

Как измерить наносилы, нанопрофиль и нанотрение.

Сканирующая силовая микроскопия – один из наиболее мощных методов изучения объектов нанотехнологии. Самой распространенной разновидностью силовой микроскопии является атомно-силовая микроскопия, которая использует для изучения объектов зонд нанометровых размеров, закрепленный на «микропружине» – кантилевере (см. рис.1). (Из каких материалов состоит кантилевер и как их изготавливают? (5 баллов))

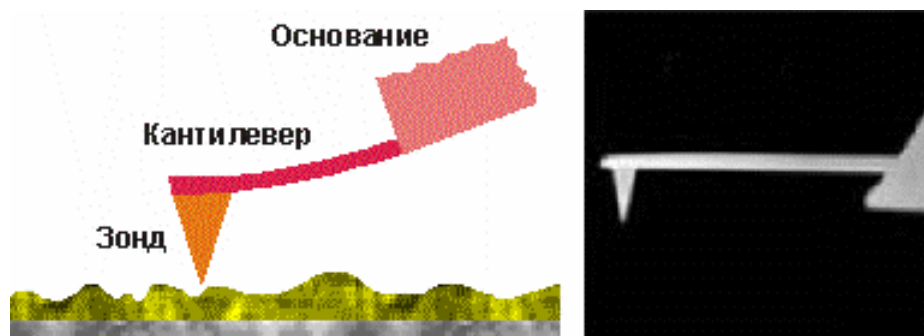


Рис.1. Схематическое изображение и электронная микрофотография типичного кантилевера с зондом

Силовое взаимодействие конца зонда с изучаемым нанообъектом приводит к изгибу кантилевера, который обычно детектируется с помощью оптической системы, выполненной по схеме оптического рычага (см. рис.2). В этой схеме изгиб кантилевера приводит к перемещению пятна отраженного лазерного луча на четырехсекционном фотодиоде. Это перемещение изменяет соотношения фототоков от различных секций, которое измеряется с помощью электронных схем.

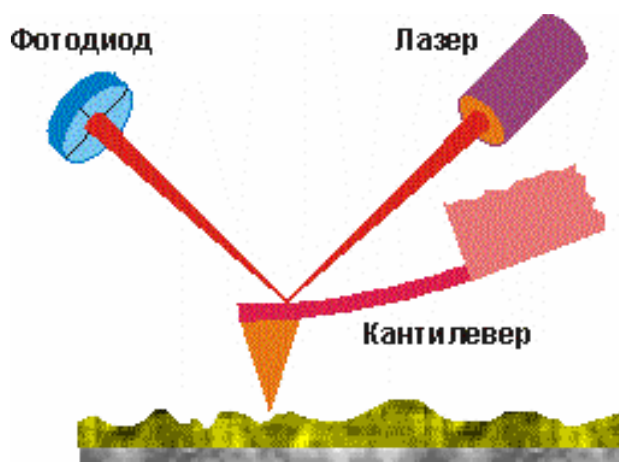


Рис.2. Схема системы детектирования изгиба кантилевера оптической системой

Оценить, как зависит от геометрических параметров схемы соотношение смещения пятна лазерного луча на фотодиоде к смещению зонда, вызванному взаимодействием зонда с нанообъектом (3 балла), используя следующие предположения:

- а) при взаимодействии зонд перемещается на расстояние, много меньшее, чем длина кантилевера;
- б) длина пути лазерного луча от кантилевера до фотодиода много больше, чем длина кантилевера;
- в) лазерный луч идет вдоль длинной стороны кантилевера;

г) угол падения лазерного луча на кантилевер равен $\frac{\pi}{4}$, а отражение лазерного луча от кантилевера зеркальное;

д) изгиб кантилевера можно представить как его поворот вокруг оси, проходящей по линии его крепления к основанию;

е) сила взаимодействия острия зонда с нанообъектами направлена перпендикулярно плоской части кантилевера.

Типичный кантилевер для контактных режимов имеет длину 300 *микрон*, ширину 30 *микрон* и толщину 1 *микрон*. Жесткость такого кантилевера составляет $0.1 \frac{H}{м}$.

Предполагая, что расстояние от кантилевера до фотодиода составляет 10 *см*, а фотодиод может зарегистрировать смещение лазерного пятна на 100 *нм*, оценить минимальную силу взаимодействия острия зонда с нанообъектом, которую можно зарегистрировать (**2 балла**).

Самым простым режимом работы атомно-силового микроскопа является измерение нанорельефа поверхности. При этом образец перемещается под зондом по растру (см. рис.3), а с помощью оптической системы детектирования стабилизируется изгиб кантилевера (и сила взаимодействия конца зонда с участком поверхности).

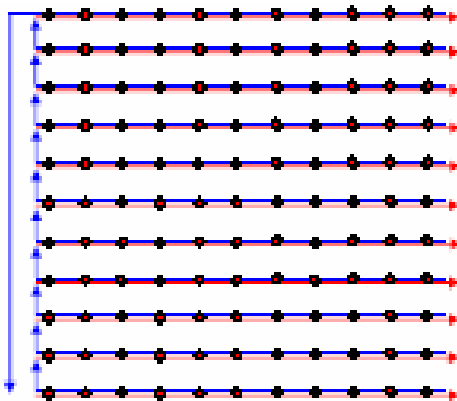


Рис.3. Схематическое изображение процесса сканирования: прямой ход обозначен красными стрелками, обратный - синими; регистрация информации производится в выделенных точках при прямом проходе

Кроме рельефа поверхности на нанометровых масштабах с помощью сканирующей силовой микроскопии можно исследовать и другие характеристики, например локальную силу трения. Для этого при перемещении образца с помощью оптической системы детектируется не только изгиб, но и кручение кантилевера (см. рис.4).

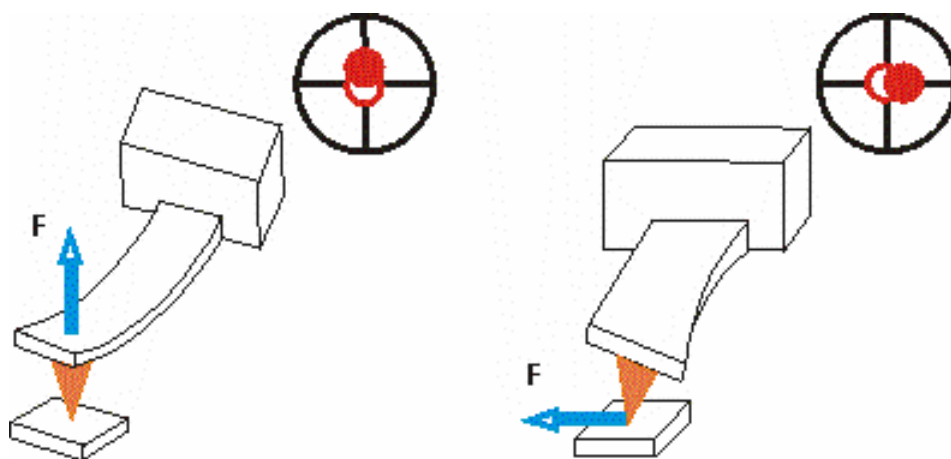


Рис.4. Изгиб и кручение кантилевера, детектируемые при исследовании нанорельефа (слева) и локальной силы трения (справа), а также силы, которые их вызывают и соответствующие смещения пятна на фотодиоде

При этом одновременно регистрируется два сигнала: сигнал, соответствующий рельефу и сигнал, соответствующий кручению кантилевера. К сожалению, изгиб кантилевера вызывается не только трением, но и рельефом поверхности. На наклонных участках сила нормальной реакции образца имеет горизонтальную составляющую (см. рис.5).

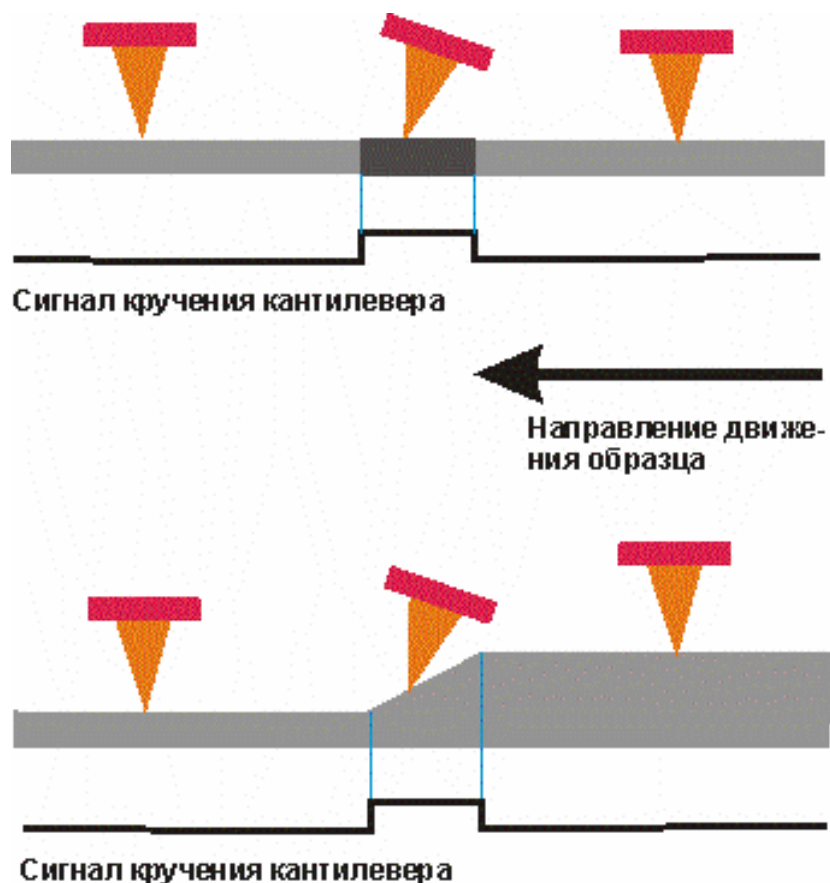


Рис.5. Схема формирования сходных сигналов кручения кантилевера за счет различных коэффициентов трения (вверху) и особенностей рельефа (внизу)

Поэтому регистрируемые латеральные силы несут информацию как о распределении силы трения, так и о рельефе поверхности.

Предложите способ или способы, с помощью которых можно было бы отделить информацию о локальном коэффициенте трения от информации о рельефе образца (**3 балла**).

Какие еще режимы «съемки» используются в сканирующей зондовой микроскопии и в чем их суть (**4 балла**)?