

Чуприна Евгения Андреевна

студентка

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет

«Московский институт электронной техники»

г. Москва

DOI 10.21661/r-498015

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ
И ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СКАНИРУЮЩЕГО
ЗОНДОВОГО МИКРОСКОПА, С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ СИСТЕМ
ЗАЩИТЫ ОТ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Аннотация: в статье рассматриваются современные методы сканирования поверхности наноструктур, влияние особенностей составляющих узлов микроскопа на работу конструкции. Отдельно рассмотрены факторы внешнего воздействия, влияющие на работу микроскопа и системы защиты от них.

Ключевые слова: зонд, кантилевер, микроскопия, сканеры, пьезоэлементы, системы защиты.

Силовая микроскопия представляет собой метод сканирующей зондовой микроскопии, позволяющий получать изображение с таким разрешением, при котором различимы отдельные атомы поверхности образца. Принципиальным отличием от прочих зондовых методов микроскопии является фактическое измерение взаимодействия между атомами острия иглы микроскопа и атомами образца [1]. При этом появляется возможность исследовать как проводящие, так и диэлектрические поверхности. Атомно-силовой микроскоп был создан, вслед за туннельным сканирующим микроскопом Гердом Биннигом и Генрихом Рорером в 1982 году, и в настоящее время широко используется во многих областях науки.

Исследование рельефа сканирующем зондовым микроскопом проводится при помощи специального зонда в виде иглы, остриё которой имеет размеры порядка десяти нанометров. Характерное расстояние между остриём зонда и исследуемой поверхностью образца при работе микроскопа составляет 0,1–10 нм. На

таком расстоянии возникает взаимодействие между атомами образца и иглой, величина этого взаимодействия поддается измерению [2]. Если известно, что это взаимодействие зависит от расстояния между иглой и поверхностью, то на основе величины взаимодействия возможно построить картину рельефа. При сканировании образца расстояние игла-образец сохраняется за счет компенсирующих вкладов устройства обратной связи. Эти компенсирующие вклады регистрируются, вносятся в память компьютера и оказываются пропорциональными рельефу поверхности, который восстанавливается при помощи графической программы.

Зонд сканирующего микроскопа представляет собой иглу, расположенную перпендикулярно на конце кантилевера. Кантилевер имеет форму тонкой балки, способной изгибаться под действием измеряемых атомных сил.

При изготовлении зонда используются пластины монокристаллического кремния. На глубину порядка 10 мкм в кремний имплантируются ионы бора, после чего производится отжиг, и атомы бора встраиваются в решетку кремния [3]. Кремний, легированный бором, образует стоп-слой, который не поддается травлению некоторых селективных травителей. Затем с обратной стороны пластина кремния протравливается насквозь вплоть до стоп-слоя. Так из слоя кремния, легированного бором, образуется кантилевер. Далее на стороне легирования методом фотолитографии формируются островки фоторезиста. Проводится травление кремния, в результате которого под островками фоторезиста остаются столбики кремния. В процессе плазменного травления диаметр этих столбиков уменьшается вплоть до необходимых размеров острия иглы. Так формируется зонд силового микроскопа. Для улучшения отражательных свойств кантилеверы с обратной стороны (по отношению к острию) покрываются тонким слоем металла (Al, Au) методом вакуумного осаждения.

Взаимодействие между зондом и образцом имеет силу, достаточную для изгиба кантилевера. Таким образом, измерить взаимодействие можно косвенно, измерив изгиб кантилевера. Обычно этот изгиб регистрируется при помощи оптических систем. Для улучшения отражательных свойств кантилеверы с обратной

стороны (по отношению к острию) покрываются тонким слоем металла (Al, Au) методом вакуумного осаждения. Полупроводниковый лазер устанавливают таким образом, что его луч падает на поверхность кантилевера, отражается от нее и попадает на многосекционный полупроводниковый фотодиод. В зависимости от того, на какую секцию попадает отраженный луч, определяется направление и величина изгиба кантилевера.

В настоящее время для управления иглы достигнута точность перемещения до сотых долей ангстрема. Для организации прецизионного перемещения зонда используются специальные манипуляторы-сканеры. Они включают специальные элементы, изготовленные на основе пьезоэлектрических материалов [4]. При изготовлении керамику нагревают выше температуры Кюри (для большинства пьезокерамик эта температура менее 300°C), а затем медленно охлаждают в сильном (порядка 3 кВ/см) электрическом поле. После остывания пьезокерамика имеет наведенную поляризацию и приобретает способность изменять свои размеры (увеличивать или уменьшать в зависимости от взаимного направления вектора поляризации и вектора внешнего электрического поля).

В сканирующей зондовой микроскопии широкое распространение получили трубчатые пьзоэлементы. Они позволяют получать достаточно большие перемещения объектов при относительно небольших управляющих напряжениях. На сегодняшний день в сканирующей зондовой микроскопии наиболее широко используются сканеры, изготовленные на основе одного трубчатого элемента. На внутренней поверхности трубки нанесен электрод, потенциал которого управляет общим удлинением трубки [5]. На внешней поверхности трубки по секторам нанесены электроды, управляющие изгибом трубки.

Другая распространенная конструкция сканера – на основе биморфных соединений. Она основана на плоскости из двух слоев пьезоэлектриков. Электроды располагают между слоями и на внешних поверхностях таким образом, что управляющими напряжениями можно выгибать плоскость в различных направлениях.

Для более масштабных перемещений, возникающих при выборе участка сканирования и установке иглы в рабочее положение, применялись электрические шаговые двигатели в совокупности с механическими редукторами, но в силу требований чистоты рабочей зоны и защиты ее от вибраций, использование механических устройств ограничивается. Для таких перемещений используются шаговые пьезодвигатели, устроенные следующим образом: объект закрепляется на массивном держателе, который через зажим крепится к пьезоэлектрической трубке [6]. При работе на пьезотрубку подаются пилообразные импульсы напряжения: при плавном фронте импульса происходит плавное изменение длины пьезоэлектрической трубки и перемещение объекта, а при резком срезе импульса трубка резко возвращается в исходное положение, но массивный держатель в силу своей инертности сохраняет своё положение. Зажим крепления в этой фазе скользит по полированной поверхности держателя.

Всю конструкцию силового микроскопа следует защитить от внешних воздействий. Для защиты от вибраций применяют пассивные и активные защитные системы. Пассивная система представляет собой совокупность упругих элементов, резонансная частота которых много меньше характерных частот внешних колебаний. Такие упругие элементы гасят внешние вибрации. Активная система подавления колебаний включает в себя виброизолирующую платформу с датчиком колебаний, расположенную на пьезоэлектрических трубках. Между датчиком колебаний и трубками устанавливают обратную связь: исходя от сигнала от датчика, пьезоэлектрическими трубками подавляются вибрации платформы с датчиком. Многоступенчатые комплексы таких систем существенно защищают устройство от внешних вибраций [7].

Еще одним внешним воздействием, оказывающим значительное влияние на работу микроскопа, является температурное. Вследствие температурного расширения все объекты в той или иной степени изменяют свои размеры. Чтобы избежать значительных геометрических перепадов, все параллельные конструкции устройства выполняются из одинаковых наборов материалов, ввиду одинаковых коэффициентов теплового расширения деформации взаимокompенсируются.

Существуют контактные и бесконтактные методы измерения. При контактном методе сохраняется постоянной либо величина взаимодействия между иглой и образцом, либо сохраняется расстояние между основанием кантилевера и плоскостью образца. При методе с сохранением величины взаимодействия игла контролируется посредством устройства обратной связи, корректирующие перемещения составляют картину рельефа, а при выдерживании одного расстояния между основанием инструмента и плоскостью образца картина строится непосредственно по величине изгиба кантилевера. Последний способ используется при малых перепадах высот рельефа. Недостатком контактных методов является требование к прочности контактируемых объектов.

При бесконтактном методе зонд микроскопа подвергается колебаниям, которые задаются инструменту с помощью пьезовибратора. В зависимости от градиента силы взаимодействия иглы и поверхности образца изменяются амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики колебательной системы, что подвергается измерению. На практике чаще реализуется полуконтактный метод, когда в нижней фазе колебаний происходит контакт – зонд попадает в зону отталкивания.

Список литературы

1. Бараш Ю.С. Силы Ван-дер-Ваальса / Ю.С. Бараш. – М.: Наука, 1988.
2. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии / В.Л. Миронов. – М.: Техносфера, 2004.
3. Суслов А.А. Сканирующие зондовые микроскопы (обзор) / А.А. Суслов, С.А. Чижик // Материалы, Технологии, Инструменты. – 1997. – Т.2, №3. – С. 78–89.
4. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии / В.Л. Миронов. – М.: Техносфера, 2004. – 143 с.
5. Сканирующая зондовая микроскопия / под ред. И.Г. Яминского. – М.: Научный мир, 1997. – 88 с.
6. Неволин В.К. Основы зондовой нанотехнологии / В.К. Неволин. – М.: Изд-во МГИЭТ (ТУ), 1996. – 91 с.

7. Эдельман В.С. Сканирующая силовая микроскопия (обзор) / В.С. Эдельман // Приборы и техника эксперимента. – 1989. – №5. – С. 25–49.