



Зондовая микроскопия: методы, теория, приложения

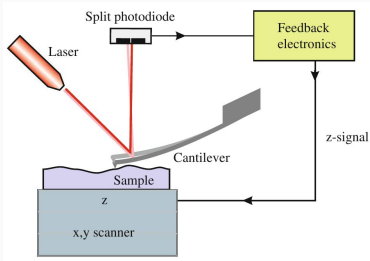
Лекция 6: динамические режимы
атомно-силовой микроскопии

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

26 марта 2018г

Московский государственный университет
Факультет наук о материалах

АСМ: контактный режим



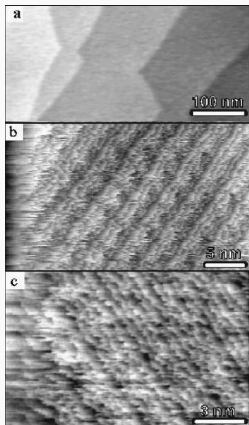
Плюсы контактного режима:

- + Быстрое сканирование
- + Возможность картирования латеральных сил
- + Сравнительная простота реализации/интерпретации

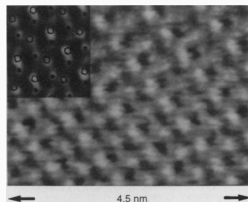
Минусы контактного режима:

- Модификация кантилевера
- Псевдоатомное разрешение
- Точечные дефекты не видны
- Движение с залипанием
- Проблема сканирования мягких и/или липких образцов
- Невозможность сканирования вязких жидкостей
- Закручивание кантилевера
- Повреждение кантилевера и поверхности

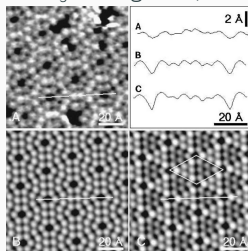
АСМ: на пути к атомному разрешению



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

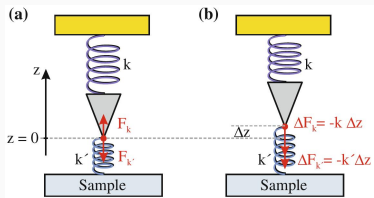


CaCO₃ Bining et al, 1993



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

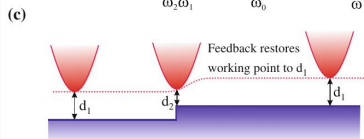
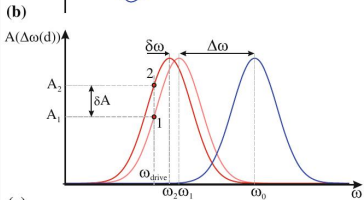
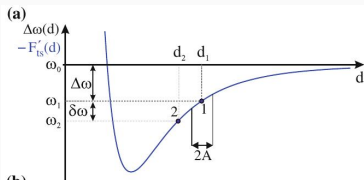
АСМ: амплитудная модуляция



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

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

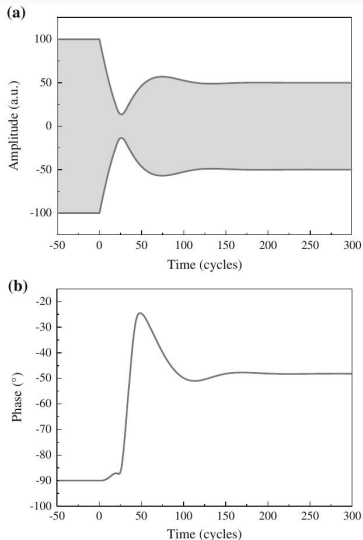
$$\Delta\omega = - \frac{\omega_0}{2k} \left. \frac{\partial F_{ts}}{\partial z} \right|_{z=0}$$



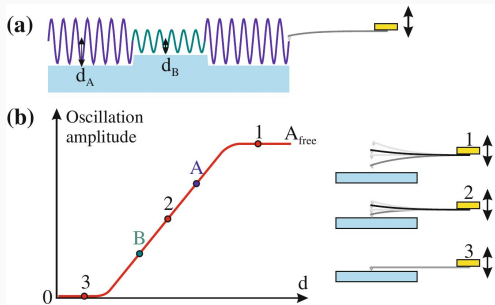
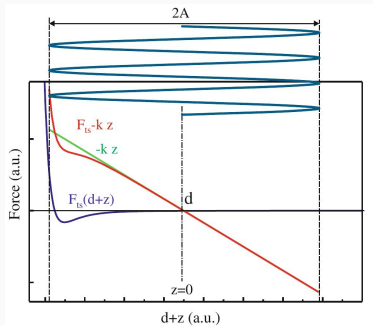
АСМ: амплитудная модуляция

Проблемы АМ АСМ

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



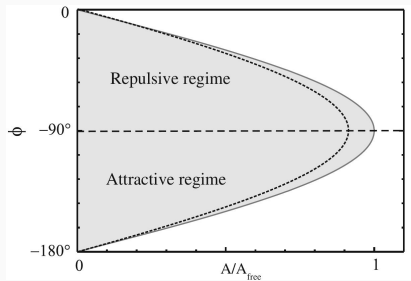
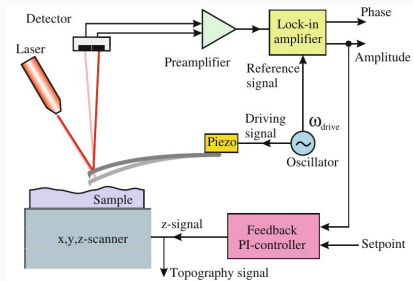
АСМ: ТЭППИНГ



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

$$z = A \cos(\omega_{\text{drive}} t + \phi)$$

АСМ: ТЭППИНГ

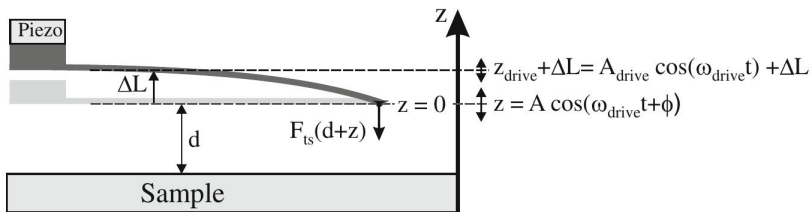


$$A_{\text{free}} = QA_{\text{drive}}$$

$$P_{\text{drive}} = \langle F\dot{z}_{\text{drive}} \rangle = \frac{1}{2}kA_{\text{drive}}A\omega \sin(-\phi)$$

$$Q = 2\pi \frac{E_{\text{osc}}}{E_{\text{drive}}} = \frac{A}{A_{\text{drive}}} \sin^{-1}(-\phi)$$

$$\frac{A}{A_{\text{free}}} = \sin(-\phi) \leftarrow \text{Setpoint}$$



$$m\ddot{z} = -\frac{m\omega_0}{Q}\dot{z} - k(z - (z_{\text{drive}} + \Delta L)) + F_{\text{ts}}(d + z)$$

$$-m\omega_0^2 z = \frac{m\omega_0^2 A}{Q} \sin(\omega_0 t + \phi) - k(z - \Delta L) + F_{\text{ts}}(d + z) + kA_{\text{drive}} \cos(\omega_0 t)$$

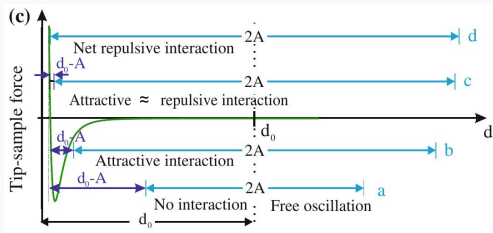
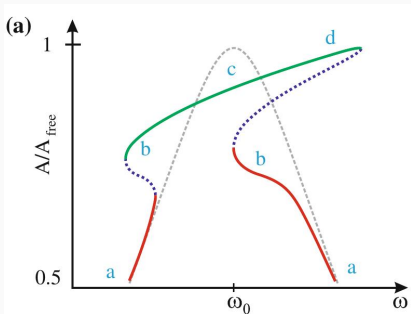
$$\langle F_{\text{ts}} \cdot z \rangle \equiv \frac{1}{T} \int_0^T F_{\text{ts}}(d + z) A \cos(\omega_0 t + \phi) dt = -\frac{1}{2} k A A_{\text{drive}} \cos(\phi)$$

$$\cos(\phi) = -\frac{2Q}{k A A_{\text{free}}} \langle F_{\text{ts}} \cdot z \rangle$$

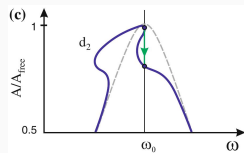
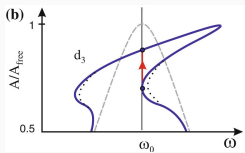
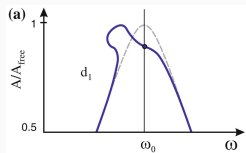
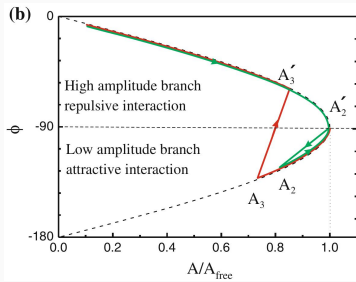
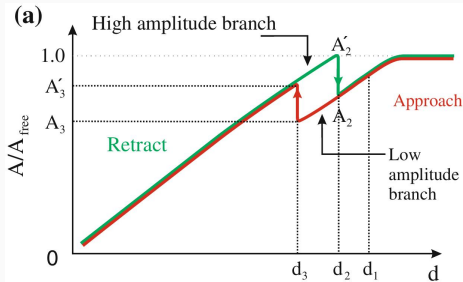
$\langle F_{\text{ts}} \cdot z \rangle > 0$ — в целом притягивающее взаимодействие, $\phi < -90^\circ$

$\langle F_{\text{ts}} \cdot z \rangle < 0$ — в целом отталкивающее взаимодействие, $\phi > -90^\circ$

Тэппинг: резонансная кривая

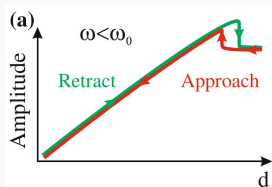


Тэппинг: амплитудная неустойчивость

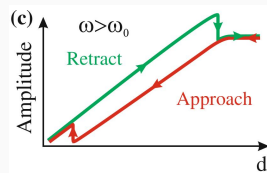
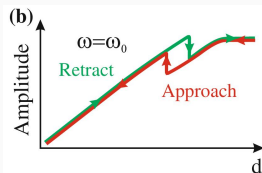


Тэппинг: подстройка частоты

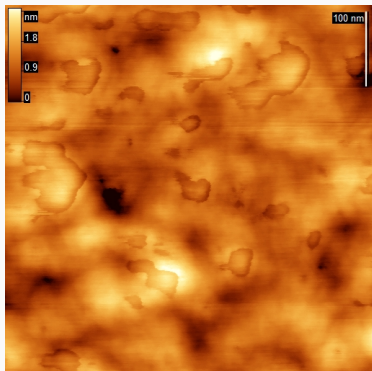
Большая амплитуда
Жесткие образцы



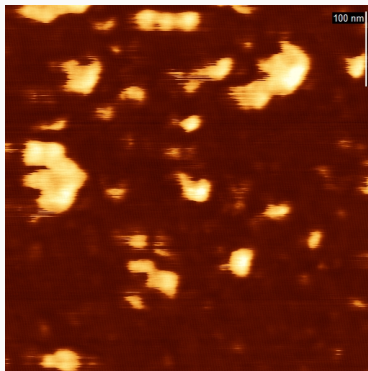
Малая амплитуда
Мягкие образцы



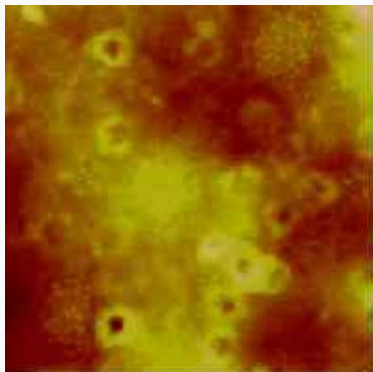
Au: топография



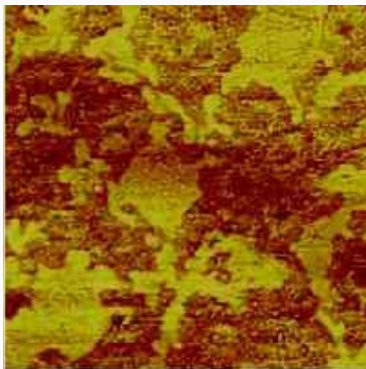
Au: фазовый контраст



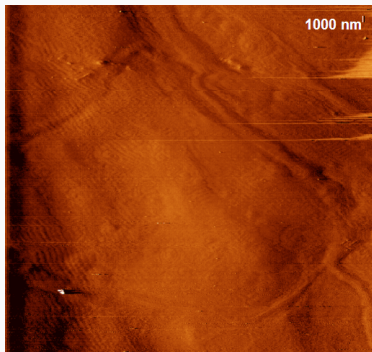
Полимер: топография



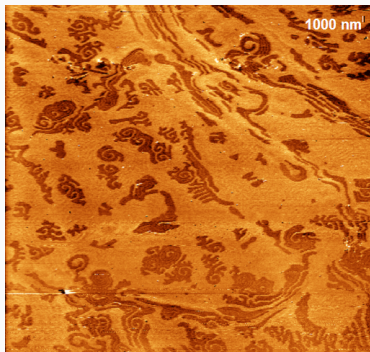
Полимер: фазовый контраст



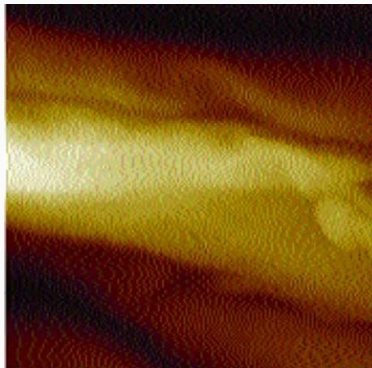
Олигомер: топография



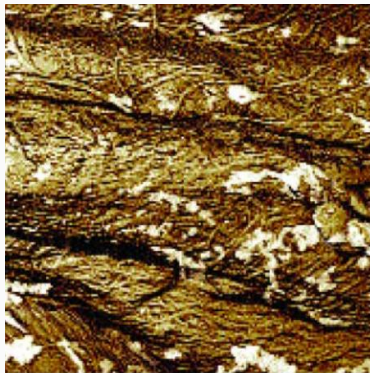
Олигомер: фазовый контраст



Древесина: топография



Древесина: фазовый контраст



Ключевые особенности:

- Тэппинг — полуконтактный динамический режим АСМ
- Колебания происходят на фиксированной частоте, близкой к резонансной
- Большая амплитуда колебаний ($\approx 50nm$) с заходом в область отталкивания
- Ангармонизм колебаний приводит к бистабильности
- Переключение между модами колебаний можно определить по фазовому контрасту

Преимущества тэппинга:

- Высокое разрешение даже на мягких образцах
- Минимизируется повреждение образца за счет трения
- Малая чувствительность к капиллярным силам
- Возможность сканирования в условиях залипания
- Возможность изучения диссипативного взаимодействия с образцом



F. J. Giessibl.

Advances in atomic force microscopy.

Reviews of modern physics, 75(3):949, 2003.



F. J. Giessibl.

Afm's path to atomic resolution.

Materials Today, 8(5):32, 2005.



B. Voigtländer.

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

Springer, 2015.