



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Kvarcoszcillátoros erőmérés atomi méretű kontaktusokban

Magyarkuti András

I. évf. MSc. fizika

Témavezetők: Dr. Halbritter András

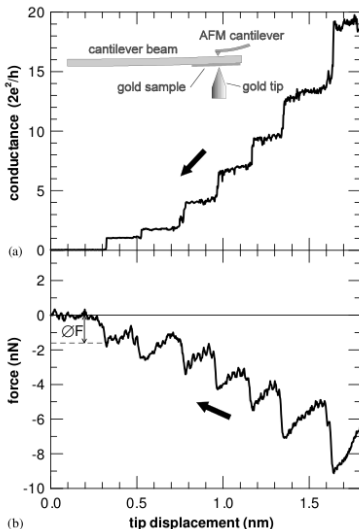
Geresdi Attila

BME Fizika Tanszék

2011. November 24.

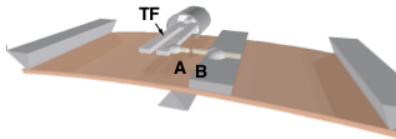
Erő mérése atomi méretű kontaktusban

- ▶ Kontaktus létrehozása, vezetőképesség mérése: STM tűt használva.
- ▶ Erő mérése AFM mikroszkóppal.
- ▶ Egyik első bizonyíték az atomi átrendeződésekre.
- ▶ Egyatomos kontaktus rugóállandója $k_a \approx 3 - 4 \text{ N/m}$.



[G. Rubio et al., Physical Review Letters 76 2302–2305]

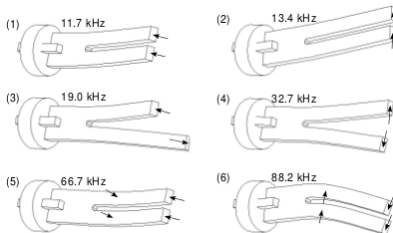
- ▶ Éles rezonanciával rendelkező, hangvilla alakú kvarcoszcillátor.
- ▶ Megvalósítható az MCBJ mérést kiegészítve:



[G. Rubio et al., Physical Review Letters 93, 116803]

- ▶ A mintavezeték egyik végét a kvarcoszcillátor egyik ágához rögzítem.
- ▶ A kvarcot kis amplitúdóval rezgetjük a vezeték széthúzása közben, a rezonanciafrekvencia eltolódik.
- ▶ Az atomi kontaktus rugóállandóját méri!

► Rezgési módusok:



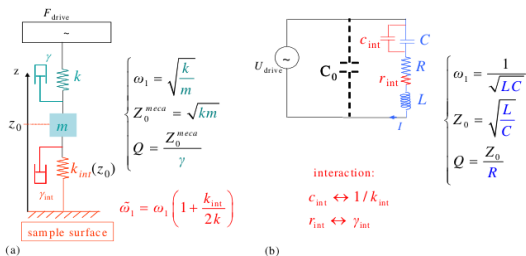
[Hélène le Sueur: Cryogenic AFM-STM for mesoscopic physics, Thesis (2007)]

► Szimmetrikus módus (4):

- Alátámasztásra nem hat se erő se forgatónyomaték
- Legnagyobb jóságú tényező.

► Elektródák kialakítása: csak a szimmetrikus módust (4) lehet gerjeszteni és detektálni.

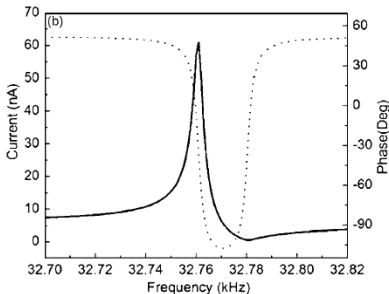
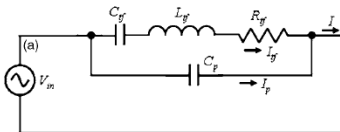
Hangvilla alakú kvarcoszcillátor helyettesítő képei



Electrical		Mechanical		ratio Electrical/Mechanical [unit]	Energy correspondence
parameter	typical value [4K-300K]	parameter	typical value		
q (charge)		z (position)		α [C/m]	
U		F ₀		l/kx [V/N]	
L	200 kH	m	43 μg	$\frac{1}{\alpha^2}$ [NmA ² /kg]	$\frac{1}{2}m\dot{z}^2 = \frac{1}{2}l\dot{q}^2$ kinetic
C	0.13 fF	1/k	$5.5 \cdot 10^{-4}$ mN ⁻¹	α^2 [F / mN ⁻¹]	$\frac{1}{2}kz^2 = \frac{q^2}{2c}$ potential
R or L ₀ /Q	500 k - 10 M	γ or m ₀ /Q	(200 μg/s)	$\frac{1}{\alpha^2}$	$\gamma\dot{z}^2 = r\dot{q}^2$ dissipation

[Hélène le Sueur: Cryogenic AFM-STM for mesoscopic physics, Thesis (2007)]

Hangvilla alakú kvarcoszcillátor rezonanciagörbéje

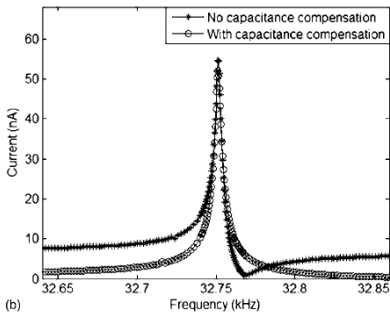
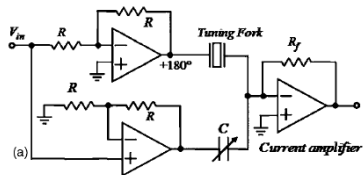


[Yexian Qin et al, REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 78, 063704]

- ▶ Asszimmetrikus rezonanciagörbe a szórt kapacitások miatt.
- ▶ Minimum: $f_p = f_0 \sqrt{1 + C_t f / C_p}$

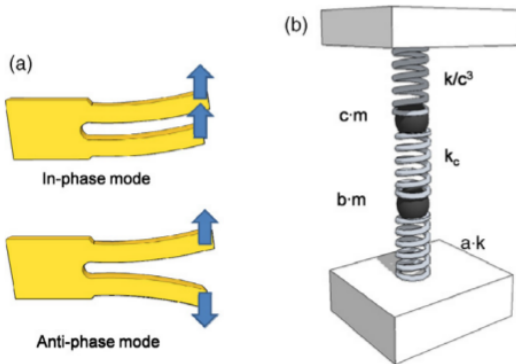
Hangvilla alakú kvarcoszcillátor rezonanciagörbéje

- ▶ Kapacitás kompenzáció:



[Yexian Qin et al, REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 78, 063704]

Kvarcoszcillátort leíró realiztikusabb modell



[A. Castellanos-Gomez et al, Nanotechnology 20 (2009) 215502 (8pp)]

- ▶ a - az erőgradiens hatására változó rugóállandó
- ▶ b - az egyik ágra ragasztott plusz tömeg
- ▶ c - az ágak hosszának különbsége

Kvarcoszcillátort leíró realiztikusabb modell

- ▶ Mozgásegyenletek:

$$bm\ddot{x}_1(t) + (ak + k_c)x_1(t) - k_c x_2(t) = 0$$

$$cm\ddot{x}_2(t) + (k/c^3 + k_c)x_2(t) - k_c x_1(t) = 0$$

- ▶ Rezonancia frekvenciák:

$$f_0^{in-phase} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad f_0^{anti-phase} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k + 2k_c}{m}}$$

- ▶ Frekvencia eltolódás az erőgradiens változás hatására:

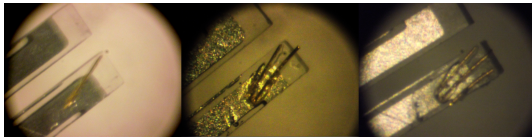
$$b = 1, c = 1, \Delta k \ll k \rightarrow \frac{\Delta f_0^{anti-phase}}{f_0^{anti-phase}} \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta k}{2(k + 2k_c)}$$

- ▶ Effektív rugóállandó

$$k_{eff} = 2(k + 2k_c) = 2k \left(\frac{f_0^{anti-phase}}{f_0^{in-phase}} \right)^2$$

Kvarcoszcillátor kalibrálása

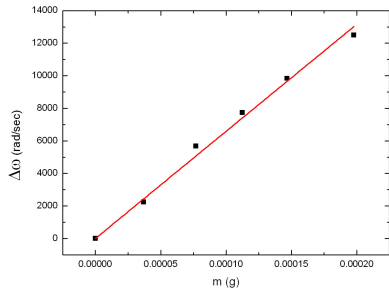
- ▶ 50 μm átmérőjű aranzsálakat ragasztottam a kvarcoszcillátor egyik ágára.



$$\omega = \sqrt{\frac{k_{\text{eff}}}{m_{\text{eff}} + m}} \approx \sqrt{\frac{k_{\text{eff}}}{m_{\text{eff}}}} - \frac{m}{2m_{\text{eff}}} \sqrt{\frac{k_{\text{eff}}}{m_{\text{eff}}}} \dots$$

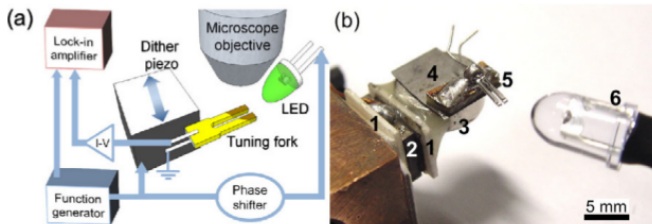
$$\Delta\omega = \omega_0 - \omega = \frac{\omega_0}{2m_{\text{eff}}} \cdot m$$

- ▶ $m_{\text{eff}} = 1.56 \cdot 10^{-3} \text{ g}$
- ▶ $k_{\text{eff}} = \omega_0^2 \cdot m_{\text{eff}} = 66.3 \text{ kN/m}$



Becslés a méretek és Young modulus alapján: $k = 25.6 \text{ kN/m}$.

- ▶ Rezgési módusok frekvenciáját mérve:

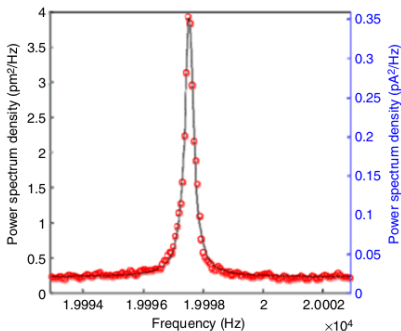


[A. Castellanos-Gomez et al, Nanotechnology 20 (2009) 215502 (8pp)]

$$k_{eff} = 2k \left(\frac{f_0^{anti-phase}}{f_0^{in-phase}} \right)^2$$

- ▶ Hőmérséklet fluktuációból származó zaj mérésével:

$$k_{eff} = \frac{k_B T}{\langle x^2 \rangle}$$

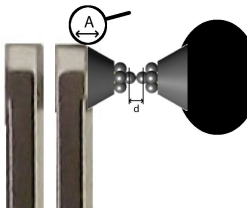


[A. Castellanos-Gomez et al, Nanotechnology 20 (2009) 215502 (8pp)]

- ▶ Amplitúdó - áram kalibrációt használva, integrálással számítható: $\langle x^2 \rangle$

- ▶ A hangvilla ágának amplitúdója elhanyagolható kell legyen a tipikus atom-atom távolsághoz képest:

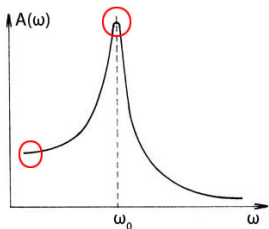
$$A \ll d$$



- ▶ A kvarcoszcillátor ágának elmozdulása DC feszültség hatására: $A(0)$

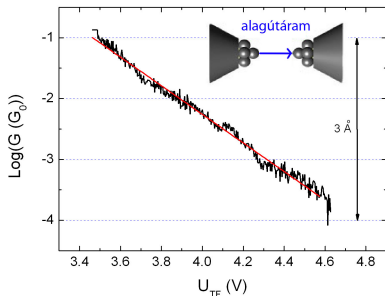
$$A(\omega) = \frac{A(0)\omega_0^2}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}$$

$$A(\omega_0) = A(0) \cdot Q$$



Rezgési amplitúdó beállítása

- ▶ Teljesen szétszakított kontaktus mellett a kvarcoszcillátort DC feszültséggel deformálok.



- ▶ Az alagút tartományban a vezetőképesség:

$$G = C \cdot \exp \left\{ -\frac{\sqrt{8m\Phi}}{\hbar} d \right\}$$

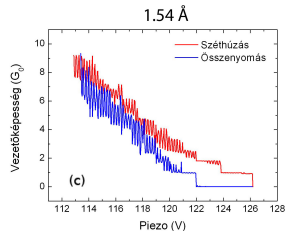
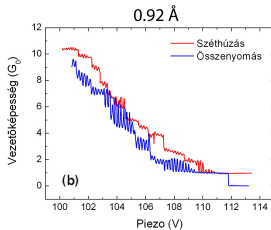
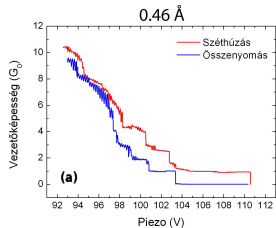
- ▶ Adott amplitúdójú rezgéshez kiszámítható a meghajtójel amplitúdója rezonanciafrekvencián:

$$1 \text{ \AA} \xrightarrow{\text{DC}} 0.37 \text{ V}$$

$$1 \text{ \AA} \xrightarrow{\text{AC} (\omega_0)} 0.37 \text{ V/Q} \approx 30 \text{ \mu V}$$

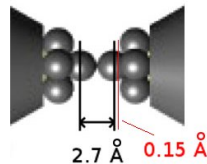
Rezgési amplitúdó beállítása

Mért vezetőképesség görbék a rezgés amplitúdóját növelve:



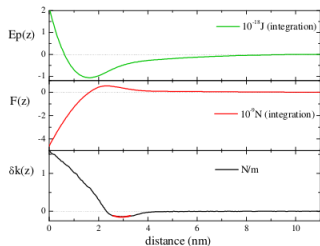
Vezetőképesség méréskor: $\approx 0.15 \text{ \AA} \rightarrow 5 \mu\text{V}$ meghajtás $\rightarrow \approx 1 \text{ nA}$ áram.

- ▶ A tipikus atom-atom távolság: $\approx 2.7 \text{ \AA}$, ehhez képest a rezgés amplitúdója elhanyagolhatóan kicsi:



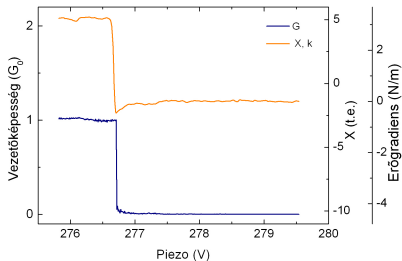
Erőmérés a rezonanciafrekvenciához közel

Potenciál, erő és k az elektródák távolságának függvényében



[Hélène le Sueur: Cryogenic AFM-STM for mesoscopic physics, Thesis (2007)]

Összenyomás

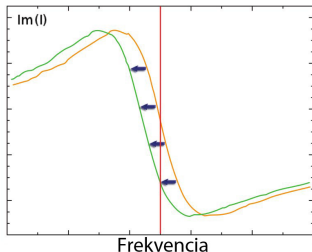


- ▶ Nagy távolság esetén: Van der Waals erő.
- ▶ Kis távolság: kémiai kölcsönhatás.
- ▶ Lennard Jones potenciál.

Rezonanciafrekvencia eltolódásának detektálása

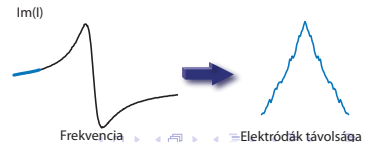
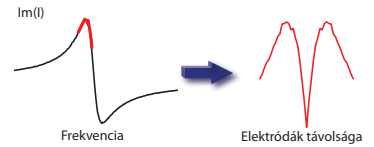
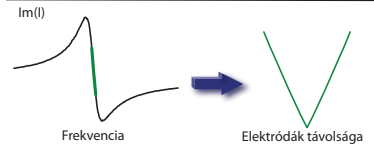
Fix frekvenciás mérési mód:

- ▶ Fix frekvenciával rezgetem a kvarcoszcillátort.
- ▶ Mérem az áram képzetes részét.



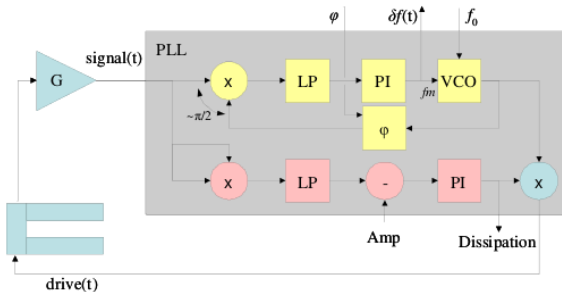
- ▶ Rezonanciafrekvenciához közel: jó felbontás, szűk tartomány.
- ▶ Rezonanciafrekvenciától távol: rosszabb felbontás, szélesebb tartomány.

A rugóállandó változása egy atomi átrendeződés hatására:



Frekvencia modulált mérési mód

- ▶ Szabályozás: frekvenciára és amplitúdóra is!

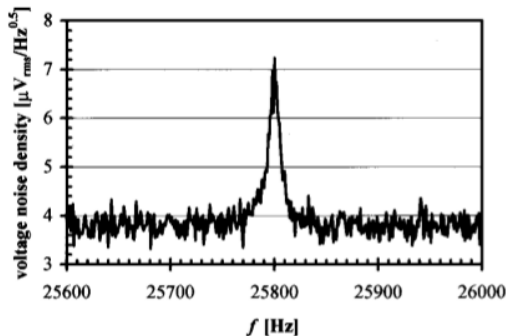


[Hélène le Sueur: Cryogenic AFM-STM for mesoscopic physics, Thesis (2007)]

- ▶ Előnyök:

- ▶ Nagy eltolódások detektálása.
- ▶ Gyorsabb mérés: $\frac{1}{\tau} = \frac{\omega_0}{2Q} \approx 2 \text{ Hz}$ helyett akár 100 Hz.

Zaj spektrum:



[Franz J. Giessibl, Appl. Phys. Lett. **76**, 11]

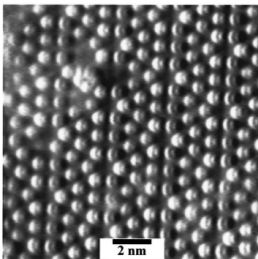
$$k\langle z_{th}^2 \rangle = k_B T$$

$$A = \sqrt{\frac{k_B T}{k}}$$

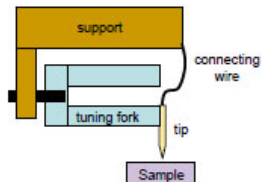
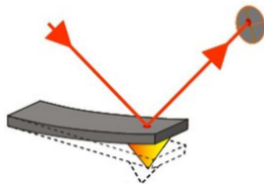
$$k = 1800 \text{ N/m}, T = 300 \text{ K} \rightarrow A = 1.5 \text{ pm}$$

Érzékelő:

- ▶ Cantilever
 - ▶ Detektálás: optikai, elektromos.
 - ▶ Alacsony hőmérsékleten nem alkalmazható.
 - ▶ Kis merevség: $k \approx k_a$
- ▶ Hangvilla alakú kvarc
 - ▶ Alacsony hőmérsékleten is alkalmazható.
 - ▶ Nagy merevség: $k \approx \text{kN}$



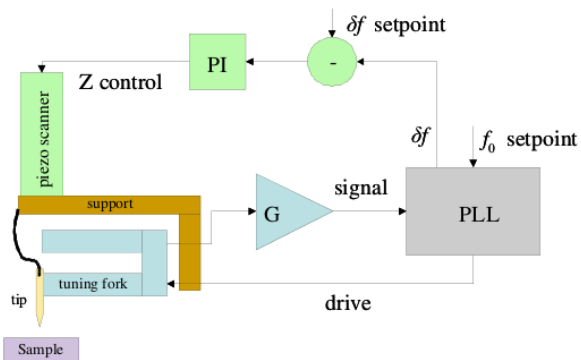
[Franz J. Giessibl, Appl. Phys. Lett. 76, 11]



[Hélène le Sueur: Cryogenic AFM-STM for mesoscopic physics, Thesis (2007)]

Felület vizsgálata:

- ▶ Pásztázás a felület felett
- ▶ A piezót mozgatva állandónak tartjuk a frekvenciaeltolódást



[Hélène le Sueur: Cryogenic AFM-STM for mesoscopic physics, Thesis (2007)]

Köszönöm a figyelmet!