

Атомно-силовая микроскопия (АСМ, АФМ)

АСМ (или АФМ, другое название СЗМ – сканирующий зондовый микроскоп, или SPM – для расшифровки сокращений см. таблицу) служит для получения изображений поверхностей различного рода: металлов, керамики, полимеров или биомолекул и живых клеток. Кроме того, АСМ существенно расширяет возможности экспериментатора при изучении механических, магнитных и электрических свойств материалов. При сравнении микроскопов необходимо разбираться в технических описаниях компаний-производителей, чтобы сделать наилучший выбор, соответствующий предъявленным требованиям. В первую очередь, следует понимать цели, для которых будет использован прибор. Если химик-технолог, синтезирующий тонкие полимерные пленки, хочет, например, контролировать результаты своей работы при помощи АСМ, то ему не нужен микроскоп, сканирующий кадры 100×100 мкм и имеющий большие возможности для нанолитографии. Ему достаточно небольшого поля сканирования и простейших функций для определения механических характеристик образца. Глубокое понимание решаемой задачи и знание особенностей существующих АСМ-методов поможет рационально распорядиться имеющимися средствами.

Задачей нанотехнологий является целенаправленное создание наноразмерных объектов с целью получения новых материалов, или материалов с улучшенными (уникальными) свойствами. Для этого необходимы методы визуализации с нанометровой и даже субнанометровой разрешающей способностью.

Как все начиналось: история АФМ

В 1959 году Р. П. Фейнман в своей дальновидной работе, озаглавленной «Внизу – там еще достаточно много места», предположил возможность существования нанотехнологии еще до того, как было изобретено слово «нанотехнология».

Хотя это понятие еще не существовало в то время, Фейнман был первым, кто увидел и предсказал его потенциал. Сегодня, всего через 60 лет после этих событий, нанотехнологии уже существуют вокруг нас. В 1980-х годах была изобретена новая область микроскопии под названием сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ). В СЗМ остроконечный шип зонда (острие кантилевера) сканирует рельеф поверхности, а поверхностные свойства обнаруживаются в нано- или атомном масштабе. Одной из первых вех в этой области было изобретение первой установки сканирующего туннельного микроскопа (СТМ, STM) в 1981/1982 году Биннигом, Рорером и Гербером. В 1986 году Биннинг и Рорер получили Нобелевскую премию по физике за это изобретение.

Технология АСМ относится к области методов сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ, SPM) и была изобретена в 1985 году Биннигом, Квоутом и Гербером.

Что такое атомно-силовая микроскопия (АСМ)?

АСМ (AFM, по англ. Atomic Force Microscopy), что обозначает атомный силовой микроскоп – это установка, которая концентрирует информацию об образце, «прикасаясь» к поверхности образца механическим зондом. Пространственное разрешение атомно-силового микроскопа зависит от размера кантилевера и кривизны его острия-шипа. Этот метод позволяет нам видеть и измерять структуру поверхности материала с беспрецедентным разрешением и точностью. Атомно-силовой микроскоп позволяет нам, например, получить изображения, показывающие расположение отдельных атомов в образце. По сравнению с другими микроскопами, такими как оптические или электронные микроскопы, АСМ обеспечивает более высокое разрешение не только в поперечном направлении, но и в вертикальном направлении, так что получается очень точная информация о рельефе поверхности. Другим преимуществом АСМ по сравнению со сканирующим туннельным микроскопом (СТМ, по англ. STM -Scanning Tunnel Microscopy) является то, что образец не должен быть обязательно проводящим, поэтому АСМ можно также использовать для изолированных образцов (исследовать как проводящие, так и непроводящие поверхности). Название Atomic Force Microscopy (АСМ) отражает тот факт, что с атомно силовой микроскоп измеряет силу взаимодействия между острием зонда (кантилевера) и образцом. Принципиальное отличие АСМ от СТМ, с которым часто путают установку, заключается в регистрации не туннельного эффекта, а сил межмолекулярных взаимодействий, что позволяет использовать АСМ для работы с непроводящими образцами. АФМ использует острый зонд-шип с радиусом острия нанометрового размера для сканирования поверхности образца для получения изображений рельефа поверхности. Ввиду способности не только сканировать, но и манипулировать атомами, он назван силовым. С помощью атомно-силового микроскопа можно получать изображения, как физических объектов, так и биологических и химических объектов (вирусов и бактерий, молекул). Разрешение таких микроскопов достигает доли нанометров, что позволяет наблюдать атомы некоторых химических элементов. Возможности этого прибора не ограничиваются получением изображений - с помощью атомно-силового микроскопа можно изучать взаимодействие объектов, измерять силы трения, упругости, адгезии, а также перемещать отдельные атомы, осаждать и удалять их с заданной поверхности. (Обычно под взаимодействием понимают взаимное притяжение зонда и поверхности под действием сил Ван-дер Ваальса и их взаимное отталкивание за счет электростатических сил (однако существует целый ряд модификаций метода для анализа иных взаимодействий, например, магнитных, сил трения)

АСМ предоставляет реальную 3D-информацию о топографии поверхности и работает в различных средах, например:

- при атмосферных условиях
- в вакууме
- при избыточном (сверхвысоком) давлении

(в атмосфере различных газов, например, инертных газов)
при различных атмосферах
при различных температурах
при (повышенной) влажности
под слоем жидкости

АСМ измеряет не только топографию поверхности, но и большое количество свойств поверхности, таких как:

трение
фаза
электропроводность / сопротивление
теплопроводность / сопротивление
температура стеклования
температура плавления
жесткость
модуль упругости
адгезия
поверхностный потенциал
емкость
магнетизм
электрохимические свойства (поверхности)

Список сокращений

AAFM – Acoustic AFM – акустический режим силовой микроскопии
AFM – Atomic Force Microscope – атомно-силовой микроскоп (АСМ)
AFM AC – Atomic Force Microscope Alternating Current – резонансная атомно-силовая микроскопия
AFM DC – Atomic Force Microscope Direct Current – контактная атомно-силовая микроскопия
AmI – Amplitude Imaging – режим визуализации амплитуды колебаний кантилевера
CAFM – Conductance AFM – атомно-силовая микроскопия проводимости
CM – Contact Mode – контактный режим
CSAFM – Current Sensing AFM – АСМ с дополнительным измерением токов
DC EFM – Direct Current Electric Force Microscopy – электрическая силовая микроскопия на постоянном токе
EAFM – Electric AFM – электрический режим атомно-силовой микроскопии
ECSAFM – Electrochemical Microscopy – электрохимическая АСМ
EFM – Electric Force Microscopy – электростатическая силовая микроскопия
FDM – Force-Distance Measurements – измерение силовых кривых
FDS – Force-Distance Spectroscopy – силовая спектроскопия
FMM – Force Modulation Microscopy – модуляционная силовая микроскопия
FVM – Force-Volume Measurements – измерение массива силовых кривых

LFM – Lateral Force Microscopy – микроскопия сил трения
MAC – Magnetic Alternating Current AFM – резонансный режим с магнитным возбуждением
MFM – Magnetic Force Microscopy – магнитная силовая микроскопия
NSOM – Near Field Optical Microscope – сканирующий оптический микроскоп ближнего поля
PFS – Picoforce Force Spectroscopy – силовая спектроскопия в диапазоне пиконьютонов (пН)
PhI – Phase Imaging – режим визуализации фазы колебаний кантилевера
RAFM – Resistance AFM – резистивный режим силовой микроскопии
SCM – Scanning Capacitance Microscopy – сканирующая емкостная микроскопия
SPM – Scanning Probe Microscopy – сканирующая зондовая микроскопия
SPM – Surface Potential Microscopy – микроскопия поверхностного потенциала
SSRM – Scanning Spreading Resistance Microscopy – сканирующая микроскопия сопротивления растекания
SThM – Scanning Thermal Mode – сканирующая микроскопия теплопроводности
STM – Scanning Tunnel Microscopy – сканирующая туннельная микроскопия
TM – Tapping Mode – полуконтактный/резонансный режим
TUNA – Tunneling AFM – туннельная атомно-силовая микроскопия
VEECO – Vacuum Electronic Equipment Company – компания вакуумного электронного оборудования

Настройка инструмента АСМ

АСМ использует кантилевер с острым микрозондом (острием - шипом) для сканирования поверхности образца, обычно следуя за профилем поверхности, строка за строкой, чтобы записать изображение топографии образца. Для контроля и проверки взаимодействия шипа кантилевера и образца в процессе сканирования применяется механизм обратной связи. Лазерный луч, генерируемый источником света, направляется на заднюю сторону кантилевера и отражается обратно на четырехсекторный детектор-фотодиод. В то время как кантилевер движется вверх и вниз, следуя профилю поверхности образца, положение лазерного пятна на фотодиоде изменяется соответствующим образом. Благодаря обратной связи, Z-сканер приближается к профилю поверхности или вытягивается, поддерживая лазерное пятно в том же положении на фотодиоде.

Зачем нужно применять контроль с обратной связью? С одной стороны, это активно расширяет диапазон измерений в направлении Z, потому что обычно Z-сканер имеет гораздо больший диапазон, чем фотодиод. Это означает, что можно измерить образец с более глубокой впадиной или более высоким выступом. С другой стороны, благодаря обратной связи взаимодействие между острием шипа и образцом может быть быстро изменено пользователем. Это помогает избежать чрезмерной силы взаимодействия, которая может повредить острие шипа или образец, или и то, и другое.

Микрозонд представляет собой тонкую пластинку-консоль (ее называют

кантилевером, от английского слова "cantilever" - консоль, балка). На конце кантилевера расположен острый шип (радиус закругления от 1 до 10 нм). При перемещении микрозонда вдоль поверхности образца острие шипа приподнимается и опускается, очерчивая микрорельеф поверхности, подобно тому, как скользит по грампластинке патефонная игла. На выступающем конце кантилевера (над шипом) расположена зеркальная площадка, на которую падает и от которой отражается луч лазера. Когда шип опускается и поднимается на неровностях поверхности, отраженный луч отклоняется, и это отклонение регистрируется фотодетектором. Данные фотодетектора используются в системе обратной связи, которая обеспечивает постоянную силу давления острия на образец. Пьезоэлектрический преобразователь может регистрировать изменение рельефа образца в режиме реального времени. В другом режиме работы регистрируется сила взаимодействия острия с поверхностью при постоянном положении шипа над образцом. Микрозонд обычно делают из кремния или нитрида кремния. Разрешающая способность метода составляет примерно 0,1-1 нм по горизонтали и 0,01 нм по вертикали. Смещая зонд по горизонтали, можно получить серию рельефов и с помощью компьютера построить трехмерное изображение.

Основные режимы сканирования и визуализации

Два разных типа АСМ

Обычно компании-производители приводят список доступных микроскопу методов/режимов сканирования.

В зависимости от того, где находится сканер, АСМ можно разделить по типам. Для типа сканирования шипом: сканер-кантилевер перемещается, в то время как образец фиксируется на площадке для образца (см. Рис. 1.1).

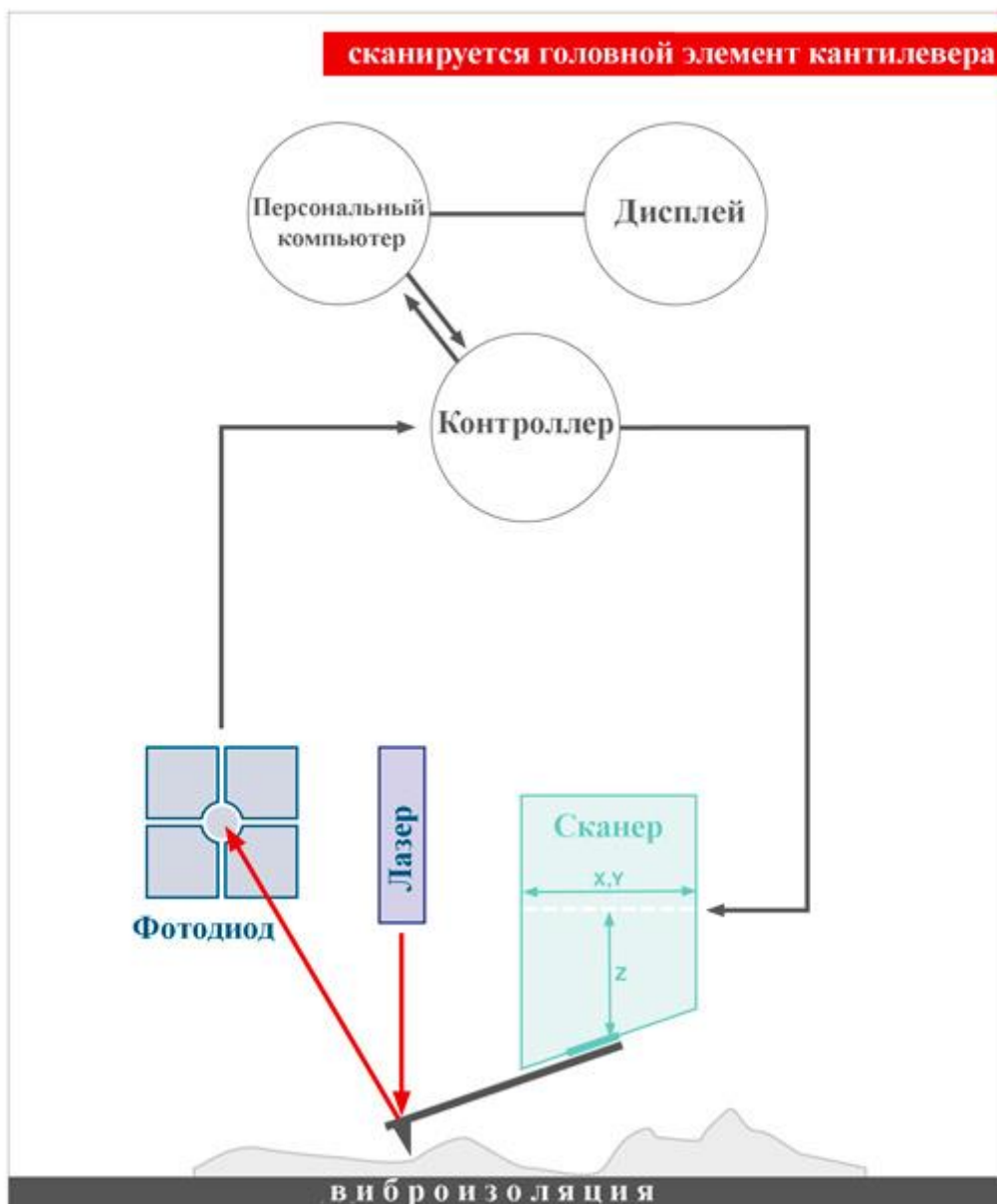


Рис. 1.1 Сканирование производится кантилевером, а образец не перемещается (образец в фиксированном положении).

При другом типе сканирования -сканировании образца привод обратной связи помещается под образец, образец передвигается, а кантилевер удерживается в фиксированном положении (см. Рис. 1.2).

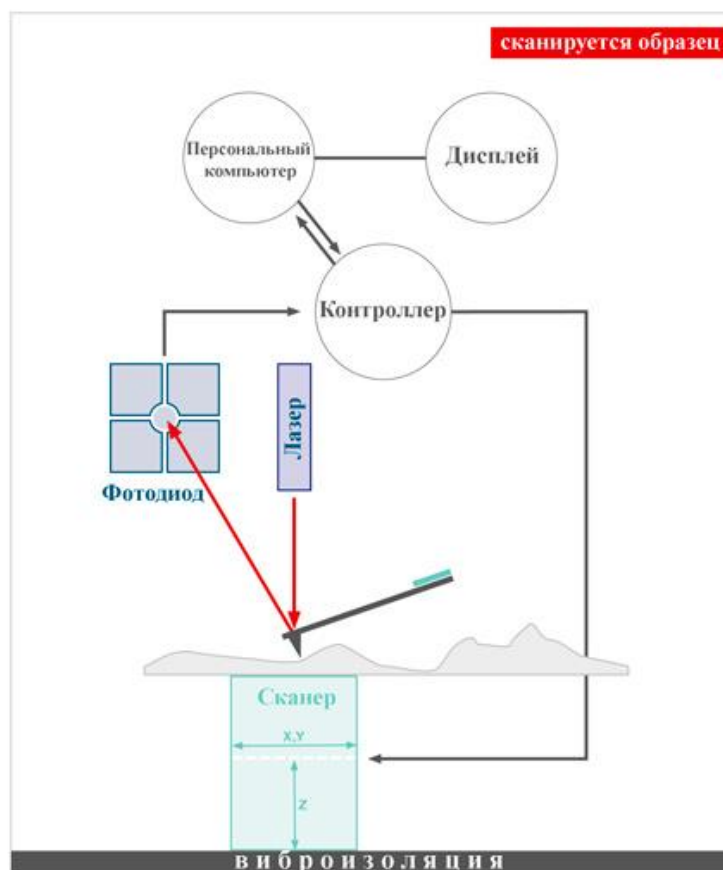


Рис. 1.2 Установкой сканируется образец (кантилевер в фиксированном положении)

Для типа сканирования АСМ, разделенного по направлениям ХУ и Z, сканер ХУ помещается под образец, а Z-сканер помещается в мобильный сканирующий элемент, чтобы уменьшить перекрестные помехи между этими сканерами (см. Рис1.3).

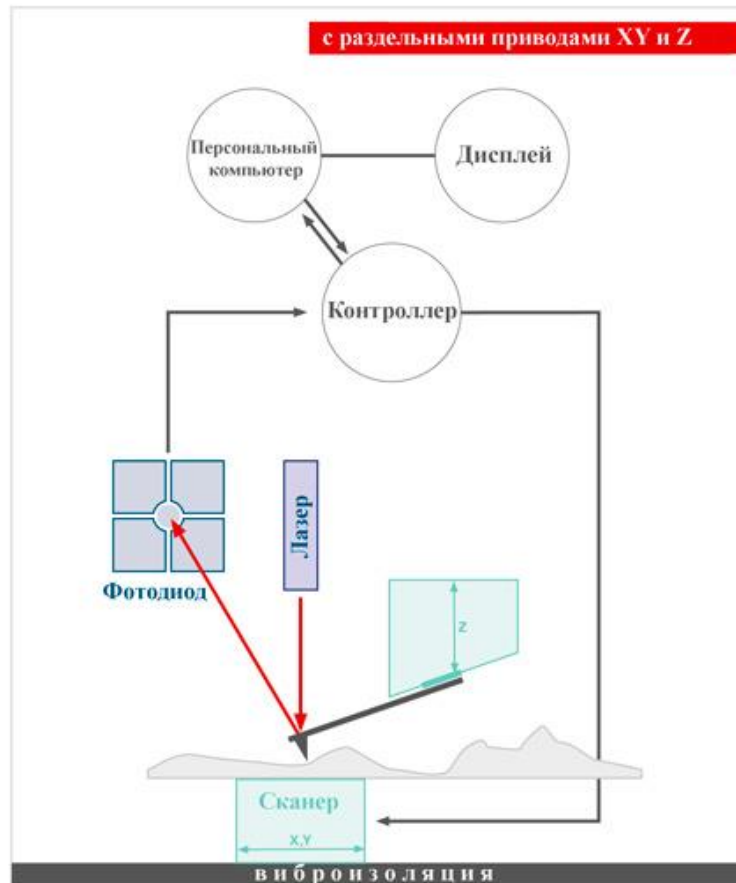


Рис. 1.3 Разделенные по направлениям XY и Z привод-системы сканеров

Основные Режимы АСМ

По мере развития технологии АСМ (AFM) были разработаны разнообразные режимы, позволяющие собирать широкий спектр данных об исследуемом образце. Здесь объясняются некоторые из наиболее известных режимов АСМ. В зависимости от расстояний от иглы до образца, используемых для получения АСМ-изображений, возможны следующие режимы (моды) работы АСМ:

- контактный режим (contact mode);
- бесконтактный режим (non-contact mode);
- полуконтактный/резонансный режим (tapping mode)

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

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

- режим постоянной высоты;
- режим постоянной силы.

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

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

Контактный режим (contact mode)

Контактный режим работает путем сканирования кантилевером поверхности в режиме постоянного контакта шипа кантилевера с поверхностью образца. Механизм обратной связи управляет перемещением кантилевера в направлении Z (вертикальном направлении) с помощью Z сканера, следуя за изменением профиля поверхности, поддерживая постоянным отклонение лазера в фотодиоде при заданном прогибе. Это называется установкой постоянной отклонения. При поддержании заданного отклонения лазера сила взаимодействия между шипом кантилевера и образцом остается постоянной.

Изгиб консоли ΔZ , пропорциональный силе, действующей на зонд со стороны поверхности, записывается для каждой точки. Изображение в таком режиме представляет собой пространственное распределение силы взаимодействия зонда с поверхностью.

Достоинства метода:

- Наибольшая, по сравнению с другими методами, помехоустойчивость
- Наибольшая достижимая скорость сканирования
- Обеспечивает наилучшее качество сканирования поверхностей с резкими перепадами рельефа

Недостатки метода:

- Наличие артефактов, связанных с наличием латеральных сил, воздействующих на зонд со стороны поверхности

- При сканировании в открытой атмосфере (на воздухе) на зонд действуют капиллярные силы, внося погрешность в определение высоты поверхности
- Практически непригоден для изучения объектов с малой механической жёсткостью (органические материалы, биологические объекты)

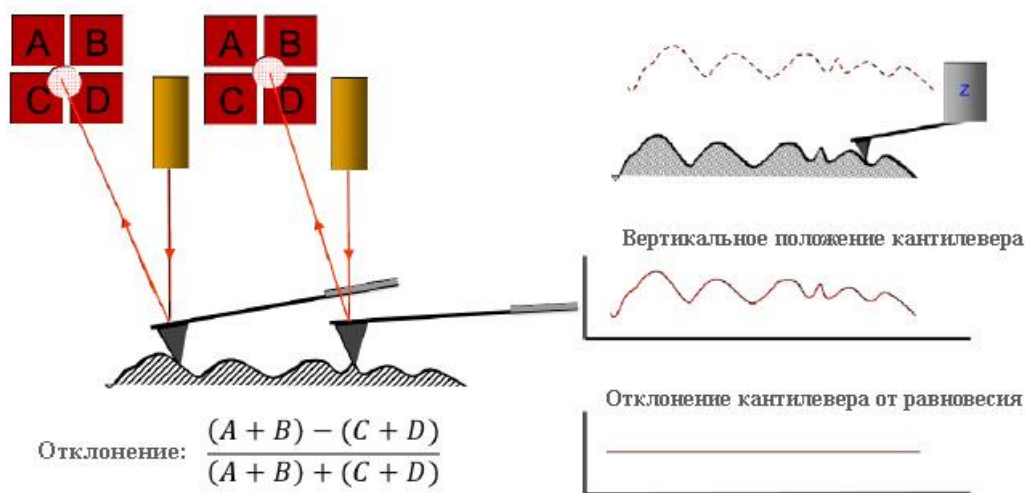


Рисунок 1.4: Контактный режим

Полуконтактный режим/резонансный режим (tapping mode).

Полуконтактный режим предполагает прерывистый контакт между шипом и образцом и часто упоминается как «бесконтактный режим». В полуконтактном режиме кантилевер осциллирует на своей резонансной частоте или вблизи нее с определенным диапазоном амплитуд, обычно от 20 нм до 100 нм. Резонансная частота кантилевера является характеристикой самого кантилевера и может измениться, если кантилевер сломан или загрязнен. Шип следует вдоль поверхности образца (X, Y) и постукивая по поверхности в каждой точке сканирования. Во процессе перемещения XY-сканера от точки к точке шип не имеет контакта с поверхностью образца. Механизм обратной связи управляет перемещением кантилевера в направлении Z (вертикальном направлении) сканером Z для поддержания постоянного колебания кантилевера в рамках заданной амплитуды.

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

отличием, что игла кантилевера в нижней точке своих колебаний слегка касается поверхности образца. При использовании атомно-силовой микроскопии в нанолитографии работа ведется в контактном режиме с контролируемым перемещением острия зонда по заданной схеме.

Контактный режим используется для твердых образцов, полуконтактный - для мягких, легко разрушаемых образцов. Независимо от стоящих перед вами задач, нужно выбирать микроскоп, реализующий оба эти режима, так как в контактном режиме трудно работать с мягкими образцами (в первую очередь с биологическими объектами и с мягкими пленками).

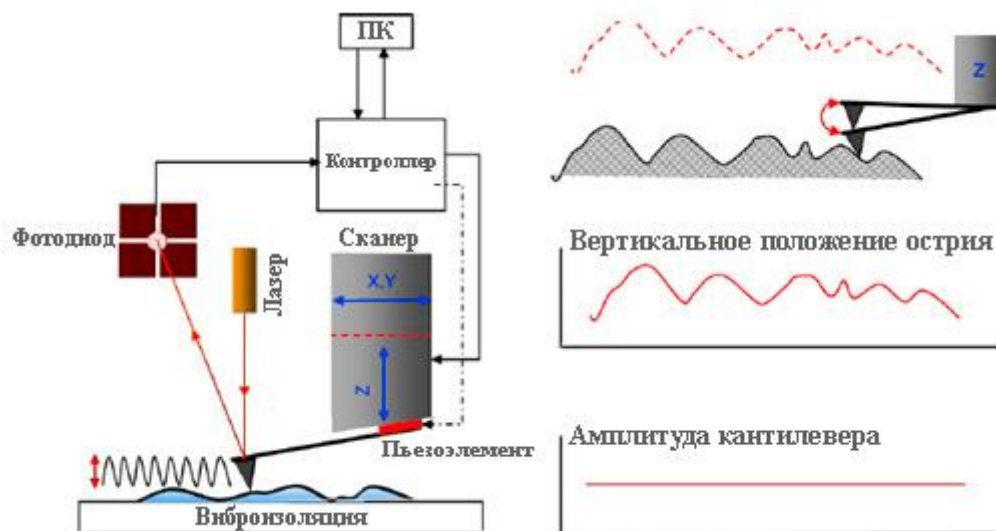


Рисунок 1.5: Полуконтактный Режим

Достоинства метода:

- Наиболее универсальный из методов АСМ, позволяющий на большинстве исследуемых образцов получать разрешение 1-5 нм
- Латеральные силы, действующие на зонд со стороны поверхности, устранены — упрощает интерпретацию получаемых изображений

Недостатки метода:

- Максимальная скорость сканирования меньше, чем в контактном режиме

Прочие режимы силовой микроскопии

Режим силы трения (LFM) (Микроскопия сил трения)

Режим LFM (Lateral force mode) является производным контактного режима. Шип поддерживает постоянный контакт с поверхностью, а кантилевер сканирует образец. Помимо измерения вертикального отклонения кантилевера

также, как это происходит в контактном режиме, обычно измеряется также поперечное отклонение для определения такого свойства поверхности как трение (friction). Поэтому метод LFM иногда также называют фрикционной силовой микроскопией, а диссипационный боковой сигнал иногда называют сигналом трения, хотя этот сигнал может быть обусловлен не только коэффициентом трения, но и топографией образца.

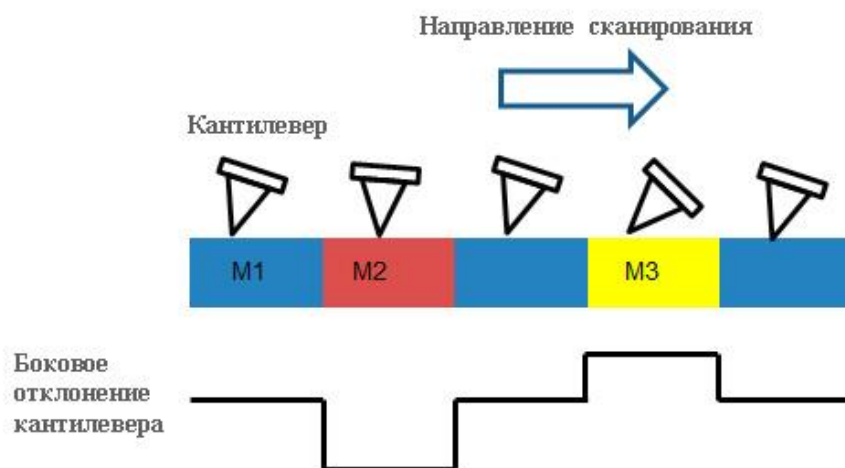


Рисунок 1.6: Фрикционная силовая микроскопия

Режим трения предназначен, главным образом, для химического анализа поверхности при необходимости идентифицировать вещества различной химической природы, имеющие схожий рельеф.

Режим фазового изображения

Режим фазового изображения представляет собой вторичный режим обработки изображений, полученный из полуконтактного режима. Фазовое изображение показывает фазовое отставание (другое название - фазовый сдвиг) между сигналом, который управляет колебанием кантилевера, и выходным сигналом колебания кантилевера. Фазовый сдвиг указывает на изменение свойств поверхности, таких как адгезия, трение, эластичность и т. д., которые могут возникать из-за изменений состава поверхности образца. Таким образом, в дополнение к топографии образца фазовая визуализация дает очень ценную информацию о неоднородности его поверхности.

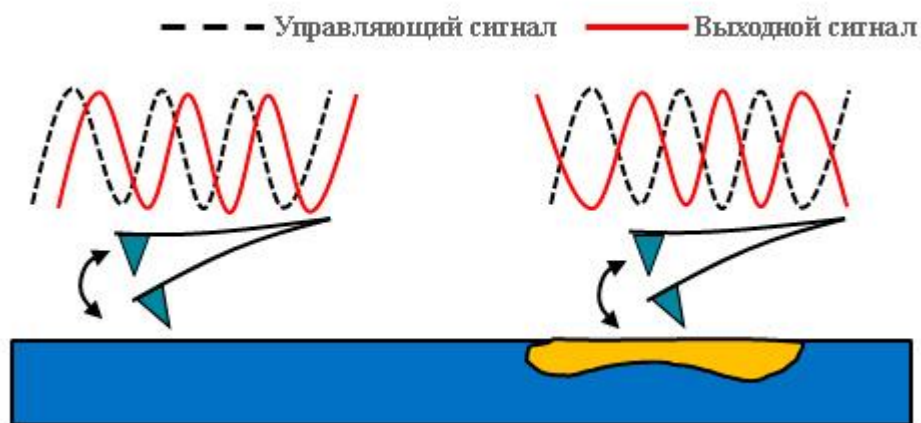


Рисунок 1.7: Режим фазового изображения

Режим измерения силовых кривых

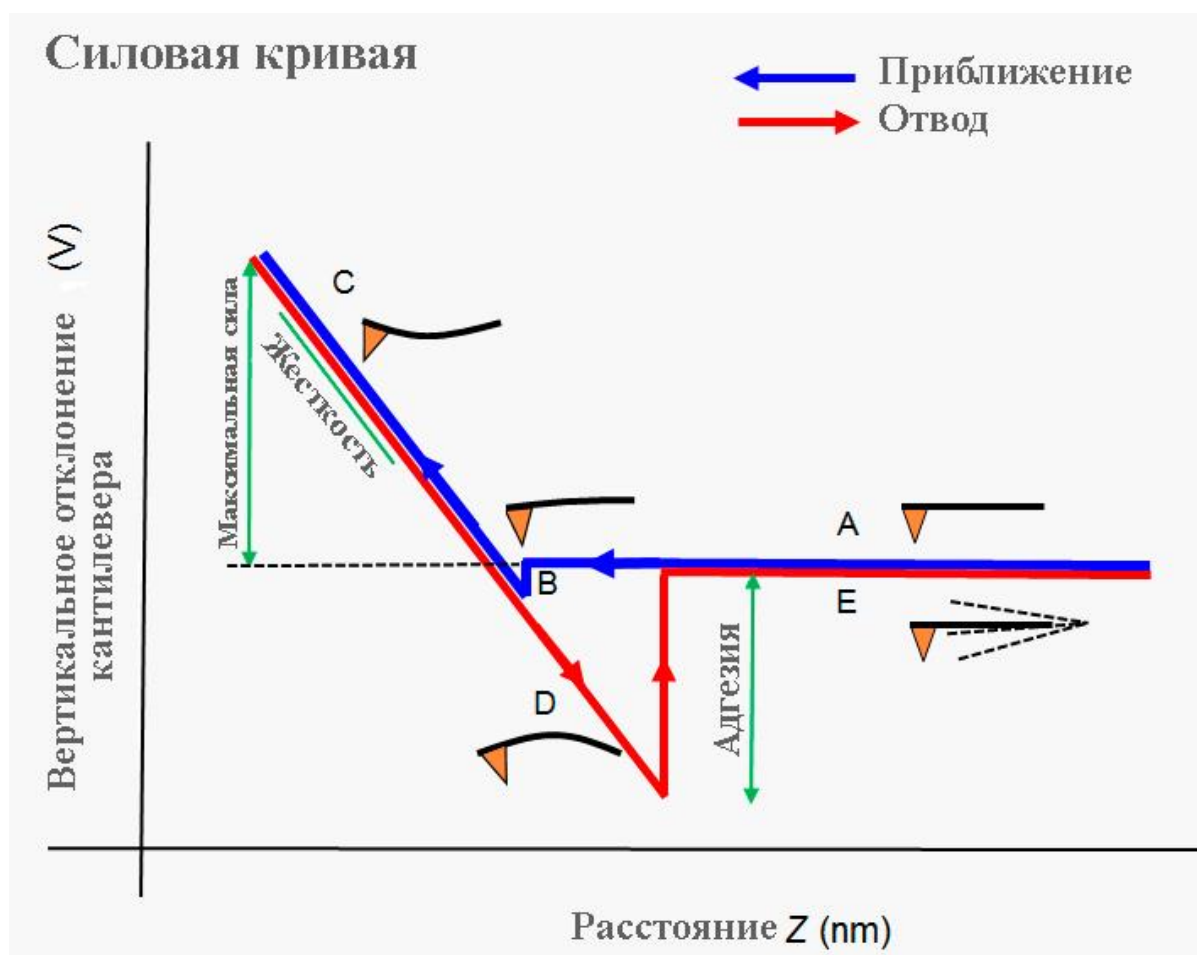


Рисунок 1.8: Кривая зависимости силы взаимодействия шипа с поверхностью от расстояния до нее.

Помимо визуализации, другой ключевой функцией АСМ является измерение поверхностных механических свойств, таких как жесткость и адгезия (прилипание) с помощью кривых, отражающих зависимость силы взаимодействия с поверхностью от расстояния между поверхностью и острием шипа. Типичная силовая кривая отражает полный цикл зависимости взаимодействия от расстояния и описывая и приближение шипа, и отвод шипа кантилевера от поверхности образца. Таким образом, этот режим измеряет зависимость отклонения кантилевера от расстояния между острием шипа и образцом. Кантилевер начинает двигаться со свободного положения уровня «А» к поверхности. В положении «В» кантилевер притягивается к поверхности без реальной нагрузки на нее. Эта площадь поверхности называется областью «привязки». Пока кантилевер движется ближе к образцу, он начинает сгибаться с увеличением нагрузки. Когда кантилевер достигает максимальной установленной силы нагрузки, силовая кривая зависимости, описывающая приближение, заканчивается и начинается кривая, описывающая отвод шипа. Кантилевер перемещается в обратном направлении, чтобы отдалиться от образца. Адгезия может препятствовать шипу покидать поверхность, поскольку он притягивается к поверхности в положении «В». Шип кантилевера остается в контакте с поверхностью до тех пор, пока не достигнет максимальной силы притяжения, и острие шипа отсоединится от образца. При количественной калибровке точности детектора (нм/В) и постоянной жесткости кантилевера k (Н/м), используя закон Гука $F = -kx$ (F - сила, k - постоянная жесткости, x - расстояние), измеренное отклонение кантилевера может быть преобразовано в параметр силы. Таким образом, измерение кривой зависимости силы взаимодействия от расстояния до образца позволяет количественно оценить максимальную силу нагрузки, силы притяжения, силы захватывания шипа и жесткости (с последующим вычислением) .

Режим измерения массива силовых кривых

Режим измерения массива силовых кривых заключается в комплексном изучении измеренных силовых кривых путем выстраивания их в 2D-массиве. Размер массива и число силовых кривых в направлениях X и Y определяются заранее. При правильной калибровке можно картировать изменения таких механических свойств, как жесткость и адгезия. Этот режим можно рассматривать как упрощенную версию режима PFM (см. Ниже), в котором кривая зависимости силы от расстояния до образца реализуется на каждом отдельном пикселе.

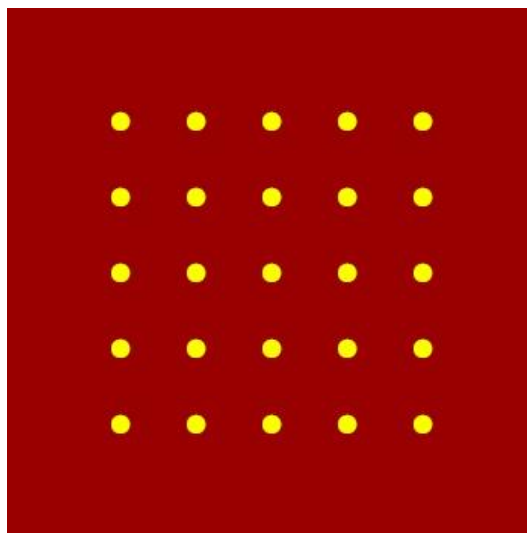


Рис. 1.9: Режим измерения массива силовых кривых

Режим импульсной синусоидальной модуляции (PFM)

Электроника режима PFM (по англ. - pulse force mode) вводит синусоидальную модуляцию для Z-пьезодатчика на АСМ с амплитудами от 10 нм до 500 нм с частотой, выбираемой пользователем, между 100 Гц и 2 кГц, что намного ниже резонансной частоты кантилевера. Полный цикл зависимости «сила взаимодействия-расстояние до образца» реализуется при этой частоте повторения на каждом пикселе изображения. PFM позволяет количественно картировать изменения поверхностных механических свойств, таких как адгезия и модуль упругости поверхности, одновременно с получением топографии поверхности в полуконтактном режиме. Поэтому поверхностные механические свойства могут быть быстро и легко прокоррелированы с особенностями поверхности. PFM может выполняться при нормальных скоростях сканирования, поскольку система может обрабатывать до нескольких тысяч пикселей в секунду.

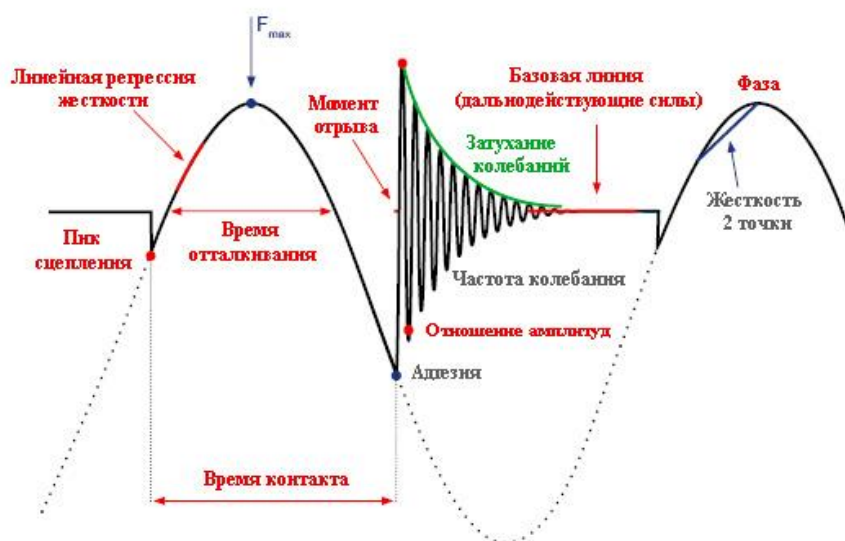


Рисунок 1.10: Режим импульсной синусоидальной модуляции силы

Режим силовой модуляции (FMM)(Модуляционная силовая микроскопия)

FMM (англ. Force modulation mode) - это расширение визуализации АСМ в контактном режиме. Режим используется для качественного определения механических свойств поверхности образца, таких как адгезия или эластичность, когда острый шипа находится в постоянном контакте с поверхностью. В то же время, применение периодического высокочастотного сигнала стимулирует колебание кантилевера на поверхности. Фазовый сдвиг между сигналом обнаружения и сигналом возбуждения указывает на изменение механических свойств.

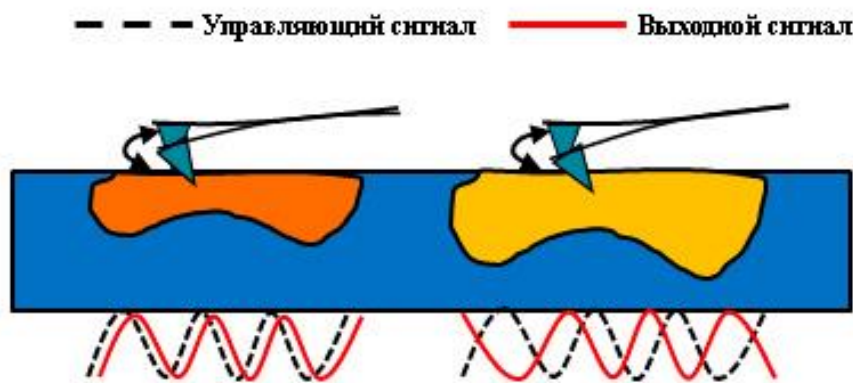


Рисунок 1.11: Режим силовой модуляции

Контактный резонансный режим (CR)

CR- AFM (англ. Contact resonance) - является производным контактного режима. Острый шипа сканирует рельеф вдоль поверхности образца, чтобы получить изображение топографии поверхности. Пока шип сканирует образец в контактном режиме, контактный резонанс непрерывно изменяется в зависимости от механических свойств образца. Чтобы измерить контактный резонанс путем приведения в движение либо кантилевера, либо образца, на относительно высокой частоте вводится вертикальная модуляция с очень низкой амплитудой, чтобы избежать воздействия на сигнал отклонения, используемого в контуре обратной связи. Измеряя изменения частоты и коэффициента качества (Q), можно количественно рассчитать и картировать жесткость и вязкоупругость образца. CR-AFM часто используется для характеристики более жестких образцов с диапазоном модулей от ~ 1 ГПа до более чем 100 ГПа.

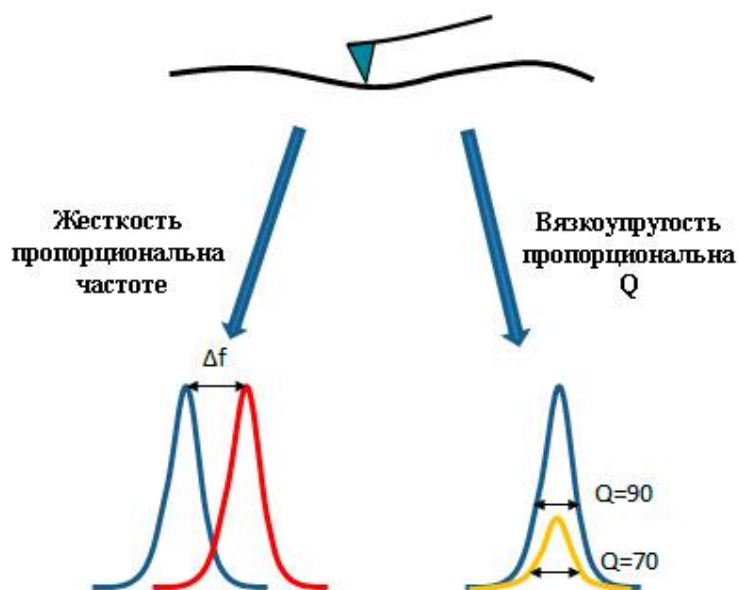


Рисунок 1.12: Контактный резонансный режим

Магнитная силовая микроскопия (MFM)

MFM (англ. Magnetic force microscopy) представляет собой двухпроходную технику визуализации, которая измеряет градиент магнитной силы над поверхностью образца. Топографическое изображение получается в контактном или полуконтактном режиме во время первого прохода, а магнитное изображение записывается во время второго прохода, при этом поддерживая острие кантилевера на заданном фиксированном расстоянии над поверхностью образца. MFM может использоваться для исследования магнитных свойств магнитных материалов для записи информации (например, жестких дисков), сверхпроводников, магнитных наночастиц и т. д. Позволяет визуализировать намагниченные области и границы магнитных доменов.

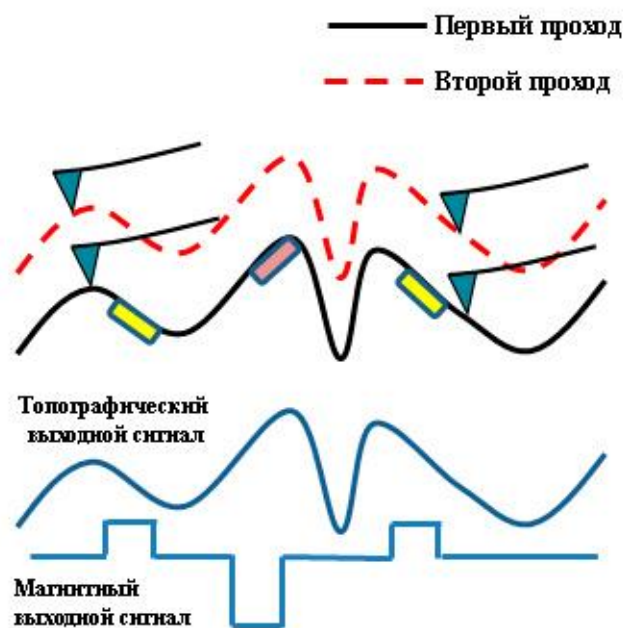


Рисунок 1.13: Магнитно-силовая микроскопия

Проводящий (кондуктивный) атомно-силовой микроскоп (С-AFM)

С-AFM (англ.-conductive atomic force microscope)- это вторичный режим формирования изображения, производный контактного режима для измерения поверхностной электропроводности образцов. С-AFM использует проводящий кантилевер для сканирования поверхности образца в контактном режиме для получения изображения топографии поверхности. Между тем, напряжение смещения подается между острием шипа кантилевера и образцом, и электрический ток, текущий между шипом и образцом, измеряется и записывается вместе с топографическим изображением как карта проводимости образца. Ток, измеренный в С-AFM, может варьироваться в пределах от нескольких μA до нескольких pA .

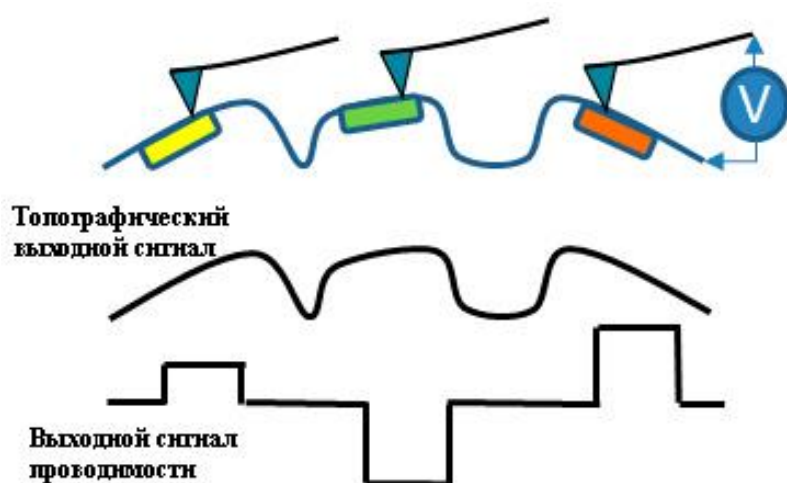


Рисунок 1.14: Проводящая силовая микроскопия АСМ

Электростатическая силовая микроскопия (EFM)

EFM (англ. electrostatic force microscope) использует проводящий кантилевер для измерения распределения градиента электрического поля с помощью двухпроходного метода. Первый проход записывает топографию поверхности и выполняется в режиме контакта или нажатия. Второй проход осуществляется путем отведения кантилевера на предварительно заданное расстояние над поверхностью для измерения электрических свойств поверхности. Крайне важно сначала определить профиль поверхности, а затем поддерживать острие кантилевера на фиксированном расстоянии для измерения электрических свойств образца. EFM используется для анализа неисправностей в электрических схемах, обнаружения захваченных зарядов, отображения электрической поляризации, чтения или записи информации с помощью электрического тока и т. д.

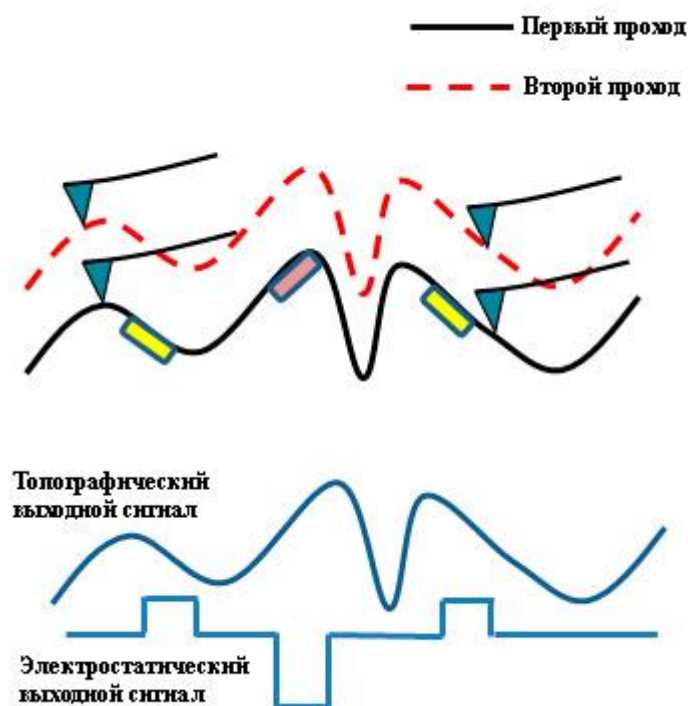


Рисунок 1.15: Электростатическая силовая микроскопия

Кельвин-зондовый силовой микроскоп (KPFM)

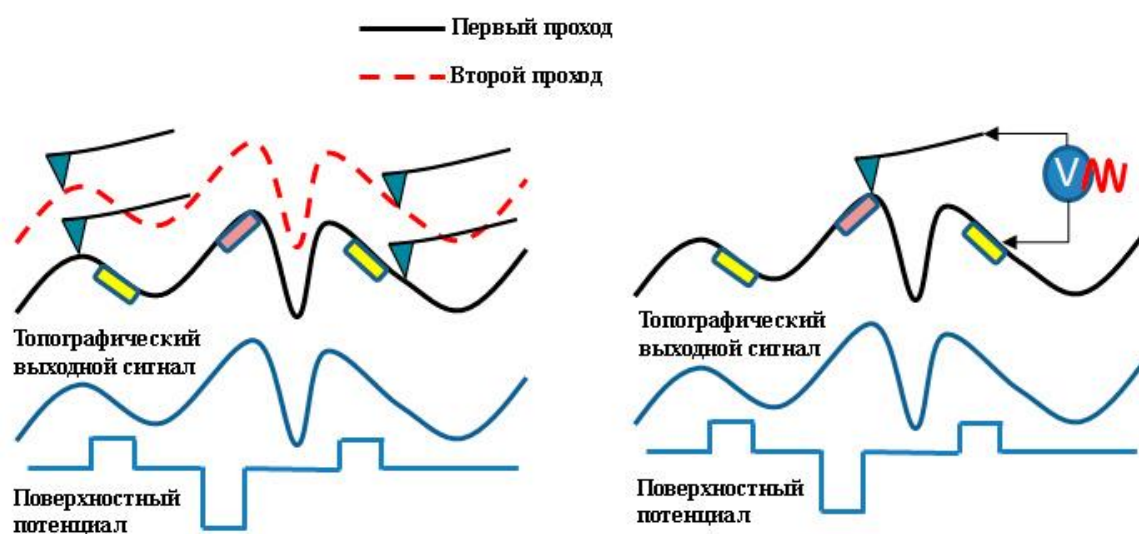


Рис. 1.16: Кельвин-зондовая силовая микроскопия (микроскопия поверхностного потенциала)

KPFM (англ. Kelvin Probe Force Microscope) использует проводящий шип кантилевера для сканирования по поверхности и для записи поверхностного потенциала. Таким образом, иногда его также называют микроскопом поверхностного потенциала. KPFM работает в различных техниках: первый традиционный способ работает по тому же принципу, что и электростатическая СМ с двухпроходной техникой. Первый проход используется для измерения рельефа поверхности в полуконтактном режиме и второй проход, соответственно, для измерения поверхностного потенциала путем ведения шипа кантилевера на фиксированном расстоянии от поверхности, и, таким образом, следуя профилю поверхности образца.

Улучшенный вариант работает с однопроходной техникой для одновременного получения топографии и поверхностного потенциала, а также для повышения эффективности измерения и точности. Пока топография отображается в полуконтактном режиме, на острие шипа кантилевера подается напряжение переменного тока с частотой несколько меньшей, чем резонансная частота кантилевера.

KPFM режим часто используется для изучения металлических и полупроводниковых наноструктур в различных устройствах от биосенсоров до солнечных элементов.

Дополнительные параметры, измеряемые АФМ

Первоначально АФМ был разработан и использован для изображения

топографии поверхностей. Однако, благодаря непрерывному развитию технологии, теперь можно измерять и другие величины, например: электрические и магнитные свойства, химические потенциалы, трение, фазу, электропроводность, магнетизм и многое другое (см. Различные режимы AFM выше).

Техническое описание

Просматривая технические описания микроскопов, хочется понять, какой из них лучше (то есть работает стабильно и дает четкие изображения). Выяснить это из документации, предлагаемой производителями, достаточно трудно. Во-первых, нет единой терминологии при описании АСМ, во-вторых, нет единых методик определения таких важных параметров, как, например, уровень шума микроскопа по вертикали и в плоскости образца. Однако оценить качество сканирования можно. Для этого нужно внимательно изучать изображения, полученные на микроскопе. Как правило, производители стараются размещать на своих сайтах галерею изображений. У одних она больше, у других – меньше. Отсутствие галереи на сайте само по себе уже настораживает (так же, как и наличие в ней только сильно сжатых изображений, не позволяющих рассмотреть детали). В описании нужно обращать внимание, прежде всего, на простые параметры, наиболее важные для оператора микроскопа:

- линейные размеры образцов, с которыми можно работать;
- максимальный размер поля сканирования;
- разнообразие основных режимов работы микроскопа.

Выводы

Атомно-силовая микроскопия является относительно новой дисциплиной, которая дает представление об атомной структуре материалов. Хотя АСМ считается очень сложным, он основан на очень простой идее: использование принципа «трость слепого», двумя словами - увидеть, прикоснувшись - вплоть до атомного масштаба. Сегодня атомно-силовой микроскоп является стандартным инструментом не только в области материаловедения, физики, химии, биологии и техники, но и во многих отраслях промышленности, таких как полупроводниковая индустрия, производство полимеров и покрытий, металлургическая промышленность и многие другие.

Эта статья выполнена по материалам фирмы [Anton Paar](#). “[Atomic force microscopy \(AFM\)](#)”.

Донау ЛАБ УКРАЇНА <http://dlu.com.ua> – эксклюзивный дистрибьютер Anton Paar GmbH в Украине и Молдове



03028 Україна, м. Київ,
вул. Стратегічне шосе,
16 <http://dlu.com.ua>

Тел: +38 (044) 229-15-
31

Факс: +38 (044) 229-15-
30 e-mail:
sale@dlu.com.ua