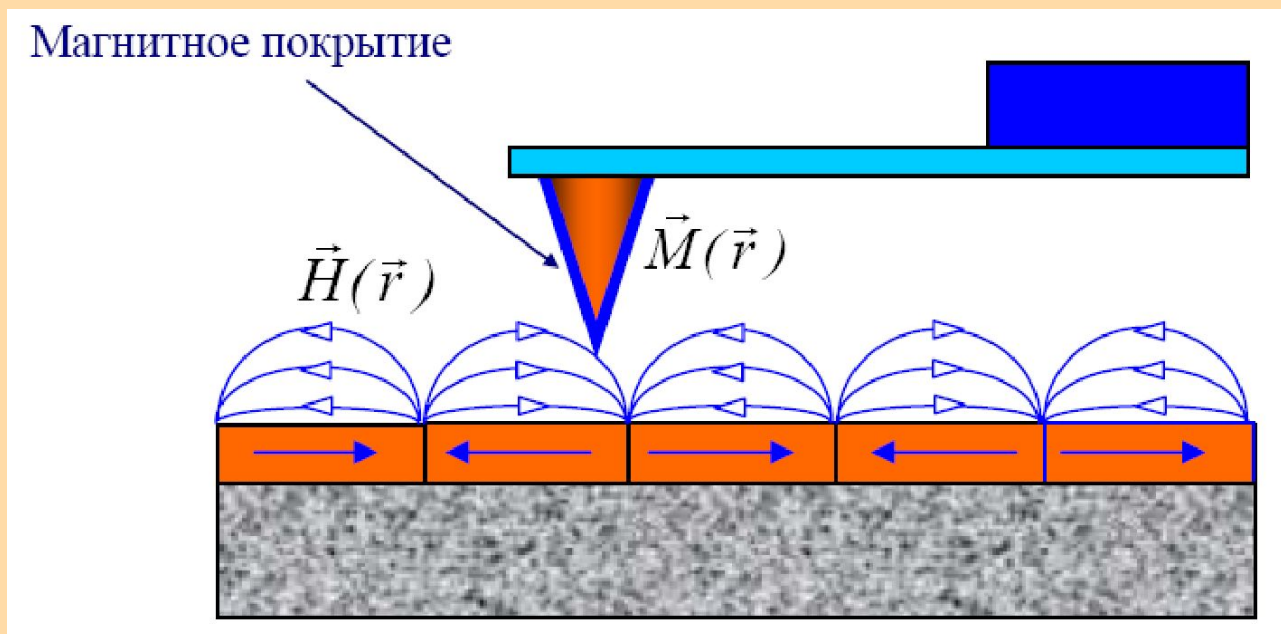


Темы лекции

- 1. Принцип действия магнитно-силового микроскопа (АСМ).*
- 2. Квазистатические методики в МСМ.*
- 3. Колебательные методики в МСМ.*

**Магнитно-силовой микроскоп (МСМ)** был изобретен И. Мартином и К. Викрамасингхом в 1987 г. для исследования локальных магнитных свойств образцов. Данный прибор представляет собой атомно-силовой микроскоп, у которого зонд покрыт слоем ферромагнитного материала с удельной намагниченностью  $\vec{M}(\vec{r})$ .

### Принцип действия МСМ



В общем случае описание взаимодействия зонда МСМ с полем образца  $\mathbf{H}(\mathbf{r})$  представляет собой достаточно сложную задачу. В качестве простейшей модели рассмотрим зонд МСМ в виде одиночного магнитного диполя, характеризующегося магнитным моментом  $\boldsymbol{\mu}$ .

Потенциальная энергия такой системы

$$U = -\boldsymbol{\mu}\mathbf{H}.$$

В поле  $\mathbf{H}$  на магнитный диполь действует сила

$$\mathbf{f} = -\text{grad}U$$

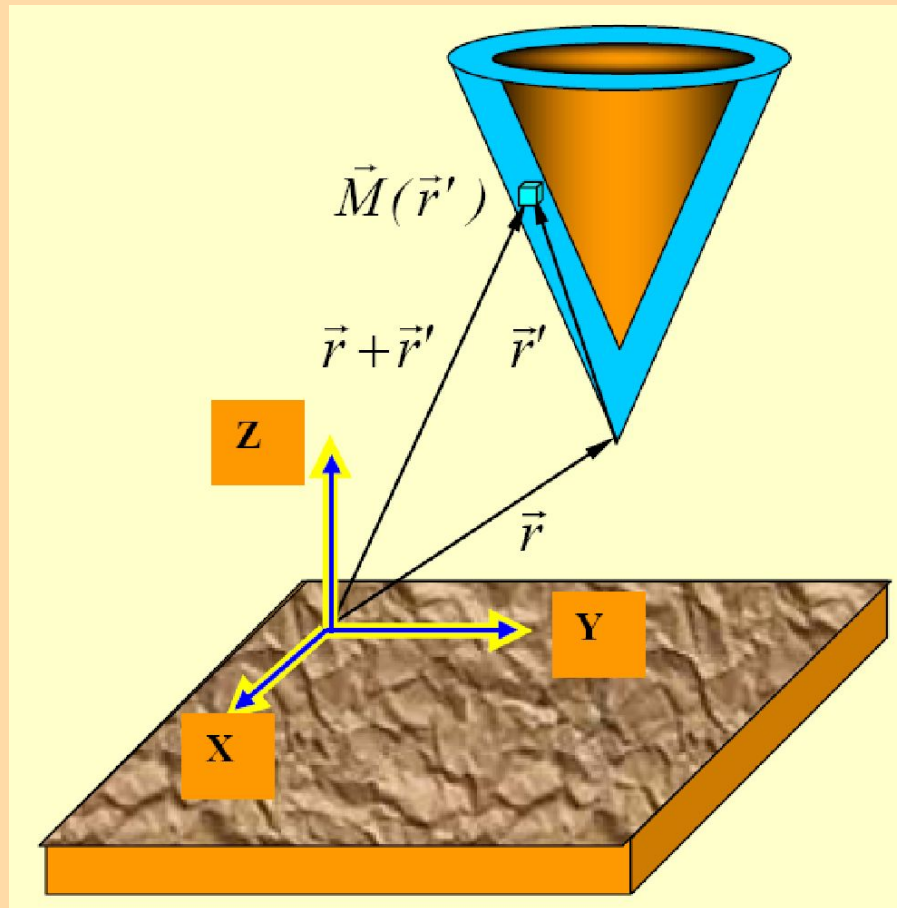
и момент сил

$$\mathbf{N} = [\boldsymbol{\mu}\mathbf{H}].$$

В однородном магнитном поле сила  $\mathbf{f} = 0$ , так что на диполь действует лишь момент сил, который разворачивает магнитный момент  $\boldsymbol{\mu}$  вдоль поля. В неоднородном поле диполь втягивается в область с большей напряженностью  $\mathbf{H}$ .

В общем случае магнитный момент зонда МСМ можно представить как суперпозицию диполей вида  $\mathbf{M}(\mathbf{r})dV$ , где  $\mathbf{M}(\mathbf{r})$  – удельная намагниченность магнитного покрытия.

### Взаимодействие зонда МСМ с магнитным полем образца



Полная энергия магнитного взаимодействия зонда и образца в соответствии с предыдущим рисунком может быть представлена в следующем виде:

$$W_{\text{маг}} = \int_{V_p} \mathbf{M}(\mathbf{r}) \mathbf{H}(\mathbf{r} + \mathbf{r}') dV'$$

где интегрирование проводится по магнитному слою зонда.

Отсюда сила взаимодействия зонда с полем образца

$$\mathbf{F} = -\text{grad} W_{\text{маг}} = \int_{V_p} \nabla(\mathbf{M}\mathbf{H}) dV'$$

Соответственно z-компонента силы:

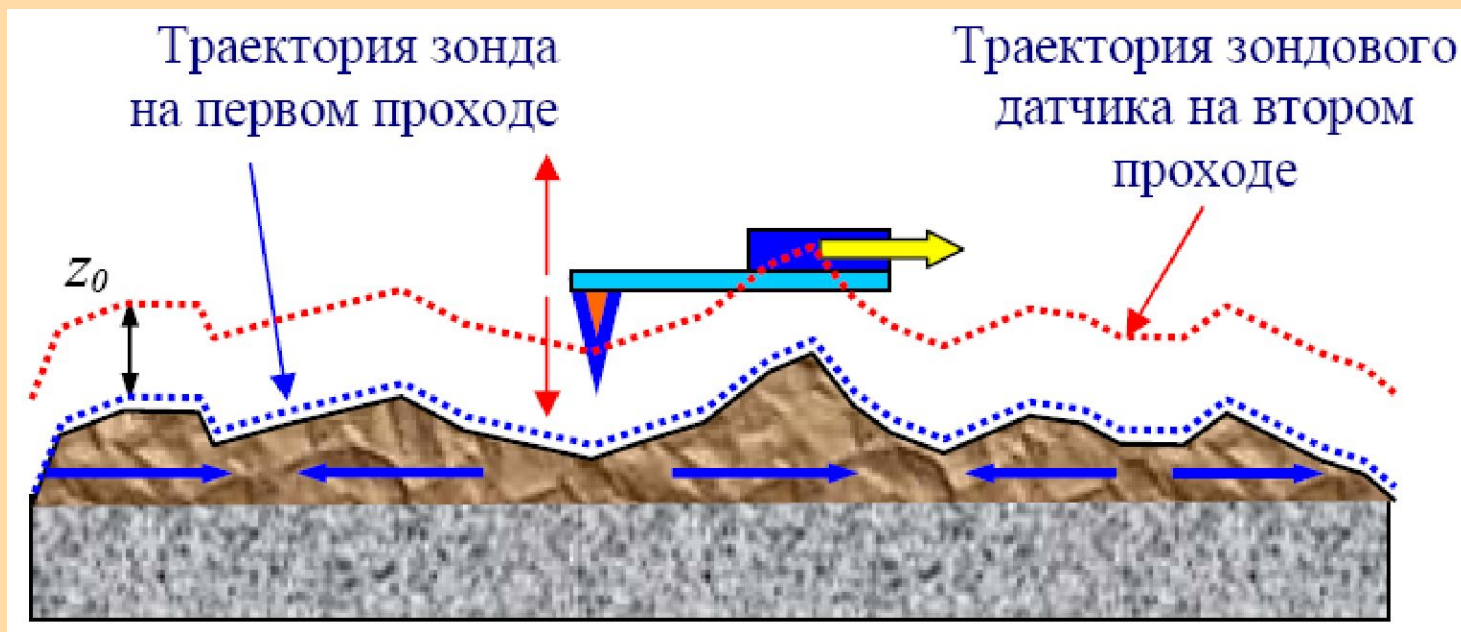
$$F_z = \int_{V_p} \left( M_x \frac{\partial H_x}{\partial x} + M_y \frac{\partial H_y}{\partial y} + M_z \frac{\partial H_z}{\partial z} \right)$$

## Квазистатические методики

**Для образцов, имеющих слабо развитый рельеф поверхности.**

МСМ изображение поверхности получают следующим образом. Во время сканирования зондовый датчик перемещается над образцом на некотором расстоянии  $h = \text{const}$ . При этом величина изгиба кантилевера, регистрируемая оптической системой, записывается в виде МСМ изображения  $F(x,y)$ , представляющего собой распределение силы магнитного взаимодействия зонда с образцом.

Для исследований магнитных образцов с сильно развитым рельефом поверхности применяется двухпроходная методика. В каждой строке сканирования производится следующая процедура. На первом проходе снимается АСМ изображение рельефа в контактном или полуконтактном режиме. Затем зондовый датчик отводится от поверхности на расстояние  $z_0$ , и осуществляется повторное сканирование



Расстояние  $z_0$  выбирается таким образом, чтобы сила Ван-дер-Ваальса была меньше силы магнитного взаимодействия.

На втором проходе датчик перемещается над поверхностью по траектории, повторяющей рельеф образца.

Поскольку в этом случае локальное расстояние между зондовым датчиком и поверхностью в каждой точке постоянно, изменения изгиба кантилевера в процессе сканирования связаны с неоднородностью магнитных сил, действующих на зонд со стороны образца.

Таким образом, итоговый МСМ кадр представляет собой двумерную функцию  $F(x,y)$ , характеризующую распределение силы магнитного взаимодействия зонда с образцом.



**Колебательные методики**

Применение колебательных методик в магнитно-силовой микроскопии позволяет реализовать большую (по сравнению с квазистатическими методиками) чувствительность и получать более качественные МСМ изображения образцов. Как было показано в лекции, посвященной бесконтактной методике АСМ, наличие градиента силы приводит к изменению резонансной частоты, а следовательно, к сдвигу АЧХ и ФЧХ системы зонд-образец. Данные изменения резонансных свойств системы используются для получения информации о неоднородном распределении намагниченности на поверхности образцов. В случае магнитного взаимодействия зонда с поверхностью сдвиг резонансной частоты колеблющегося кантилевера будет определяться производной по координате  $z$  от величины  $F_z$

$$F_z' = \int_{V_p} \left( M_x \frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + M_y \frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} + M_z \frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} \right)$$

**Для получения МСМ изображения поверхности используется двухпроходная методика.**

С помощью пьезовибратора возбуждаются колебания кантилевера на частоте  $\omega$  вблизи резонанса.

На первом проходе в полуконтактном режиме записывается рельеф поверхности.

На втором проходе зондовый датчик движется над образцом по траектории, соответствующей рельефу, так, что расстояние между ним и поверхностью в каждой точке равно величине  $z_0 = \text{const}$ , определяемой оператором.

**МСМ изображение формируется посредством регистрации изменений амплитуды или фазы колебаний кантилевера.**

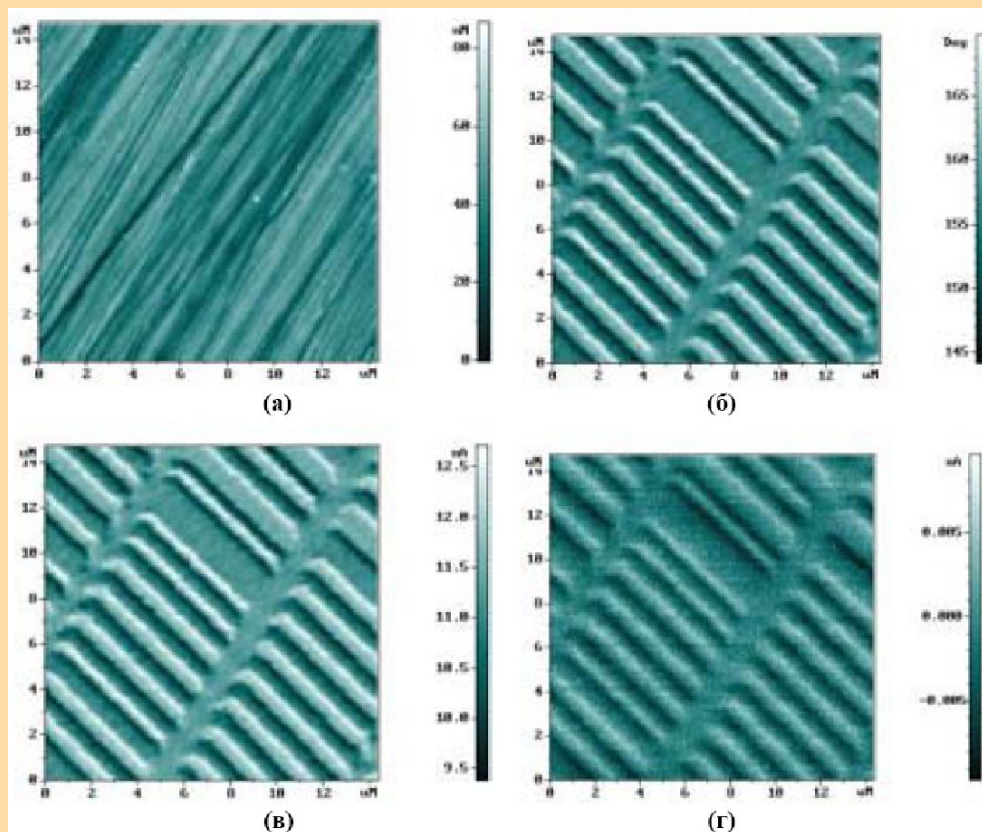
Изменения амплитуды и сдвиг фазы колебаний, связанные с вариациями градиента силы, при условии, что изменения  $F_z'$  вдоль поверхности невелики, будут равны

$$\Delta A = A(F_z') - A(F_{z0}') = A'_{F_z'}(F_z') \Big|_{F_{z0}'} \Delta F_z'$$

$$\Delta \varphi = \varphi(F_z') - \varphi(F_{z0}') = \varphi'_{F_z'}(F_z') \Big|_{F_{z0}'} \Delta F_z'$$

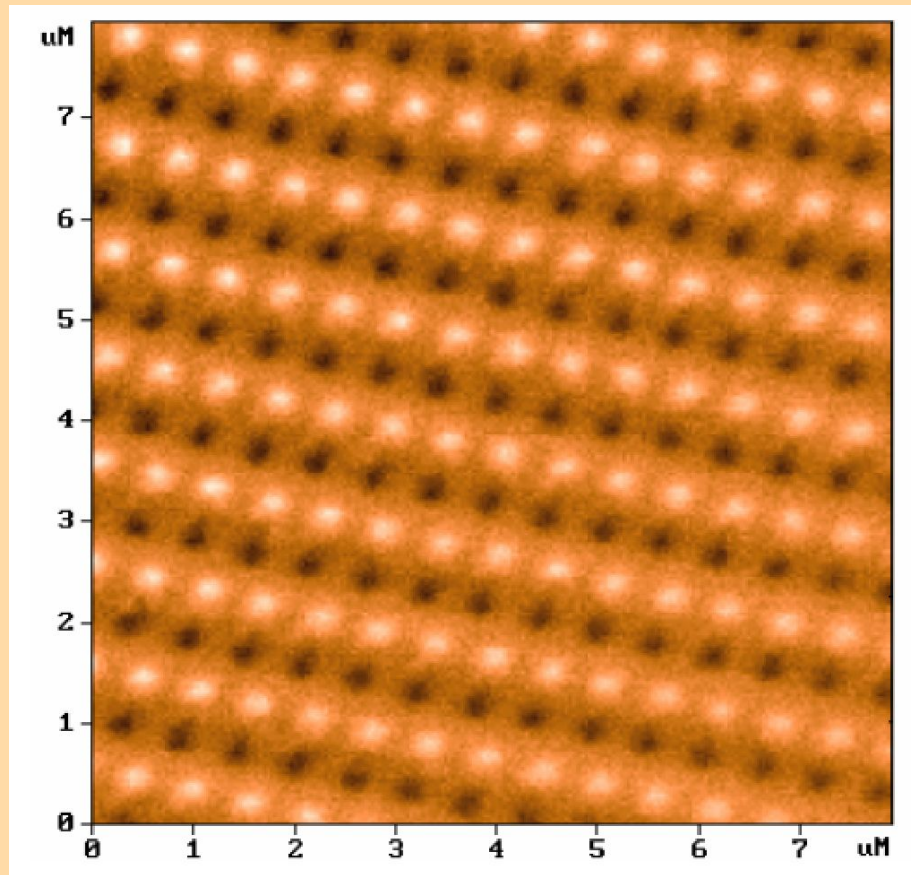
**Коэффициенты перед  $\Delta F_z'$  определяют чувствительность амплитудного и фазового методов измерения. Максимум чувствительности достигается при определенных частотах возбуждения кантилевера.**

## МСМ изображения поверхности магнитного диска.



(а) – АСМ изображение рельефа поверхности; (б) – МСМ изображение фазового контраста; (в) – МСМ изображение амплитудного контраста; (г) – МСМ изображение распределения силы взаимодействия зонда с поверхностью.

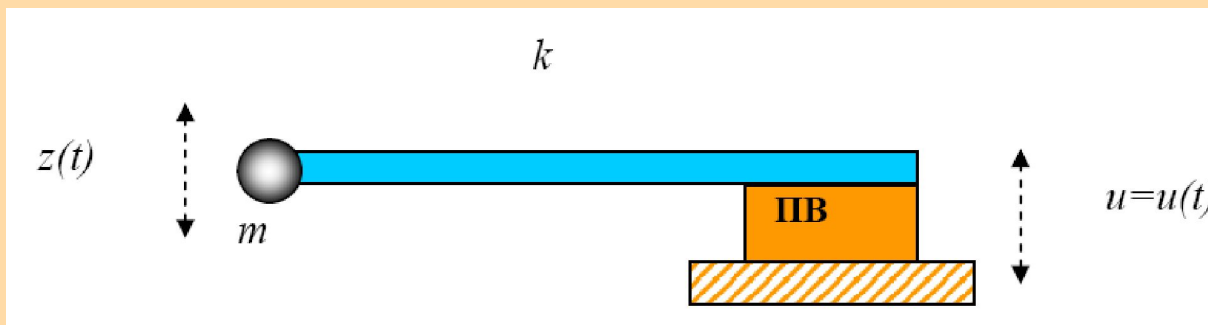
**МСМ изображение массива магнитных наночастиц, сформированных методом интерференционного лазерного отжига пленок Fe-Cr**



**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 позволяют 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  $\omega$ , 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:

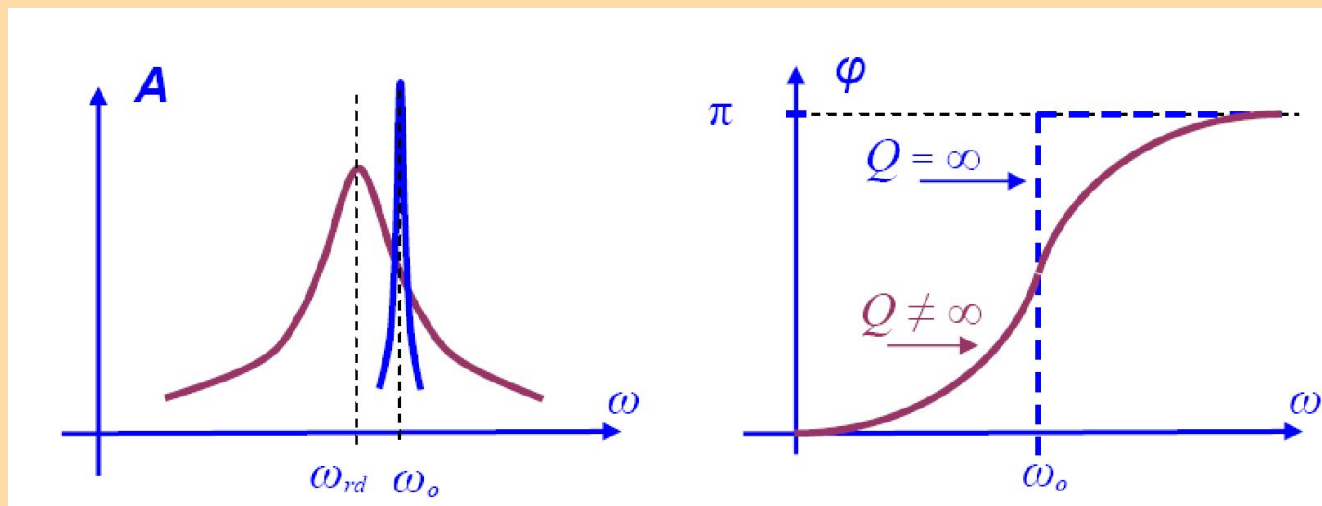
$$m\ddot{z} + \gamma\dot{z} + kz = ku_0 \cos \omega t$$



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

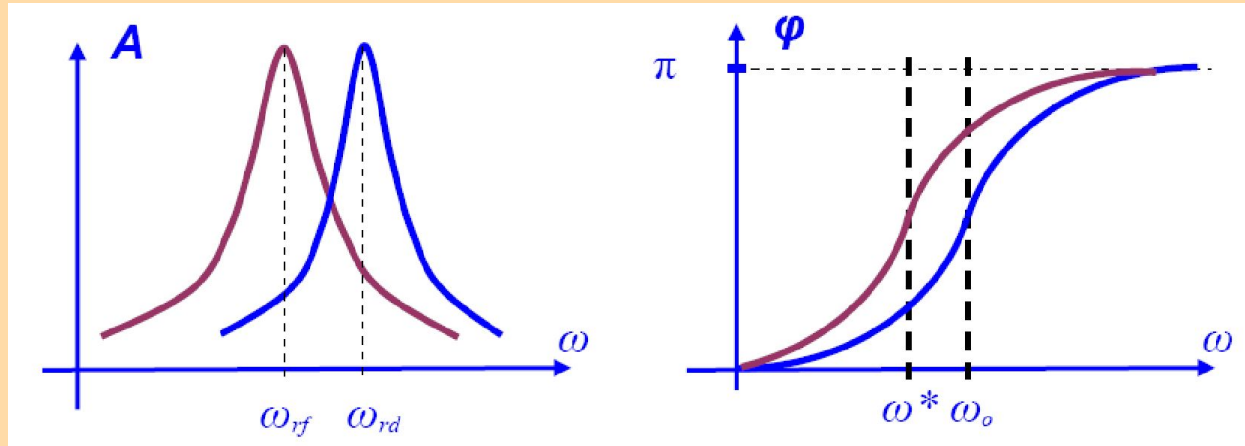
$$\ddot{z} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{z} + \omega_0^2 z = \omega_0^2 u_0 \cos \omega t$$

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



Величина  $\omega_{rd}$ , определяющая сдвиг относительно резонансной частоты  $\omega_0$  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  $\omega$  (близкой к резонансной частоте кантилевера) с амплитудой  $A_\omega$ . 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  $z$ -электроде 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.