

Исследование свойств поверхности методами СЗМ

Исследование топографии в широком диапазоне разрешений – это только небольшая часть того потенциала, который дает сканирующая зондовая микроскопия. В рамках этого курса невозможно уместить все исследовательские СЗМ-методики, поэтому в этой главе вам предлагается ознакомиться лишь с основными и ставшими уже классическими методами, которые предоставляют возможность визуализировать свойства поверхности вместе с измерением ее топографии. **Цель** этой главы – показать, насколько гибкие и широкие возможности может дать зондовый микроскоп.

Микроскопия латеральных сил

Микроскопия латеральных сил (МЛС) – это метод, который вместе с топографической дает еще и информацию о локальных трибологических характеристиках – т.е. о трении в каждой точке исследуемой поверхности. Для этого в контактном режиме производятся измерения торсионного изгиба (скручивания) кантилевера, вызванного **латеральными силами**, действующими в плоскости образца, для построения контраста изображения.

Как это показано на рисунке 7-1, торсионный изгиб кантилевера обычно возникает по двум причинам: изменения поверхностного трения и изменения наклона. В первом случае игла может испытать более высокое трение при прохождении через некоторые участки, вызывая дополнительное скручивание кантилевера. Во втором случае кантилевер может испытать скручивающее воздействие при попадании на участок сильного наклона поверхности. Для того, чтобы отделить один эффект от другого, изображения МЛС и контактной АСМ следует получать одновременно.

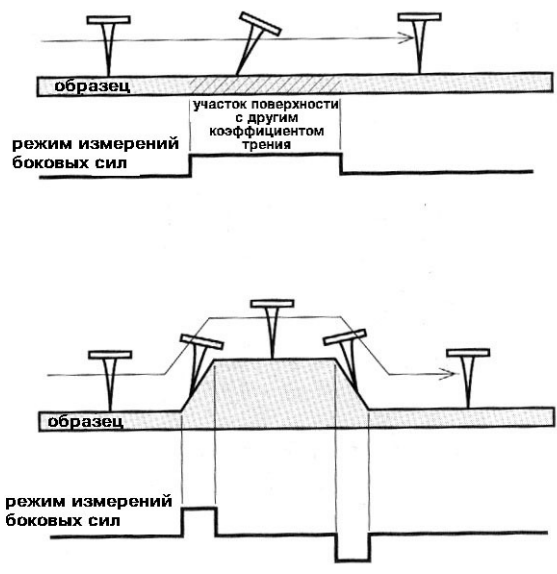


Рисунок 0-1 Торсионный изгиб (скручивание) кантилевера, вызванное изменениями поверхностного трения (сверху) и изменениями наклона (снизу).

В АСМ достаточно двухсекционного фотодиода, разделенного на две половины А и В. Для МЛС требуется четырехсекционный элемент (см. рисунок 7-2). За счет сложения сигналов из четвертей А и В и сравнения результата с суммой, полученной от четвертей С и D, четырехэлементный детектор может также определять боковую составляющую отклонения кантилевера.

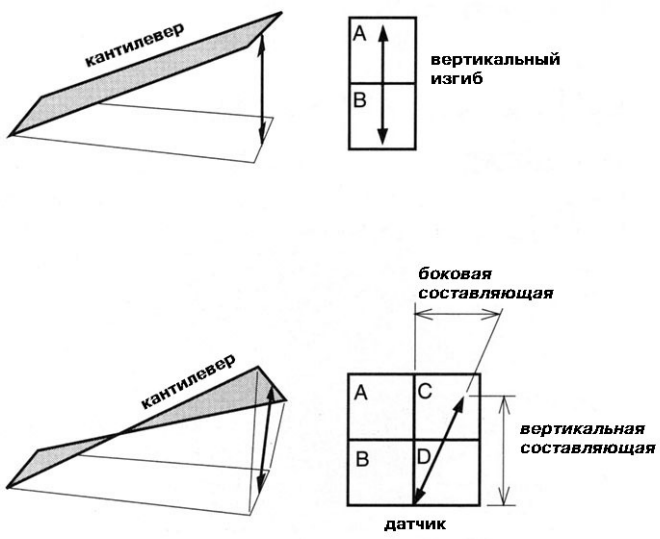


Рисунок 0-2 Двухсекционный фотодиод для АСМ (сверху) и четырехсекционный фотодиод (снизу). Практически все современные АСМ, как правило, рассчитаны на измерение как нормального, так и торсионного изгиба кантилевера одновременно.

Силовая модуляционная микроскопия

Силовая модуляционная микроскопия (СММ) представляет собой расширенный вариант АСМ, включающий характеристику механических свойств образца. В режиме СММ игла сканирует образец в контактном режиме, а контур обратной связи поддерживает постоянное отклонение кантилевера (режим постоянной силы). При этом на сканер подается периодический сигнал, который заставляет двигать образец (или кантилевер) периодически вверх и вниз. Амплитуда модуляции изгиба кантилевера, вызванная этим периодическим сигналом, изменяется в зависимости от упругих свойств образца, как это показано на рисунке 7-3.



Рисунок 0-3 Амплитуда колебаний кантилевера изменяется в зависимости от механических свойств поверхности образца.

Система генерирует изображение, представляющее собой графическое отображение упругих модулей образца, на основании изменений амплитуды модуляции кантилевера. Частота переменного сигнала обычно составляет порядка нескольких сот килогерц, что превышает скорость, которую позволяет отслеживать настройка контура обратной связи. Соответственно, топографическая информация может быть отделена от локальных изменений механических свойств образца и два типа изображений могут быть получены одновременно.

Магнитная силовая микроскопия

Магнитная силовая микроскопия (МСМ) позволяет создать изображение пространственного распределения магнитных полей на поверхности образца. В МСМ используются иглы, покрытые тонким ферромагнитным слоем. Система работает в полуконтактном или неконтактном режиме, определяя изменения в резонансной частоте или фазе колебаний кантилевера, вызванные зависимостью магнитного поля от расстояния между иглой и образцом (см. рисунок 7-4). Иногда реализуют так называемую статическую МСМ, в которой напрямую измеряется изгиб кантилевера с магнитным зондом.

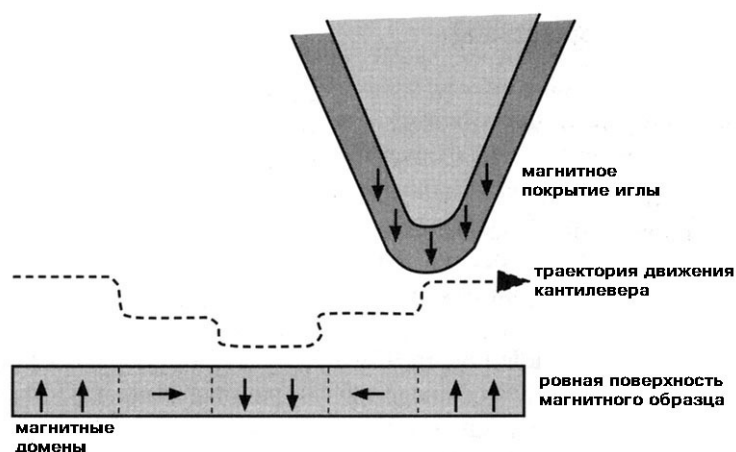


Рисунок 0-4 Траектория движения магнитной иглы над ровной поверхностью магнитного образца.

Изображение, полученное при помощи магнитной иглы, содержит информацию, как о топографии, так и о магнитных свойствах поверхности. То, какой эффект будет преобладающим, зависит от расстояния между иглой и поверхностью. По мере увеличения расстояния между иглой и образцом, магнитные эффекты становятся определяющими. Основным способом разделения магнитных и топографических эффектов на изображении является получение ряда изображений при различных расстояниях между зондом и поверхностью. После прохождения каждой строки скана в полуконтактном (или иногда контактном) режиме игла поднимается (или образец опускается) на несколько десятков нанометров и проходит ту же самую строку еще раз. При этом получается два изображения – топография, полученная на первом проходе, и МСМ-изображение, полученное на втором проходе. Из-за этого МСМ относят к так называемым **двухпроходным методикам**. Второй проход реализуют по-разному: иногда это проход колеблющегося кантилевера с регистрацией фазового сдвига или сдвига резонансной частоты, которые и отвечают в этом случае за формирование МСМ-контраста, иногда – проход неколеблющегося кантилевера, при этом контраст формируется на основе регистрации отклонения балки (статическая МСМ).

Некоторые лаборатории занимаются количественной МСМ, т.е. не просто визуализацией распределения магнитных полей на поверхности, а количественными измерениями этих полей.

Электростатическая силовая микроскопия

В электростатической силовой микроскопии (ЭСМ) используются зонды с проводящим покрытием. Система подает напряжение между иглой и образцом, в то время как кантилевер перемещается над поверхностью, не касаясь ее. Как и МСМ, ЭСМ – это

двухпроходная методика, позволяющая разделить топографию и контраст, основанный на заряде поверхности.

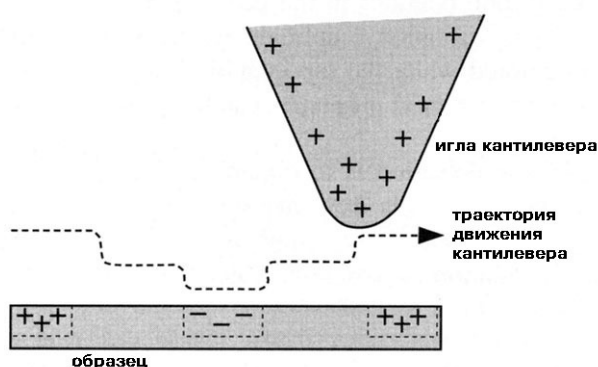


Рисунок 0-5 ЭСМ создает графическое изображение локально заряженных областей на поверхности образца.

При помощи ЭСМ создается графическое изображение локально заряженных областей на поверхности образца. Величина отклонения, пропорциональная плотности заряда, может быть измерена с использованием стандартной системы отраженного луча. Более распространена бесконтактная ЭСМ, в которой при втором проходе кантилевер осциллирует и контраст строится на основании сдвига резонансной частоты или амплитуды.

ЭСМ используется для изучения пространственного изменения плотности носителя поверхностного заряда. Например, при помощи ЭСМ можно отобразить графически электростатические поля электронной цепи при включении и выключении устройства. Этот метод известен как “зондирование напряжения” и представляет собой ценное средство для тестирования микропроцессорных микросхем под напряжением в масштабе менее микрона.

Сканирующая емкостная микроскопия

При помощи сканирующей емкостной микроскопии (СЕМ) создается графическое изображение пространственных изменений емкости. Как и в ЭСМ, в СЕМ между иглой и образцом на втором проходе включено напряжение. Кантилевер работает в неконтактном или полуконтактном режиме с постоянной высотой. Специальная схема используется для слежения за емкостью между иглой и образцом. Поскольку емкость зависит от диэлектрической проницаемости среды, находящейся между иглой и образцом, проведенные в режиме СЕМ исследования позволяют создать графическое изображение изменений в толщине диэлектрика на полупроводниковой подложке. Также СЭМ может использоваться, например, для графического изображения профилей распределения легирующих примесей в полупроводниках.

Силовая микроскопия пьезоотклика

Микроскопия пьезоотклика – это направленная на изучение пьезоэлектриков контактная методика, в которой между образцом и проводящим зондом прилагается переменное напряжение смещения. В результате проявления обратного пьезоэффекта поляризованные домены на поверхности изучаемого образца начинают осциллировать, вызывая тем самым колебания кантилевера. Амплитуда этих колебаний и используется для формирования контраста. Для достижения лучших результатов частоту переменного напряжения, подаваемого на зонд, подбирают такой, чтобы амплитуда колебаний кантилевера была максимальной (фактически, подбирают резонансную частоту электромеханической системы «пьезоэлектрик – игла – кантилевер»).

Существует и спектроскопическая модификация микроскопии пьезоотклика. В ней делается развертка напряжения смещения и регистрируется электромеханический гистерезис.

Самое важное в этой главе

- Атомно-силовой микроскоп – это прибор, который может фиксировать изгибы кантилевера и изменения параметров его колебаний, происходящие под действием внешних сил. Силы могут носить разнообразный характер, поэтому становится возможным исследовать самые разные характеристики поверхности.
- В главе даны общие представления только о нескольких распространенных методиках. Сегодня количество режимов работы зондовых микроскопов очень велико. Многие специалисты модифицируют микроскопы (некоторые даже создают их самостоятельно) и реализуют все новые измерительные подходы.

Источники для самостоятельного изучения

- Анимированные иллюстрации методов изучения свойств поверхности (как описанных в этой главе, так и многих других) можно найти на странице <http://ru.ntmdt.ru/SPM-Techniques/Principles/>
- Информацию о зондах для рассмотренных методик можно найти на сайте www.spmtips.com

Контрольные вопросы

- В чем отличие двухпроходных методик от однопроходных, и зачем они нужны?
- В чем различие статической и динамической МСМ?

- Как определяется торсионные изгибы кантилевера в МЛС? Какие кантилеверы и с какими иглами следует использовать для МЛС?
- На какой частоте должен работать генератор переменного напряжения в микроскопии пьезоотклика?

Дополнительные вопросы

- Каким образом и какие параметры измеряет количественная МСМ?
- Возможно ли получение абсолютных значений латеральных сил и коэффициентов трения в МЛС? Если да, то каким образом, если нет, то почему?
- Какие кантилеверы должны быть выбраны для проведения микроскопии пьезоотклика? Как наблюдать петлю гистерезиса пьезоэлектрика при помощи атомно-силового микроскопа (с поддержкой режима пьезоотклика) и какие кантилеверы для этого использовать?