

Сканирующая микроскопия в измерениях нанообъектов

© Е.В. Смирнов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Статья посвящена анализу приборов нанотехнологий и тех физических явлений, которые лежат в их основе. Подробно рассмотрены сканирующий туннельный, атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопы, указаны возможности этих приборов в развитии технологий атомного уровня — атомного дизайна, спинтроники и т. д. В основе действия приборов нанотехнологии лежат квантовые явления, что предъявляет более высокие, чем прежде, требования к уровню подготовки инженерного персонала и, соответственно, к уровню овладения студентами технических университетов современной, в первую очередь, квантовой, физикой. Подчеркивается важность фундаментальной подготовки студентов технических вузов для успешного развития нанотехнологий в нашей стране.

Ключевые слова: нанотехнологии, сканирующий туннельный микроскоп, атомно-силовой микроскоп, магнитно-силовой микроскоп, атомный дизайн, спинтроника.

Введение. Интенсивное развитие нанотехнологий, происходящее в последние десятилетия, их широкое проникновение практически во все сферы научно-технической деятельности человека — электронику, машиностроение, энергетику, биологию, медицину, экологию и т. д. — является одной из наиболее характерных особенностей современного этапа развития нашей цивилизации. Первые практические результаты применения достижений нанотехнологий продемонстрировали их поистине удивительные возможности. Еще более поразительными являются перспективы дальнейшего развития этих направлений.

Отметим, что успешное развитие нанотехнологий стало возможным, прежде всего, потому, что были созданы приборы, которые позволили исследовать нанообъекты с необходимым для этого высоким разрешением. К числу этих приборов относятся сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), атомно-силовой микроскоп (АСМ), магнитно-силовой микроскоп (МСМ) и еще ряд других микроскопов. Все они являются основными приборами нанотехнологий, поэтому студентам технических университетов необходимо представлять себе их возможности, а также знать те физические явления, в первую очередь, квантовые, которые лежат в основе их работы.

Все эти приборы являются зондовыми. Изучение объектов нанотехнологий с их помощью основано на взаимодействии очень тонкого зонда (иглы), подводимого к исследуемой поверхности, на которой рас-

положены эти объекты, с самими объектами [1–3]. В зависимости от характера взаимодействия зонда с поверхностью — протекания туннельного тока, ван-дер-ваальсовского взаимодействия молекул зонда и поверхности, взаимодействия магнитного поля зонда с магнитной структурой поверхности и т. д. — возникают изменения положения зонда при сканировании поверхности, которые фиксируются высокоточной следящей системой. По этим отклонениям и удается прецизионным образом исследовать свойства изучаемой поверхности и находящихся на ней атомных и молекулярных образований.

Пьезоэлектрический сканер. Высокое разрешение сканирующих зондовых микроскопов достигается при использовании пьезоэлектрических сканеров — устройств, которые с очень высокой точностью перемещают зонд над исследуемой поверхностью. В основе работы этих сканеров лежит обратный пьезоэлектрический эффект, заключающийся в том, что приложение напряжения к пьезоэлектрическому образцу вызывает изменение его размеров. Это изменение может быть очень малым и иметь значение до $\Delta x \sim 1$ нм. На рис. 1 представлен простейший вид сканера, состоящего из трех поликристаллических пьезоэлектрических брусков, так называемый трипод. Подача напряжения на каждый из брусков приводит к смещению сканирующего зонда вдоль соответствующей оси — x , y или z . Важной особенностью пьезосканеров является линейная зависимость их перемещения от величины приложенного напряжения, что значительно упрощает управление процессом перемещения зонда над исследуемым объектом.

В настоящее время наибольшее распространение в сканирующей зондовой микроскопии получили трубчатые пьезосканеры. Они представляют собой полые тонкостенные цилиндры из пьезоэлектрических

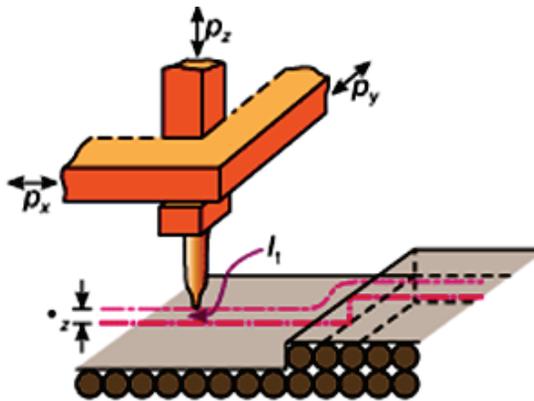


Рис. 1. Пьезоэлектрический сканер зондового микроскопа

(пьезокерамических) материалов и позволяют получать значительные перемещения зонда при относительно небольших управляющих напряжениях.

Важнейшей особенностью всех видов пьезосканеров является их безынерционность, они обладают высокой чувствительностью и плавностью перемещений, значительным быстродействием, а также обеспечивают возможность реверсивных перемещений при сканировании поверхности.

Следует отметить, что при работе пьезосканеров могут возникать искажения получаемого изображения из-за таких нежелательных эффектов, как нелинейность механической деформации, гистерезис, ползучесть (крип), температурный дрейф и старение керамики, которые необходимо принимать во внимание в процессе работы.

Сканирующий туннельный микроскоп. СТМ был создан в 1982 г. сотрудниками исследовательского отдела фирмы IBM Г. Биннигом и Х. Ререром. Благодаря этому прибору были открыты уникальные возможности научных и прикладных исследований в области нанотехники. Он явился первым техническим устройством, с помощью которого была осуществлена наглядная визуализация атомов и стоячих волн де Бройля на поверхности металла [4, 5]. За создание СТМ Г. Бинниг и Х. Ререр в 1986 г. были удостоены Нобелевской премии по физике.

Принцип работы СТМ заключается в следующем: к поверхности проводящего образца на характерное межатомное расстояние z , составляющее доли нанометра, подводится очень тонкий металлический зонд (игла). При приложении между образцом и иглой разности потенциалов $U \sim 0,1 \dots 1$ В в цепи (рис. 2) появляется ток, обусловленный туннелированием электронов через зазор между ними. Туннельный ток составляет $\sim 1 \dots 10$ нА, т.е. имеет величину, которую вполне можно измерить экспериментально.

Если потенциальный барьер между иглой СТМ и поверхностью образца считать одномерным, то энергетическая диаграмма «туннельного контакта» зонда и исследуемой поверхности имеет вид, как на рис. 3. Здесь A_B и A'_B — работы выхода для металлов зонда и исследуемого образца, соответственно, Δz — ширина потенциального барьера между зондом и образцом, U — напряжение смещения.

При прямом смещении (см. рис. 3) электроны в результате туннельного эффекта переходят с заполненных уровней зонда на свободные уровни образца. При обратном смещении электроны туннели-

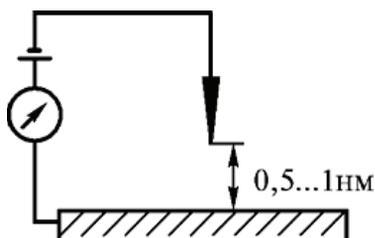


Рис. 2. Принципиальная схема сканирующего туннельного микроскопа [2]

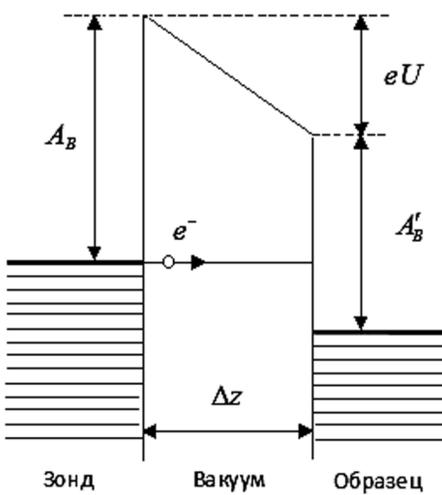


Рис. 3. Диаграмма «туннельного контакта» СТМ

руют из образца в зонд. Сила туннельного тока зависит от напряжения смещения U , коэффициента прозрачности барьера и плотности состояний электронов вблизи уровня Ферми.

В случае, когда напряжение U невелико (энергия eU меньше работы выхода электрона из металла), выражение для плотности туннельного тока можно представить в виде [1]:

$$j = j_0(U) \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m_e A_{cp}} \Delta z\right). \quad (1)$$

Здесь m_e — масса электрона, $A_{cp} = \frac{A_B + A'_B}{2}$; Δz — ширина потенциального барьера между острием поверхностью. В (1) считается, что предэкспоненциальный множитель $j_0(U)$ не зависит от расстояния Δz , а только от напряжения U . При характерных значениях работы выхода $A_{cp} \sim 4$ эВ константа затухания в экспоненте $\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m_e A_{cp}} \approx 20 \text{ нм}^{-1}$. Тогда из (1) следует, что при изменении Δz на $\sim 0,1$ нм, величина туннельного тока меняется примерно на порядок, что и обуславливает очень высокую разрешающую способность СТМ. Вдоль оси z , перпендикулярной поверхности образца, разрешающая способность достигает значения $\delta z \sim 10^{-3} \text{ нм} = 1 \text{ пм}$, а вдоль осей x и y , параллельных поверхности образца, — $\delta x, \delta y \sim 10^{-2} \text{ нм}$. Такое высокое разрешение СТМ позволяет с его помощью проводить детальное исследование отдельных атомов, находящихся на проводящей поверхности.

Реальный потенциальный барьер между острием СТМ и исследуемой поверхностью не является одномерным, как в рассмотренном выше случае, а имеет более сложную структуру. Тем не менее и в общем случае выявленная основная особенность туннелирования — экспоненциальная зависимость туннельного тока от расстояния Δz между зондом и образцом — сохраняется, что подтверждается результатами экспериментов (рис. 4). Отметим, что сила тока I на рис. 4 отложена в логарифмическом масштабе.

Следует отметить, что СТМ, в отличие от других электронных микроскопов, не содержит линз, и, следовательно, получаемое в нем изо-

бражение не искажается из-за аберраций. Кроме того, энергия электронов, формирующих изображение в СТМ, не превышает нескольких электрон-вольт, т.е. оказывается меньше характерной энергии химической связи, что обеспечивает возможность неразрушающего контроля исследуемого образца.

Возможности сканирующей туннельной микроскопии были убедительно продемонстрированы при изучении реконструкции поверхностной структуры кремния (рис. 5) [3]. Эти исследования принесли признание СТМ-микроскопии и показали возможность изучения структуры поверхности твердых тел с атомным разрешением.

Конструкторские функции СТМ. Важной особенностью СТМ является то, что помимо исследовательских функций наблюдения, он может выполнять и активные конструкторские функции: осуществлять захват и перемещение отдельных атомов, проводить локальные химические реакции, манипулировать отдельными молекулами, атомами и даже квантовыми точками, собирая из них заданные наперед наноструктуры (атомный дизайн). Это полностью согласуется с утверждением, сделанным Р. Фейнманом еще в 1959 г.: «Известные нам принципы физики не запрещают создавать объекты «атом за атомом». Манипуляция атомами, в принципе, вполне реальна и не нарушает никаких законов природы» [7].

Наиболее ярко возможности СТМ в этом направлении были продемонстрированы в работах [8, 9]. В них с помощью СТМ на атомарно гладкой поверхности меди из атомов железа были собраны так называемые квантовые загоны — замкнутые двумерные образования различной формы, представляющие собой потенциальные ямы для находящихся внутри электронов (рис. 6). Отметим, что эти и подобные им опыты проводились в условиях сверхвысокого вакуума при низких температурах, чтобы исключить загрязнение поверхности меди и тепловую диффузию атомов железа.

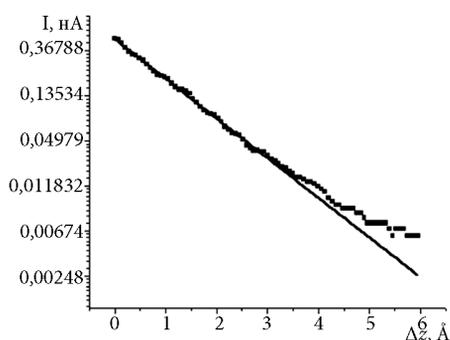


Рис. 4. Экспериментальная зависимость туннельного тока от расстояния между платиновым образцом и Pt-Rh зондом [6]

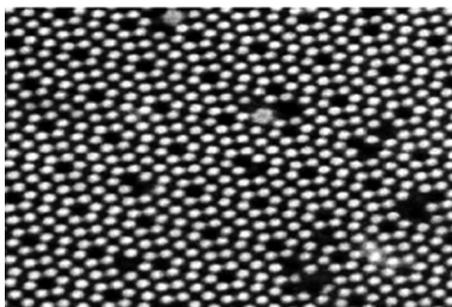


Рис. 5. Реконструкция атомной структуры на поверхности кристалла кремния [3]

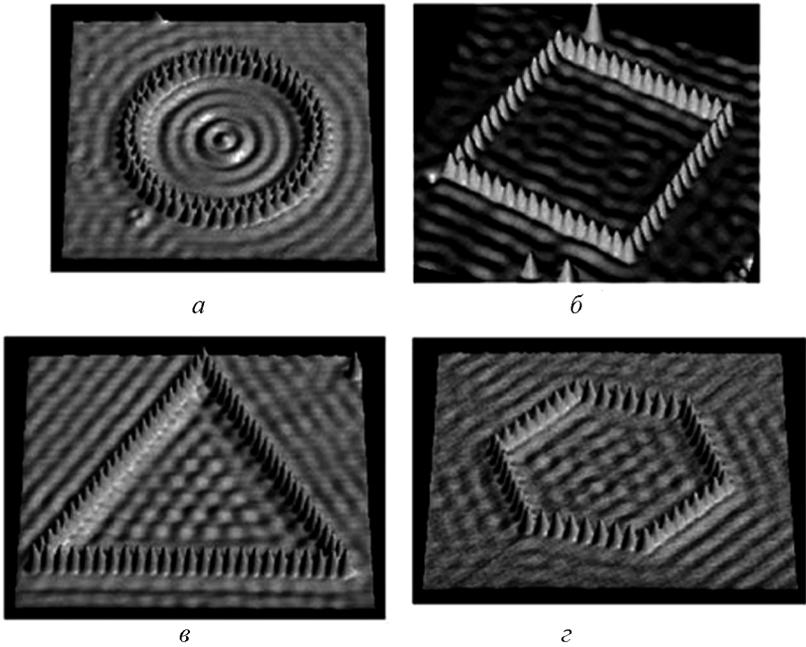


Рис. 6. Квантовые загоны из атомов железа на поверхности кристалла меди: *а* — круглый; *б* — прямоугольный; *в* — треугольный; *г* — шестиугольной формы [9]

Следует отметить, что электроны внутри и вне этих загонов, размеры которых сравнимы с их длиной волны де Бройля, согласно квантовомеханическим представлениям, проявляют свою волновую природу и наблюдаются в виде стоячих волн. Эти результаты, полученные на стыке новейших нанотехнологий и фундаментальной физики, могут служить очень важной иллюстрацией основных положений квантовой механики, могут сделать ее выводы более наглядными и содержательными для студентов.

Спинтроника. Еще одна удивительная возможность СТМ — исследование направления спина атома — была продемонстрирована экспериментально совсем недавно [10]. В этой работе магнитный атом кобальта помещался на подложку из вольфрама (плоскость (110)), на которую предварительно был нанесен тонкий слой атомов магния. Измерения проводились в условиях сверхвысокого вакуума при температуре $\sim 10\text{К}$.

Магний, как известно, обладает достаточно сложной магнитной геликоидальной структурой, в которой магнитные моменты атомов, расположенные вдоль определенной кристаллографической оси, изменяют свое направление по спирали. Предварительные исследования, выполненные в [10], позволили установить, что магнитные моменты атомов магния в слое на вольфрамовой подложке также периодически, по спирали, меняют свое направление в пространстве.

Опыт показал, что СТМ-изображения атомов кобальта, осажденных на магниево-вольфрамовую подложку, имеют различную форму и высоту, зависящую от положения атома на подложке (рис. 7). В этом эксперименте использовался зонд из вольфрама, покрытый тонким слоем атомов железа, который можно было намагничивать в двух направлениях по отношению к исследуемой поверхности: как перпендикулярно вверх, так и перпендикулярно вниз. Изображения атомов кобальта, полученные для разных направлений намагниченности зонда, также оказывались различными. На рис. 7 приведены результаты исследования для зонда, намагниченного перпендикулярно вверх.

Ориентация спина атома кобальта, находящегося на поверхности магния, определяется взаимодействием этого спина со спином атома магния, расположенного в подложке непосредственно под ним. Исследования показали, что СТМ-изображение атома кобальта имеет большую высоту, если атом кобальта расположен над атомом магния, имеющим спин, направленный вверх. И, наоборот, высота изображения атома кобальта оказывается меньше, если спин расположенного под ним атома магния направлен вниз. Если спин атома магния ориентирован в плоскости подложки, то изображение атома кобальта имеет промежуточную высоту с небольшим провалом в центре.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что авторам работы [10] удалось наблюдать спин атома и научиться управлять его ориентацией, перемещая атом кобальта по поверхности магния. Следует отметить, что аналогичные СТМ-исследования, выполненные с немагнитным зондом, давали для всей цепочки атомов кобальта одинаковые изображения, не зависящие от ориентации спина.

Результаты данной работы могут быть использованы для изучения ориентации спинов в других атомных системах, а также для развития

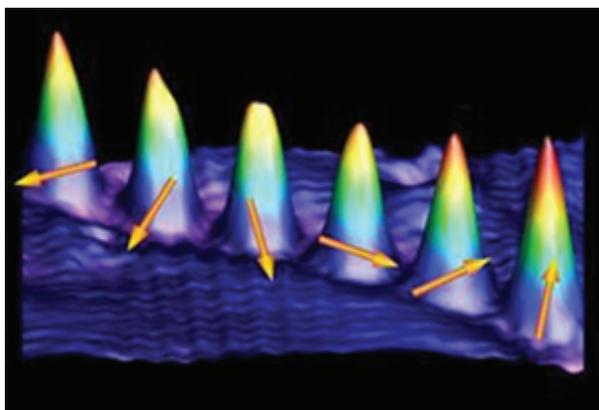


Рис. 7. Влияние направления спина на СТМ-изображение атома кобальта [10]

наноразмерных магнитных модулей памяти, квантовых компьютеров и других устройств, работающих на эффектах, связанных с ориентацией спинов атомов. Это направление в нанотехнологии, использующее, в отличие от электроники, не заряд электрона, а его спин, получило название спинтроники.

Атомно-силовой микроскоп. В основе работы атомно-силового микроскопа (АСМ), созданного Г. Биннигом, К. Куэйтом и К. Гербером в 1986 г. [1, 2, 11], лежит ван-дер-ваальсовское взаимодействие между атомами заостренной иглы (зонда), подводимой к поверхности образца на очень малое расстояние, и атомами поверхности. Игла АСМ, имеющая чрезвычайно малый радиус закругления острия, расположена на конце миниатюрной консольной балки — кантилевера (рис. 8).

Под действием сил Ван-дер-Ваальса кантилевер изгибается, что регистрируется либо с помощью оптических методов (по отклонению отраженного от тыльной поверхности кантилевера лазерного луча), либо с помощью пьезорезистивного эффекта, возникающего в самом кантилевере при изгибе. При сканировании поверхности образца иглой АСМ длиной 1...2 мкм и диаметром острия не более 10 нм измерение положения иглы позволяет восстановить рельеф поверхности с очень высоким разрешением, вплоть до атомарного.

Энергия ван-дер-ваальсовского взаимодействия двух атомов, находящихся на расстоянии r друг от друга, может быть записана с помощью потенциала Леннарда — Джонса U_{LD} :

$$U_{LD}(r) = U_0 \left[-2 \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 + \left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} \right]. \quad (2)$$

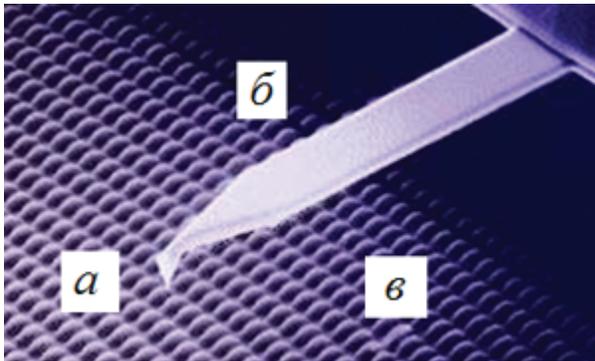


Рис. 8. Общая схема атомно-силового микроскопа: *а* — игла АСМ; *б* — кантилевер; *в* — исследуемая поверхность

Здесь U_0 — минимальное значение потенциальной энергии взаимодействия, а r_0 — расстояние, при котором $U_{LD} = U_0$. Первое слагаемое в (2) описывает притяжение между атомами на больших расстояниях, обусловленное, главным образом, диполь-дипольным взаимодействием. Второе слагаемое характеризует отталкивание между атомами, возникающее на малых расстояниях.

Общая энергия взаимодействия иглы АСМ и исследуемой поверхности W находится суммированием элементарных энергий взаимодействия по всем атомам иглы и образца:

$$W = \int_V \int_{V'} U_{LD}(|\vec{r} - \vec{r}'|) n(\vec{r}) n'(\vec{r}') dV dV',$$

где \vec{r} и \vec{r}' — векторы, определяющие положения взаимодействующих атомов в образце и игле соответственно; $n(\vec{r})$ и $n'(\vec{r}')$ — плотности атомов в материале образца и иглы; dV и dV' — соответствующие элементарные объемы.

Результирующая сила взаимодействия между иглой АСМ и исследуемой поверхностью определяется выражением:

$$\vec{F} = -\text{grad } W.$$

В общем случае сила \vec{F} может иметь как нормальную к поверхности, так и тангенциальную (латеральную) составляющие. Здесь для простоты изложения мы будем учитывать только нормальную составляющую.

Качественный вид зависимости силы взаимодействия F от расстояния r между острием АСМ и поверхностью образца приведен на рис. 9. При $r > r_*$ между острием и поверхностью действует сила притяжения, которая на больших расстояниях по мере уменьшения r первоначально возрастает. При малых r электронные облака атомов острия и поверхности испытывают электростатическое отталкивание, которое увеличивается при уменьшении r . Эти силы притяжения и отталкивания уравновешивают друг друга при значении $r = r_* \approx 0,2$ нм, которое характеризует так называемую «длину» химической связи. Значения r , при которых $F > 0$, отвечают области отталкивания. Это означает, что атомы острия и поверхности вступили в контакт.

В зависимости от расстояния между острием и образцом существуют бесконтактный и контактный методы работы АСМ (см. рис. 9). При бесконтактном методе между иглой и исследуемой поверхностью действует сила притяжения, поэтому его называют также методом притяжения. Характерное расстояние между иглой АСМ и поверхностью в

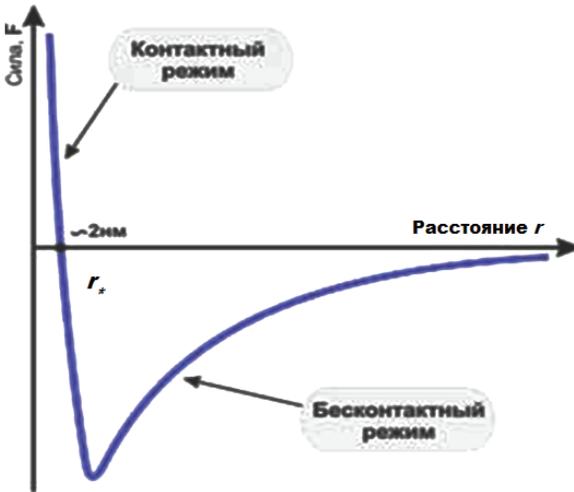


Рис. 9. Сила взаимодействия между иглой АСМ и исследуемой поверхностью [2]

этом случае составляет $5 \dots 10$ нм. При таких расстояниях сила, действующая между иглой и образцом, невелика. Одним из преимуществ такого метода работы АСМ является отсутствие прямого контакта иглы с поверхностью, что позволяет избежать повреждения и загрязнения взаимодействующих объектов, а также обеспечивает большую скорость сканирования поверхности.

При контактном методе острие иглы АСМ приводят в мягкий физический контакт с поверхностью исследуемого образца. При малых значениях r сила F является силой отталкивания, поэтому данный метод работы называют еще методом отталкивания. В этом случае сила F , имеющая достаточно большую величину, уравнивается силой упругости кантилевера. При контактном методе работы АСМ используются кантилеверы с достаточно малым коэффициентом жесткости, что позволяет избежать нежелательных деформаций при воздействии зонда на образец, а также обеспечивает достаточно высокую чувствительность измерений.

Недостатком контактного метода является прямое механическое взаимодействие острия иглы с исследуемой поверхностью в процессе сканирования, что довольно часто может приводить к поломке острия, а также к деформации и разрушению поверхности образца. Отметим также, что контактный метод не позволяет исследовать структуры с малой механической жесткостью, например, биологические объекты.

Здесь при описании работы АСМ мы рассматривали только силы Ван-дер-Ваальса, однако следует иметь в виду, что в реальном эксперименте на зонд микроскопа со стороны поверхности действуют также упругие силы и силы адгезии. Они наиболее интенсивно проявляются

при контактном режиме работы микроскопа и могут заметно усложнить получение изображения и его интерпретацию.

Атомный силовой микроскоп, в отличие от СТМ, позволяет исследовать как проводящие, так и непроводящие поверхности. Для большинства режимов АСМ не требуется вакуум, они могут быть реализованы в воздухе, в других газообразных и даже в жидких средах. Это очень важно при изучении биологических макромолекул и живых клеток.

Пространственное разрешение, которое обеспечивает АСМ при изучении структуры поверхности, зависит от радиуса закругления острия зонда, а также от чувствительности системы, регистрирующей отклонение кантилевера. Современные АСМ позволяют проводить исследования поверхности с очень высоким разрешением, максимальная достигнутая разрешающая способность составляет $\delta z \approx 77$ пм.

В настоящее время АСМ широко применяются для изучения неорганических и синтетических материалов, биологических объектов, наноструктур, для неразрушающего контроля, диагностики и модификации различных поверхностей. Типичный вид структуры поверхности, полученный с помощью АСМ с атомным разрешением, приведен на рис. 10.

Магнитный сканирующий микроскоп. В 1987 г. И. Мартин и К. Викрамасингх создали магнитно-силовой микроскоп (МСМ) для исследования локальных магнитных свойств поверхности с субмикронным пространственным разрешением [13]. МСМ представляет собой усовершенствованный атомно-силовой микроскоп, в качестве зонда которого используется игла, покрытая тонким слоем ферромагнитного материала (рис. 11).

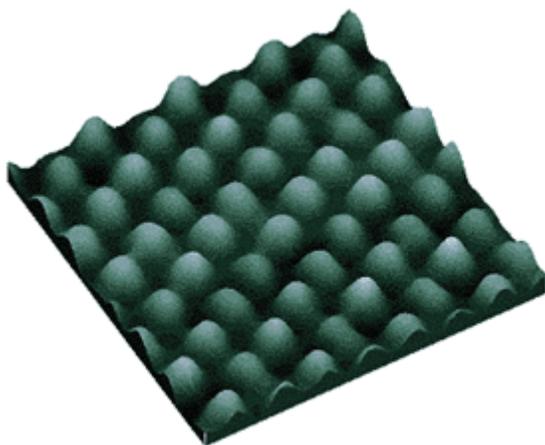


Рис. 10. Атомная структура поверхности высокоориентированного пиролитического графита. Размер изображения $17 \times 17 \text{ \AA}$ [12]

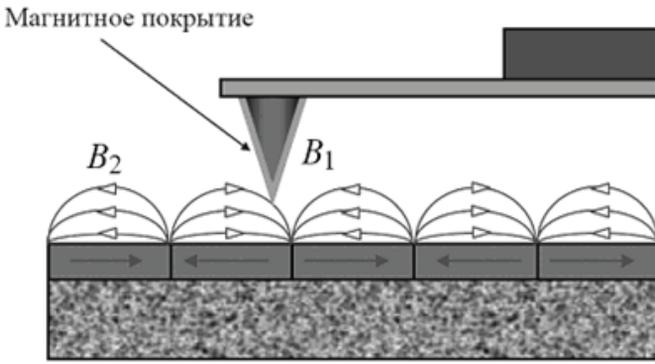


Рис. 11. Общая схема магнитно-силового микроскопа [1]

Этой магнитной иглой, подведенной к поверхности образца на расстояние ~ 10 нм, осуществляется сканирование поверхности. Причем игла, в зависимости от ориентации магнитного поля в доменах, будет либо притягиваться, либо отталкиваться образцом и за счет этого смещаться в вертикальном направлении. Такие вертикальные смещения фиксируются традиционными для атомно-силовой микроскопии методами, они позволяют определить размеры домена и установить направление намагниченности в нем. На рис. 12 представлена магнитная структура поверхности жесткого магнитного диска (винчестера) персонального компьютера, полученная с помощью МСМ. Данный метод позволяет достичь разрешения ~ 10 нм и является в настоящее время одним из наиболее перспективных и востребованных при изучении доменной структуры магнитных материалов.

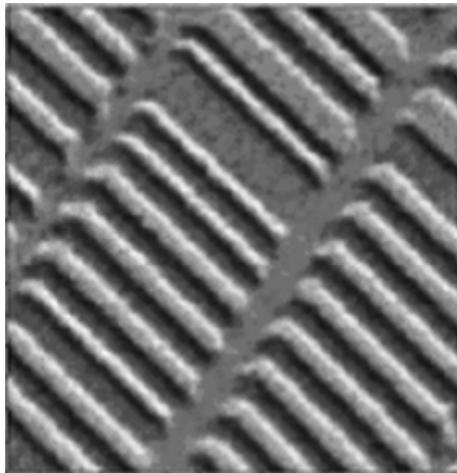


Рис. 12. Доменная структура на поверхности жесткого диска персонального компьютера, полученная с помощью МСМ [1]

Магнитно-силовой микроскоп применяется при создании и анализе свойств магнитных носителей информации — магнитных лент, винчестеров, магнитооптических дисков и т. д. МСМ позволяет увидеть на поверхности носителя отдельные магнитные области размером ~10 нм, соответствующие отдельным битам информации.

Следует отметить, что в последние годы выполнены работы по магнитной обменно-силовой микроскопии, позволяющей исследовать магнитную структуру образца с атомным разрешением [14]. Этот метод является дальнейшим развитием магнитно-силовой микроскопии и дает возможность изучать не только атомную структуру поверхности, но и ориентацию магнитных моментов отдельных атомов на поверхности. Метод магнитной обменно-силовой микроскопии может быть использован как для изучения магнитной структуры поверхности образца, так и для исследования таких динамических магнитных процессов, как спиновые волны и прецессия атомных спинов.

Заключение. Рассмотренные в данной статье СТМ, АСМ, МСМ являются основными приборами нанотехнологий и дают возможность проводить исследования поверхности с очень высоким разрешением, вплоть до атомного. Эти приборы имеют большие перспективы практического применения, они оказывают значительное влияние на ускорение научно-технического прогресса. Отметим, что кроме них существует еще целый ряд сканирующих микроскопов, используемых в настоящее время в области нанотехнологий: ближнепольный оптический микроскоп, сканирующий емкостной микроскоп, сканирующий тепловой микроскоп, электростатический силовой микроскоп, ближнепольный акустический микроскоп, латерально-силовой микроскоп и т. д., их подробное описание содержится в работах [1, 2].

В настоящее время во всем мире идет Третья научно-техническая (нанотехнологическая) революция, цель которой состоит в том, чтобы заменить экономику общества, базирующуюся на природных ресурсах, экономикой, основывающейся на знаниях [15, 16]. Для того чтобы выпускники технических университетов обладали широким кругозором и могли использовать полученные во время учебы навыки в работе на самом высоком научном и техническом уровне, им в процессе обучения необходимо получать информацию о самых последних научных достижениях, а также о перспективах и возможностях их практических приложений. Это означает, что курс современной физики в техническом университете наряду с фундаментальными теоретическими положениями должен содержать разделы, посвященные самым передовым, самым перспективным ее достижениям. В первую очередь, это касается квантовых эффектов и основанных на них нанотехнологий.

В настоящее время существуют реальные предпосылки успешного развития нанотехнологий в России (см., например, [17–19]). Наша страна,

обладающая значительным интеллектуальным потенциалом, весомыми достижениями в наукоемкой космической и ядерной промышленности, не может находиться на вторых ролях в сфере нанотехнологий — наиболее важной и перспективной сфере высоких технологий. По мнению лауреата Нобелевской премии по физике Ж.И. Алферова, возможность прорыва России в области нанотехнологии связана, прежде всего, с активной поддержкой фундаментальных исследований и подготовкой высококвалифицированных исследовательских кадров.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Миронов В.Л. *Основы сканирующей зондовой микроскопии*. Нижний Новгород, 2004, 144 с.
- [2] Суслов А.А., Чижик С.А. Сканирующие зондовые микроскопы (обзор). *Материалы, Технологии, Инструменты*, 1997, т. 2, № 3, с. 78–89.
- [3] Бахтизин Р.З. Сканирующая туннельная микроскопия — новый метод изучения поверхности твердых тел. *Соросовский образовательный журнал*, 2000, т. 6, № 11, с. 1–7.
- [4] Бинниг Г., Ререр Г. Сканирующая туннельная микроскопия — от рождения к юности. *Успехи физических наук*, 1988, т. 154, вып. 2, с. 261–278.
- [5] Смирнов Е.В. Волновые свойства электронов в нанобъектах. *Физическое образование в вузах*, 2012, т. 18, № 3, с. 80–91.
- [6] Сканирующие зондовые микроскопы и инструменты нанотехнологии на их основе. Руководство пользователя Solver P47. [Электрон. ресурс]. URL: <http://www.nt-mdt.ru>
- [7] Фейнман Р.Ф. Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики. *Российский Химический Журнал*, 2002, т. XLVI, № 5, с. 4–6.
- [8] Crommie M.F., Lutz C.P., Eigler D.M. Confinement of electrons to quantum corrals on a metal surface. *Science*, 1993, vol. 262, pp. 218–220.
- [9] Crommie M.F., Lutz C.P., Eigler D.M., Heller E.J. Waves on a metal surface and quantum corrals. *Surface Review and Letters*, 1995, vol. 2(1), pp. 127–137.
- [10] Serrate D., Ferriani P., Yoshida Y., Hla S.-W., Menzell M., K. von Bergmann I., Heinze S., Kubetzka A., Wiesendanger R. Imaging and manipulating the spin direction of individual atoms. *Nature Nanotechnology*, 2010, vol. 5, pp. 350–353.
- [11] Binnig G., Quate C.F., Gerber Ch. Atomic Force Microscope. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, vol. 56, p. 930–933.
- [12] www.nanoscopy.org/tutorial/Afm/afm.htm
- [13] Martin Y., Wickramasinghe H.K. Magnetic imaging by “force microscopy” with 1000 Å resolution. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, vol. 50, pp. 1455–1547.
- [14] Kaiser U., Schwarz A., Wiesendanger R. Magnetic exchange force microscopy with atomic resolution. *Nature*, 2007, vol. 446, pp. 522–525.
- [15] Шека Е.Ф. Квантовая нанотехнология и квантовая химия. *Российский Химический Журнал*, 2002, т. XLVI, № 5, с. 15–21.
- [16] Головин Ю.И. Нанотехнологическая революция стартовала! *Природа*, 2004, № 1, с. 1–16.
- [17] Быков В.А. Нанотехнологический потенциал России. *Наука в России*, 2003, № 6(138), с. 8–12.

- [18] Алфимов С.М., Быков В.А., Гребенников Е.П. Желудева С.И., Мальцев П.П., Петрунин В.Ф., Чаплыгин Ю.А. Развитие в России работ в области нанотехнологий. *Микросистемная техника*, 2004, № 8, с. 2–8.
- [19] Алферов Ж.И. Нанотехнологии — перспективы развития в России. *Наука Москвы и регионов*, 2005, № 2, с. 41–47.

Статья поступила в редакцию 16.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Смирнов Е.В. Сканирующая микроскопия в измерениях нанобъектов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/809.html>

Смирнов Евгений Васильевич родился в 1948 г., окончил МФТИ в 1972 г. Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 80 печатных работ. Научные интересы: когерентное взаимодействие излучения с веществом, мессбауэровская дифракция, квантовая физика, нанотехнологии. e-mail: seva09@rambler.ru