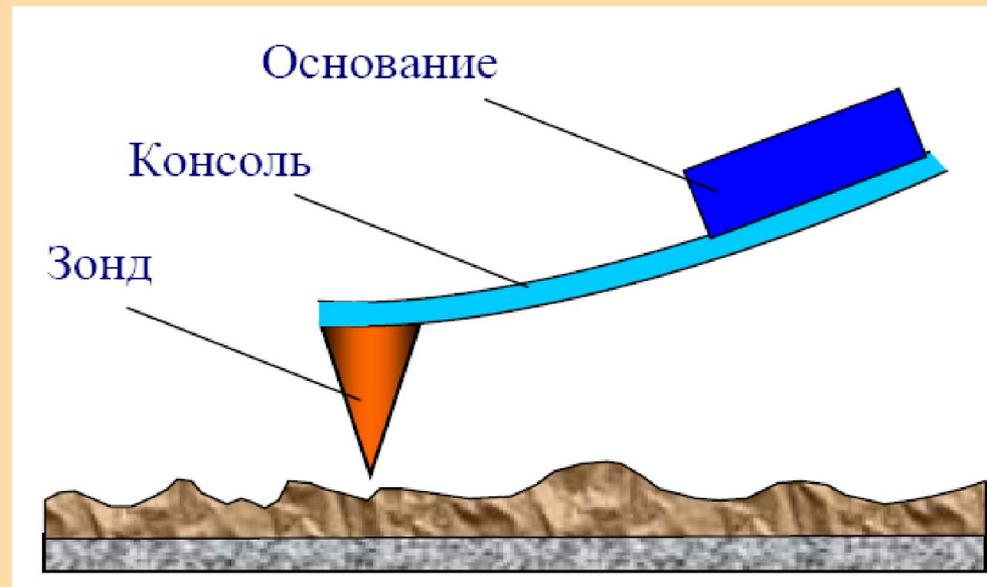


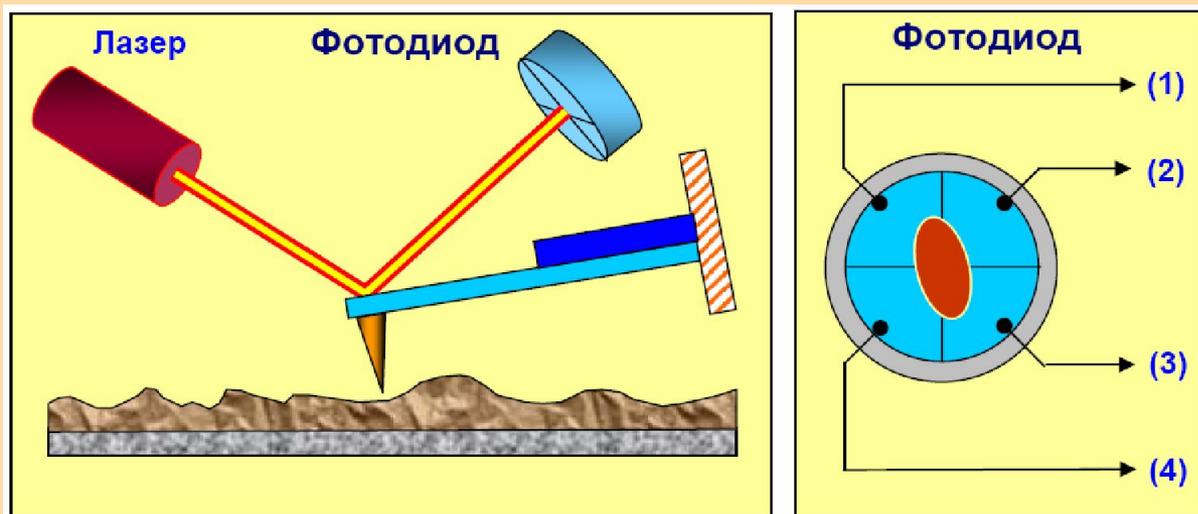
Темы лекции

- 1. Принцип действия атомно-силового микроскопа (АСМ).*
- 2. Схема реализации обратной связи в АСМ.*
- 3. Параметры кантилеверов в АСМ.*
- 4. Контактные и бесконтактные методики измерения.*

В основе работы АСМ лежит силовое взаимодействие между зондом и поверхностью, для регистрации которого используются специальные зондовые датчики, представляющие собой упругую консоль с острым зондом на конце. Сила, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли. Регистрируя величину изгиба, можно определить силу взаимодействия зонда с поверхностью.

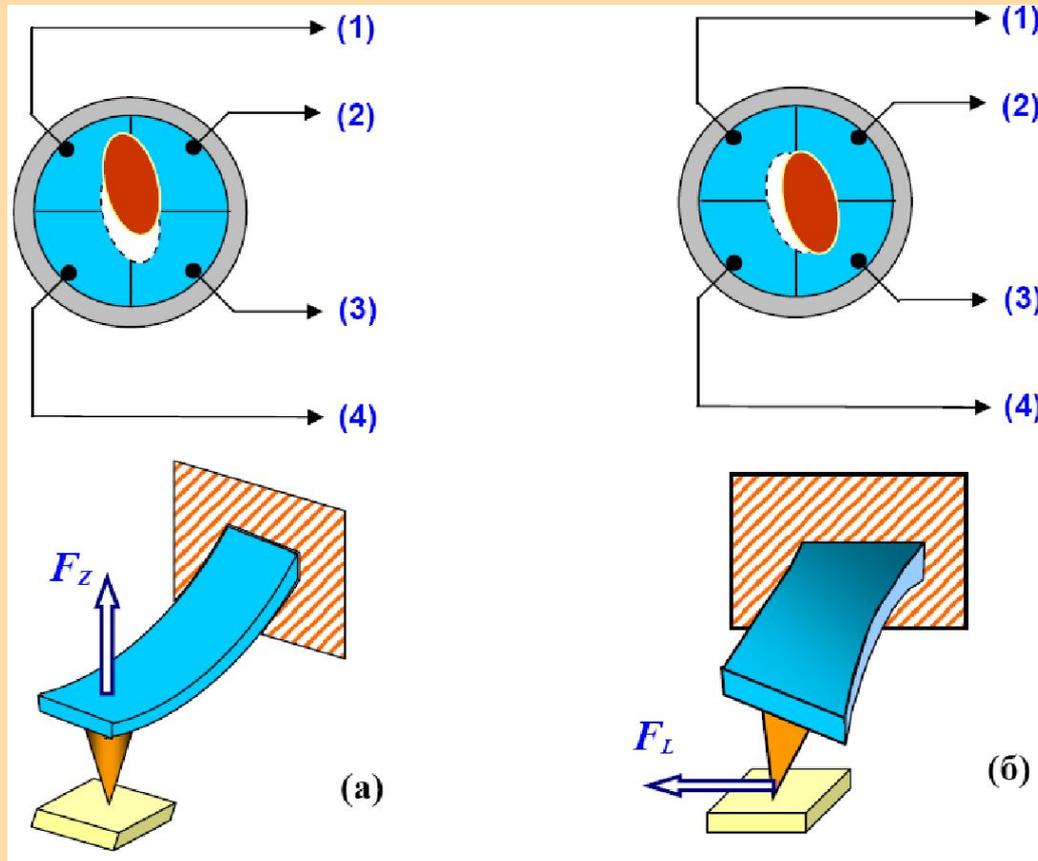


Получение АСМ изображений рельефа поверхности связано с регистрацией малых изгибов упругой консоли зондового датчика. В атомно-силовой микроскопии для этой цели используются **оптические методы**



Оптическая система АСМ юстируется так, чтобы **излучение полупроводникового лазера** фокусировалось на консоли зондового датчика, а **отраженный пучок попадал в центр фоточувствительной области фотоприемника**. В качестве позиционно-чувствительных фотоприемников применяются **четырёхсекционные полупроводниковые фотодиоды**.

Соответствие между типом изгибных деформаций консоли зондового датчика и изменением положения пятна засветки на фотодиоде



Основные регистрируемые оптической системой параметры – это деформации изгиба консоли под действием Z -компонент сил притяжения или отталкивания (F_Z) и деформации кручения консоли под действием латеральных компонент сил (F_L) взаимодействия зонда с поверхностью. Если исходные значения фототока в секциях фотодиода $I_{01}, I_{02}, I_{03}, I_{04}$, а I_1, I_2, I_3, I_4 – значения токов после изменения положения консоли, то разностные токи с различных секций фотодиода $\Delta I_i = I_i - I_{0i}$ однозначно характеризуют величину и направление изгиба консоли зондового датчика АСМ.

Это следует из того, что разность токов вида

$$(\Delta I_1 + \Delta I_2) - (\Delta I_3 + \Delta I_4) = \Delta I_Z$$

пропорциональна изгибу консоли под действием силы, действующей по нормали к поверхности образца.

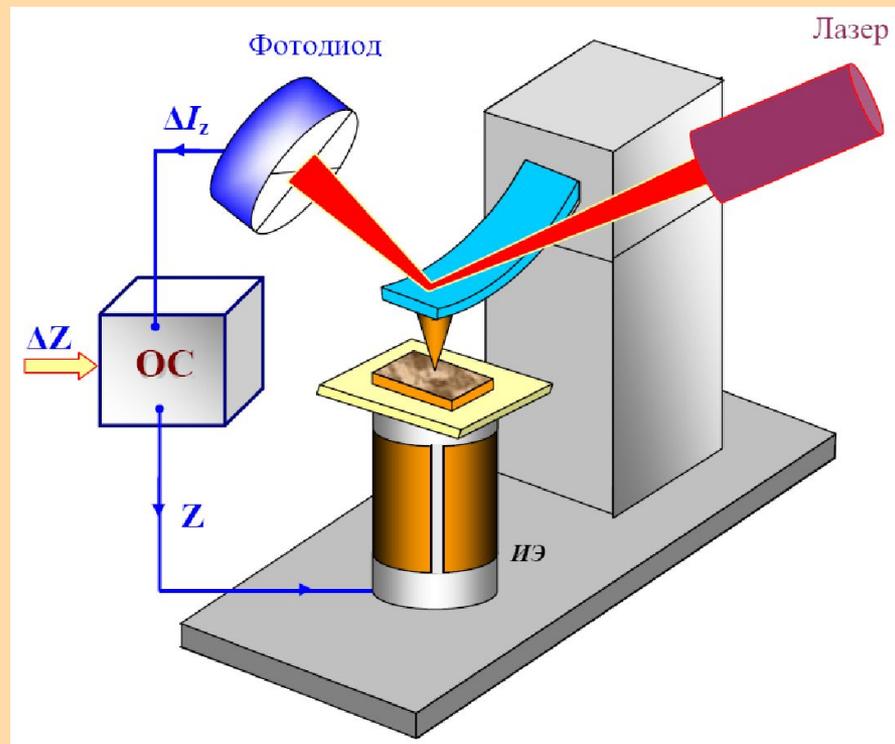
А комбинация разностных токов вида

$$(\Delta I_1 + \Delta I_4) - (\Delta I_2 + \Delta I_3) = \Delta I_L$$

пропорциональна изгибу консоли под действием латеральных сил

Величина ΔI_Z используется в качестве входного параметра в петле обратной связи атомно-силового микроскопа. Система ОС обеспечивает $\Delta I_Z = \text{const}$ с помощью пьезоэлектрического исполнительного элемента, который поддерживает изгиб консоли ΔZ равным величине ΔZ_0 , за даваемой оператором АСМ.

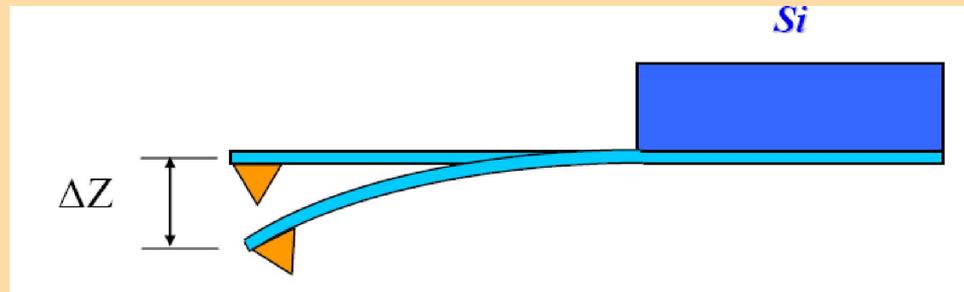
Схема реализации обратной связи



При сканировании образца в режиме $\Delta Z = \text{const}$ зонд перемещается вдоль поверхности, при этом напряжение на Z -электроде сканера записывается в память компьютера в качестве рельефа поверхности $Z = f(x, y)$.

Пространственное разрешение АСМ определяется радиусом закругления зонда и чувствительностью системы, регистрирующей отклонения консоли. В настоящее время реализованы конструкции АСМ, позволяющие получать атомарное разрешение при исследовании поверхности образцов.

Зондирование поверхности в атомно-силовом микроскопе производится с помощью специальных зондовых датчиков, представляющих собой упругую консоль – **кантилевер** с острым зондом на конце. Датчики изготавливаются методами фотолитографии и травления из кремниевых пластин. **Упругие консоли формируются, в основном, из тонких слоев легированного кремния: SiO_2 или Si_3N_4 .**



Один конец кантилевера жестко закреплен на кремниевом основании - держателе. На другом конце консоли располагается собственно зонд в виде острой иглы. **Радиус закругления современных АСМ зондов составляет $1 \div 50$ нм в зависимости от типа зондов и технологии их изготовления. Угол при вершине зонда - $10 \div 20$ °.**

Силу взаимодействия зонда с поверхностью F можно оценить следующим образом:

$$F = k \Delta Z,$$

где k – жесткость кантилевера; ΔZ – величина, характеризующая его изгиб.

Коэффициенты жесткости кантилеверов k варьируются в диапазоне 10^{-3} - 10 Н/м в зависимости от используемых при их изготовлении материалов и геометрических размеров.

При работе зондовых АСМ датчиков в колебательных режимах важны резонансные свойства кантилеверов. Собственные частоты изгибных колебаний консоли длиной l прямоугольного сечения площадью S определяются следующей формулой

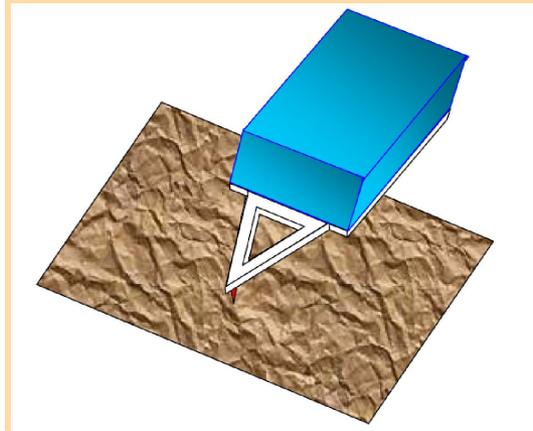
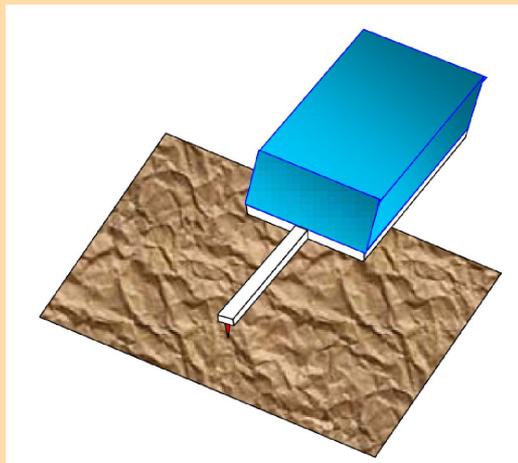
$$\omega_i = \frac{\lambda_i}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{\rho S}},$$

где E – модуль Юнга; J – момент инерции консоли; ρ – плотность материала; λ_i – численный коэффициент (в диапазоне $1 \div 100$), зависящий от моды изгибных колебаний.

Резонансная частота кантилевера определяется его геометрическими размерами и свойствами материала. Частоты основных мод кантилеверов, используемых в АСМ, лежат в диапазоне $10 \div 1000$ кГц. Добротность кантилеверов, в основном, зависит от той среды, в которой они работают.

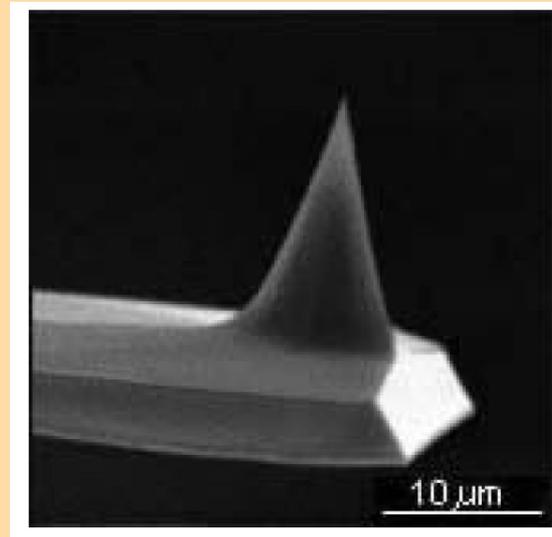
Типичные значения добротности при работе в вакууме составляют $10^3 - 10^4$, на воздухе 300 – 500, а в жидкости 10 – 100.

В атомно-силовой микроскопии применяются, в основном, зондовые датчики двух типов – с кантилевером в виде балки прямоугольного сечения и с треугольным кантилевером, образованным двумя балками



Зондовые датчики с треугольным кантилевером имеют при тех же размерах большую жесткость и, следовательно, более высокие резонансные частоты. Чаще всего они применяются в колебательных АСМ методиках.

Общий вид зондового датчика



Методы получения информации о рельефе и свойствах поверхности с помощью АСМ– контактные (квазистатический режим) и **бесконтактные** (колебательный режим).

В контактных методиках остриё зонда находится в непосредственном соприкосновении с поверхностью, при этом силы притяжения и отталкивания, действующие со стороны образца, уравновешиваются силой упругости консоли. **При работе АСМ в таких режимах используются кантилеверы с относительно малыми коэффициентами жесткости**, что позволяет обеспечить высокую чувствительность и избежать нежелательного чрезмерного воздействия зонда на образец.

В квазистатическом режиме работы АСМ изображение рельефа исследуемой поверхности формируется либо при постоянной силе взаимодействия зонда с поверхностью (сила притяжения или отталкивания), либо при постоянном среднем расстоянии между основанием зондового датчика и поверхностью образца.

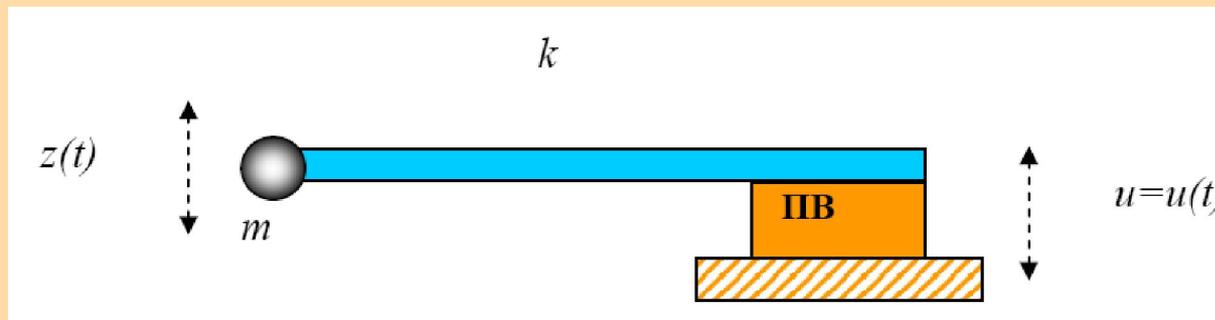
При сканировании образца в режиме $F_z = \text{const}$ система обратной связи поддерживает постоянной величину изгиба кантилевера, а, следовательно, и силу взаимодействия зонда с образцом. При этом управляющее напряжение в петле обратной связи, подающееся на Z-электрод сканера, будет пропорционально рельефу поверхности образца.

При исследовании образцов с малыми (порядка единиц ангстрем) перепадами высот рельефа часто применяется режим сканирования при постоянном среднем расстоянии между основанием зондового датчика и поверхностью ($Z = \text{const}$). В этом случае зондовый датчик движется на некоторой средней высоте Z_{cp} над образцом, при этом в каждой точке регистрируется изгиб консоли ΔZ , пропорциональный силе, действующей на зонд со стороны поверхности. АСМ изображение в этом случае характеризует пространственное распределение силы взаимодействия зонда с поверхностью.

Недостатком контактных АСМ методик является непосредственное механическое взаимодействие зонда с поверхностью. Это часто приводит к поломке зондов и разрушению поверхности образцов. Кроме того, контактные методики практически не пригодны для исследования образцов, обладающих малой механической жесткостью (структуры на основе ряда органических материалов и многие биологические объекты).

Для исследования таких образцов применяются **колебательные АСМ методики, основанные на регистрации параметров взаимодействия колеблющегося кантилевера с поверхностью.** Данные методики позволят существенно уменьшить механическое воздействие зонда на поверхность в процессе сканирования.

Точное описание колебаний кантилевера зондового датчика АСМ представляет собой весьма сложную математическую задачу. С целью упрощения задачи, рассмотрим процессы, происходящие при взаимодействии колеблющегося кантилевера с поверхностью, в рамках модели сосредоточенной массы. Пусть имеется кантилевер в виде упругой консоли с жесткостью k , с сосредоточенной массой m на одном конце. Другой конец консоли закреплен на пьезовибраторе ПВ



Если пьезовибратор совершает гармонические колебания $u = u_0 \cos \omega t$ с частотой ω , тогда уравнение движения такой колебательной системы имеет вид

$$m\ddot{z} = -k(z - u) - \gamma\dot{z} + F_0$$

где член, пропорциональный первой производной по времени, учитывает силы вязкого трения со стороны воздуха, а посредством F_0 обозначена сила тяжести и другие возможные постоянные силы.

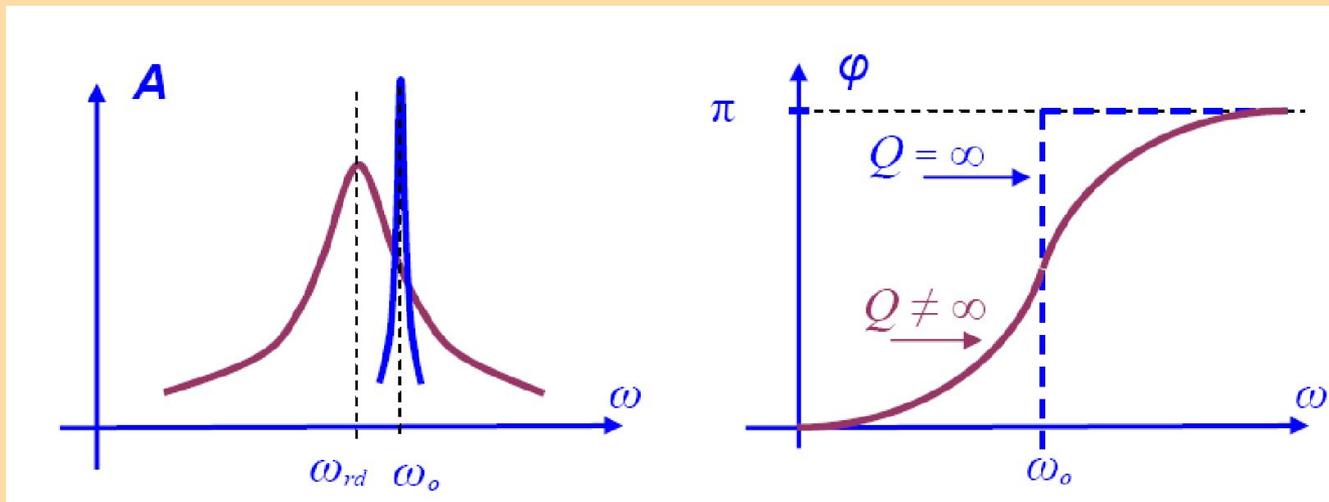
Как известно, постоянная сила лишь смещает положение равновесия системы и не влияет на частоту, амплитуду и фазу колебаний. Делая замену переменных $z = z + F_0/k$ (т.е. рассматривая колебания относительно нового состояния равновесия), можно привести уравнение движения кантилевера к виду:

$$m\ddot{z} + \gamma\dot{z} + kz = ku_0 \cos \omega t$$

Разделив уравнение на m и введя **параметр добротности системы** $Q = \omega_0 m / \gamma$, получим уравнение движения в следующем виде:

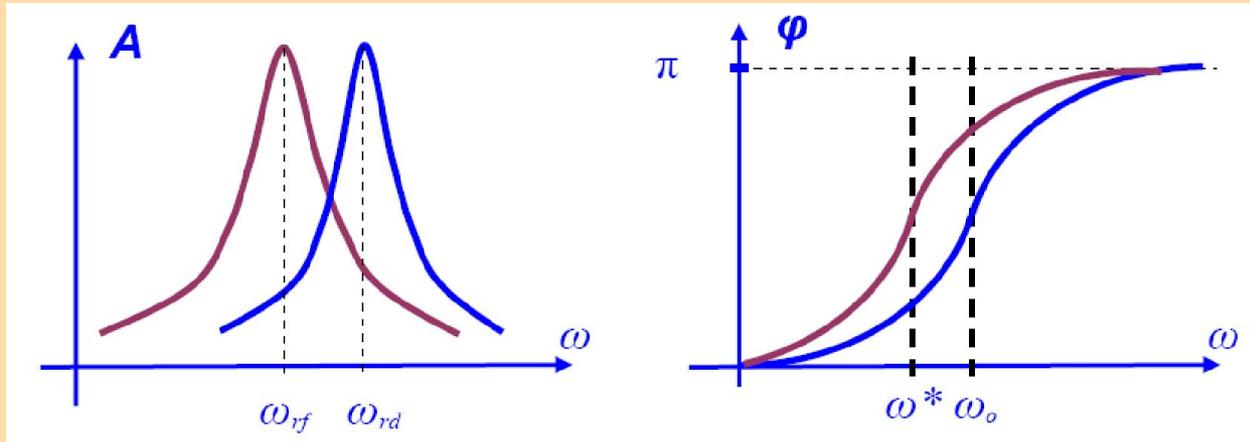
$$\ddot{z} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{z} + \omega_0^2 z = \omega_0^2 u_0 \cos \omega t$$

Амплитудно-частотная (АЧХ) и фазо-частотная (ФЧХ) характеристики кантилевера, отвечающие данному уравнению



Величина ω_{rd} , определяющая сдвиг относительно резонансной частоты ω_0 находится из соотношения $\omega_{rd}^2 = \omega_0^2(1 - 1/2Q^2)$.

В бесконтактном режиме кантилевер совершает вынужденные колебания с малой амплитудой порядка 1 нм. При приближении зонда к поверхности на кантилевер начинает действовать дополнительная сила со стороны образца. При ван-дер-ваальсовом взаимодействии это соответствует области расстояний между зондом и образцом, где действует сила притяжения. Появление такой дополнительной силы немного модифицирует вышеприведенные уравнения и в результате АЧХ и ФЧХ приобретают вид



Дополнительный сдвиг фазы при наличии градиента силы

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{2} - \phi(\omega_0) \cong \frac{Q}{k} \frac{\partial F}{\partial z}$$

Регистрация изменения амплитуды и фазы колебаний кантилевера в бесконтактном режиме требует высокой чувствительности и устойчивости работы обратной связи.

На практике чаще используется т.н. **полуконтактный режим колебаний кантилевера. При работе в этом режиме возбуждаются вынужденные колебания кантилевера вблизи резонанса с амплитудой порядка 10 – 100 нм. Кантилевер подводится к поверхности так, чтобы в нижнем полупериоде колебаний происходило касание поверхности образца.**

При сканировании образца регистрируется изменение амплитуды и фазы колебаний кантилевера.

Формирование АСМ изображения поверхности в режиме колебаний кантилевера происходит следующим образом.

- С помощью пьезовибратора возбуждаются колебания кантилевера на частоте ω (близкой к резонансной частоте кантилевера) с амплитудой A_ω . При сканировании система обратной связи АСМ поддерживает постоянную амплитуду колебаний кантилевера на уровне A_0 , задаваемом оператором ($A_0 < A_\omega$).
- Напряжение в петле обратной связи (на z -электроре сканера) записывается в память компьютера в качестве АСМ изображения рельефа поверхности.
- Одновременно при сканировании образца в каждой точке регистрируется изменение фазы колебаний кантилевера, которое записывается в виде распределения фазового контраста.