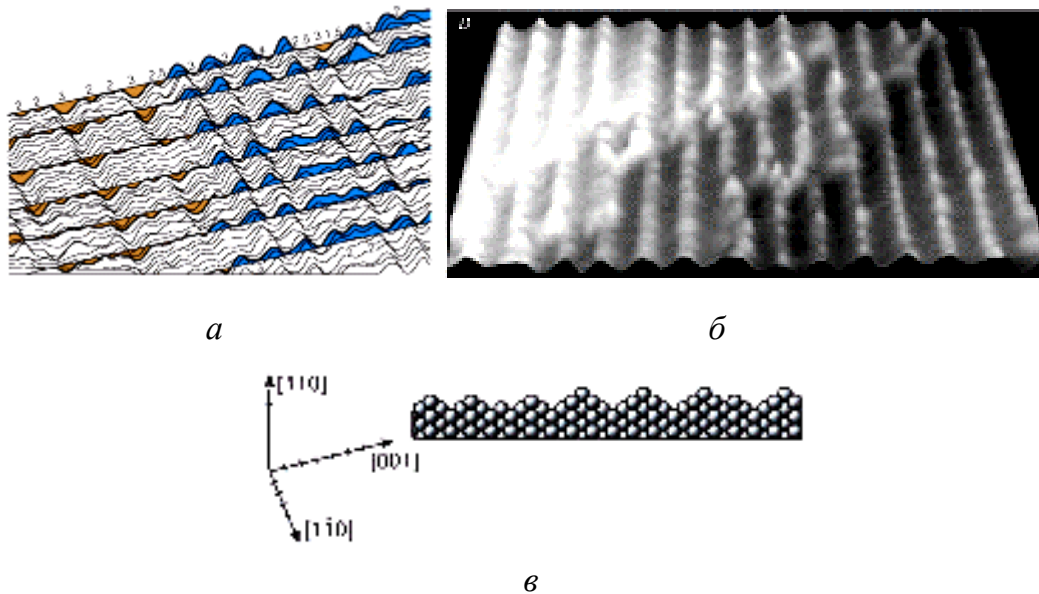


Рисунок 2.6 – STM-изображение поверхности золота: *a*, *б* – атомная структура поверхности, полученная в различных режимах работы STM; *в* – структурная модель поверхности Au (110)

В целом STM можно рассматривать как сочетание трех концепций: сканирования, туннелирования и локального зондирования, что делает его уникальным микроскопом, который не содержит линз (а, значит, изображение не искажается из-за aberrаций). 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.

Возможны различные варианты STM: работающие на воздухе и в вакууме, низкотемпературные STM и работающие в условиях комнатных температур.

Весьма важным конструктивным элементом STM является игла-зонд.

В качестве зонда в STM используется остро заточенная металлическая игла. Предельное пространственное разрешение STM определяется в основном радиусом закругления острия (которое может достигать долей нанометра) и его механической жесткостью. Если механическая жесткость (жесткость – способность тела сопротивляться деформированию) в продольном и поперечном направлениях оказывается

достаточно малой, механические, тепловые и квантовые флуктуации иглы могут существенно ухудшить разрешение СТМ. В качестве материала для зонда обычно используются металлы с высокой твердостью и химической стойкостью.

Зонды изготавливают из различных металлических материалов (иридия, молибдена, ниобия, никеля, платины, родия, вольфрама и т.д.) разными методами.

Методика изготовления СТМ зондов. Изготовление игл для СТМ может осуществляться путем механической, химической или электрохимической обработки исходной проволоки.

Для исследования атомно-плоских поверхностей макроскопическая геометрия зонда не важна, поэтому заострение проволоки осуществляется путем ее механического скусывания под углом 45 °.

Очень острые иглы получают путем **электрохимического травления** исходной тонкой проволоки (диаметром ~ 0,2 мм) в щелочном растворе электролита (1- или 0,5-молярный водный раствор КОН или NaOH) при воздействии переменного напряжения (12...15 В). В качестве материала для второго электрода при этом используется палладий. Травление происходит довольно однородно по всей поверхности погруженной части проволоочки, за исключением мениска на поверхности раствора, где травление идет быстрее. В итоге в области мениска образуется шейка, которая утоняется.

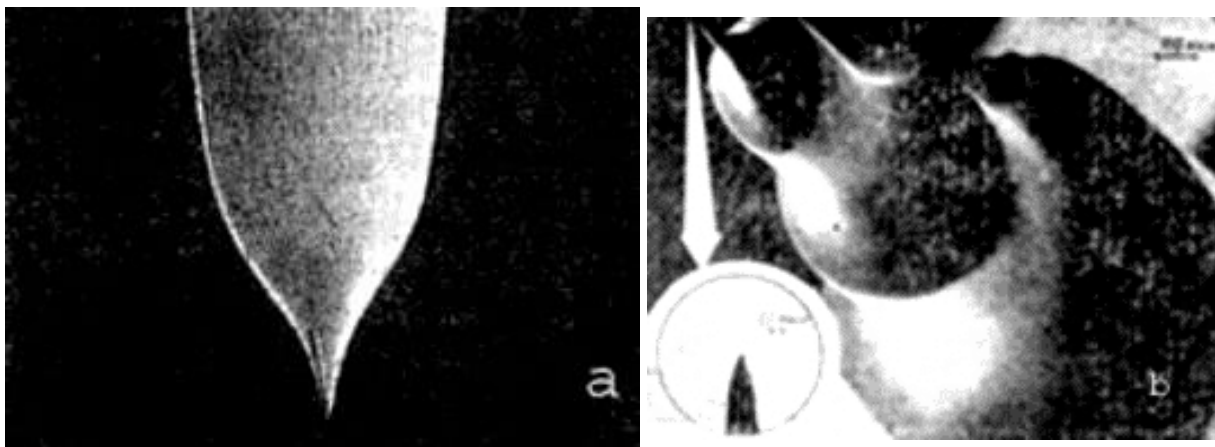
Когда радиус шейки достигает предельного значения r_0 , нижняя часть проволоки отрывается под действием силы тяжести, и процесс травления автоматически завершается. Радиус закругления острия, образовавшегося в момент отрыва, можно оценить по формуле

$$r_0 = d \sqrt{\frac{\rho L}{4\sigma_B}}, \quad (2.1)$$

где d – диаметр проволоки; ρ - удельный вес ее материала; L – длина оторвавшейся части (длина зонда); r_0 – предельный радиус шейки (радиус зонда); σ_B - предел прочности на растяжение (временное сопротивление).

Электронно-микроскопическое изображение кончика иглы, полученной таким способом, показано на рис. а.

Для получения игл с малым радиусом острия в сочетании с их высокой механической жесткостью применяется методика, в основе которой лежит **метод ступенчатой вытяжки проволоочки при электрохимическом травлении** (рис.б).



Электронно-микроскопическое изображение электрохимически заостренного СТМ зонда

Очень важно, что помимо исследовательских функций, сканирующая туннельная микроскопия может выполнять еще и функции активные – конструирование наноструктур.

С помощью зонда СТМ можно осуществлять захват отдельных атомов, перенос их в новую позицию, атомарную сборку, локальные химические реакции, манипулирование отдельными молекулами, рис. 2.7.

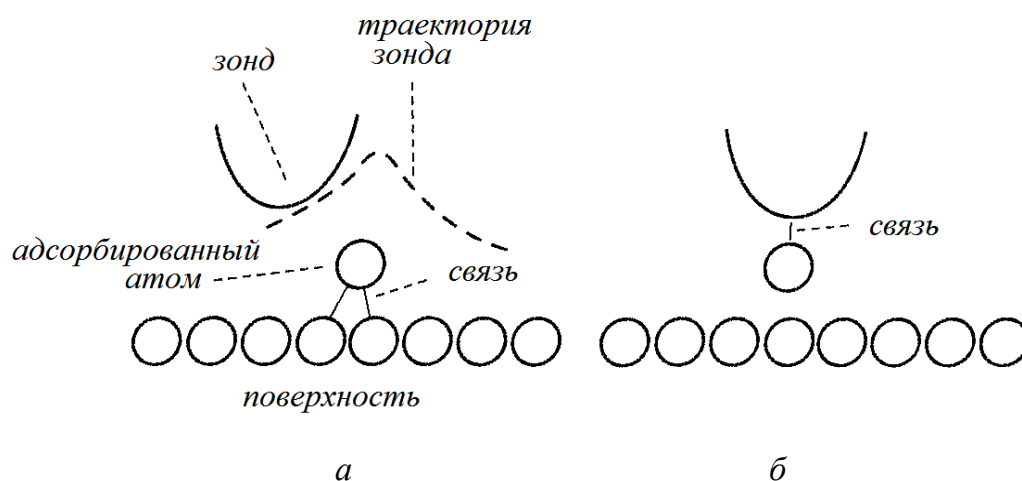


Рисунок 2.7 – Иллюстрация траектории острого зонда СТМ над адсорбированным на поверхности материала атомом:

а – режим изображения (зонд не контактирует с поверхностью, но расположен достаточно близко к поверхности для получения изображения); *б* - режим манипуляции (зонд расположен так близко к поверхности, что между ним и атомом поверхности возникает связь)

Когда в процессе сканирования зонд подходит к этому атому, его траектория искажается, см. рис. 2.7, *а*, что и служит источником информации о

рельефе поверхности. На определенном расстоянии между острием и адсорбированным атомом силы взаимодействия между ними начинают превышать силы, связывающие атом с поверхностью, так что острие тянет атом за собой, см. рис. 2.7, б.

Захваченный атом можно оставить в любой точке поверхности путем увеличения расстояния между острием и подложкой.

Адсорбированные на поверхности материала атомы можно таким способом перегруппировать и поатомно строить на поверхности различные наноструктуры.

Сегодня с помощью основных инструментов нанотехнологий – СЗМ достигнуты существенные успехи по атомарной сборке путем захвата отдельных атомов и переноса их в заданную позицию, т.е. путем формирования поверхности с заданными структурой и свойствами.

Использование сканирующей зондовой микроскопии для локального переноса атомов является, по-видимому, единственным путем получения предельной миниатюризации при создании наноустройств.

Сборка поверхности с помощью сканирующего зонда путем перемещения отдельных атомов или молекул при последовательном наращивании объекта весьма «элегантна» и демонстративна, применима в научных исследованиях, однако слишком дорога и длительна при промышленном применении для построения массивного материала по атому. Поэтому СЗМ-манипуляции не могут пока считаться технологией, пригодной для крупномасштабного производства наноструктур.

Даже при сборке с нереально высокими скоростями $\sim 10^6$ ат/с потребуется $\sim 10^{17}$ с для построения горсти полезного материала.

Эти работы находятся в самой начальной стадии развития, и потребуется еще много усилий для доведения методов механосинтеза до уровня промышленного производства.

Туннельный микроскоп при всех его достоинствах обладает существенным недостатком – основанный на туннельном эффекте, он может применяться только для изучения материалов, хорошо проводящих электрический ток.

Этого недостатки лишены атомно-силовые микроскопы.

2.4. Атомно-силовая микроскопия

Атомно-силовая микроскопия (АСМ, *AFM*) основана на регистрации изменения силы притяжения иглы-зонда (чаще всего, алмазной, в форме конуса или пирамиды; может быть также применена фуллереновая или кремниевая игла) к поверхности образца от точки к точке.

По мере приближения иглы к поверхности ее атомы все сильнее притягиваются к атомам образца. Силы притяжения будут возрастать до тех пор, пока игла и поверхность не сблизятся настолько, что их электронные облака начнут отталкиваться электростатически. При дальнейшем сближении электростатическое отталкивание экспоненциально ослабляет силу притяжения. Эти силы уравниваются на расстоянии между атомами около 2 нм, рис.2.8.

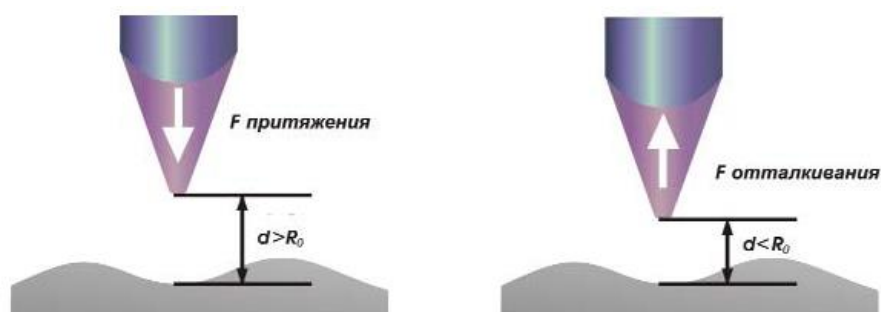
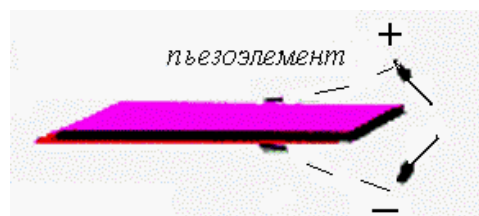
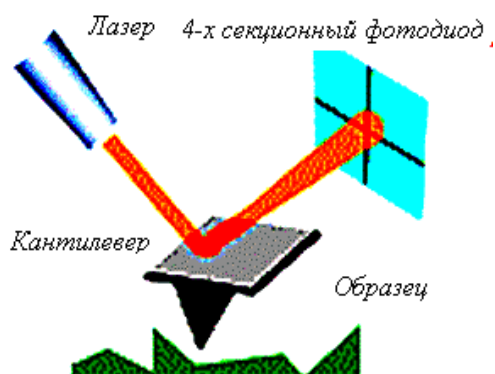


Рисунок 2.8 – Принцип действия АСМ

Для измерения величины силового взаимодействия используется схема, рис. 2.9, включающая в качестве миниатюрного динамометра упругую консоль - кронштейн (левер, или кантилевер – от англ. *cantilever*) – кремниевую пластинку 3x1,5x0,5 мм, на одном свободном конце которой закреплен зонд, другой конец заделан в держателе.



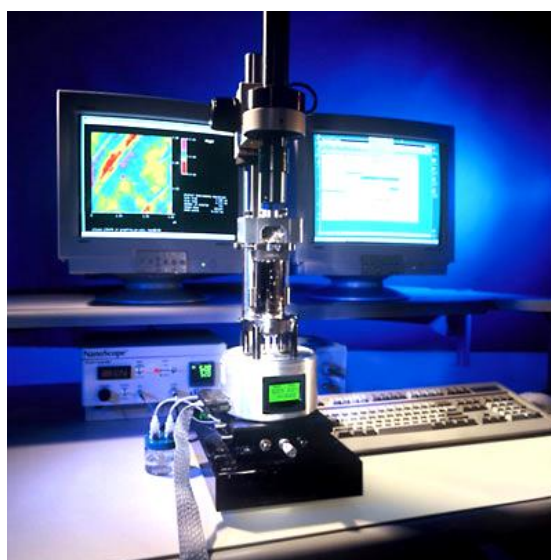
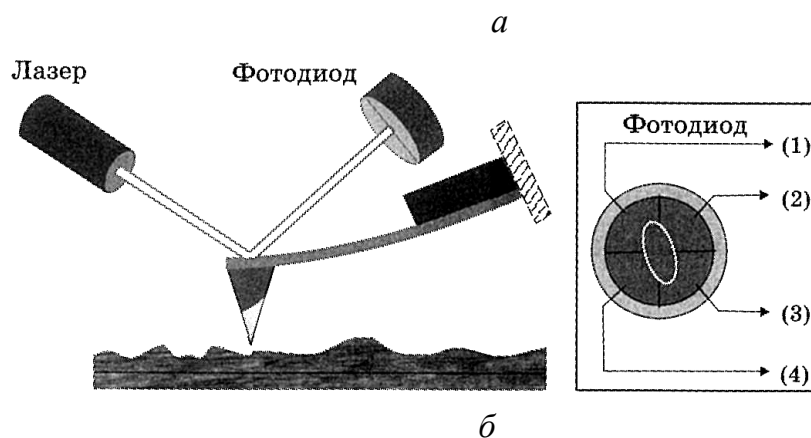


Рисунок 2.9 – Схема атомно-силового микроскопа (а); изгиб кантилевера (б); общий вид атомного силового микроскопа (в)

При сканировании баланс сил взаимодействия зонда и образца приводит к изгибу левера.

Величина изгиба фиксируется прецизионным датчиком, в большинстве атомно-силовых микроскопов – оптическим, работающим по следующей схеме, см. рис. 2.9: луч лазерного диода падает под углом на поверхность левера и отражается в центр четырехпозиционного фотодиода. При изгибе левера происходит смещение луча лазера относительно секций фотодиода, т.е. возникает разница в сигналах соответствующих участков фотодиода: верхние сегменты/нижние сегменты или правые сегменты/левые сегменты. Первый сигнал несет информацию о балансе сил притяжения и отталкивания, а второй – о латеральных силах взаимодействия зонда и образца (т.е. боковых силах трения между зондом и сканируемой поверхностью, от англ. *lateral* – боко-

вой). Такая система позволяет измерять отклонение луча лазера с точностью до 1'', что соответствует отклонению кантилевера на угол $2 \cdot 10^{-7}$ рад.

В процессе сканирования система обратной связи поддерживает на заданном уровне величину изгиба кантилевера (а, следовательно, и силы воздействия зонда на образец) посредством вариации Z-координаты точки закрепления кантилевера. Сигнал обратной связи несет, таким образом, информацию о топографии поверхности.

Как и в случае с СТМ, в атомном силовом микроскопе используется пьезоэлектрический сканер.

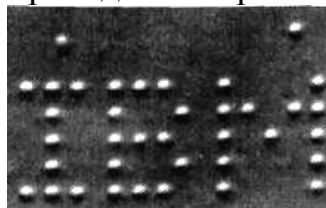
В работе АСМ, аналогично СТМ, возможна реализация различных режимов – контактного (острие зонда непосредственно контактирует с поверхностью), бесконтактного (зонд не касается поверхности); *режима постоянной силы взаимодействия зонда с поверхностью, режима постоянного среднего расстояния между острием зонда и поверхностью.*

Процесс сканирования может осуществляться на воздухе, в некоторых газах, в вакууме и даже сквозь пленку жидкости.

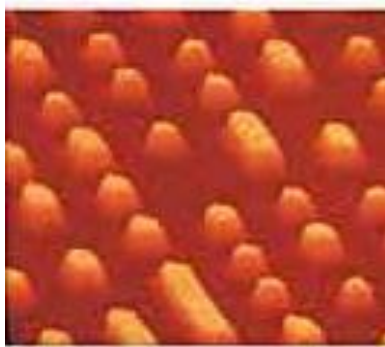
АСМ позволяют получать изображения поверхности с чрезвычайно высокой точностью, до нескольких ангстрем, что превышает точность СТМ. Это объясняется тем, что в АСМ нет ограничений на близость острия зонда к исследуемой поверхности, например, при исследовании диэлектриков, в которых не возникает туннельный ток. Кроме того, точность АСМ может быть повышена за счет улучшения характеристик материала кронштейна (кантилевера, плоской пружины). Слабые упругие напряжения, которые возникают в кронштейне, регистрируются с достаточно высокой точностью (~ 1 нН), что соответствует атомарному разрешению для структуры.

АСМ могут быть также использованы для изучения не только структуры, но и магнитных, электростатических характеристик, адсорбционных свойств и других параметров.

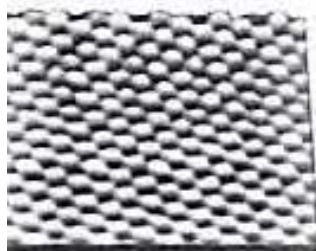
Изображения различных объектов, полученных методами сканирующей зондовой микроскопии, приведены на рис. 2.10.



первое практическое достижение нанотехнологии: надпись «IBM», выполненная 35-ю атомами ксенона на поверхности монокристалла никеля с помощью СТМ



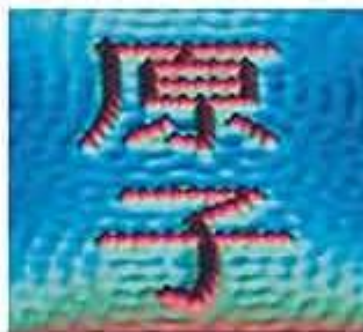
рельеф CD-ROM (АСМ)



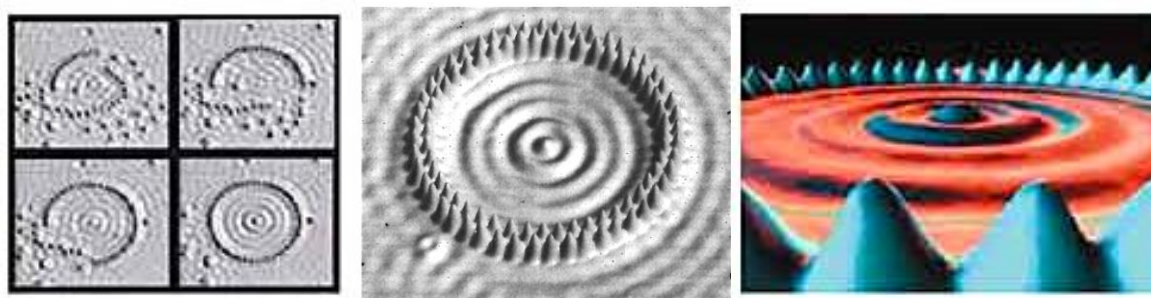
изображение поверхности графита с атомным разрешением (СТМ);



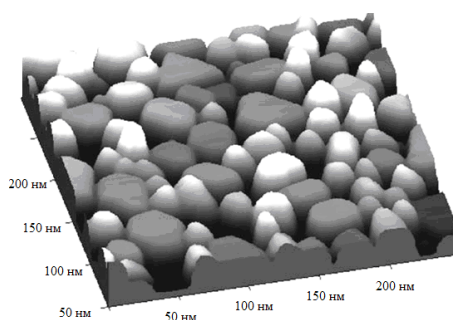
изображение квантовой точки, образованной самосборкой атомов (германиевая пирамида)



атомный дизайн в СТМ: - «пляшущий человечек», выложенный молекулами монооксида углерода; - иероглифы, выложенные атомами железа на поверхности меди (111)



поатомная сборка «квантового загона» для электрона из 48 атомов железа на поверхности кремния; в собранном «загоне» видны стоячие волны электронной плотности захваченного ловушкой электрона - СТМ



эпитаксиальный рост наночастиц золота (АСМ)

Сегодня в мире СЗМ и принадлежности к ним выпускаются многими фирмами. Среди наиболее известных фирм – *Digital Instruments*, *Omicron*, *Park Scientific Instruments*, *Topometrics* и т.д.

Цены на СЗМ – от 40 тыс. \$ за простейший АСМ до 100...200 тыс. \$ и выше в зависимости от комплектации и спектра решаемых задач.

В России СЗМ выпускают фирмы «Нанотехнология-МДТ», концерн «Наноиндустрия». Например, концерн «Наноиндустрия» приступил к выпуску учебного СТМ «УМКА», см. рис. 2.5, который малогабаритен (помещается в небольшом дипломате), стоит 9 тыс. \$, работает в комнатных условиях; для работы используется обычный персональный компьютер.

3. ХОД ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с принципом работы и основными характеристиками СЗМ.
2. Ознакомиться со схемой, принципом действия и возможностями сканирующих туннельных микроскопов при изучении наноматериалов.

3. В соответствии с исходными данными, приведенными в табл.3.1, используя формулу 2.1, табл. 3.2, рассчитать радиус закругления острия зонда r_0 сканирующего туннельного микроскопа, полученного электрохимическим травлением.

Таблица 3.1 – Исходные данные для расчета радиуса зонда СТМ

№ варианта	Материал зонда	Диаметр исходной проволоки d , мм	Длина зонда L , мм
1...15	Вольфрам	0,1	10
2...16	Вольфрам	0,05	8
3...17	Вольфрам	0,01	5
4...18	Никель	0,2	12
5...19	Никель	0,01	8
6...20	Молибден	0,15	10
7...21	Молибден	0,02	4
8...22	Ниобий	0,2	9
9...23	Ниобий	0,02	4
10...24	Ниобий	0,01	3
11...25	Платина	0,25	9
12...26	Платина	0,1	7
13...27	Платина	0,02	6
14...28	Платина	0,01	4

Таблица 3.2 – Физико-механические свойства материала зонда

Материал зонда	Температура плавления, °С	Удельный вес, $\text{кг/м}^3 \cdot 10^3$	Временное сопротивление σ_b , МПа
Вольфрам W	3410	19,3	1100
Никель Ni	1453	8,9	460
Молибден Mo	2620	10,2	310
Ниобий Nb	2500	8,6	400
Платина Pt	1769	21,5	140

4. Ознакомиться с принципом работы и возможностями АСМ.

3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1.Цель работы.

2.Принцип работы и возможности СЗМ для изучения наноматериалов, рис.2.2.

3.Принцип работы и характеристики СТМ, рис. 2.4, а.

4. Основные требования к материалам зонда СТМ и применяемые материалы. Методы изготовления зондов.
5. Расчет угла заострения зонда СТМ.
4. Принцип работы и характеристики АСМ, рис.2.8.

Контрольные вопросы

1. Каковы особенности диагностики наноматериалов?
2. Какие методы применяют для изучения наноматериалов?
3. В чем сущность методов СЗМ?
4. Каков принцип работы СЗМ?
5. Каково предельное разрешение СЗМ?
6. Какие задачи изучения наноматериалов решают с помощью СЗМ?
7. Опишите принцип действия и устройство СТМ.
8. В чем принцип туннельного эффекта, что представляет собой туннельный ток?
9. Каковы основные концепции устройства СТМ?
10. Каким образом осуществляется конструирование наноструктур с помощью СТМ?
11. Опишите принцип действия АСМ.
12. Какова схема регистрации силового взаимодействия зонда АСМ и поверхности исследуемого материала?
13. Сопоставьте характеристики АСМ и СТМ.
14. Из каких материалов и какими методами получают зонды в СЗМ?
15. Какие наноматериалы можно изучать с помощью СТМ и АСМ?
16. Какие параметры наноматериалов, помимо структуры, можно изучать с помощью СЗМ?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбалкина М. Нанотехнологии для всех / М. Рыбалкина. – М.: Nanotechnology News Network, 2005. – 444 с.

2. Пул Ч. Нанотехнологии / Ч. Пул, Ф. Оуэнс: пер. с англ. – М.: Техносфера, 2005. – 336 с.
3. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения: учеб. пособие / Балоян Б.М., Колмаков А.Г., Алымов М.И. и др. – М.: АгроПрессДизайн, 2007. – 102 с.
4. Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию / Н. Кобаяси: пер. с японск. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 134 с.
5. Нанотехнологии. Азбука для всех / под ред. Ю. Д. Третьякова. – М.: Физматлит, 2008. – 368 с.
6. Нанотехнологія та її інноваційний розвиток: Монографія / В.с. Пономаренко, Ю.Ф. Назаров, В.П. Свідерський, І.М. Ібрагімов. – Х.: ВД «ІН-ЖЕК», 2008, 280 с.
7. Балабанов В.И. Нанотехнологии. Наука будущего / В.И. Балабанов. – М.: Эксмо, 2009. – 256 с.

Навчальне видання

Методичні вказівки

до виконання практичної роботи

«Методи скануючої зондової мікроскопії»

з курсів «Вступ до нанотехнології», «Технології і техніка нанорівня»,

№Наноматеріали і нанотехнології»

для студентів машинобудівних спеціальностей денної та заочної форм

навчання

Російською мовою

Укладач ПУПАНЬ Лариса Іванівна

Відповідальний за випуск А.І. Грабченко

Роботу до видання рекомендував О.М.Шелковой

В авторській редакції

План 2011 р., поз. 108.

Підп. до друку .11 р. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний. Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 1,3. Обл.-вид. арк. 1,62. Наклад 40 прим. Зам. № . Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ».

Свідоцтво про реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.

61002, Харків, вул. Фрунзе, 21
