

Магнитно-силовая микроскопия

А.М. Тишин

доктор физико-математических наук,

И.В. Яминский

доктор физико-математических наук,

Московский государственный университет им.И.В.Ломоносова.

В 1987 г. И.Мартин и К.Викрамасингх предложили усовершенствовать атомно-силовой микроскоп с тем, чтобы проводить исследования магнитных свойств поверхности твердых тел с субмикронным пространственным разрешением. В качестве зондирующего острия использовалась микроигла из ферромагнитного материала. Новый прибор получил название «магнитно-силовой микроскоп».

Его прототип — атомно-силовой микроскоп — был изобретен годом раньше Г.Биннигом с коллегами. Уникальность этого прибора в том, что он позволяет «увидеть» отдельные атомы и молекулы на поверхности проводников, полупроводников и диэлектриков. По принципу работы его можно считать чувствительным профилометром и даже дальним родственником граммофона.

Магнитно-силовой микроскоп устроен следующим образом. Микромагнит (рис.1) в виде заостренной иглы перемещают вблизи поверхности образца, регистрируя силы взаимодействия с образцом. Для перемещения острия относительно исследуемой поверхности используется прецизионный трехкоординатный микроманипулятор. Обычно в зондо-вой микроскопии такой манипулятор изготавливают из

пьезокерамической трубки с системой электродов. При подаче напряжения на электроды трубка может изгибаться, удлиняться или укорачиваться, производя тем самым перемещение образца (или иглы) по трем координатам X, Y и Z. В зависимости от размеров пьезотрубки максимальное перемещение образца может быть обеспечено в диапазоне от единиц до сотни микрон. Точность позиционирования такого манипулятора

достигает сотых долей нанометра. Зондирующее острие располагают на упругой микроминиатюрной консоли (кантилере), по изгибу которой, регистрируемому, например, с помощью оптической системы, можно определять силу взаимодействия между острием и поверхностью. В магнитно-силовом микроскопе при сканировании образца игла проходит по одному и тому же месту дважды. Первый раз она

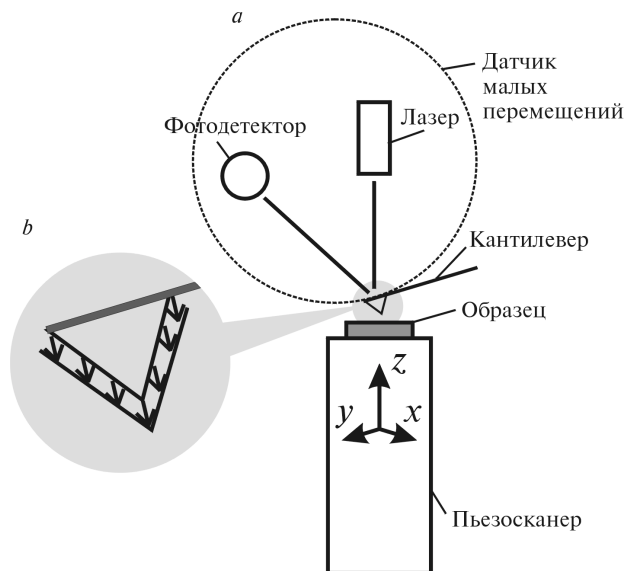


Рис.1. схематическое изображение магнитно-силового микроскопа.

движется по поверхности образца в контакте с ним, при этом компьютер запоминает ее траекторию, которая в этом случае соответствует профилю исследуемой поверхности. Магнитные свойства образца, если пренебречь деформациями поверхности (они обычно невелики), не оказывают влияния на наблюдаемую траекторию. Второй раз микроконсоль проходит по той же траектории над тем же участком поверхности, но на некотором удалении от нее. При таком движении на иглу, расположенную на микроконсоли, действуют уже не контактные силы, как в первом случае. Если иглу отвести на расстояние 10—50 нм, то универсальное ван-дер-ваальсово притяжение затухает и остаются только более дальнедействующие магнитные силы, так что отклонение иглы от заранее обусловленной траектории будет определяться именно магнитными свойствами образца (рис.2). В реальных экспериментах для достижения



Рис.2. Получение «магнитного» изображения. 1 – запись профиля поверхности с помощью специальной иглы; 2 – при следующем проходе задается та же траектория, но на высоте 10 – 50 нм от поверхности образца; 3 – отклонение иглы от выбранной траектории в результате действия магнитных сил.

максимальной чувствительности кантилевер приводят в состояние резонанса, и игла проходит образец дважды: первый раз отслеживает профиль поверхности в режиме прерывистого контакта, второй раз — при свободных колебаниях, на удалении от поверхности. Регистрация в процессе измерений амплитуды, фазы или частоты колебаний дает более точную информацию о магнитных включениях (доменах, кластерах) в исследуемом объекте.

Магнитно-силовой микроскоп нашел практическое применение при разработке и конструировании магнитных носителей информации — магнитных лент, винчестеров, магнитооптических дисков и пр. Он позволяет увидеть в материале отдельные магнитные области (до 10 нм). На рис.3 изображены участки поверхности магнитооптического диска: слева — профиль поверхности (темные полосы — прямолинейные микроуглубления), а справа — структура намагниченных областей, соответствующих отдельным битам информации. На представленном изображении (5x5 мкм²) можно увидеть продолговатые островки (~2x1 мкм²), соответствующие записи 1 бит. Доменная структура магнитной пленки хорошо выявляется в области углублений. Магнитно-силовой микроскоп различает отдельные зерна размером 50 нм. Исследования с его помощью активно проводятся на ведущих фирмах — производителях носителей информации, — чтобы минимизировать область, соответствующую 1 бит информации, с целью обеспечения помехоустойчивости, уменьшения шума при записи и считывании информации, а также разработки новых принципов и устройств магнитной записи. На рис.4 дано «магнитное изображение»

островков, сформированных с помощью литографии учеными Стэнфордского университета Р.Нью, Р.Пиа-зом и Р.Байтом. Островки состоят из кобальта — металла, обладающего ферромагнитными свойствами. Используя магнитно-силовой микроскоп, удалось увидеть доменную структуру отдельных кластеров размером 200x400 нм (рис.4, слева). Кластеры меньшего размера диаметром - 150 нм (рис.4, справа) имеют вид одиночных магнитных диполей.

Магнитно-силовой микроскоп можно использовать не только для картирования магнитного поля, но и для магнитной сверхплотной записи информации. Так, показанные на рис.5 выступы соответствуют магнитным доменам, сформированным в пленке TbFeCo с помощью магнитной иглы. Образование доменов происходило в присутствии однородного магнитного поля внешнего магнита и локального поля иглы по достижении некоторого порогового значения, определяемого коэрцитивной силой магнитной пленки. При последовательном уменьшении суммарного магнитного поля размеры намагниченных областей сокращались и постепенно исчезали. Плотность такой записи — 10 Гбит/см², что на несколько порядков превышает плотность записи информации на современных винчестерах и магнитооптических дисках, широко применяемых в компьютерах.

Не только в искусственно созданных системах, но и в живой природе микромагниты играют важную роль. Например, бактерии *Aquaspirillum magnetotacticum* умеют двигаться вдоль линии земного магнитного поля. Оказывается, внутри них есть особые образования — магнетосомы, сформированные

цепочками из 10—25 кристаллов оксида железа размером ~50 нм и представляющие собой постоянные магниты. В неокрашенных клетках одиночные кристаллы хорошо видны при просвечивающей электронной микроскопии. Внутренние магниты клеток обуславливают направление их движения в морской воде: к северу — в Северном полушарии и к югу — в Южном. Ученые Калифорнийского университета (Р.Прокш, Т.Шафер и Р.Франкель) вместе с коллегами из Университета штата Миннесоты (Б.Московитц, Е.Далберг) и сотрудником Центра океанологии (штат Массачусетс) Д.Базилинским сумели с помощью магнитно-силового микроскопа измерить магнитный момент одной бактерии *Aquaspirillum magnetotacticum*. Он составил ничтожную величину: 10^{-16} А*м² (длина одной бактерии ~2 мкм).

В настоящее время американские фирмы «Digital Instruments» и «Park Scientific Instruments» выпускают магнитно-силовые микроскопы для промышленных и научных применений. В России Центр перспективных технологий (Москва) разработал модель сканирующего зондового микроскопа «Фемтоскан», одна из функций которого — измерение магнитных свойств поверхности. Разработанный ранее совместно с физическим факультетом МГУ туннельный микроскоп «Скан-8» успешно работает во многих университетах и академических институтах нашей страны. В ближайшее время сотрудники Центра и МГУ планируют с помощью новой модификации микроскопа изучать магнитные свойства биологических наноструктур.

В 1991 г. американский ученый Дж.Сайдл (университет

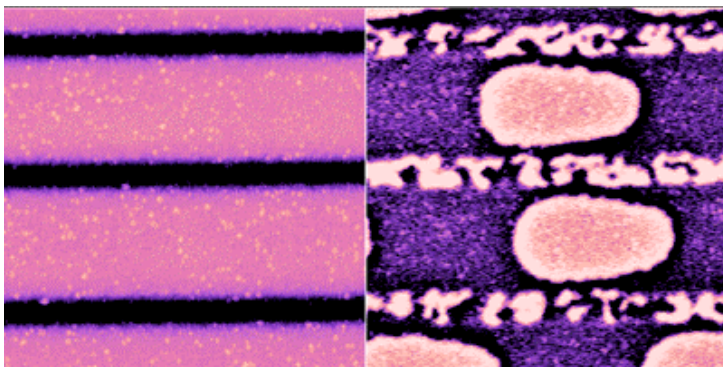


Рис.3. Профиль поверхности (слева) и магнитное изображение (справа) участка магнитооптического диска.

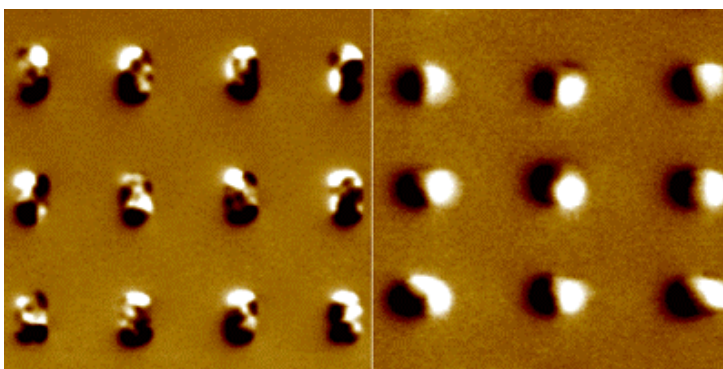


Рис.4. Магнитные изображения кобальтовых нанокластеров. У кластеров большего размера (слева) — многодоменная структура, меньшего размера (справа) — однодоменная.

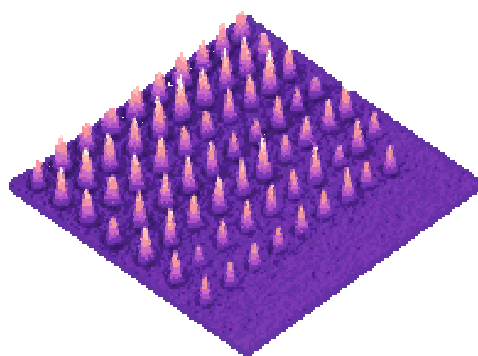


Рис.5. Сверхплотная запись, производимая с помощью магнитно-силового микроскопа.

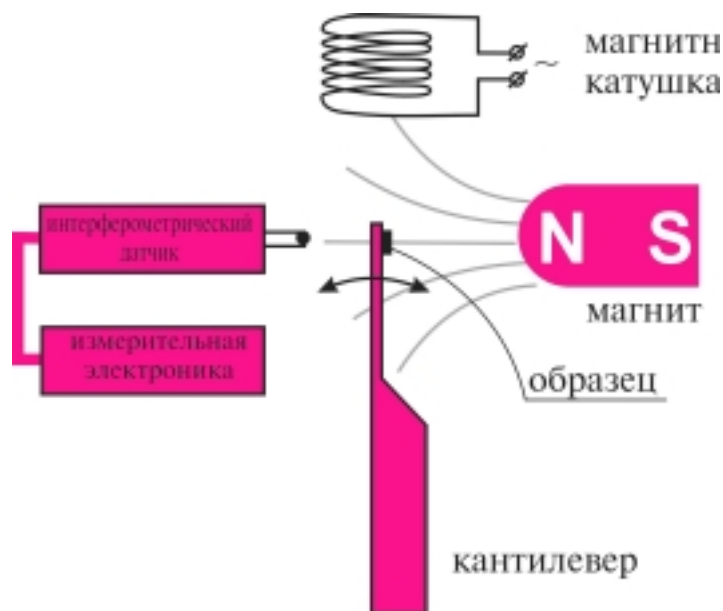


Рис. 6. схема ядерного магнитно-резонансного силового микроскопа.

штата Вашингтон, Сизтл) предложил использовать магнитно-силовой микроскоп для получения трехмерных изображений одиночных биологических молекул. Для этого следует совместить существующие методы электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и ядерного магнитного резонанса (ЯМР) с магнитно-силовой микроскопией. Новый метод получил название «магнитно-резонансная силовая микроскопия». Его основные преимущества — неразрушающий характер, субнанометровое пространственное разрешение и возможность изучения отдельных биомолекул. В настоящее время опыты по магнитно-резонансной силовой микроскопии ставят по следующей схеме. Исследуемый образец крошечной массы закрепляют на упругой микроконсоли, аналогичной той,

что используется в атомно-силовой микроскопии (рис.6). Постоянное магнитное поле в образце создается с помощью расположенного рядом с кантилевером магнита. Сила, действующая на атомы образца, пропорциональна спину неспаренных электронов (для ЭПР-варианта микроскопии) или магнитному моменту ядер (для ЯМР-варианта). В условиях резонанса происходит квантовый переход, который приводит к изменению ориентации магнитного момента электрона или ядра. Периодически изменяя частоту переменного магнитного поля, создаваемого дополнительной катушкой, можно модулировать намагниченность образца. Частоту модуляции выбирают равной частоте механического резонанса кантилевера. Вынужденные колебания кантилевера измеряют

с помощью датчика малых перемещений, например интерферометрического. При выбранной геометрии эксперимента условия ядерного и электронного парамагнитного резонансов в системе выполняются для области субнанометровых размеров. Этот метод имеет нетривиальные возможности для расшифровки структуры биомолекул — белков и вирусов, Первые успешные эксперименты по наблюдению парамагнитного резонанса были проведены в группе профессора Д.Ружара в 1992 г. (Исследовательский центр фирмы IBM). Зарегистрирован спиновый резонанс в образце дифинилпикрилгид-разина массой 30 нг. Величина зарегистрированной силы составила 10^{-14} Н. Для наблюдения магнитного резонанса, в котором участвует только одна молекула, необходимо повысить чувствительность по силе хотя бы на четыре порядка. Недавно появилось сообщение, что эта же научная группа разработала микрокантилевер длиной 230 мкм и толщиной 60 нм, на вершине которого закреплен микроминиатюрный магнит. Последний взаимодействует с магнитными моментами атомов расположенного в непосредственной близости образца. Намагниченность образца периодически меняют, как и в предыдущем случае, путем выполнения условий электронного парамагнитного или ядерного резонанса. Величина измеренной силы составила $7 \cdot 10^{-18}$ Н. Ружар надеется в ближайшем будущем зарегистрировать сигнал от спина одного электрона.

Опыт развития зондовой микроскопии, и в частности магнитно-силовой, демонстрирует, как смелые научные идеи получают реальное воплощение.