

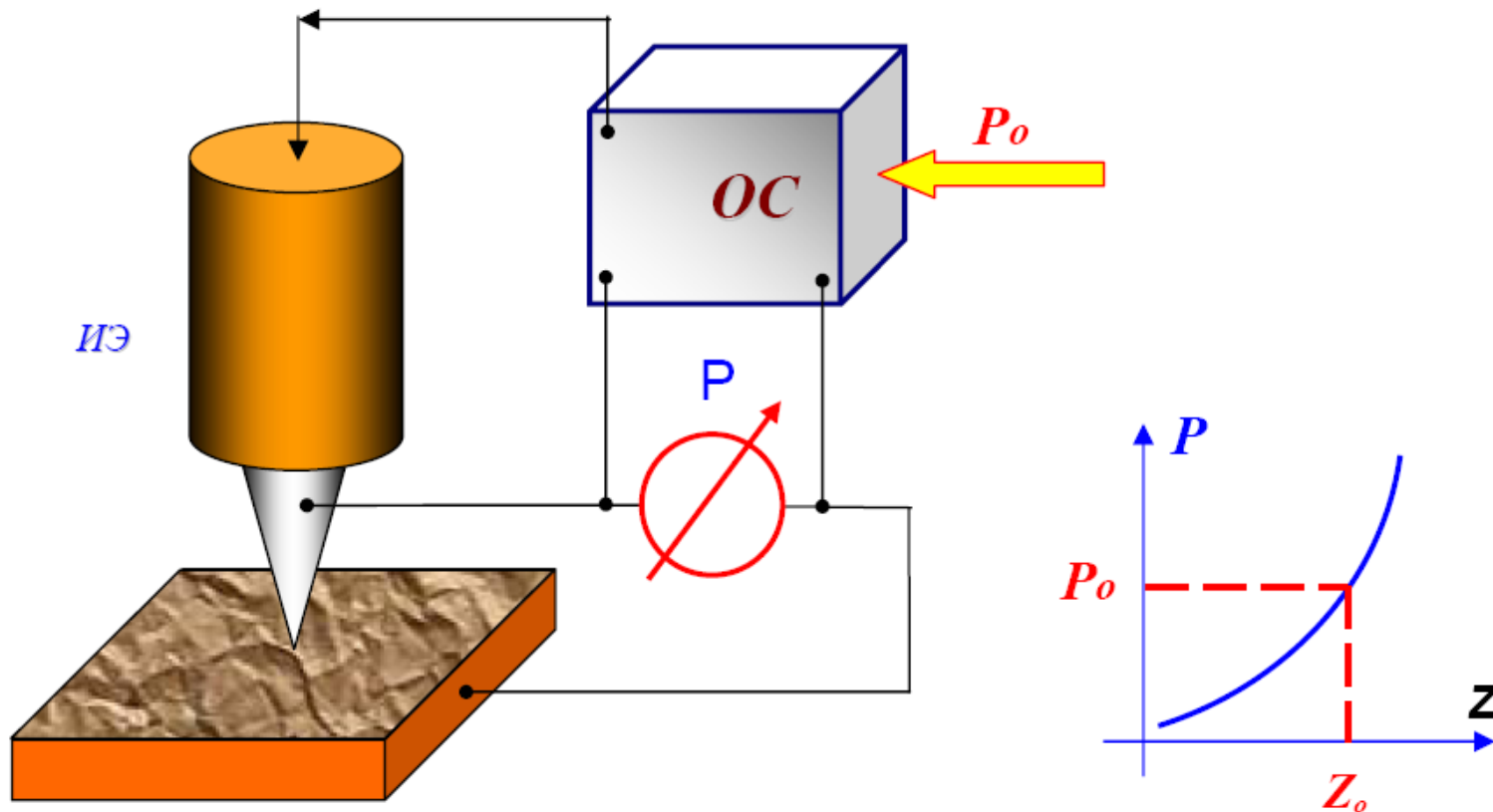


# Методы зондовой микроскопии

- сканирующая туннельная микроскопия
- атомно-силовая микроскопия
- магнитно-силовая микроскопия
- электро-силовая микроскопия
- ближнепольная оптическая микроскопия

# Схема организации обратной связи в зондовом микроскопе

Размеры зонда  $\sim 10$  нм, расстояние зонд-образец  $0,1 - 10$  нм



# Сканирующий элемент зондового микроскопа

Уравнение обратного пьезоэффекта:

$$u_{ij} = d_{ijk} E_k$$

$u_{ij}$  - тензор деформаций

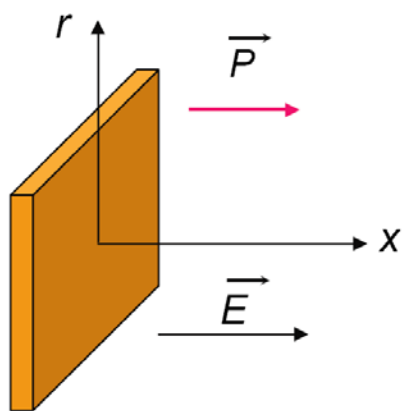
$E_k$  - компоненты электрического поля

$d_{ijk}$  - компоненты тензора пьезоэлектрических  
коэффициентов

Пьезокерамики:  $d_{33}$ ,  $d_{31}$ ,  $d_{15}$

# Сканирующий элемент зондового микроскопа

Пьезокерамики:  $d_{33}$ ,  $d_{31}$ ,  $d_{15}$  продольные, поперечные и сдвиговые деформации

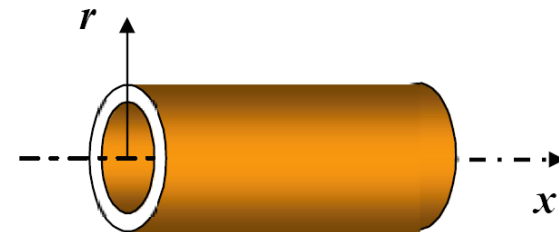


$$d_{\parallel} = d_{33}$$

$$d_{\perp} = d_{31}$$

$$u_{xx} = d_{\parallel} E_x$$

$$u_{rr} = d_{\perp} E_x$$



$$u_{xx} = \frac{\Delta x}{l_0} = d_{\perp} E_r$$

Абсолютное удлинение пьезотрубки:

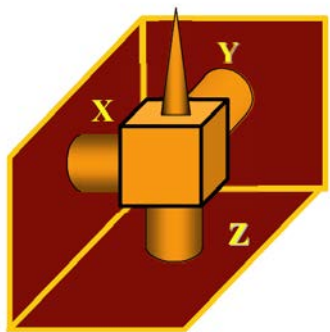
$$\Delta x = d_{\perp} \frac{l_0}{h} V$$

$h$  – толщина стенки

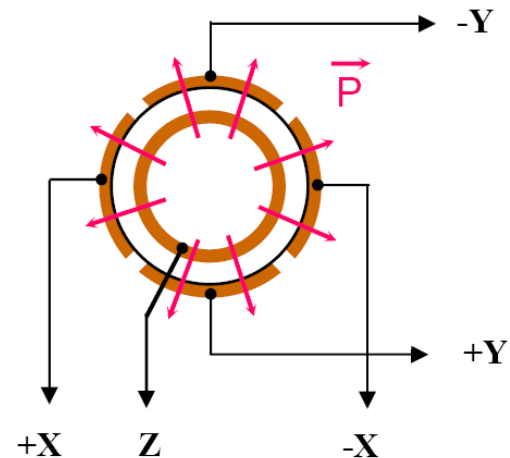
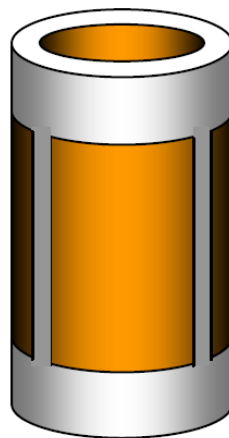
$V$  – разность потенциалов

# Сканирующий элемент зондового микроскопа

«Трипод»

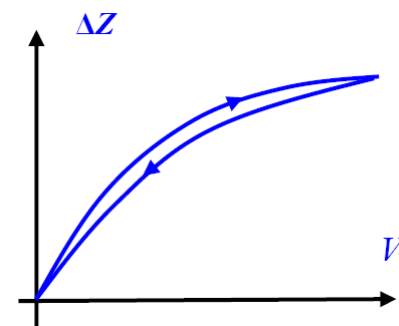
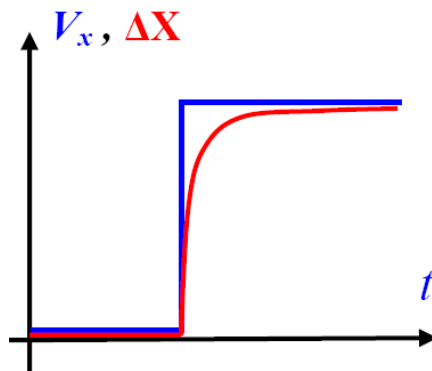
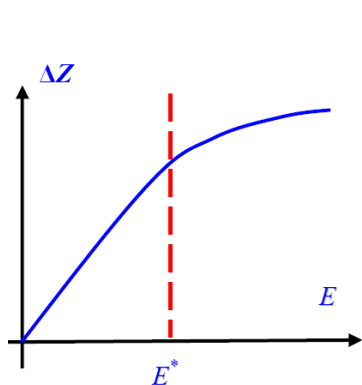


Трубчатый пьезосканер

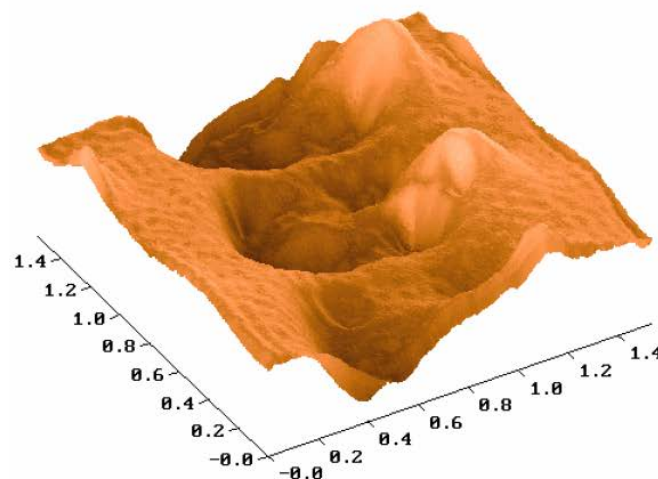
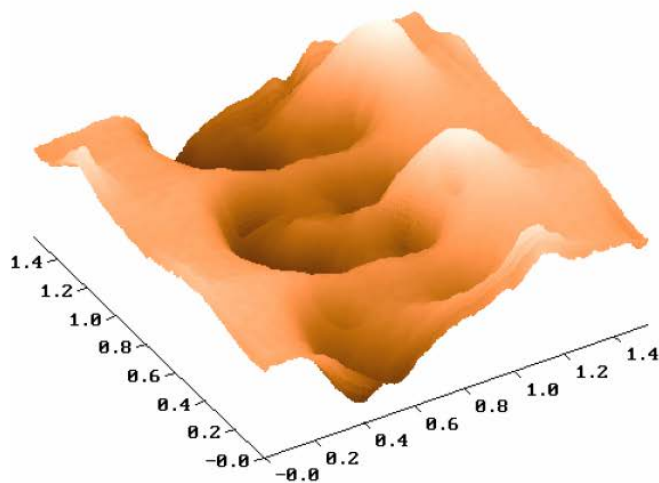
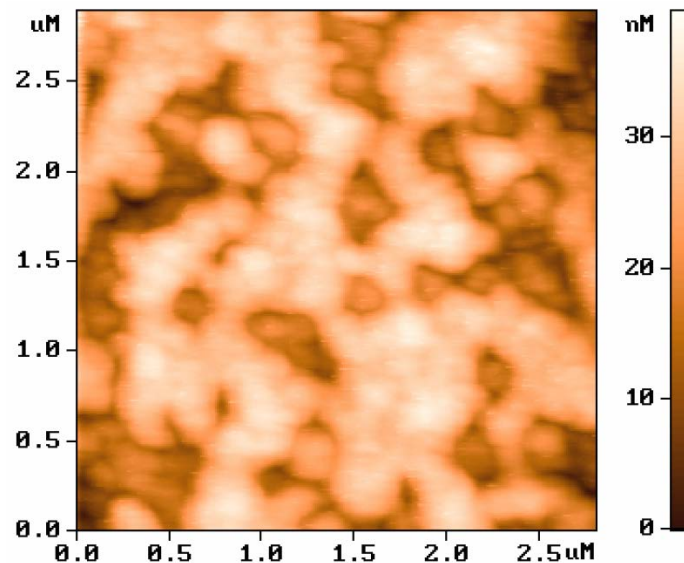
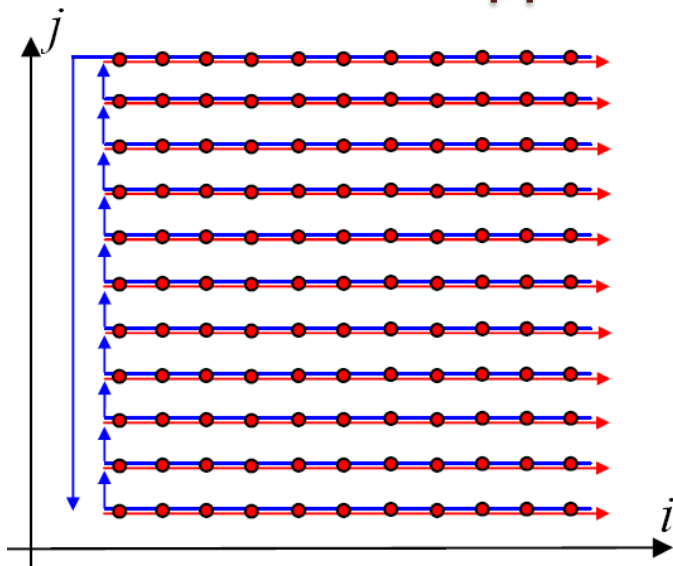


Недостатки пьезокерамики – нелинейность характеристик, запаздывание (крип), гистерезис

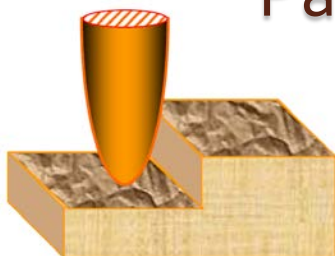
$$u_{ij} = u_{ij}(\vec{E}) \quad u_{ij} = d_{ijk} E_k + \alpha_{ijkl} E_k E_l + \dots$$



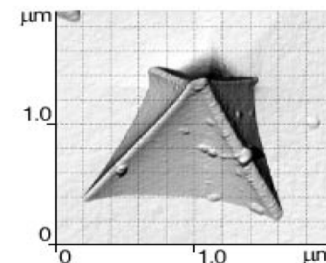
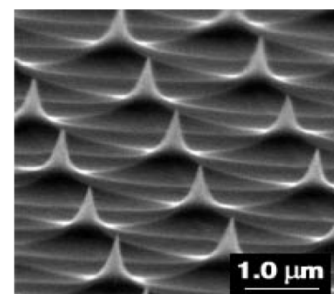
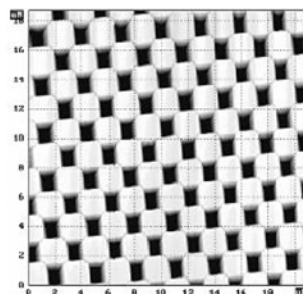
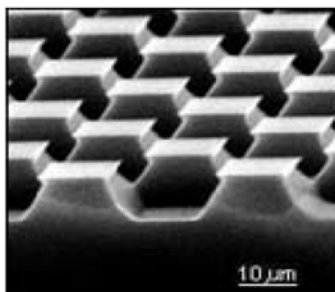
# Регистрация и обработка изображений зондового микроскопа



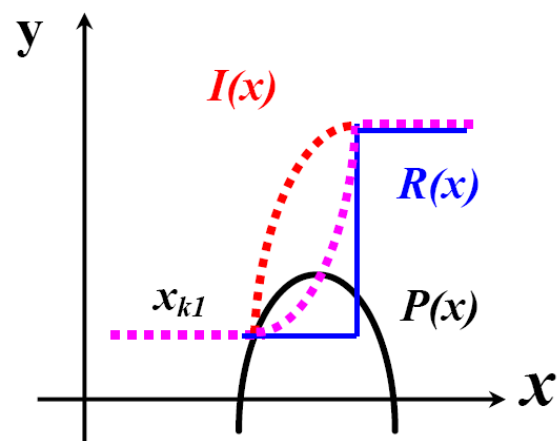
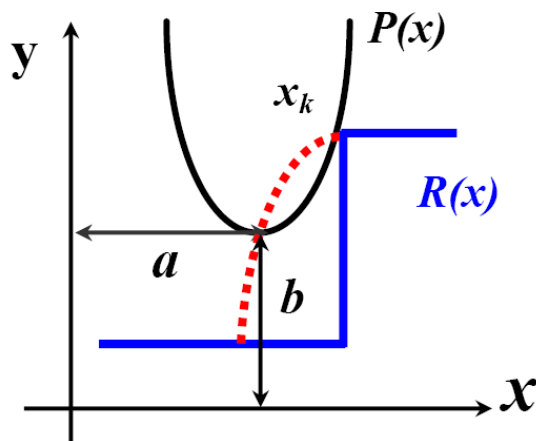
# Разрешение зондового микроскопа



Форма зонда определяется из сканирования тестовых образцов



Свертка формы зонда с формой поверхности, частичное восстановление изображения

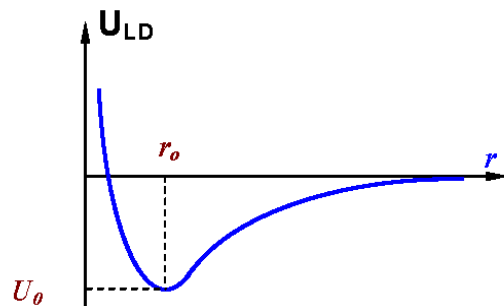


Чем большего количества точек поверхности коснулся зонд, тем достовернее восстановление рельефа

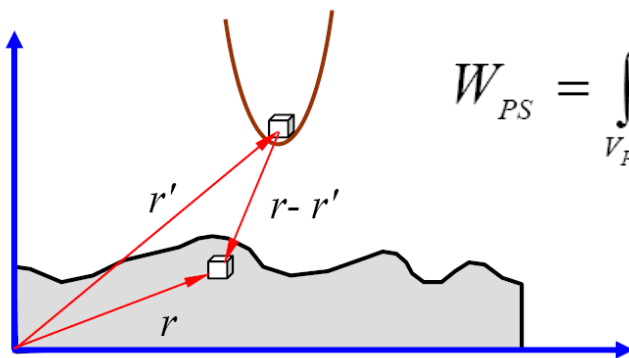
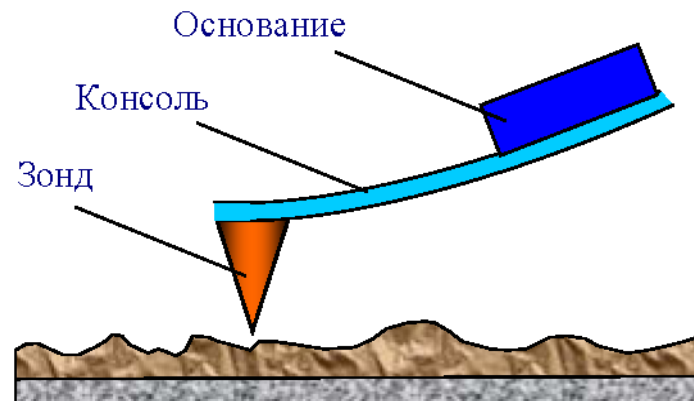


# Атомно-силовой микроскоп

потенциал Леннарда-Джонса



$$U_{LD}(r) = U_0 \left\{ -2 \left( \frac{r_0}{r} \right)^6 + \left( \frac{r_0}{r} \right)^{12} \right\}$$

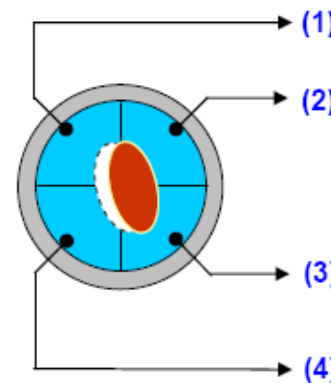
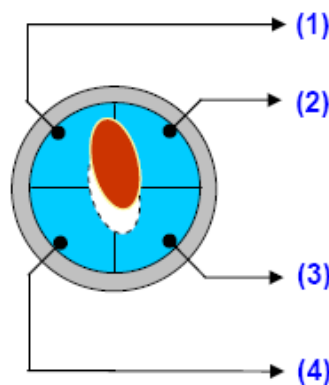
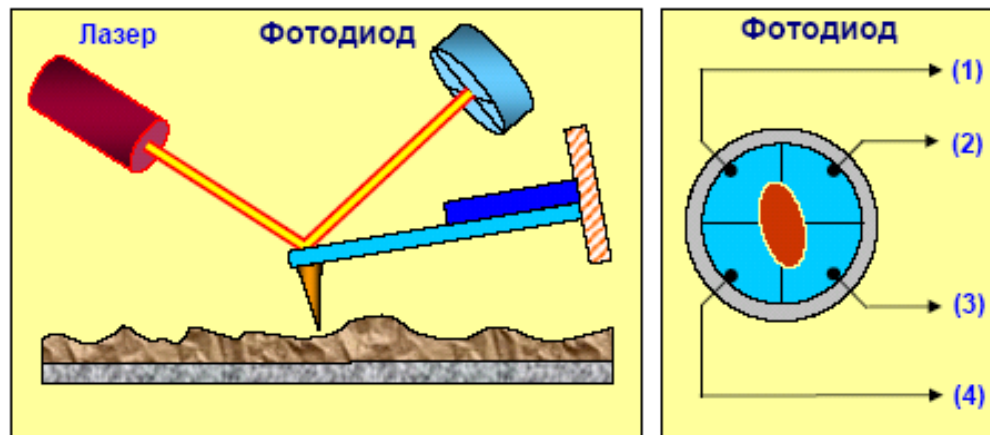


$$W_{PS} = \iint_{V_P V_S} U_{LD}(r - r') n_P(r') n_S(r) dV dV'$$

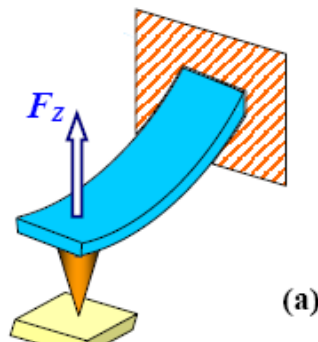
$n$  - ПЛОТНОСТИ АТОМОВ

$$\vec{F}_{PS} = -\text{grad}(W_{PS})$$

# Оптическая регистрация изгибов

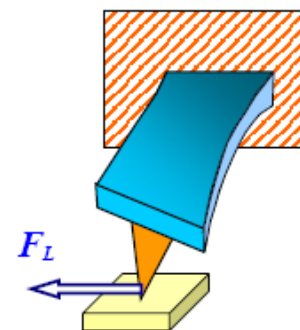


изгиб



(a)

латеральные силы

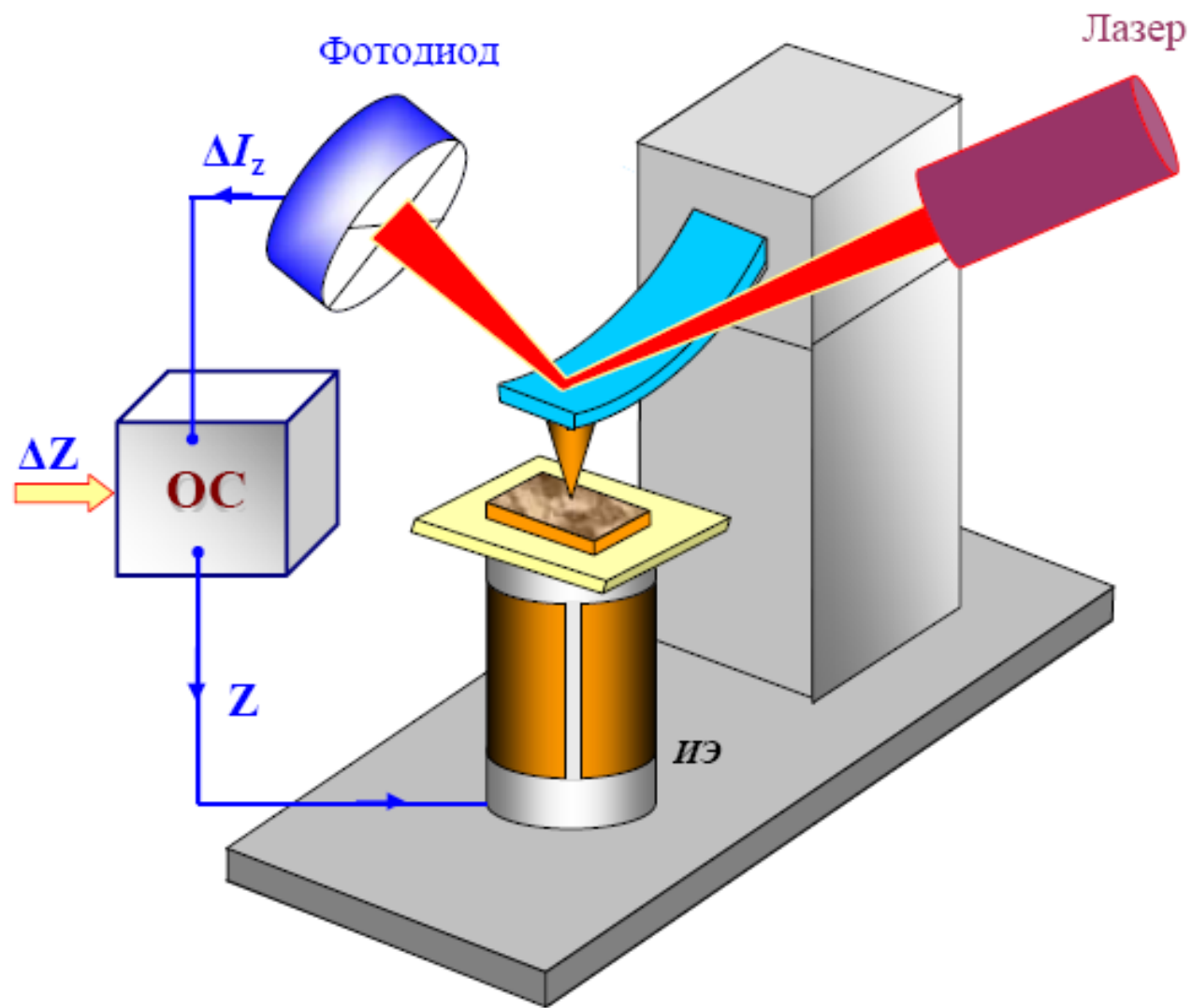


(б)

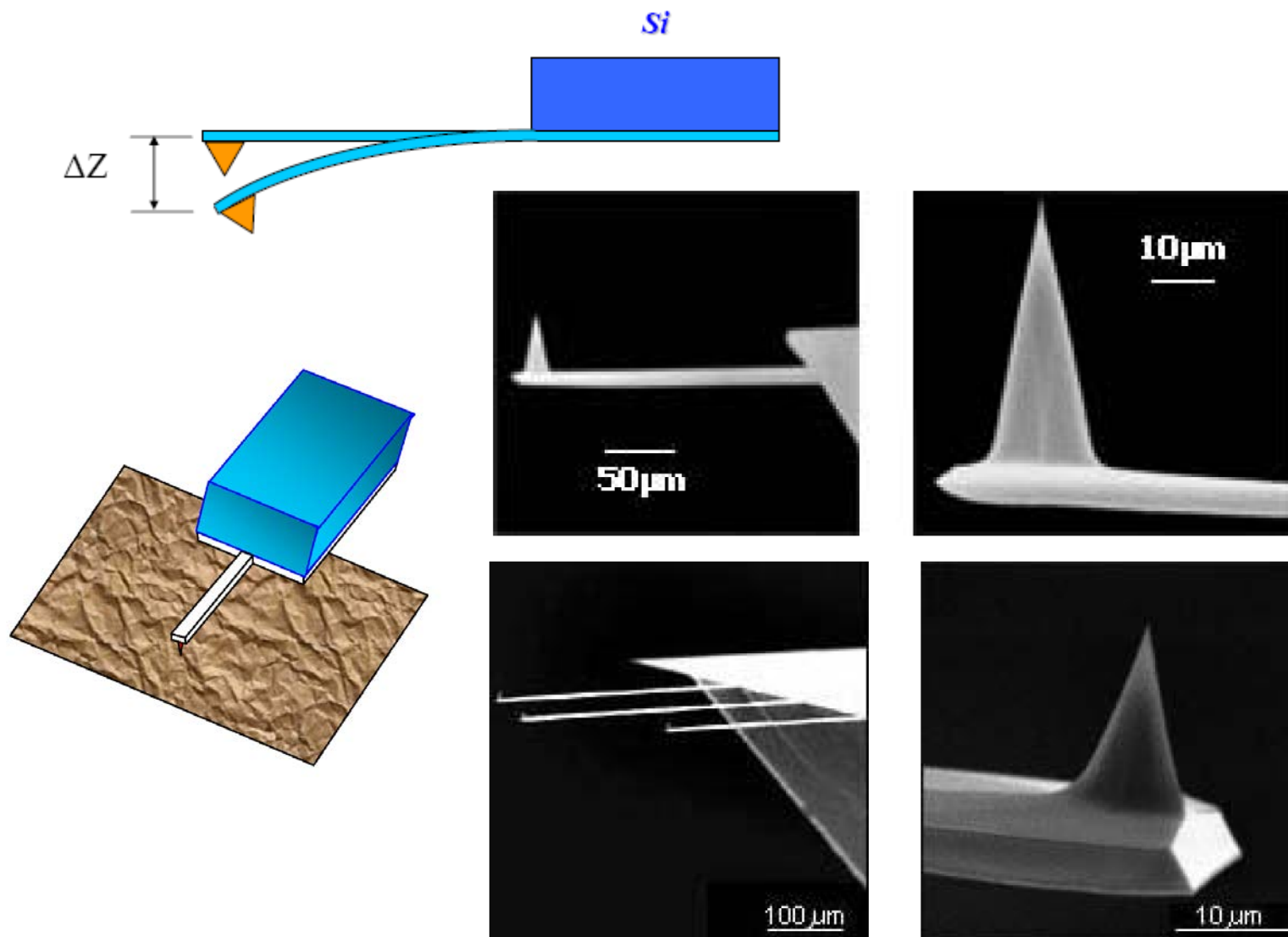
$$\Delta I_z = (\Delta I_1 + \Delta I_2) - (\Delta I_3 + \Delta I_4)$$

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

# Упрощенная схема обратной связи. $Z = \text{const}$

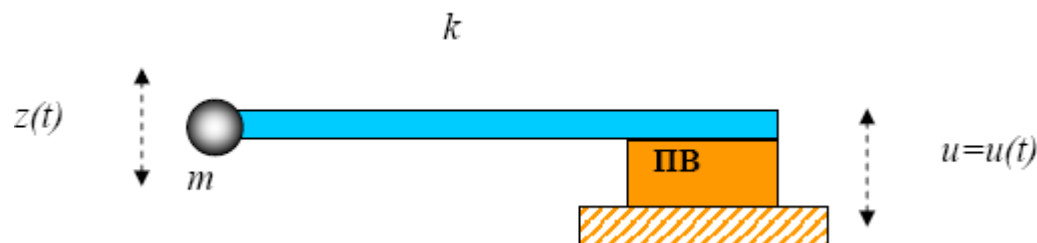


# Кантилеверы атомно-силового микроскопа



Колебательный режим – важны резонансные свойства кантилевера,  
Контактный и бесконтактный режимы

# Колебательные методики АСМ



$$u = u_0 \cos(\omega t)$$

Уравнение движения:

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

Замена переменных (постоянная сила только сдвигает положение равновесия):

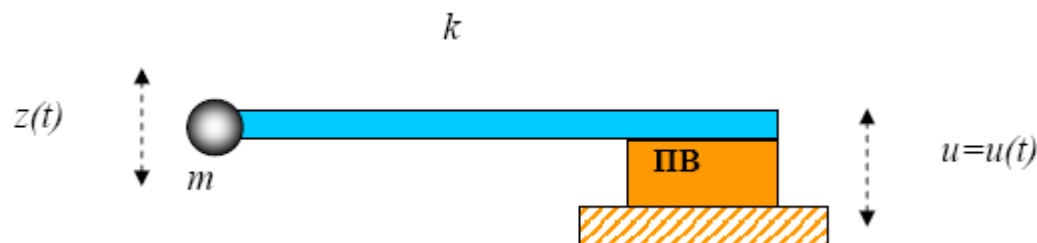
$$z = z + F_0 / k$$

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

Разделим уравнение на  $m$  и введем добротность  $Q = \frac{\omega_0 m}{\gamma}$

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

# Колебательные методики АСМ



Чаще всего решение ищется на комплексной плоскости:

$$\ddot{\eta} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{\eta} + \omega_0^2 \eta = \omega_0^2 u_0 e^{-i\omega t}$$

Общее решение представляет собой суперпозицию

затухающих с декрементом  $\delta = \omega_0 / 2Q$  и

незатухающих с частотой  $\omega$  колебаний. Ищем

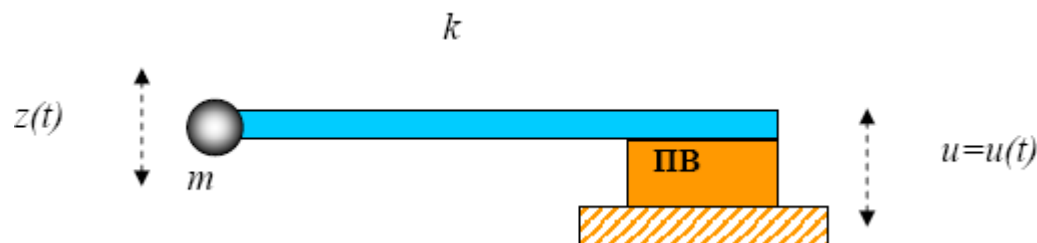
установившиеся колебания в виде:

$\eta = a \cdot e^{-i\omega t}$ , подставляем в ур-е, получаем для

компл. амплитуды:

$$a = \frac{\omega_0^2 u_0}{\omega_0^2 - \omega^2 - i \frac{\omega \omega_0}{Q}}$$

# Колебательные методики АСМ



$$a = \frac{\omega_0^2 u_0}{\omega_0^2 - \omega^2 - i \frac{\omega \omega_0}{Q}}$$

Модуль и фаза данного выражения дает амплитуду и фазу вынужденных колебаний:

$$A(\omega) = \frac{u_0 \omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \frac{\omega^2 \omega_0^2}{Q^2}}} \quad \varphi(\omega) = \arctg \left[ \frac{\omega \omega_0}{Q(\omega_0^2 - \omega^2)} \right]$$

Амплитуда колебаний зонда на частоте  $\omega_0$  определяется добротностью системы и равна  $Q u_0$ . Наличие в системе диссипации приводит к сдвигу резонансной частоты колебаний кантилевера.

# Колебательные методики АСМ

Действительно, производя дифференцирование подкоренного выражения по величине  $\omega^2$  и приравнявая производную нулю, получаем для резонансной частоты диссипативной системы:

$$\omega_{rd}^2 = \omega_0^2 \left( 1 - \frac{1}{2Q^2} \right)$$

$$\Delta\omega = \omega_0 - \omega_{rd} = \omega_0 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}} \right)$$

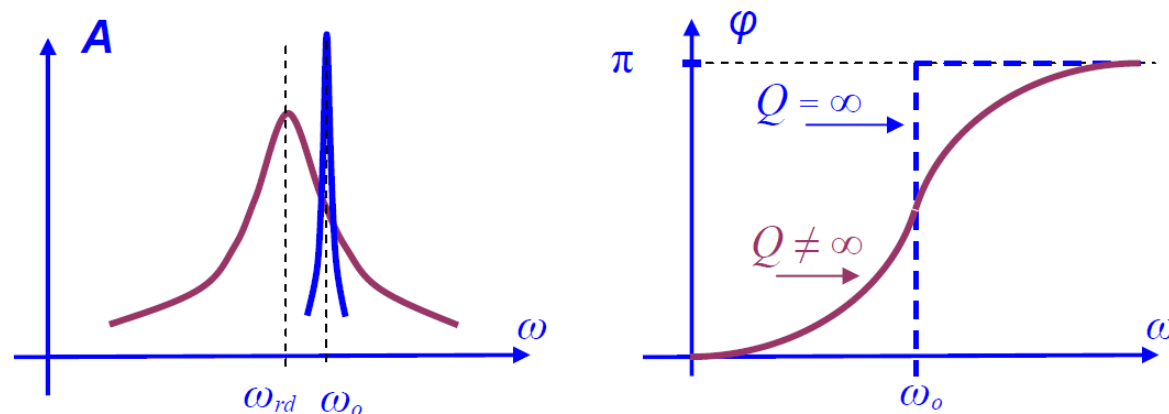


Рис. 80. Изменение АЧХ и ФЧХ в системе с диссипацией.  
Синим цветом показаны характеристики бездиссипативной системы



# Колебательные методики АСМ

При наличии силы со стороны образца:

$$A(\omega) = \frac{u_0 \omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2 - \frac{F'_z}{m})^2 + \frac{\omega^2 \omega_0^2}{Q^2}}}$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \left[ \frac{\omega \omega_0}{Q \left( \omega_0^2 - \omega^2 - \frac{F'_z}{m} \right)} \right]$$

# Колебательные методики АСМ

При наличии силы со стороны образца:

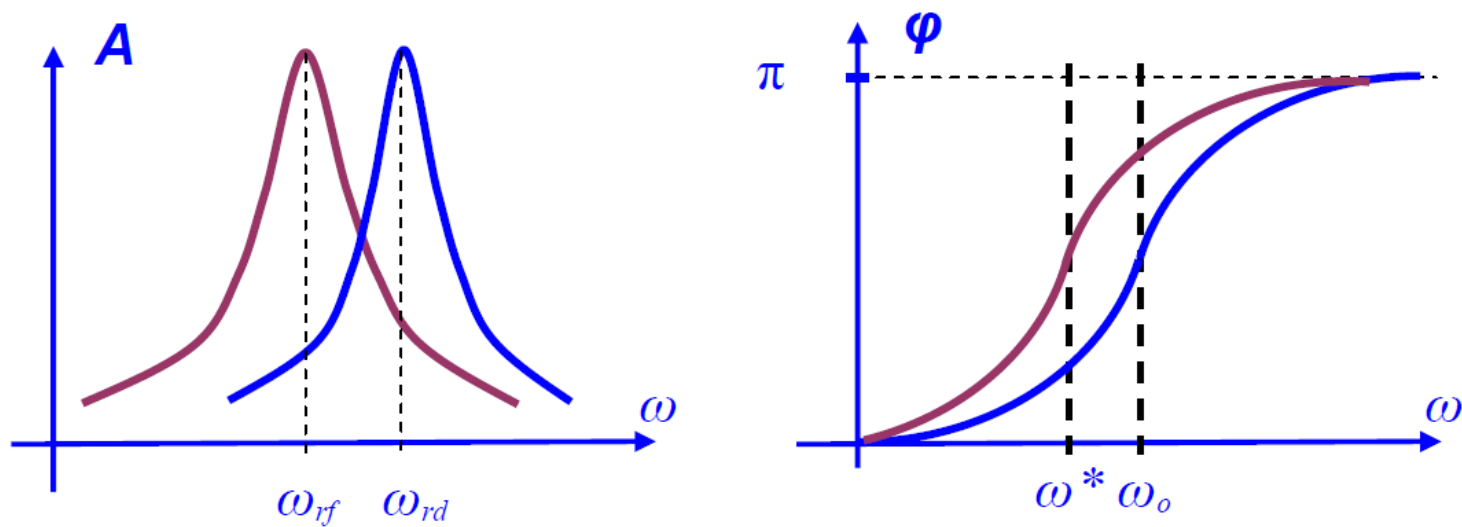
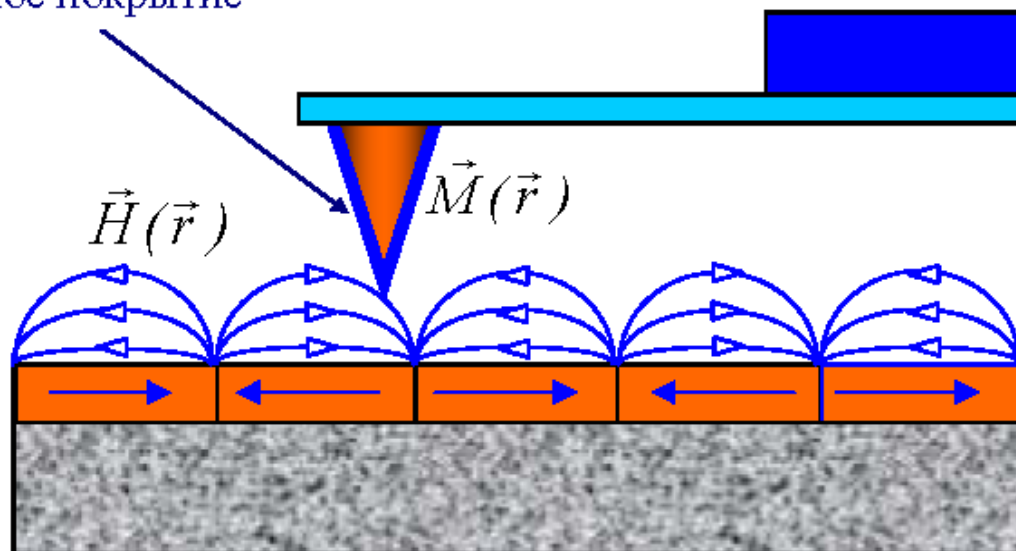


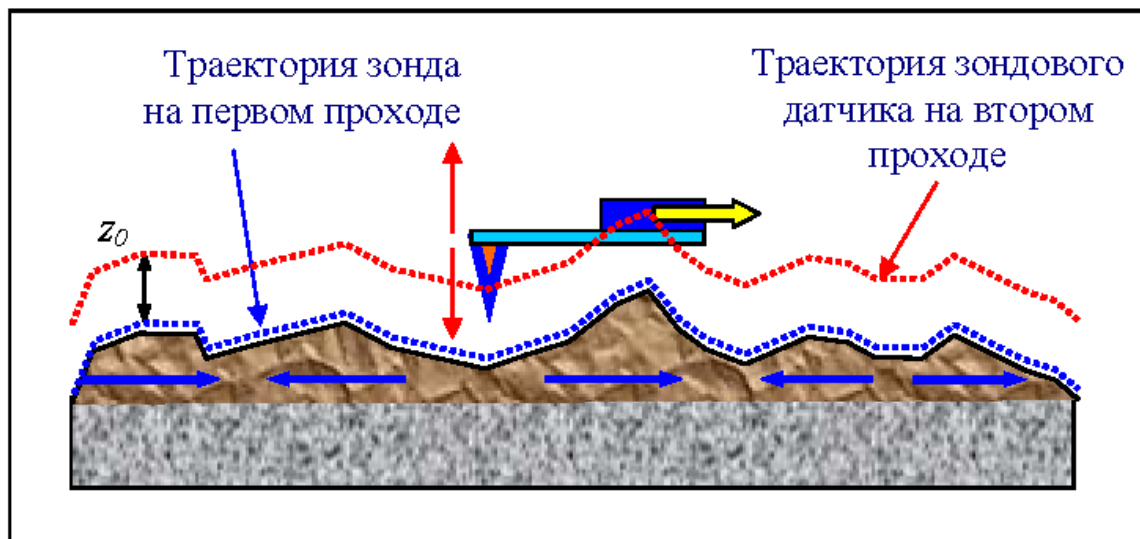
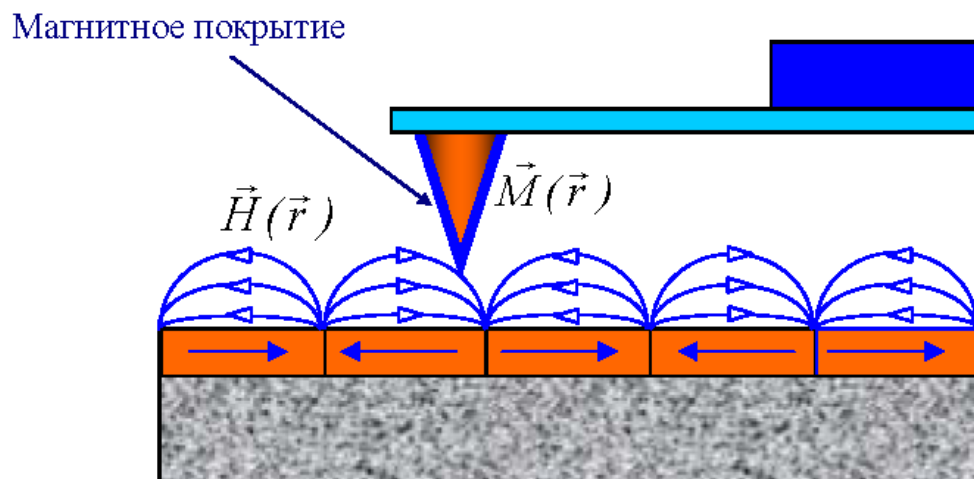
Рис. 81. Изменение АЧХ и ФЧХ кантилевера под действием градиента силы

# Принципы магнитно-силовой микроскопии

Магнитное покрытие

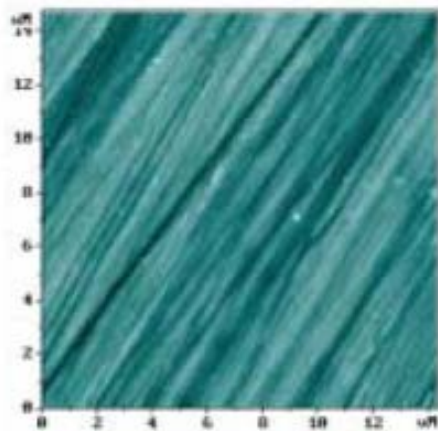


# Принципы магнитно-силовой микроскопии



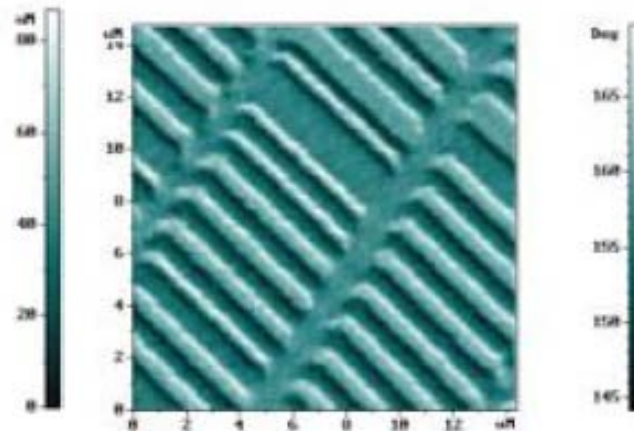
# Пример МСМ-изображений: магнитный диск

АСМ

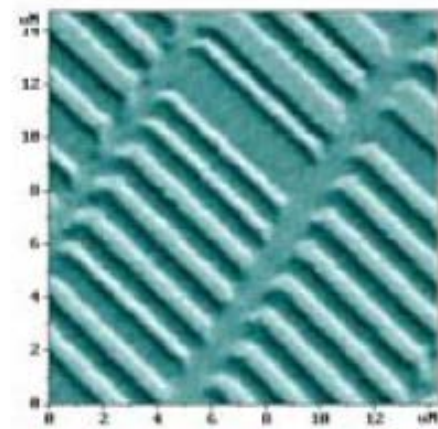


(а)

Амплитудный контраст

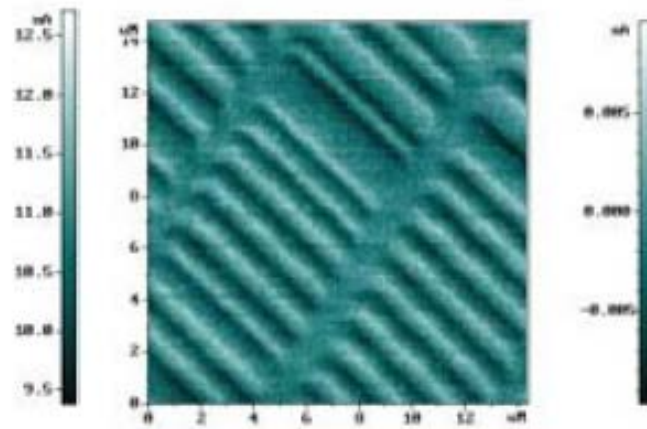


(б)



(в)

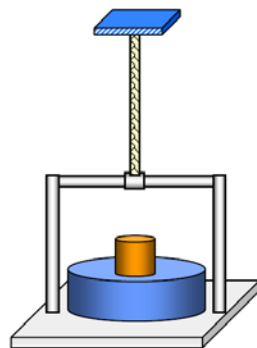
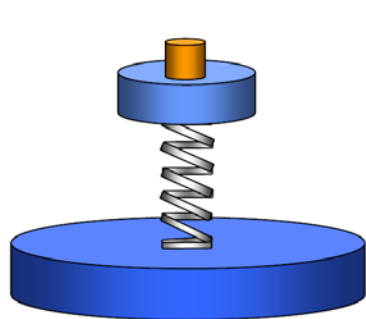
Фазовый контраст



(г)

Распределение сил

# Защита от внешних вибраций и акустических шумов



Сложная конструкция  
микроскопа ->

большое количество  
собственных частот ->

резонансы -> шумы

все элементы, кроме  
сканирующего – с высокими  
резонансными частотами

