Зондовая микроскопия: методы, теория, приложения

Лекция 7, часть 1: динамические режимы атомно-силовой микроскопии

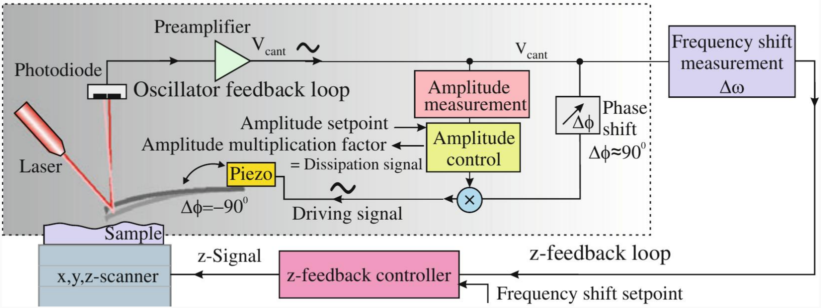
О.В. Синицына, Г.Б. Мешков, Я.В. Гиндикин

2 апреля 2018г

Московский государственный университет
Факультет наук о материалах

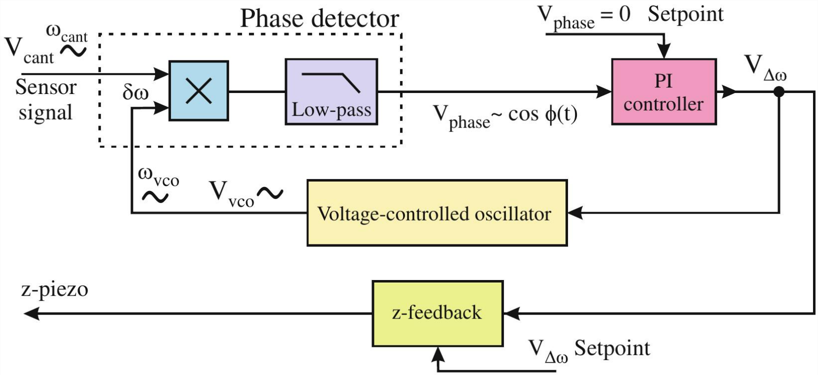
АСМ: частотная модуляция

Кантилевер всегда колеблется на своей резонансной частоте
Амплитуда колебаний поддерживается постоянной



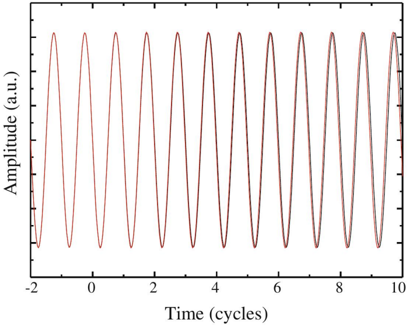
АСМ: частотная модуляция

Метод фазовой автоподстройки частоты



АСМ: частотная модуляция

Мгновенное следование за изменением резонансной частоты



$$\frac{\delta\omega}{\omega_0} = 5 \times 10^{-3}$$

Кантилевер с самовозбуждением

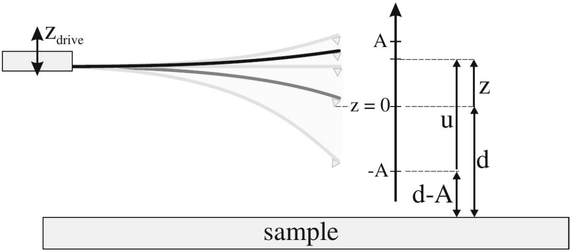
$$\ddot{z} + \frac{\omega_0}{Q}\dot{z} + \omega_0^2 z = \frac{\omega_0^2}{Q} z(t - t_0)$$

$$\omega t_0 = -\frac{\pi}{2}$$

$$\Delta E_{\mathrm{AM}} = \frac{2\delta A}{A} E_{\mathrm{cant}}$$

$$\Delta E_{\mathrm{FM}} = \frac{2\delta\omega}{\omega} E_{\mathrm{cant}}$$

FM AFM: Сдвиг резонансной частоты



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

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

$$z = A\cos(\omega t + \phi), \quad \phi = -\frac{\pi}{2}$$

FM AFM: Сдвиг резонансной частоты

$$\delta f = -\frac{f_0}{A^2 k}\langle F_{ts}(t)\cdot z(t)\rangle$$

$$\langle F_{ts}(t)\cdot z(t)\rangle \equiv \frac{1}{T}\int_0^T F_{ts}(d + A\sin\omega t)A\sin\omega t dt$$

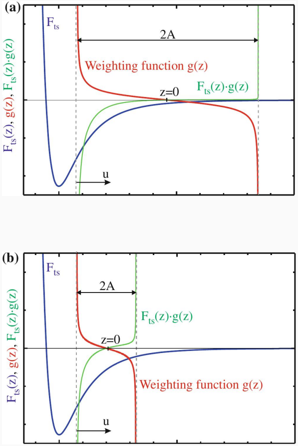
$$\delta f = -\frac{f_0}{\pi A^2 k}\int_{-A}^{A} F_{ts}(d+z)g(z)dz\,,$$

$$g(z) = \frac{z}{\sqrt{A^2 - z^2}}$$

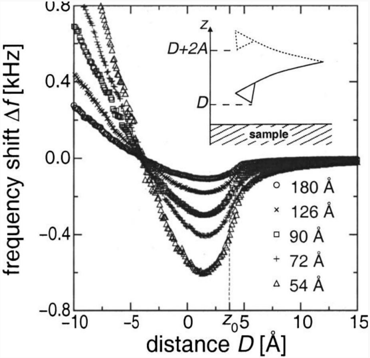
$$\delta f(d) = -\frac{f_0}{2k}\frac{\partial F_{ts}(d+z)}{\partial z}\bigg|_{z=0} \quad \text{при малых } A$$

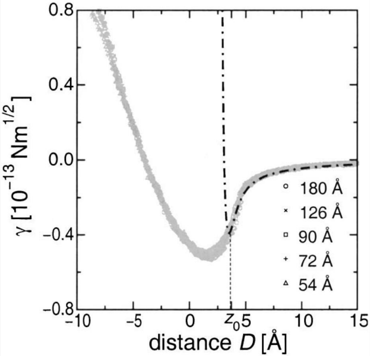
$$u = z + A, \quad u \ll A$$

$$\delta f = \frac{f_0}{\sqrt{2}\pi A^{3/2}k}\int_0^\infty \frac{F_{ts}(d-A+u)}{\sqrt{u}}du$$



FM AFM: нормализованный сдвиг частоты





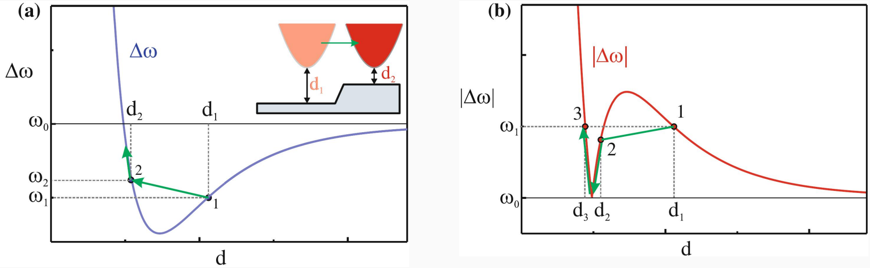
$\delta f \propto \dfrac{1}{A^{3/2}}$ при больших A

$$\gamma = \delta f \frac{kA^{3/2}}{f_0}$$

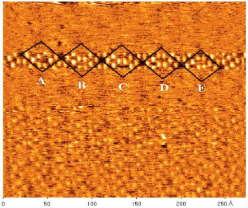
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \frac{F_{\text{ts}}(d - A + u)}{\sqrt{u}} du$$

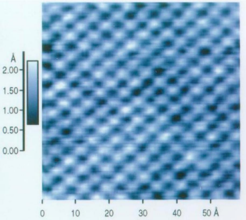
АСМ: частотная модуляция

Немонотонность частотного сдвига
может приводить к ошибкам обратной связи

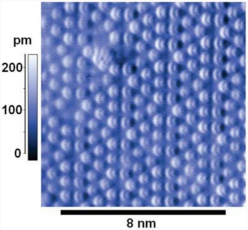


FM AFM: примеры

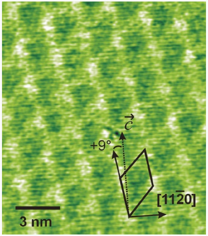




KCl, Patrin 1995



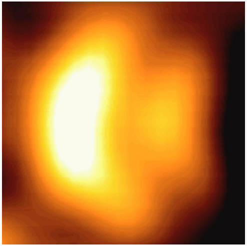
Si (111)-(7x7), Giessibl 1995



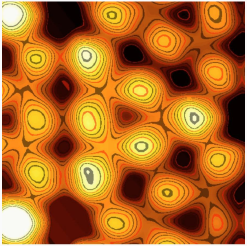
Al_2O_3, Barth et al, 2001

FM AFM: высокое разрешение

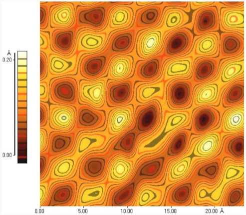
Si (111)-(7x7), Giessibl 2000



Si (111)-(7x7), Giessibl 2001



KCl(001)



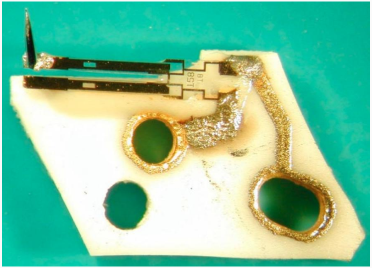
Оптимальный режим: жесткие кантилеверы, малые амплитуды

$k \approx 2kN/m, \quad A \approx 2 \ldots 5$ Å

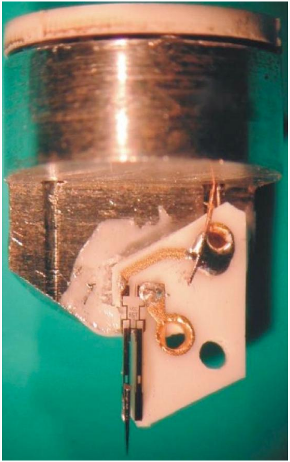
FM AFM: высокое разрешение

Кантилеверы на кварцевых вилках

Вертикальный

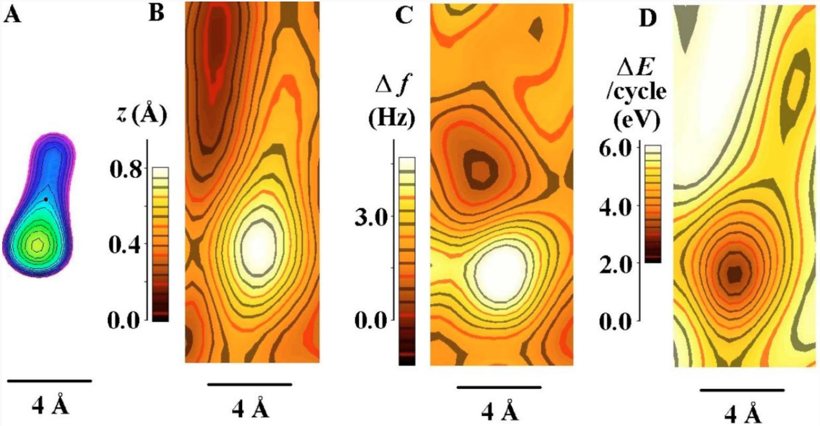


Латеральный



FM AFM: высокое разрешение

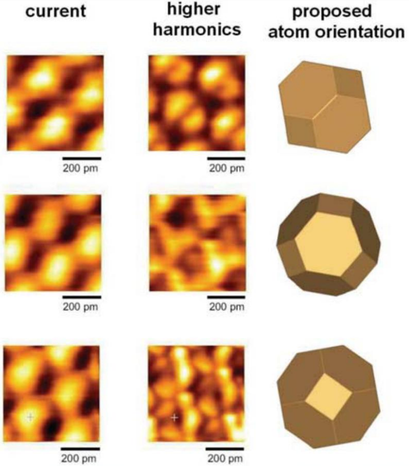
Латеральная микроскопия адатома на Si(111)



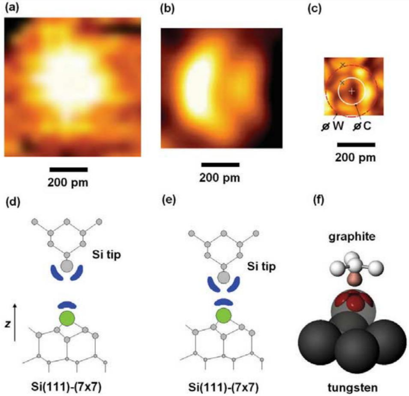
Giessibl, 2003

FM AFM: экстремально высокое разрешение

Графит, W кантилевер



Эволюция разрешения



Giessibl, 2005

AFM: сводная таблица

	C-AFM	Tapping	AM-AFM	FM-AFM
Feedback	F_{ts}	A/A_0 10 < A < 100 nm	A/A_0 A < 10 nm	$\delta\omega$
Cantilever spring constant k $[N/m]$	~ 1	$\sim 20 \dots 500$	$\sim 10 \dots 10^6$	$\sim 10 \dots 10^6$

Задачи

- Выведите следующую формулу для связи сдвига резонансной частоты самовозбуждающегося кантилевера с силовым профилем:

$$\delta f = -\frac{f_0}{A^2 k}\langle F_{\text{ts}}(t) \cdot z(t)\rangle$$

- Найдите ее асимптотику в двух случаях: $A \to 0$ и $A \to \infty$
- (Опционально) Воспользовавшись формулой

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \frac{F_{\text{ts}}(d - A + u)}{\sqrt{u}} du$$

  для нормализованного частотного сдвига, попытайтесь реконструировать силовой профиль, отвечающий результатам измерений частотного сдвига из работы [H. Hölscher et al, Phys. Rev. **B** 61, 12678 (2000)].

Литература

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.