



# Зондовая микроскопия: методы, теория, приложения

Лекция 5: динамические режимы  
атомно-силовой микроскопии

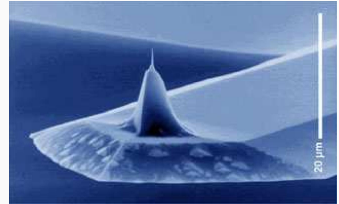
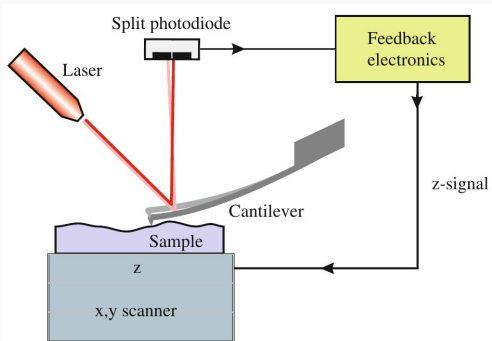
---

О.В. Синицына, Г.Б. Мешков, Я.В. Гиндикин

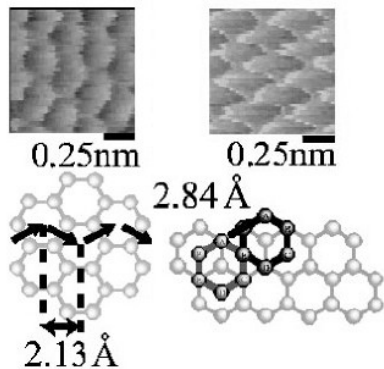
19 марта 2018г

Московский государственный университет  
Факультет наук о материалах

# АСМ: принципиальная схема

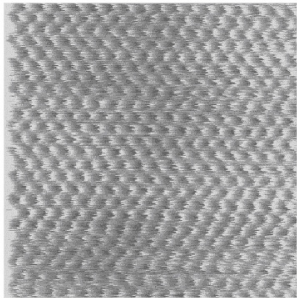


## АСМ: на пути к атомному разрешению



Проблемы контактного режима:

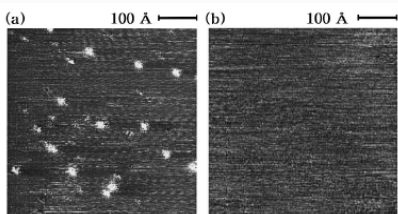
- Модификация кантилевера



## Проблемы контактного режима:

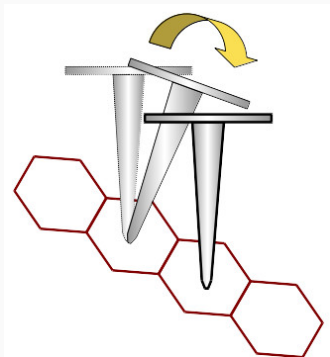
- Модификация кантилевера
- Псевдоатомное разрешение: видны лишь элементарные ячейки

# АСМ: на пути к атомному разрешению



## Проблемы контактного режима:

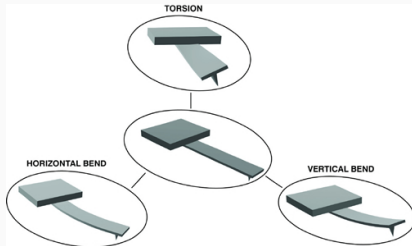
- Модификация кантилевера
- Псевдоатомное разрешение: видны лишь элементарные ячейки
- Точечные дефекты не видны



## Проблемы контактного режима:

- Модификация кантилевера
- Псевдоатомное разрешение: видны лишь элементарные ячейки
- Точечные дефекты не видны
- Движение с залипанием

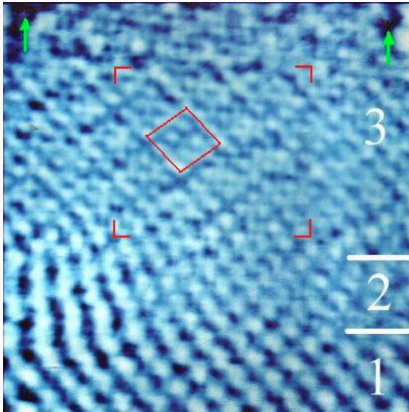
# АСМ: на пути к атомному разрешению



## Проблемы контактного режима:

- Модификация кантилевера
- Псевдоатомное разрешение: видны лишь элементарные ячейки
- Точечные дефекты не видны
- Движение с залипанием
- Закручивание кантилевера

# АСМ: на пути к атомному разрешению

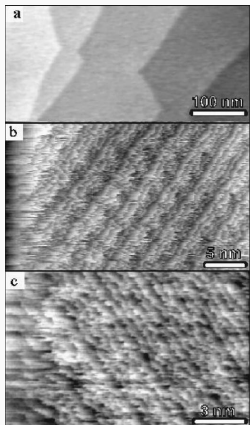


## Проблемы контактного режима:

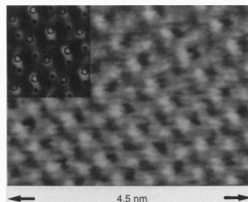
- Модификация кантилевера
- Псевдоатомное разрешение: видны лишь элементарные ячейки
- Точечные дефекты не видны
- Движение с залипанием
- Закручивание кантилевера
- Повреждение кантилевера и поверхности



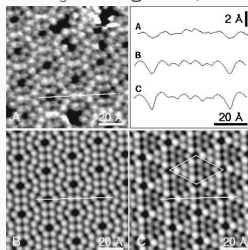
# АСМ: на пути к атомному разрешению



Si (111)-(7x7) в контактном режиме  
Кантилевер покрыт тефлоном  
Псевдоатомное разрешение  
Howald et al, 1994

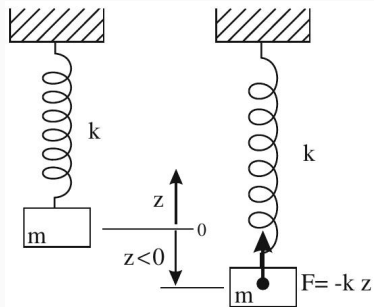


CaCO<sub>3</sub> Bining et al, 1993



Si (111)-(7x7) в AM AFM  
Erlandsson et al, 1997

# Линейные колебания



$$m\ddot{z} = -m\dot{z} - k(z - z_{\text{drive}})$$

$$z_{\text{drive}} = A_{\text{drive}} \cos(\omega t)$$

$$z = A \cos(\omega t + \phi)$$

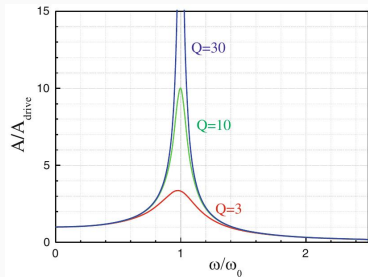
$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}$$

$$Q = \frac{\omega_0}{\gamma} = 2\pi \frac{\frac{1}{2}kA^2}{\gamma m \langle v^2 \rangle T}$$

$$\omega_{\text{max}}^2 = \omega_0^2 \left( 1 - \frac{1}{4Q^2} \right) \approx \omega_0^2$$

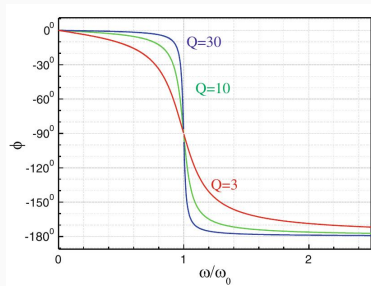
# Линейные колебания

АЧХ



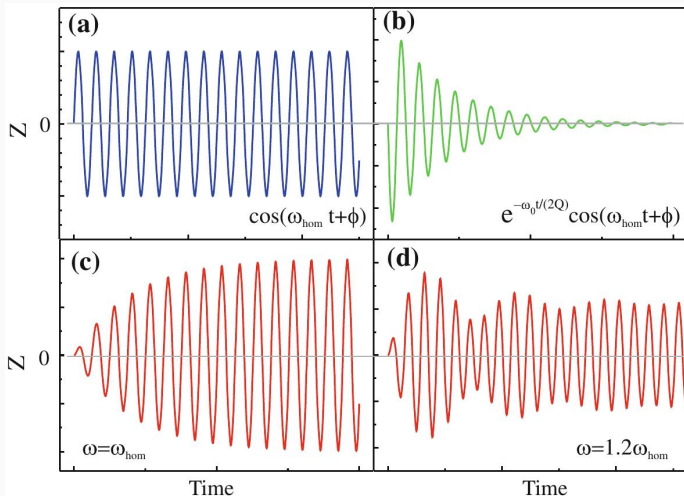
$$A^2 = \frac{A_{\text{drive}}^2}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{1}{Q^2} \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}$$

ФЧХ



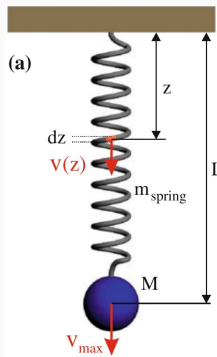
$$\tan(\phi) = \frac{-\frac{\omega}{\omega_0}}{Q\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)}$$

# Переходные процессы



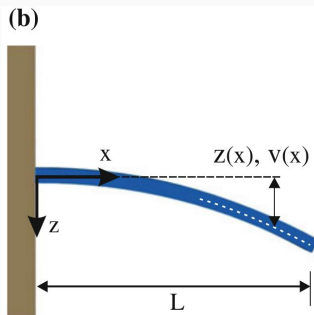
$$z(t) \propto e^{-\frac{\omega_0}{2Q} t} \cos(\omega_0 t - \phi), \quad \tau = QT$$

# Эффективная масса



$$dE = \frac{1}{2} \frac{m}{L} v^2(z) dz, \quad v(z) = v_{\max} \frac{z}{L}$$

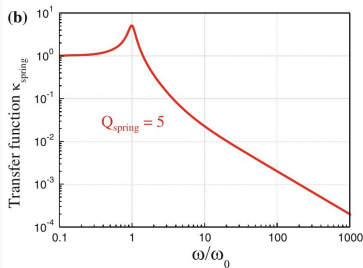
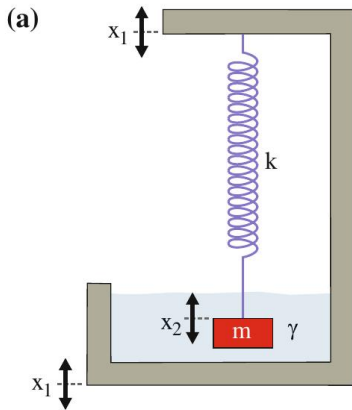
$$E = \frac{1}{2} m_{\text{eff}} v_{\max}^2, \quad m_{\text{eff}} = \frac{1}{3} m$$



$$v(x) = \frac{v_{\max}}{2L^3} (-x^3 + 3x^2L)$$

$$m_{\text{eff}} = 0.2357m$$

# Виброизоляция

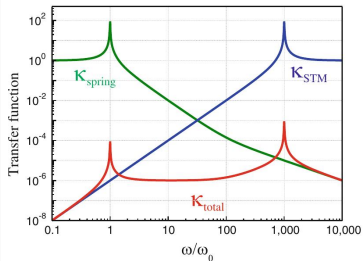
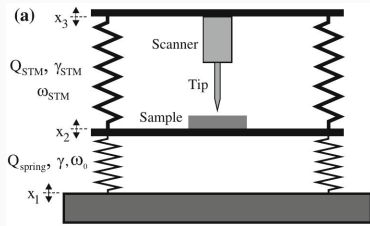


$$\ddot{x}_2 + \gamma(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + \omega_0^2(x_2 - x_1) = 0$$

$$\kappa(\omega) = \frac{|x_2|}{|x_1|} = \sqrt{\frac{\omega_0^4 + \gamma^2 \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}}$$

$$\kappa(\omega_0) = \sqrt{1 + Q^2}; \quad \kappa(\omega) \approx \frac{\omega_0^2}{\omega^2}, \quad \omega \gg \omega_0$$

# Виброизоляция



$$\ddot{x}_3 + \gamma_{STM}(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + \omega_{STM}^2(x_3 - x_2) = 0$$

$$\kappa_{STM}(\omega) = \frac{|x_3 - x_2|}{|x_2|} = \sqrt{\frac{\omega^4}{(\omega_{STM}^2 - \omega^2)^2 + \gamma_{STM}^2 \omega^2}} \approx \frac{\omega^2}{\omega_{STM}^2}, \quad \omega \ll \omega_{STM}$$

$$\kappa_{total} = \kappa_{STM} \kappa_{spring}$$

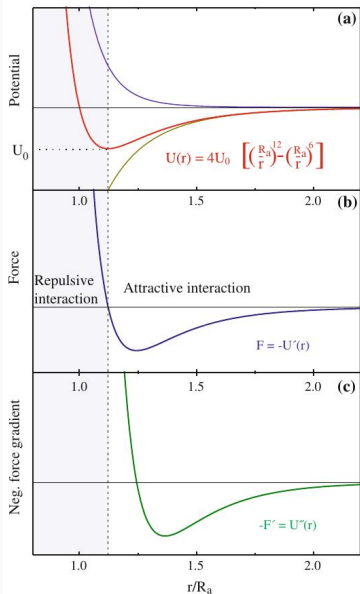
# Взаимодействие зонда и образца

## Потенциалы взаимодействия

$$U_{LJ}(r) = 4U_0 \left( \left( \frac{R_a}{r} \right)^{12} - \left( \frac{R_a}{r} \right)^6 \right)$$

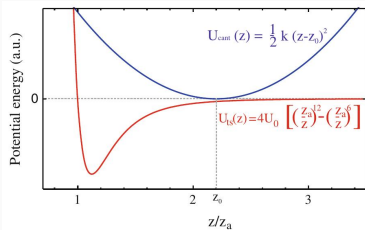
$$U_{vdW} = -\frac{HR}{6D}$$

$$H = 4\pi^2 U_0 \rho_{\text{tip}} \rho_{\text{sample}}$$

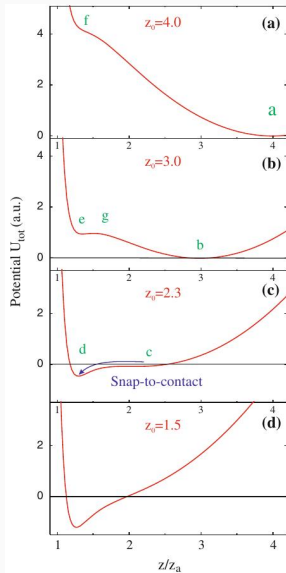




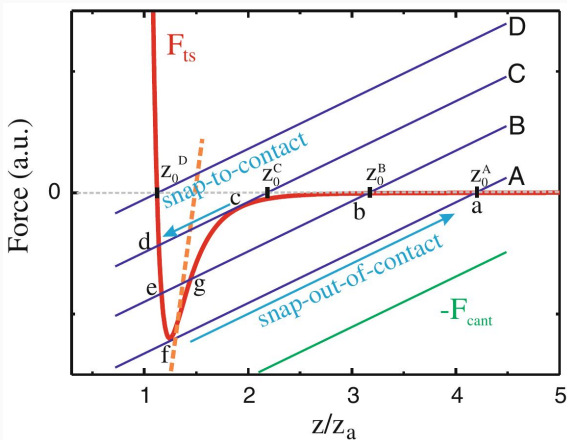
# Прыжок в контакт



$$U(z) = 4U_0 \left[ \left(\frac{Z_a}{z}\right)^{12} - \left(\frac{Z_a}{z}\right)^6 \right] + \frac{1}{2}k(z - z_0)^2$$



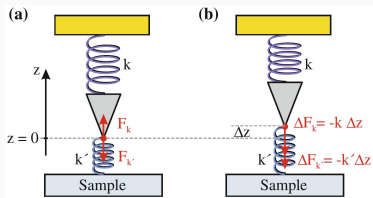
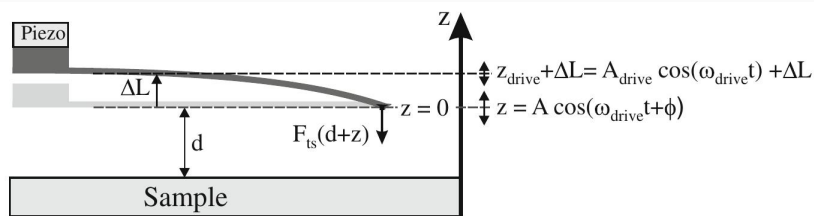
# Прыжок в контакт



$$F_{ts}(z) + F_{cant}(z, z_0) = 0$$

$$\frac{\partial^2 U_{ts}}{\partial z^2} + k > 0, \quad k > \frac{\partial F_{ts}}{\partial z}$$

# АСМ: амплитудная модуляция

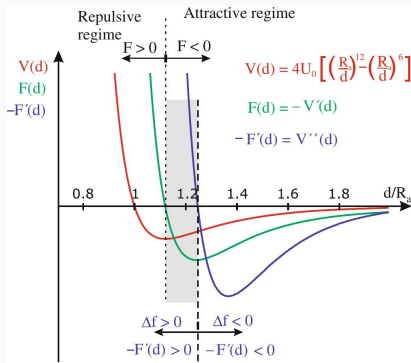
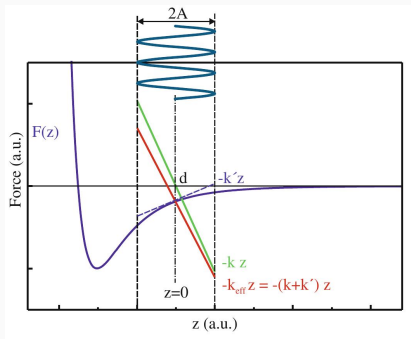


$$k' = - \left. \frac{\partial F_{ts}}{\partial z} \right|_{z=0}; \quad k_{\text{eff}} = k + k'$$

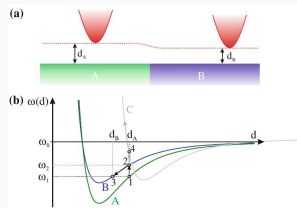
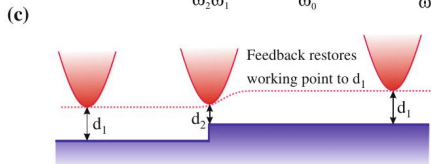
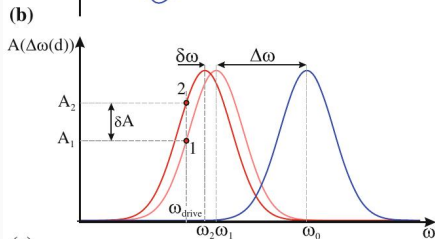
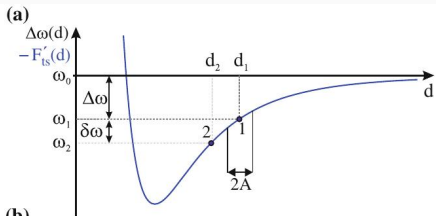
$$\omega'_0 = \sqrt{\frac{k_{\text{eff}}}{m}} = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{k'}{k}}$$

$$\Delta\omega = - \left. \frac{\omega_0}{2k} \frac{\partial F_{ts}}{\partial z} \right|_{z=0}$$

# АСМ: амплитудная модуляция

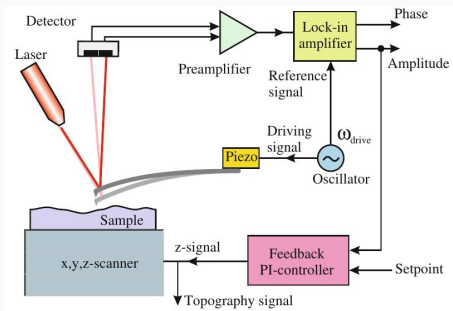


# АСМ: амплитудная модуляция

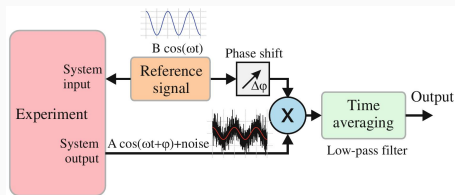


# АСМ: амплитудная модуляция

## Принципиальная схема

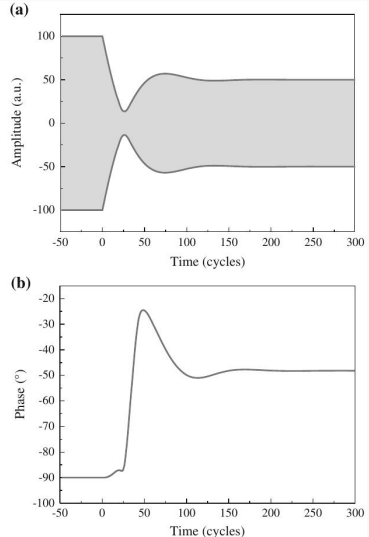


## Синхронный усилитель

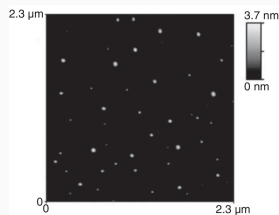
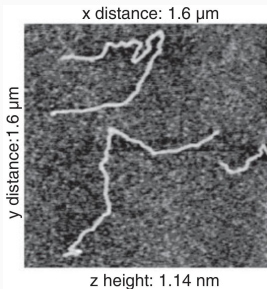
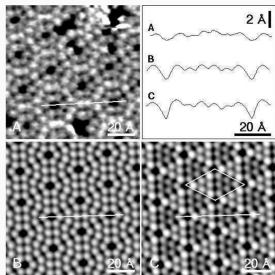


# Проблемы AM ACM

- Переходные процессы длятся долго:  $\tau \propto QT$
- Невозможность работы в вакууме
- Невозможность реконструкции вертикального силового профиля
- Сложность определения диссипативных сил



# АСМ: амплитудная модуляция





# Задачи

- С помощью акселерометра в Вашем смартфоне определите амплитуду строительных вибраций в Вашей лаборатории.
- Рассчитайте параметры виброизоляционной системы (стол на пружинках), гарантирующей коэффициент передачи вибраций не выше  $10^{-5}$  на рабочей частоте 1 kHz.
- Поместится ли эта система на Вашем лабораторном столе?



R. García.

*Amplitude modulation atomic force microscopy.*

John Wiley & Sons, 2011.



B. Voigtländer.

*Scanning probe microscopy: Atomic force microscopy and scanning tunneling microscopy.*

Springer, 2015.