ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Цели работы

1. Изучение физических основ атомно-силовой микроскопии и принципа работы атомно-силового микроскопа.

2. Получение изображения топографии поверхности композитного материала с помощью атомно-силового микроскопа.

Введение

Для детального исследования структурных особенностей материалов и определения размеров структурных элементов существует много разнообразных методов. В таблице 1 приведены сравнительные характеристики различных методов микроскопического исследования поверхности. Предел разрешения оптических микроскопов ограничен длиной волны видимого света. Сканирующий электронный микроскоп, работающий только в вакууме, позволяет разрешать структурные элементы нанометрового масштаба, но при этом образец должен быть проводящим, чтобы исключить накопление электрического заряда. Этот метод также не позволяет получать информацию о высоте структурных элементов.

| Метод | Увеличение | Рабочая | Размерность | Воздействие на |
|-------------|-----------------|-----------|-------------|----------------|
| | | среда | изображения | образец |
| Оптический | 10 ³ | воздух, | 2D | неразрушающий |
| микроскоп | | жидкость | | |
| Лазерный | 10^{4} | воздух | 2D | неразрушающий |
| микроскоп | | | | |
| Сканирующий | | | | |
| электронный | 10^{6} | вакуум | 2D | неразрушающий |
| микроскоп | | | | |
| Ионный | 10 ⁹ | вакуум | 2D | разрушающий |
| микроскоп | | | | |
| Сканирующий | | воздух, | | |
| зондовый | 10^{9} | жидкость, | 3D | неразрушающий |
| микроскоп | | вакуум | | |

Таблица 1 — Сравнительная характеристика различных методов микроскопического исследования поверхности твердых тел В настоящее время одним из наиболее мощных современных методов исследования особенностей структуры, топографии, а также локальных физико-механических свойств поверхности материалов является метод сканирующей зондовой микроскопии (C3M). Для получения увеличенных изображений поверхности в сканирующем зондовом микроскопе используется механический зонд. Исследования морфологии поверхности различных конденсированных сред (металлов, полупроводников, диэлектриков) методами С3М можно проводить как на воздухе, так и в жидкости или в вакууме, и получать трехмерные изображения структуры с высоким пространственным разрешением вплоть до атомарного. Как известно, к методам С3М относятся сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) и более десятка разновидностей атомно-силовой микроскопии (ACM), основанных на различных видах взаимодействия между иглой (зондом) и поверхностью образца — механическом, электрическом, магнитном и др.

Физический принцип работы атомно-силового микроскопа

В основе сканирующей зондовой микроскопии лежит детектирование локального взаимодействия, возникающего между зондом и поверхностью исследуемого образца при их взаимном сближении. В зависимости от природы взаимодействия «зонд-образец» различают: сканирующий туннельный микроскоп (детектируется туннельный ток), атомно-силовой микроскоп (детектируется силовое взаимодействие), сканирующий ближнепольный оптический микроскоп (детектируется электромагнитное излучение).

Для регистрации силового взаимодействия между зондом и поверхностью в атомно-силовом микроскопе используются специальные зондовые датчики, представляющие собой упругую консоль (кантилевер) с острым зондом на конце (рис. 1).



Рис 1. Схематическое изображение зондового датчика АСМ

Датчики изготавливаются методами фотолитографии и травления из кремниевых пластин. Упругие консоли формируются, в основном, из тонких слоев легированного кремния или нитрида кремния. На конце кантилевера формируется пирамидальный зонд. Радиус закругления современных АСМ зондов составляет 1-50 нм в зависимости от типа зондов и технологии их изготовления.

Принцип действия силового датчика основан на использовании сил атомных связей, действующих между атомами вещества. Совершенно аналогичные силы действуют и между любыми сближающимися телами. В атомно-силовом микроскопе такими телами служат исследуемая поверхность и скользящее над нею остриё. При изменении силы, действующей между поверхностью и остриём, кантилевер, на котором оно закреплено, отклоняется от положения равновесия, и такое отклонение регистрируется датчиком положения кантилевера. Таким образом, атомносиловой сенсор представляет собой механический зонд, аналогичный обычному зонду механического профилометра. Однако его чувствительность настолько высока, что позволяет регистрировать силы взаимодействия между отдельными атомами. Отличительной особенностью атомно-силового микроскопа по сравнению с профилометром является наличие системы обратной связи, позволяющей управлять силой взаимодействия между зондом и образцом.

Соотношение между силой *F*, воздействующей на зонд, и отклонением кантилевера *x* определяется законом Гука:

$$\mathbf{F} = -\mathbf{k}\mathbf{x} \tag{1}$$

Возможно изготовление кантилевера с упругой константой *k* порядка 1 Н/м. Под действием силы взаимодействия между двумя атомами порядка 0,1 нН величина отклонения таких кантилеверов составляет порядка 0,1 нм.

При приближении зонда к образцу он сначала притягивается к поверхности, благодаря наличию сил Ван-дер-Ваальса. Эти силы обычно доминируют на достаточно больших расстояниях, когда перекрытие волновых функций атомов взаимодействующих тел несущественно. По сравнению с характерными энергиями химической связи энергия вандер-ваальсова взаимодействия мала.

При дальнейшем приближении зонда к образцу электронные оболочки атомов на конце иглы и атомов на поверхности образца начинают перекрываться, что приводит к появлению отталкивающей силы. При дальнейшем уменьшении расстояния отталкивающая сила становится доминирующей. В общем виде зависимость силы межатомного взаимодействия F от расстояния между атомами R имеет вид (рис. 2):

$$F(R) = -\frac{a}{R^{m}} + \frac{b}{R^{n}}, \qquad (2)$$

константы a и b и показатели степени m и n зависят от сорта атомов и типа химических связей. Для сил Ван-дер-Ваальса, которые являются наиболее дальнодействующими из некулоновских сил, m = 7, n = 13.



Рис. 2. Зависимость сил взаимодействия между атомами от расстояния между ними

Реальное взаимодействие зонда с образцом имеет более сложный характер, однако основные черты данного взаимодействия сохраняются — зонд ACM испытывает притяжение со стороны образца на больших расстояниях и отталкивание на малых.

При перемещении зонда вдоль поверхности образца происходит изменение параметра взаимодействия, обусловленное рельефом поверхности. Система обратной связи отрабатывает эти изменения, так что при перемещении зонда в плоскости *XY* сигнал на исполнительном элементе оказывается пропорциональным рельефу поверхности. При сканировании зонд вначале движется над образцом вдоль определенной линии (строчная развертка), при этом величина сигнала на исполнительном элементе, пропорциональная рельефу поверхности, записывается в память компьютера. Затем зонд возвращается в исходную точку и переходит на следующую строку сканирования (кадровая развертка), и процесс повторяется вновь. Записанный таким образом при сканировании сигнал обратной связи обрабатывается компьютером, и затем СЗМ-изображение рельефа поверхности Z = f(x, y) строится с помощью средств компьютерной графики.

Информация, полученная с помощью СЗМ, хранится в виде двумерного массива целых чисел a_{ij} (матрицы). Физический смысл данных чисел определяется той величиной, которая оцифровывалась в процессе сканирования. Каждому значению пары индексов *ij* соответствует определенная точка поверхности в пределах поля сканирования. Как правило, такие массивы чисел представляют собой квадратные матрицы, имеющие размер 256×256 или 512×512 элементов. Визуализация СЗМ данных производится средствами компьютерной графики, в основном, в виде трехмерных и двумерных яркостных (или цветовых) изображений. В последнем случае яркость или цвет однозначно связаны с представляемой величиной в данной точке поверхности.

Общая конструкция атомно-силового микроскопа

Основными составными частями атомно-силового микроскопа являются зонд; пьезоэлектрические двигатели для прецизионного перемещения зонда над поверхностью исследуемого образца; электронный сенсор, детектирующий величину локального взаимодействия между зондом и образцом; компаратор, сравнивающий текущий сигнал в цепи сенсора V(t) с изначально заданным V_s , и, при его отклонении, вырабатывающий корректирующий сигнал V_{fb} ; электронная цепь обратной связи, управляющая положением зонда по оси z; компьютер, управляющий процессом сканирования и получением изображения (рис. 3).

Для контролируемого перемещения иглы на сверхмалых расстояниях используются пьезокерамические двигатели. Используемые в них пьезокерамические материалы (наиболее распространенный материал – цирконат-титанат свинца, ЦТС) изменяют свои размеры под действием приложенного к ним электрического напряжения (пьезоэлектрический эффект).

Существует много типов и форм, в которых выпускаются пьезокерамические двигатели. Каждый имеет свой уникальный пьезоэлектрический коэффициент от 0,1 до 300 нм/В. Так, керамика с коэффициентом расширения 0,1 нм/В позволяет получить перемещение 0,01 нм при приложении напряжения 100 мВ. Таким образом осуществляется прецизионное позиционирование иглы.



Рис. 3. Общая схема сканирующего зондового микроскопа:

- 1- зонд; 2 образец; 3 пьезоэлектрические двигатели х, у, z;
- 4 генератор напряжения развертки на х, у пьезокерамики;
- 5 электронный сенсор; 6 компаратор;
- 7 электронная цепь обратной связи; 8 компьютер;
- 9 изображение поверхности образца Z(x, y).

Основные методики атомно-силовой микроскопии

В зависимости от расстояния зонд-образец при сканировании различают контактный, неконтактный и прерывисто-контактный («полуконтактный») способы проведения силовой микроскопии. В контактном методе острие зонда непосредственно соприкасается с поверхностью образца в процессе сканирования и находится в области действия сил отталкивания. В бесконтактном методе зонд находится достаточно далеко, не касается поверхности и находится в области действия дальнодействующих притягивающих сил. В «полуконтактном» режиме зонд частично касается поверхности, находясь попеременно как в области притяжения, так и в области отталкивания.

Каждый метод предназначается для решения определенного ряда задач. Причем некоторые исследования можно проводить различными методиками в разных методах. Это дает исследователю широкие возможности и позволяет работать в том методе, который наиболее уместен и эффективен в условиях эксперимента. Например, существует три метода измерения рельефа с помощью ACM:

• контактная атомно-силовая микроскопия — измерение топографии поверхности в контактном методе;

• бесконтактная атомно-силовая микроскопия — измерение топографии поверхности в бесконтактном методе, основанном на использовании вибрационной методики;

• «полуконтактная» атомно-силовая микроскопия (или прерывистоконтактная атомно-силовая микроскопия) — в данном случае используется вибрационная методика, при которой колеблющееся острие слегка стучит по поверхности образца.

Перечисленные способы измерений обладают определенными достоинствами и недостатками. Контактный способ измерений наиболее удобен с точки зрения детектирования силового взаимодействия, т.к. величины сил отталкивания в области контакта могут значительно превышать величины сил притяжения. Однако при его использовании существует опасность возникновения нарушений структуры поверхности образца и быстрого износа или даже поломки зонда. При бесконтактном способе измерений разрушение образца отсутствует, однако малы измеряемые сигналы. Поэтому наиболее часто для визуализации различных свойств поверхности в силовой микроскопии используется «полуконтактный» способ детектирования взаимодействия. При этом вследствие кратковременности контакта воздействие зонда на поверхность минимально, а измеряемые сигналы достаточны для их надежного детектирования. Дополнительным преимуществом «полуконтактного» способа является отсутствие сдвиговой составляющей силы воздействия на исследуемую поверхность, что существенно уменьшает искажения получаемых изображений.

Контактные методики

При работе ACM в контактном режиме используются кантилеверы с относительно малыми коэффициентами жесткости (0,01-0,2 Н/м), что позволяет обеспечить высокую чувствительность и избежать нежелательного чрезмерного воздействия зонда на образец.

В этом режиме работы взаимодействие зонда и образца осуществляется в области действия сил отталкивания. Сила *F*, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу кантилевера.

Величина изгиба регистрируется, как правило, с помощью оптической системы, состоящей из полупроводникового лазера и четырехсекционного фотодиода (рис. 4).

Оптическая система ACM юстируется таким образом, чтобы излучение лазера фокусировалось на конце кантилевера, а отраженный луч попадал в центр фотодетектора. При изгибе кантилевера под действием контактных сил отраженный от него луч лазера смещается относительно центра фотодетектора.



Рис. 4. Схема оптической регистрации изгиба консоли зондового датчика ACM

Таким образом, отклонение кантилевера может быть определено по относительному изменению освещенности верхней и нижней половинок фотодетектора. На таком оптическом датчике взаимодействия сейчас основано действие большинства современных зондовых микроскопов.

В контактном режиме ACM-изображение рельефа исследуемой поверхности формируется либо при постоянной силе взаимодействия зонда с поверхностью, либо при постоянном среднем расстоянии между основанием зондового датчика и поверхностью образца. При сканировании образца в режиме постоянной силы система обратной связи поддерживает постоянной величину изгиба кантилевера, при этом управляющее напряжение, подающееся на Z-электрод сканера, будет пропорционально рельефу поверхности образца. Недостаток контактных ACM методик – непосредственное механическое взаимодействие зонда с поверхностью. Это часто приводит к поломке зондов и разрушению поверхности образцов в процессе сканирования.

Полуконтактный режим работы АСМ

В этом режиме работы зонд находится достаточно далеко от поверхности образца в области действия сил притяжения. Силы притяжения и их градиенты слабее отталкивающих контактных сил, поэтому для их детектирования обычно используется модуляционная методика. Для этого на пьезовибратор, на котором закреплен кантилевер, прикладывается переменное напряжение, которое вызывает вынужденные колебания.

Частоту переменного напряжения выбирают равной собственной частоте колебаний кантилевера. Вследствие этого кантилевер колеблется

над образцом с резонансной частотой ω₀:

$$\omega_0 \sim \sqrt{\frac{k}{m}},$$
 (3)

где *т* – масса кантилевера.

Уравнение, описывающее движение зонда при малой амплитуде колебаний имеет вид:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \cdot \frac{dz}{dt} + \omega_0^2 (z - z_0) = \Delta z \omega_0^2 \cos(\omega t)$$
(4)

где ω – частота вынуждающих колебаний пьезодрайва, z_0 – расстояние зонд-образец при нулевой амплитуде колебаний, z(t) – расстояние зонд-образец в момент времени t, Δz – амплитуда вынуждающих колебаний (закрепленного на пьезовибраторе конца кантилевера), амплитуда возбуждения, Q – добротность, безразмерная величина, зависящая от колебательной системы и условий внешней среды (воздух, жидкость или вакуум). Величина Q связана с характерным временем затухания колебаний τ соотношением:

$$2\mathbf{Q} = \boldsymbol{\omega}_0 \cdot \boldsymbol{\tau} \,. \tag{5}$$

Вынужденные колебания образуются из двух различных типов колебаний – переходного процесса и стационарного колебания. Переходный процесс является общим решением уравнения (4) при $\Delta z = 0$; он затухает с течением времени и интереса не представляет. Стационарное колебание представляет собой чисто гармоническое колебание с частотой ω и амплитудой возбуждения $\Delta z \neq 0$.

Амплитуда стационарных колебаний зонда равна:

$$\delta = \Delta z \sqrt{\frac{Q^2 \omega_0^4}{\omega_0^2 \omega^2 + Q^2 (\omega_0^2 - \omega^2)^2}}.$$
 (6)

Сдвиг фазы φ колебаний свободного конца кантилевера относительно закрепленного определяется выражением:

$$tg\phi = \frac{1}{Q} \cdot \frac{\omega \cdot \omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2}.$$
 (7)

Приближение зонда к поверхности образца приводит к возникновению силы взаимодействия между ними, что эквивалентно увеличению массы зонда. Это приводит к смещению амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазо-частотной характеристики (ФЧХ) колебаний кантилевера влево по сравнению с измеренными характеристиками вдали от поверхности (рис. 5).



Рис. 5. Изменение АЧХ (а) и ФЧХ (б) под действием градиента силы.

Резонансная частота колебаний кантилевера изменяется при изменении градиента силы $\partial F/\partial z$ (при приближении зонда к поверхности) по сравнению со свободно резонирующим кантилевером (вдали от поверхности) в соответствии с выражением:

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{k} \frac{\partial F}{\partial z}}.$$
(8)

Так как частота вынуждающих колебаний кантилевера поддерживается постоянной и равной ω_0 в свободном состоянии, то при приближении зонда к поверхности амплитуда колебаний свободного конца кантилевера уменьшается. Эта амплитуда колебаний регистрируется с помощью оптической системы и может быть определена по относительному изменению переменной освещенности верхней и нижней половинок фотодетектора. Далее с помощью синхронного детектора выделяется постоянный сигнал, согласованный с синхросигналом от генератора напряжений (см. рис. 5).

Компаратор сравнивает текущий сигнал в цепи сенсора с изначаль-

но заданным V_s (характеризует уровень силы, на котором зонд удерживается от поверхности образца) и, при его отклонении, вырабатывает корректирующий сигнал V_{fb} . Взаимодействие зонда с образцом поддерживается постоянным за счет приближения и отвода зонда от поверхности системой обратной связи, управляющей Z-пьезоприводом таким образом, чтобы сила взаимодействия между зондом и образцом (а как следствие и амплитуда колебаний зонда) была постоянной (режим постоянной силы). Сигнал о высоте z в каждой точке изображения (x, y) берется из канала Z-пьезопривода.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Описание устройства блока сканирования атомно-силового микроскопа NT-206

Блок сканирования (рис. 6) предназначен для работы на открытом воздухе и предоставляет удобный доступ для установки образца и смены зонда. В приборе применена измерительная схема с неподвижным зондом над подвижным образцом. В ходе измерений прецизионные перемещения образца обеспечиваются трубчатым пьезосканером, на котором образец устанавливается. Перед измерениями зонд может быть перемещен в необходимую область над образцом при помощи автоматизированной платформы.

Блок сканирования состоит из базовой платформы (корпуса) (1) и сменной измерительной головки (8). Все механизмы смонтированы на верхней плите корпуса, которая является базовой. С нижней стороны (внутри корпуса) базовой плиты установлен механизм вертикального перемещения пьезосканера. Данный механизм обеспечивает подвод (подъем) и отвод пьезосканера с образцом на предметном столике, установленном на верхнем (подвижном) торце пьезотрубки (16), относительно зонда (вертикальное или Z-перемещение). Диапазон хода механизма вертикального перемещения составляет 20 мм с шагом около 200 нм.

На верхней стороне базовой плиты смонтирована платформа горизонтального (ХҮ) перемещения для подготовительных передвижений измерительной головки над образцом (грубое ХҮ-позиционирование) для выбора необходимой области. Платформа горизонтального перемещения состоит из Y-ступени (2) с приводным шаговым двигателем (3) и X-ступени (4) с соответствующим шаговым двигателем (5). Платформа ХҮ-перемещения обеспечивает диапазон хода 10 мм в обоих направлениях с шагом 2,5 мкм.

Сверху на ступени X смонтирована направляющая «ласточкин хвост» (6), в которой устанавливается измерительная головка (8). Измерительная головка (8) вставляется в ласточкин хвост спереди движением ее в горизонтальной плоскости. Винт (7) служит для надежной фиксации измерительной головки на базовой платформе.

Измерительная головка (8) представляет собой высокоточную систему, содержащую механические, оптические и электронные компоненты и оборудованную специально разработанной видеокамерой (18). В нижней части измерительной головки устанавливается держатель зонда (12). Винт (13) используется для фиксации держателя зонда после его установки в измерительной головке. Ручки (9) и (10) служат для настройки лазерного луча.



Рис. 8. Блок сканирования атомно-силового микроскопа NT-206. 1 – корпус; 2 – ступень грубого позиционирования по Y; 3 – шаговый электродвигатель по Y; 4 – ступень грубого позиционирования по X; 5 – шаговый электродвигатель по X; 6 – соединение типа «ласточкин хвост» для установки измерительной головки; 7 – винт фиксации измерительной головки; 8 – измерительная головка; 9 – ручка механизма регулировки лазера в направлении X; 10 – ручка механизма регулировки лазера в направлении X; 10 – ручка механизма регулировки фотодетектора в направлении X; 15 – ручка механизма регулировки фотодетектора в направлении Y; 16 – предметный столик; 17 – труба видеосистемы; 18 – модуль видеосистемы; 20 – кабель измерительной головки; 21 – кабель видеосистемы (USB).

Источник лазерного излучения и видеокамера интегрированы в одной оптической системе, поэтому видеокамера (18) перемещается вместе с источником лазерного излучения при его настройке. Данное решение обеспечивает постоянное нахождение области вокруг центра лазерного луча в поле обзора видеокамеры. Ручки (14) и (15) используются для настройки фотодетектора на луч, отраженный от обратной стороны кантилевера зонда.

Программа управления ACM NT-206 SurfaceScan

Атомно-силовой микроскоп NT-206 работает под управлением специализированного программного обеспечения *SurfaceScan*. После запуска SurfaceScan на рабочем столе появляется основное окно программы с линейкой инструментов, функции кнопок которой перечислены на рис. 8.

- 🔲 Вывод диалога сохранения данных
- Вывод основной панели управления сканированием
- — Вывод панели управления шаговыми двигателями
- 🔆 Вывод панели управления лазером
- Вывод панели настройки параметров обратной связи
- 💹 Вывод панели настройки генератора колебаний зонда
- **Ш** Вывод панели настройки параметров спектроскопии
- 🔳 Вывод панели индикаторов
- 🗮 Вывод окна видеоизображения
- **8** Запуск программы обработки СЗМ-данных
- Инициализация аппаратной части
- Запуск сканирования матрицы
- _____ Запуск статической спектроскопии в точке
- **2** Запуск динамической спектроскопии
- Запуск сканирования по линии
- **Х**^{То} Запуск подвода образца к зонду



Рис. 8. Функции кнопок линейки инструментов.

По умолчанию окно содержит линейку инструментов и меню; все другие панели управления и элементы интерфейса в основном окне активируются после выбора соответствующих пунктов меню или при нажатии соответствующих кнопок на линейке инструментов. Окна визуализации, отображающие процесс измерения и его результаты, выводятся после запуска соответствующих процедур в панели управления или меню, а также при нажатии соответствующих кнопок на линейке инструментов.

Все управление работой ACM производится с помощью специализированных панелей, которые активируются нажатием соответствующих кнопок в линейке инструментов или выбором соответствующих команд меню.

Требования к образцам

Атомно-силовой микроскоп HT-206 позволяет исследовать плоскопараллельные образцы, имеющие линейные размеры в плоскости до 15 мм и толщину до 10 мм. Образцы закрепляются на подложке из поликристаллического сапфира с помощью двусторонней липкой ленты.

Техника безопасности

Прибор управляется напряжением 220В. Эксплуатацию сканирующего зондового микроскопа НТ-206 производить в соответствии с ПТЭ и ПТБ электроустановок потребителей напряжением до 220 В.

Задание

1. Ознакомьтесь с Руководством по эксплуатации АСМ НТ-206.

2. Поместите исследуемый образец на предметный столик атомносилового микроскопа.

3. Установите зонд для контактного метода исследования поверхности в соответствии с Руководством по эксплуатации.

4. Проведите настройку системы детектирования атомно-силового микроскопа (юстировку лазера и фотодетектора) в соответствии с Руководством по эксплуатации.

5. Произведите подвод зонда к образцу.

6. В панели *Area* программы управления ACM выделите область сканирования. (При первом сканировании образца или нового участка на нем рекомендуется установить максимальное поле сканирования.)

7. В панели Area установите необходимые параметры для количества точек по осям X и Y (Num points X, Num points Y), размера шага между точками измерения (Step, nm), длительности задержки измерения в точке измерения (Delay, mks).

8. Выберите схему движения зонда в селекторе *Pattern*.

9. Запустите процесс сканирования нажатием кнопки Start в нижней части панели *Main*.

10. Сохраните полученное изображение.

11. Измените направление сканирования и получите новое изображение.

12. Измените количество точек по осям X и Y (*Num points X, Num points Y*), размер шага между точками измерения (*Step, nm*) и получите новые изображения.

13. Уменьшите сканируемый интервал и повторите сканирование.

14. Сравните полученные изображения и сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Опишите физический принцип работы атомно-силового микро-скопа.

2. Назовите основные режимы работы АСМ и их назначение.

3. Опишите зависимость силы взаимодействия от расстояния зондобразец.

4. Как устроена система регистрации малых изгибов упругой консоли зондового датчика ACM?

5. Как устроены зондовые датчики атомно-силовых микроскопов?

6. Какие недостатки у контактных АСМ методик?

Литература

1. Ю.С. Бараш. Силы Ван-дер-Ваальса. М: Наука, 1988. 344 с.

2. В.Л. Миронов. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004. 144 с.