

Содержание

Содержание	1
Как работать с этим пособием?	3
1. Возможности и общие принципы сканирующей зондовой микроскопии.....	1-1
Общие принципы и понятия в СЗМ.....	1-1
Сканирующая туннельная микроскопия	1-2
Сканирующая силовая микроскопия	1-3
Самое важное в этой главе	1-6
Источники для самостоятельного изучения	1-6
Контрольные вопросы.....	1-6
Дополнительные вопросы.....	1-7
2. Сканеры зондовых микроскопов	2-1
Устройство и работа сканера.....	2-1
Неидеальность сканера	2-3
Искажение изображения сканером	2-9
Самое важное в этой главе	2-9
Источники для самостоятельного изучения	2-10
Контрольные вопросы.....	2-10
Дополнительные вопросы.....	2-10
3. Зонды для СЗМ	3-1
Форма иглы, кривизна ее острия и разрешение	3-3
Изображение исследуемого объекта или иглы?	3-7
Кантилеверы для АСМ.....	3-8
Самое важное в этой главе	3-9
Источники для самостоятельного изучения	3-10
Контрольные вопросы.....	3-10
Дополнительные вопросы.....	3-10
4. Сканирующая туннельная микроскопия	4-1
Принципы работы СТМ	4-1
Сканирующая туннельная спектроскопия	4-4
Самое важное в этой главе	4-5
Источники для самостоятельного изучения	4-5
Контрольные вопросы.....	4-5
Дополнительные вопросы.....	4-5

5. Контактная атомно-силовая микроскопия	5-1
Силы, возникающие между зондом и образцом	5-1
Контактная атомно-силовая микроскопия	5-2
Кривые зависимости силы от расстояния	5-3
Самое важное в этой главе	5-5
Источники для самостоятельного изучения	5-5
Контрольные вопросы	5-6
Дополнительные вопросы	5-6
6. Неконтактная и полуконтактная атомно-силовая микроскопия	6-1
Колебания свободного кантилевера и колебания в поле внешних сил	6-2
Бесконтактная АСМ	6-5
Полуконтактная АСМ	6-6
Фазовая микроскопия	6-6
Самое важное в этой главе	6-7
Источники для самостоятельного изучения	6-7
Контрольные вопросы	6-7
Дополнительные вопросы	6-8
7. Исследование свойств поверхности методами СЗМ	7-1
Микроскопия латеральных сил	7-1
Силовая модуляционная микроскопия	7-3
Магнитная силовая микроскопия	7-3
Электростатическая силовая микроскопия	7-4
Сканирующая емкостная микроскопия	7-5
Силовая микроскопия пьезоотклика	7-6
Самое важное в этой главе	7-6
Источники для самостоятельного изучения	7-6
Контрольные вопросы	7-6
Дополнительные вопросы	7-7
8. Примеры использования СЗМ для решения задач в материаловедении и нанотехнологии	8-1
Самое важное в этой главе	8-6
Источники для самостоятельного изучения	8-6
Контрольные вопросы	8-6
Дополнительные вопросы	8-6

Как работать с этим пособием?

Курс «Введение в Сканирующую Зондовую Микроскопию» рассчитан на людей, которые не знакомы с СЗМ или являются новичками в этой области. Физические основы работы СЗМ объясняются в рамках курса «на пальцах» и без привлечения сложных математических моделей; основной упор сделан на те теоретические разделы, понимание которых особенно важно на практике.

Правда сразу хотелось бы оговориться: если ограничиться только прочтением глав этого курса, едва ли можно ожидать, что вы начнете хорошо ориентироваться в такой обширной области, как СЗМ. Очень большое значение придается вашей самостоятельной работе. В конце каждой главы есть ряд разделов, которые помогут вам освоить идеологию СЗМ и научиться правильно решать практические задачи методами зондовой микроскопии.

Разделы с названием «Контрольные вопросы» помогут проверить внимательность изучения материала главы. Кроме «Контрольных вопросов» каждая глава содержит еще и «Дополнительные вопросы», прямые ответы на которые не содержатся в только что прочитанной главе. Решение этих задач требует самостоятельного изучения дополнительных материалов, которые почти всегда можно найти в интернете. Некоторые рекомендации по поиску информации содержатся в подразделах «Источники для самостоятельного изучения». Не стоит, однако, думать, что, просмотрев только те источники, которые приведены в пособии, вы найдете ответы на все вопросы. Очень важным является самостоятельный поиск информации. Для поиска мы рекомендуем пользоваться, в первую очередь, системой Google (www.google.com), т.к. эта система ищет информацию не только на web-страницах, но и внутри файлов Adobe PDF, которые доступны через интернет и часто содержат важную информацию. Проведение поиска не только на русском, но и на английском языке, поможет вам найти намного больше полезных сведений.

1. Возможности и общие принципы сканирующей зондовой микроскопии

Сканирующий зондовый микроскоп представляет собой инструмент для получения изображений с большим динамическим диапазоном разрешений, выходящим за пределы возможностей оптических и электронных микроскопов. В некоторых случаях сканирующие зондовые микроскопы позволяют не только получать изображение топографии поверхности, но и измерять и картировать такие физические свойства, как проводимость поверхности, распределение статического заряда, намагниченность отдельных участков, локальное трение и упругие модули. Соответственно, сферы применения СЗМ весьма разнообразны. Поэтому **целью** данного раздела курса является ознакомление с тем набором возможностей, который дает СЗМ.

Общие принципы и понятия в СЗМ

Сканирующие зондовые микроскопы представляют собой семейство измерительных приборов, применяемых для изучения поверхности материалов на масштабах от единиц нано- до сотен микрометров. Принципиальная схема СЗМ представлена на рисунке 1-1.

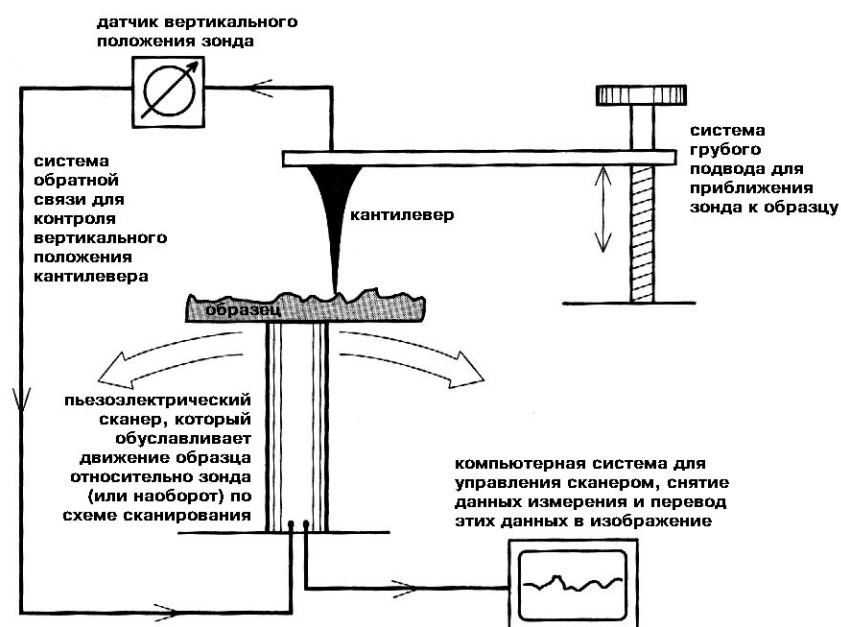


Рисунок 1-1 Схематичное изображение обобщенного варианта СЗМ.

Устройство позиционирования, называемое **сканером**, перемещает образец относительно **зонда** (или наоборот, зонд относительно образца), а **регистрирующая система** фиксирует данные о контрасте изображения в каждой точке поверхности, «собираемые» зондом. В зависимости от того, как устроен зонд и каким образом формируется информация о

поверхности, в СЗМ выделяют два подсемейства методов: это сканирующая туннельная микроскопия, в которой зонд – это заостренная проводящая проволока, и силовая микроскопия, где используются кантилеверы – микроскопические балки с остриями на конце.

Изображения, получаемые в СЗМ, часто называют **сканами**. Сканы всегда представляют собой графическую визуализацию матрицы данных. Номер строки и столбца в матрице определяет положение точки на поверхности, а значение элементов матрицы – контраст изображения в данной точке. Обычно программное обеспечение сразу выдает двумерную графическую репрезентацию данных – монохромное изображение, состоящее из отдельных точек (pixels), интенсивность цвета в каждой точке соответствует значениям элементов матрицы. Под «монохромным изображением» необязательно понимать черно-белое, просто имеется в виду, что цвет отражает всего один параметр – высоту рельефа поверхности, или проводимость, или намагниченность и т.п. Современное ПО может строить и трехмерные изображения поверхности (т.е. трехмерные модели, которые можно вращать на экране компьютера).

Важно понимать, что при практической работе с СЗМ нужно хранить не только красивые изображения в формате JPEG, TIFF и др., но и «сырые» цифровые данные.

Сканирующая туннельная микроскопия

Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) является предшественником всех сканирующих зондовых микроскопов. СТМ стал первым прибором, при помощи которого стало возможно получение изображений поверхностей с атомарным разрешением.

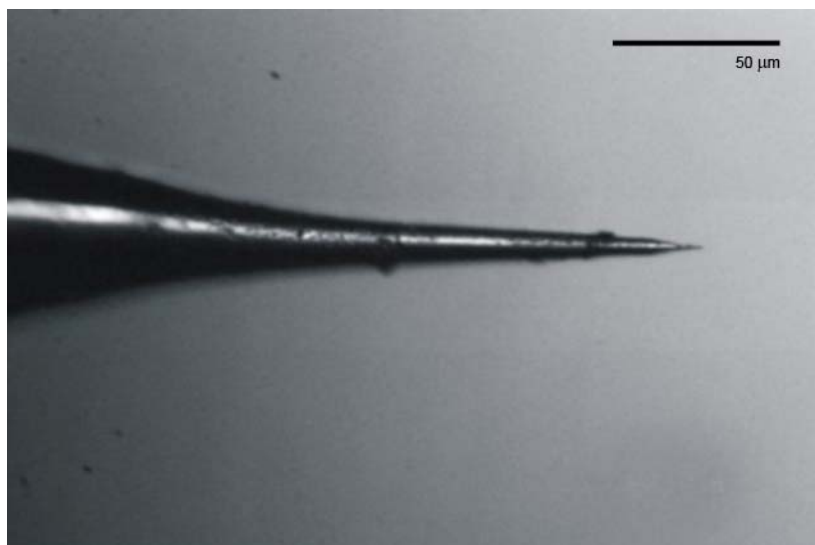


Рисунок 1-2 Микрофотография СТМ-зонда

В СТМ используется заостренная проводящая игла. Между иглой и образцом прилагается потенциал. Когда игла приближается к образцу на расстояние около 10 ангстрем,

электроны начинают туннелировать через промежуток между иглой и образцом. Результирующий туннельный ток изменяется в зависимости от расстояния между иглой и образцом, и именно этот сигнал используется для формирования контраста изображения. Зависимость туннельного тока от расстояния носит экспоненциальный характер, что делает СТМ очень чувствительным методом. В отличие от методов сканирующей силовой микроскопии (АСМ и других), которые рассматриваются в следующем разделе, СТМ не может использоваться для создания изображений непроводящих материалов.

Сканирующая силовая микроскопия

Атомный силовой микроскоп (АСМ) зондирует поверхность образца при помощи острой иглы-зонда длиной в несколько микрон и диаметром часто меньше 100 ангстрем. Игла располагается на свободном конце **кантилевера** – микроскопической балки, длина которой составляет от 100 до 200 микрон, ширина несколько десятков микрон, а толщина порядка единиц микрон.

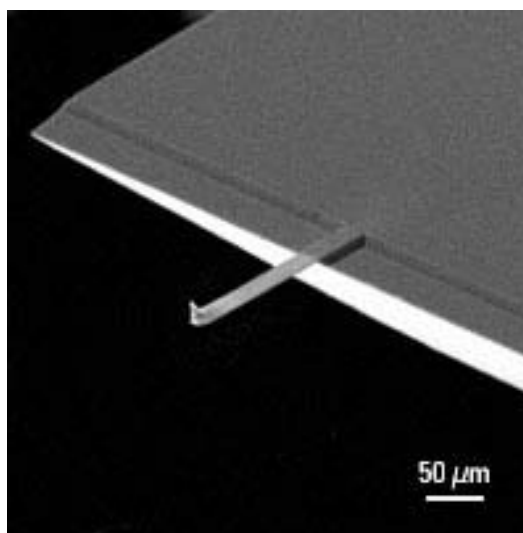


Рисунок 1-3 Микрофотография кантилевера с острием на конце

Силы, возникающие между иглой и поверхностью образца, вызывают изгиб кантилевера. Детектор измеряет степень отклонения кантилевера по мере прохождения иглы над образцом или по мере перемещения образца под иглой. На основании полученных значений отклонения кантилевера компьютер может составить карту топографии поверхности. АСМ могут использоваться для изучения диэлектриков и полупроводников, также как и проводящих материалов. Отклонение кантилевера АСМ происходит обычно под влиянием нескольких сил. В некотором приближении хорошо известная кривая межатомного взаимодействия моделирует зависимость силы от расстояния между кончиком зонда и поверхностью образца (см. рисунок 1-4).

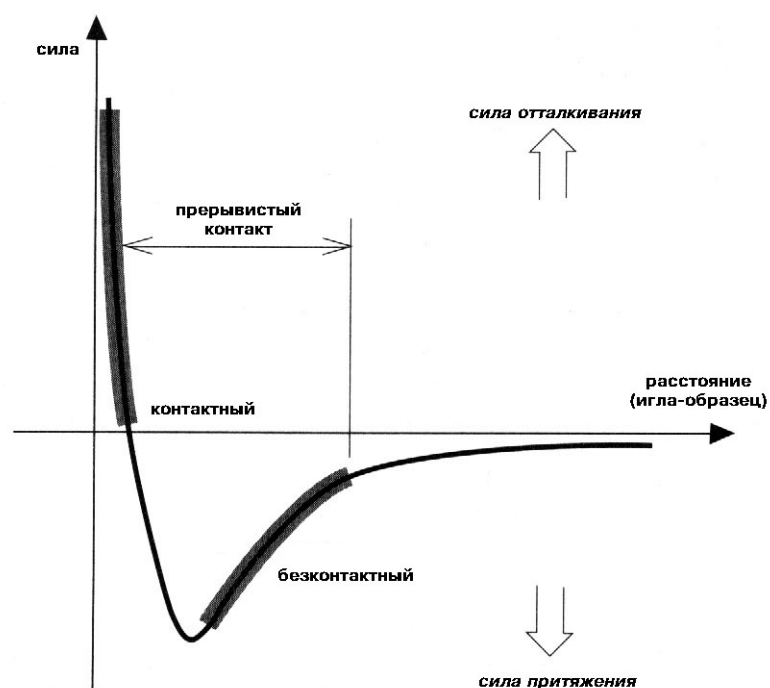


Рисунок 1-4. Кривая зависимости силы межатомного взаимодействия от расстояния.

В зависимости от расстояния от зонда до поверхности образца и, соответственно, от сил, возникающих между зондом и образцом, выделяется несколько режимов АСМ. В контактном режиме игла поддерживается на расстоянии нескольких ангстремов от поверхности образца, и сила, действующая между кантилевером и образцом, является силой отталкивания. В бесконтактном режиме кантилевер поддерживается на расстоянии порядка десятков или сотен ангстрем от поверхности образца и сила, действующая между кантилевером и образцом является силой притяжения (в основном, в результате дальних ван-дер-ваальсовых взаимодействий). Очень распространенной на сегодняшний день является **полуконтактная** АСМ (прерывистый контакт). В этом режиме возникают как силы притяжения, так и силы отталкивания между образцом и зондом, который колеблется вблизи поверхности.

Детектирование положения балки обычно происходит с помощью оптической системы, показанной на рисунке 1-5. Четырехсекционный фотодиод показывает отклонение лазерного луча, отраженного от кончика балки, на основании чего делаются выводы о изгибе кантилевера. Позиционно-чувствительный фотодиод сам по себе может измерять смещения светового луча величиной порядка нанометров, а система в целом может обнаруживать вертикальное смещение иглы кантилевера величиной менее ангстрема. В других методах определения отклонения кантилевера используется оптическая интерференция, кантилеверы из тензорезистивного материала. Наиболее интересным подходом является применение так называемых “self-actuating & self-sensing”

кантилеверов, которые в своей конструкции уже содержат пьезоэлектрический актюатор и сенсор.

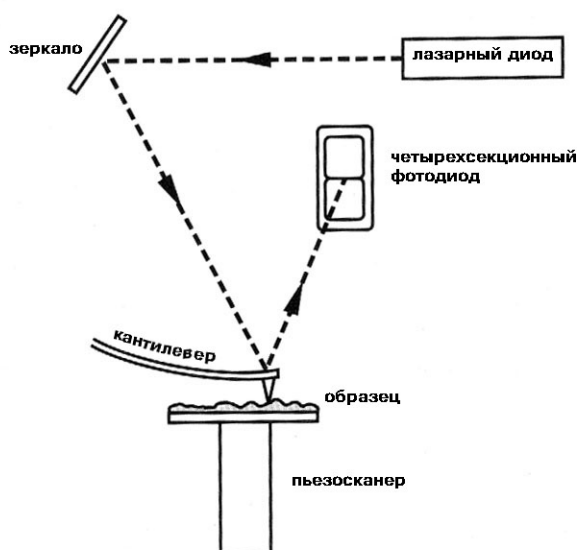


Рисунок 1-5 Схема детектирования отклонения кантилевера.

Атомно-силовой микроскоп позволяет реализовать не только измерения топографии, но и измерение ряда механических, электрофизических и магнитных свойств поверхности. При помощи зондов с ферромагнитным покрытием **магнитная силовая микроскопия (МСМ)** позволяет создать изображение пространственного изменения магнитных полей на поверхности образца. **Микроскопия латеральных сил (МЛС)** использует измерения торсионного изгиба (скручивания) кантилевера, вызванного силами, действующими в плоскости образца, для построения контраста изображения и изучения трибологических свойств поверхности. **Силовая модуляционная микроскопия (СММ)** представляет собой расширенный вариант АСМ, включающий характеристику упругих модулей материала. В **электростатической силовой микроскопии (ЭСМ)** используются зонды с проводящим покрытием, при помощи которых создается графическое изображение локально заряженных областей на поверхности образца. **Сканирующая емкостная микроскопия (СЕМ)** строит изображения пространственных изменений емкости. И это только малая часть режимов, которые можно реализовать при помощи АСМ. Такие широкие возможности делают АСМ чрезвычайно привлекательным для исследователей, но использование каждого метода силовой микроскопии требует хорошего понимания процессов происходящих между образцом и зондом. В противном случае полученные данные могут быть интерпретированы неверно, или, хуже того, оказаться лишеными какого-либо смысла.

Самое важное в этой главе

- Сканирующая зондовая микроскопия является методом изучения поверхности и подразделяется на сканирующую туннельную микроскопию и сканирующую силовую микроскопию.
- В СТМ зондом является заостренная проводящая проволока, а сигналом для формирования изображения является сила туннельного тока, протекающего между иглой и образцом и зависящего от расстояния между иглой и поверхностью, а также локальными свойствами поверхности.
- В силовой микроскопии в роли зонда выступает острое, закрепленное на конце микроскопической балки – кантилевера. Изображение формируется на основе данных об изгибе кантилевера, вызываемом силами взаимодействия между острием и поверхностью образца. Эти силы могут иметь различный характер.

Источники для самостоятельного изучения

- В качестве дополнительного источника рекомендуется использовать книгу «Основы сканирующей зондовой микроскопии» В.Миронова, которая также доступна через интернет.
- Можно ознакомиться с сайтами производителей микроскопов www.veeco.com, www.asylumresearch.com, www.ntmdt.com, www.agilent.com, www.parkafm.com, www.omicron.de, и зондов www.nanosensors.com, www.spmtips.com, www.budgetsensors.com

Контрольные вопросы

- Каковы главные преимущества и недостатки СТМ по сравнению со сканирующей силовой микроскопией?
- Какова зависимость силы туннельного тока от туннельного барьера (расстояния между иглой и образцом)?
- В каких методиках требуется использование четырехсекционного фотодиода для отслеживания изгибов кантилевера, а в каких достаточно и двухсекционного диода?
- Какие методики позволяют получить информацию о механических свойствах поверхности образца?

Дополнительные вопросы

- Какие предельные разрешения достигнуты сегодня в мире при помощи АСМ и СТМ?
- Что определяет разрешение в АСМ, а что в СТМ?
- Возможно ли достижение атомарного разрешения в АСМ и почему?
- Чем определяется соотношение сигнал-шум в СЗМ?
- Как работают “self-actuating & self-sensing” кантилеверы и где они могут быть особенно полезны?
- В каких средах возможно проведение АСМ и СТМ измерений?