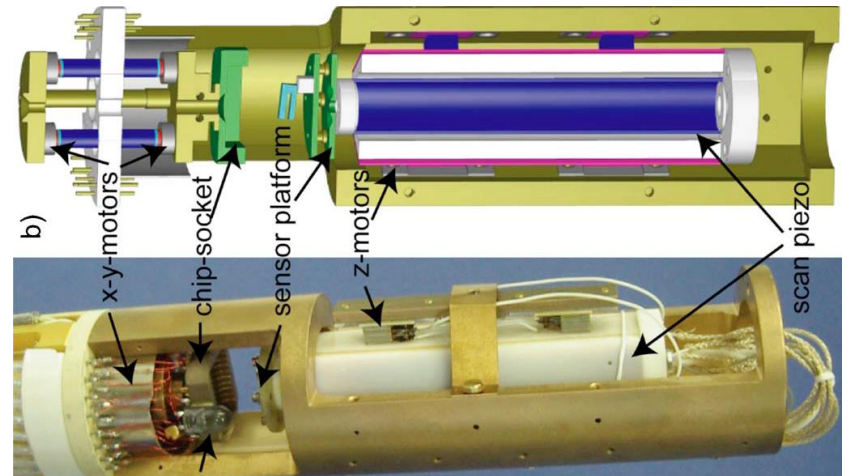
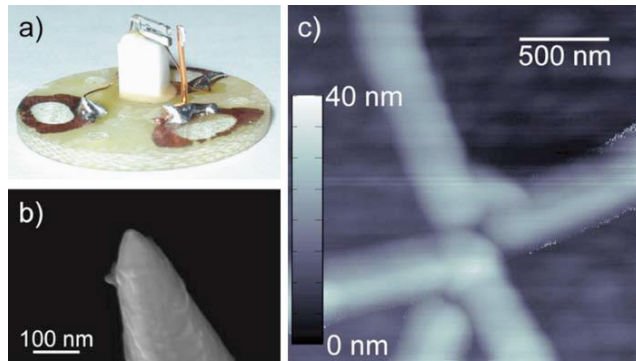


# Dilution Refrigerator Cooled Scanning Force Microscope

Stephan Schnez: Transport Properties and Local Imaging of Graphene Quantum Dots

Arnd E. Gildemeister: Scanning Gate Microscopy of Semiconductor Quantum Circuits

ETH Zurich



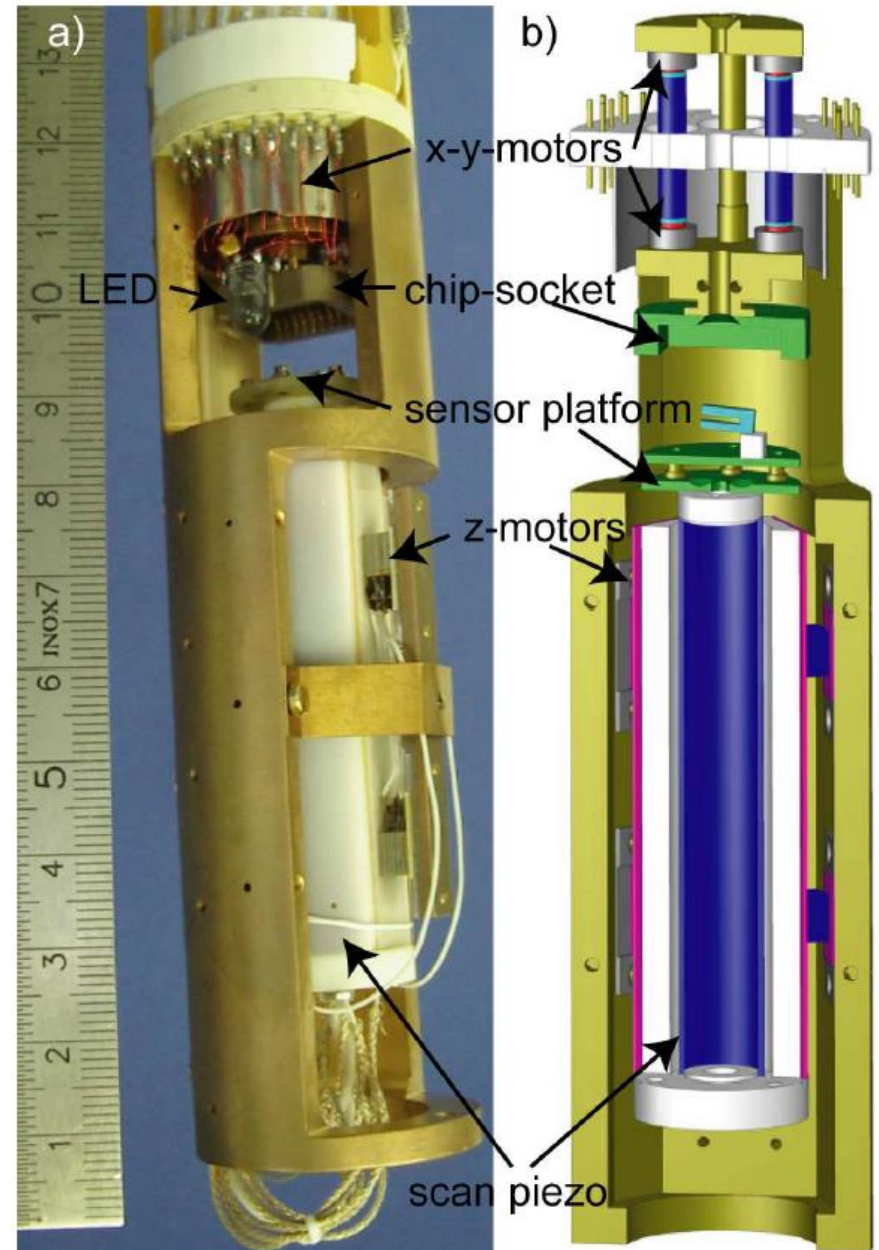
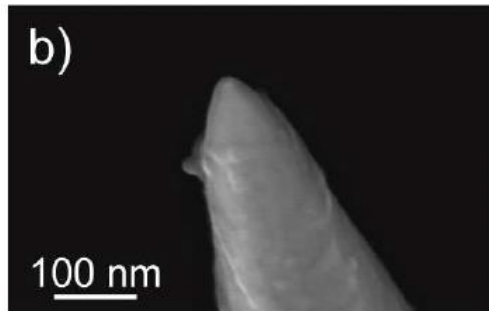
Magyarkuti András  
Nanofizika szeminárium  
2012. November 8.

# Mikroszkóp felépítése

- Dilution Refrigerator:  $T=40\text{mK}$
- $7 \times 7 \mu\text{m}$  scan range
- Slip-stick motor:  $3 \times 3 \text{ mm}$
- Tuning fork szenzor



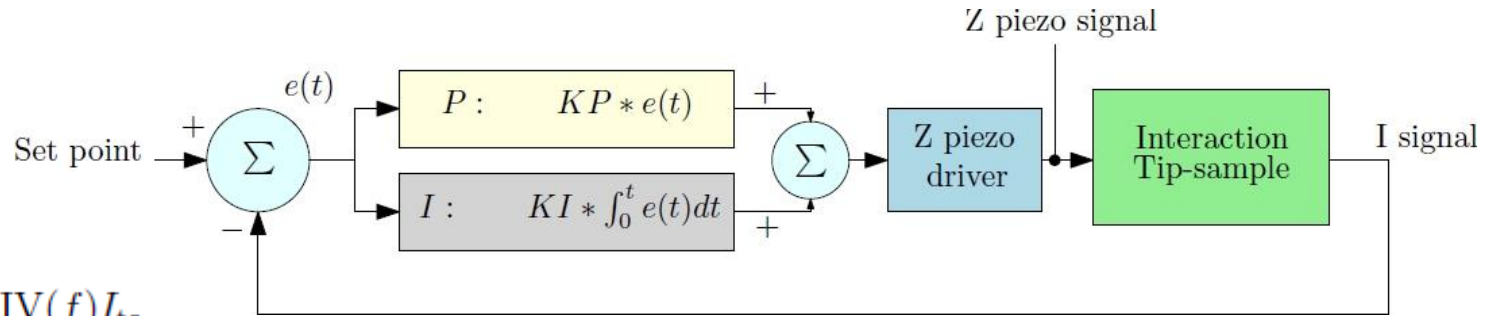
- Tű: elektro-kémiai marással



# STM Feedback

Hibajel:

$$V_{in}(t) = I_{set} - IV(f)I_{tc}$$



Piezo vezérlése:  $PIC(V_{in}) = PV_{in}(t) + I \int_0^t V_{in}(\tau) d\tau$  Szabályozó kör időállandója:  $\tau_{PI} = P/I$   
 sávszélessége:  $f_{PI} = 1/(2\pi\tau_{PI})$

Átviteli függvények:

- IV konverter:  $IV(f) = \frac{1}{1 + i\frac{f}{f_{IV}}}$
- PI szabályozó:  $PIC(f) = P \left(1 - i\frac{I}{P\omega}\right) = P \left(1 - i\frac{1}{\omega\tau_{PI}}\right) = P \left(1 - i\frac{f_{PI}}{f}\right)$

Alagútáram sorbafejtve:

$$I_{tc}(z_0 + \Delta z, V_0 + \Delta V) \approx I(z_0, V_0) + \underbrace{\frac{\partial}{\partial z} I(z, V_0) \Big|_{z=z_0}}_{\beta} \Delta z + \underbrace{\frac{\partial}{\partial V} I(z_0, V) \Big|_{V=V_0}}_{\alpha} \Delta V.$$

# STM Feedback

A Zpiezo elmozdulása:

$$\begin{aligned}\Delta z &= \mu \cdot \Delta V_{HV} = \mu \cdot \text{PIC}(f) \cdot e = \mu \cdot \text{PIC}(f) \cdot (I_{\text{set}} - \text{IV}(f) \cdot I_{\text{tc}}) \\ &= \mu \cdot \text{PIC}(f) \cdot (I_{\text{set}} - \text{IV}(f) \cdot I_{\text{tc}}(z_0, V_0) - \text{IV}(f) \cdot \beta \Delta z - \text{IV}(f) \cdot \alpha \Delta V) \\ \Rightarrow \Delta z &= \frac{\mu \cdot \text{PIC}(f)}{1 + \mu \beta \cdot \text{IV}(f) \cdot \text{PIC}(f)} (I_{\text{set}} - \text{IV}(f) \cdot I_{\text{tc}}(z_0, V_0) - \alpha \cdot \text{IV}(f) \cdot \Delta V).\end{aligned}$$

Rendszer átvitelének mérése: AC minta-tű feszültség  $\Delta z = -Z_{\text{STM}}(f) \cdot \frac{\alpha}{\beta} \Delta V$

$$Z_{\text{STM}}(f) = \frac{\mu \beta \cdot \text{PIC}(f) \cdot \text{IV}(f)}{1 + \mu \beta \cdot \text{PIC}(f) \cdot \text{IV}(f)}$$

Maximális sávszélesség:  $f_{\text{PI}} = f_{\text{IV}}$

Szabályozó kör időállandója:  $\tau_{\text{PI}} = P/I$

sávszélessége:  $f_{\text{PI}} = 1/(2\pi\tau_{\text{PI}})$



Elég csak P-t állítani!

$$Z_{\text{STM}}(f) = \left(1 + i \frac{f}{f_{\text{STM}}}\right)^{-1}$$

$$f_{\text{STM}} = \mu \beta P f_{\text{PI}}.$$

# STM Feedback

Alagútáram:  $I_{tc}(z, V_{\text{bias}}) \propto \mathcal{D}_{\text{sample}}(E_F) \mathcal{D}_{\text{tip}}(E_F + eV_{\text{bias}}) V_{\text{bias}} e^{-2\kappa z}$   $\kappa = \sqrt{2m_e \Phi / \hbar^2}$

Rendszer átvitele:  $Z_{\text{STM}}(f) = \left(1 + i \frac{f}{f_{\text{STM}}}\right)^{-1}$   
 $f_{\text{STM}} = \mu\beta P f_{\text{PI}}$ .

Sávszélesség növelése:

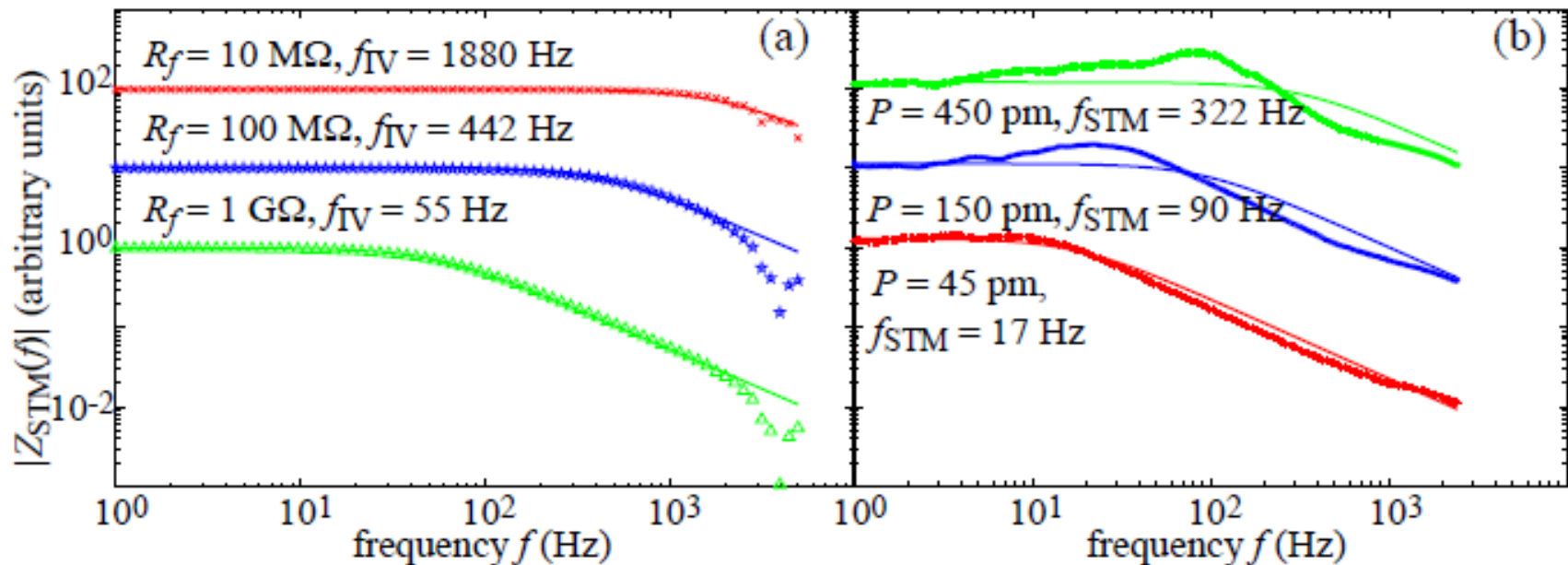
- $P$  növelése  $\leftrightarrow$  zajos vezérlés
- $V_{\text{bias}}$  növelése  $\rightarrow$  nagyobb  $z$ , nagyobb  $\beta \leftrightarrow$  kisebb felbontás
- $I_{\text{set}}$  növelése  $\rightarrow$  kisebb  $z$ , nagyobb  $\beta \leftrightarrow$  tű felületbe ütközésének veszélye nő

# STM átvitelének mérése

Minta-tű feszültséghez hozzáadnak egy AC tagot:  $V_{\text{bias}}(f) = V_{\text{DC}} + V_{\text{AC}}(f)$

Mérik a Zpiezo oszcilláló mozgását:  $A_z \propto |Z_{\text{STM}}(f)| = \left(1 + \frac{f^2}{f_{\text{STM}}^2}\right)^{-1/2}$

$$\phi = \arctan \frac{\text{Im } Z_{\text{STM}}(f)}{\text{Re } Z_{\text{STM}}(f)} = -\arctan \frac{f}{f_{\text{STM}}}$$



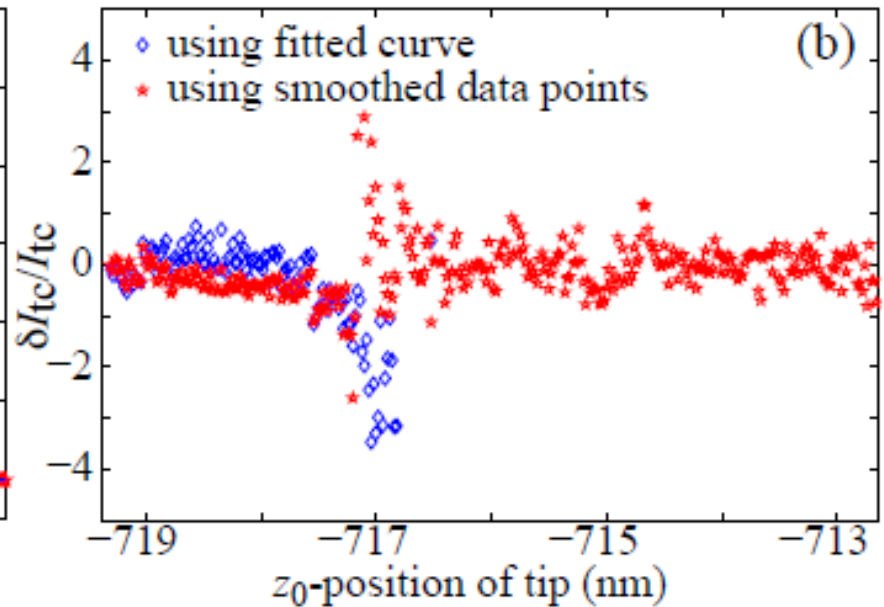
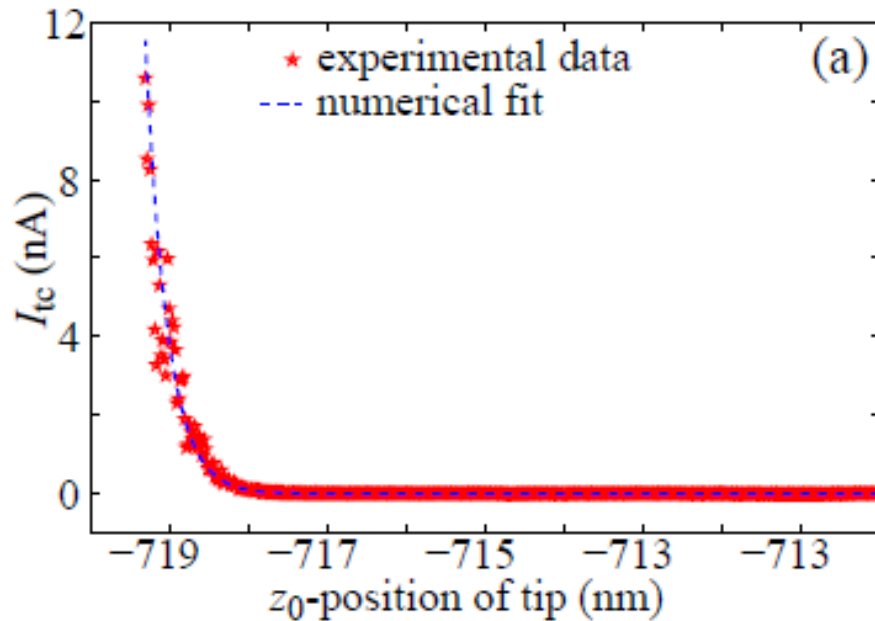
# STM stabilitásának mérése

$$I_{tc}(z_0 + \delta z) = C e^{-2\kappa(z_0 + \delta z)} = C e^{-2\kappa z_0} e^{-2\kappa \delta z}$$

$z = z_0 + \delta z$   
Ideális pozíció      zaj

$$\frac{\delta I_{tc}}{I_{tc}(z_0)} = e^{-2\kappa \delta z} - 1 \qquad \delta I_{tc} = I_{tc}(z_0 + \delta z) - I_{tc}(z_0)$$

$$\delta z = -(2\kappa)^{-1} \ln \left( \frac{\delta I_{tc}}{I_{tc}(z_0)} + 1 \right)$$





# AFM Feedback

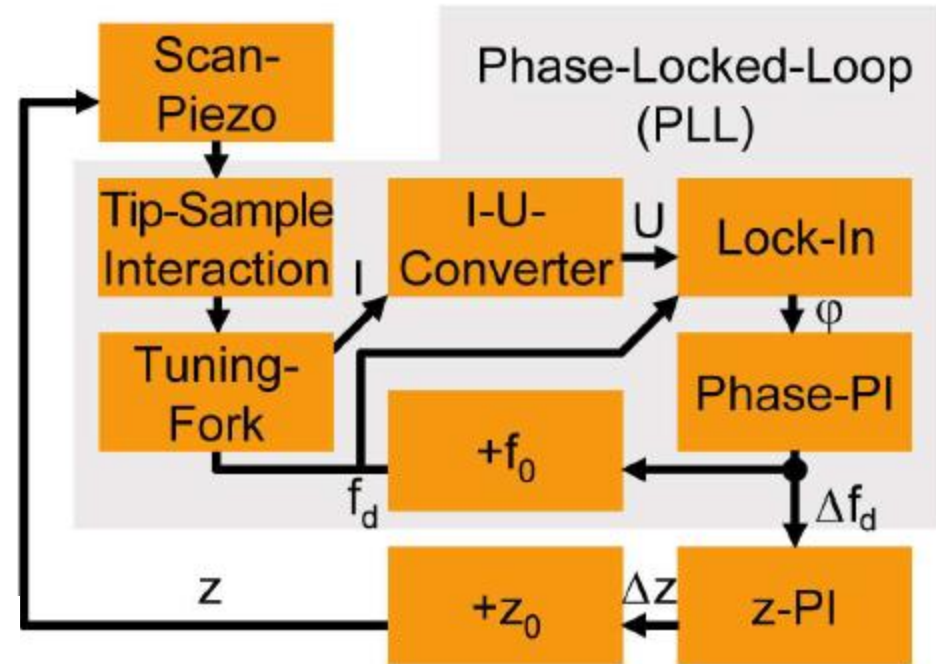
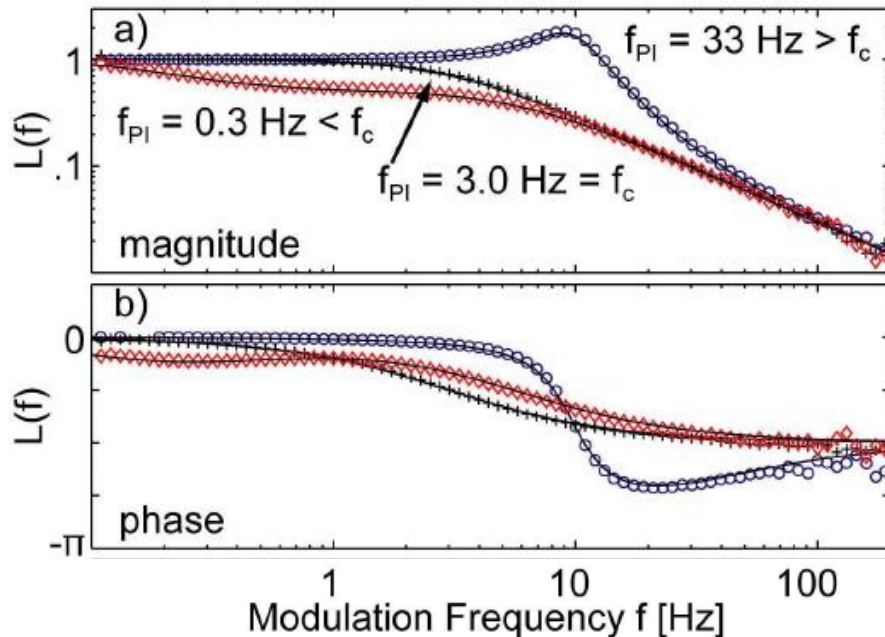
Meghajtó jel frekvenciája:  $f_d = f_0 + \Delta f_d$

TF sávszélessége:

$$f_c := - \left( \frac{\partial \varphi}{\partial f_d} \right)_{f_d=f_{res}}^{-1} = \frac{f_{res}}{2Q}$$

PI szabályozó sávszélessége:

$$f_{PI} = \frac{I}{2\pi P} = \frac{1}{2\pi T}$$



Optimum: gyors szabályozás túllövések nélkül.

$$f_{PI} = f_c \quad T = \frac{1}{2\pi f_c}$$

Átvitel: aluláteresztő, sávszélessége  $P$

$$L(f) = \frac{1}{1 + if/P}$$



# AFM Feedback

PLL átviteli függvénye:  $L(f)$

AFM átviteli függvénye:  $Z(f)$

$$Z(f) = -\frac{\beta R_z(f) L(f)}{1 + \beta R_z(f) L(f)}$$

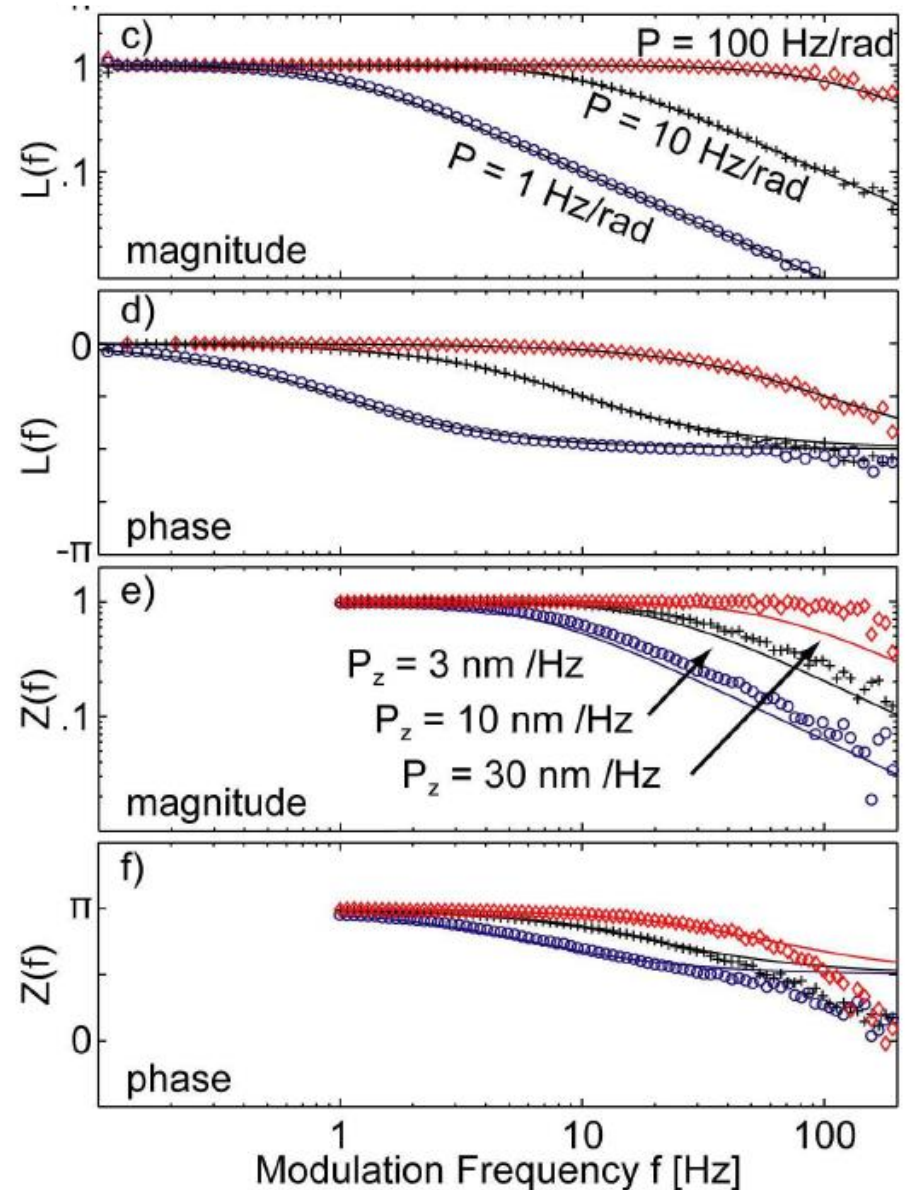
Maximális sávszélesség:

$$f_z = f_{PI} \quad T_z = \frac{1}{2\pi P}$$

$$Z(f) = -\frac{1}{1 + if/(\beta P P_z)}$$

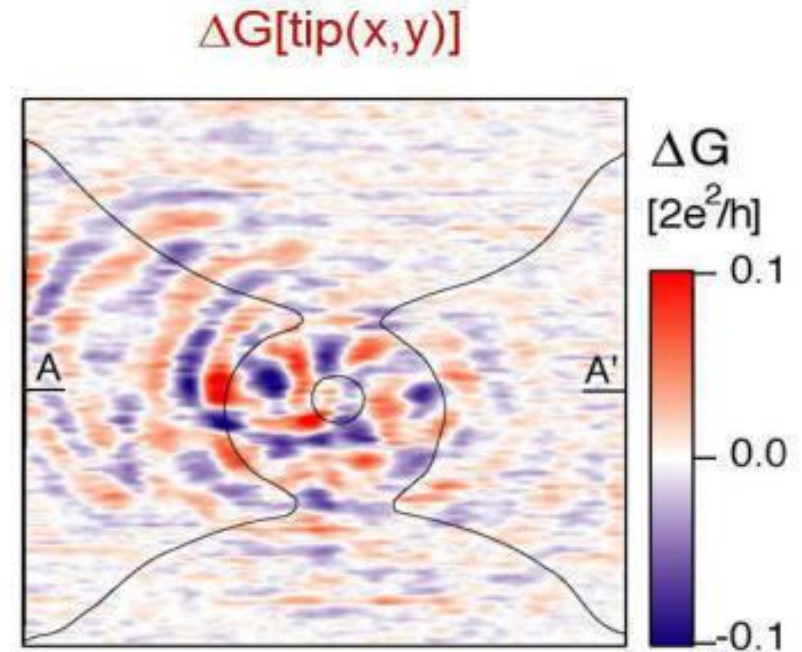
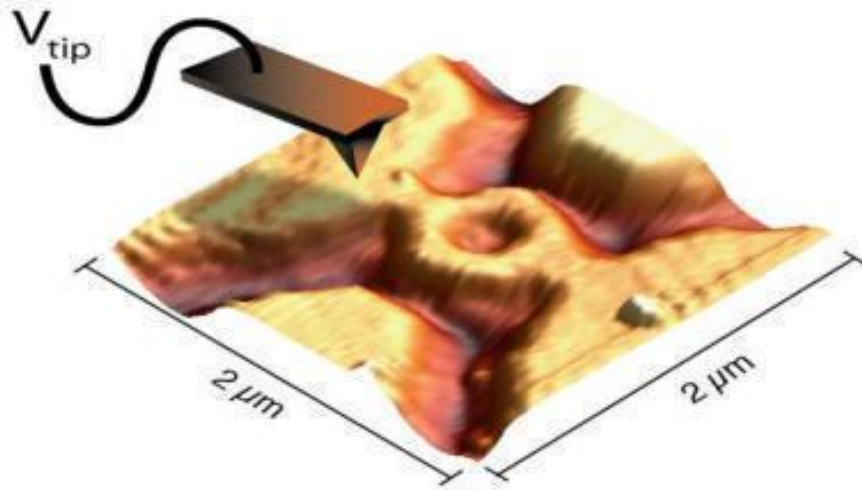
Sávszélesség:  $\beta P P_z$

- Akár jóval nagyobb is lehet, mint a PLL sávszélessége

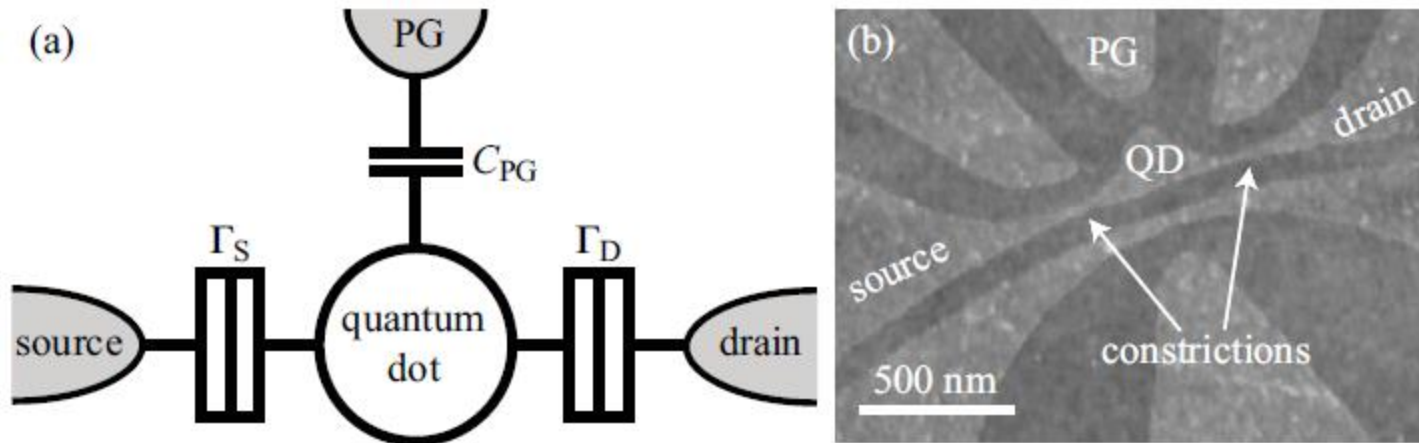


# Scanning Gate Microscopy

- Túre feszültséget kapcsolnak
- A felülettől állandó magasságban pásztáznak
- Mérik a vizsgált nanoszerkezet vezetőképességét



# Scanning Gate Microscopy on Graphene Qdot



$$eV_{\text{bias}} = \mu_S - \mu_D$$

Kémiai potenciál  $N$  töltéshordozó esetén: 
$$\mu_N = \epsilon_N + \frac{e^2}{C_\Sigma} \left( N - \frac{1}{2} \right) + e \sum_{i=1}^n \frac{C_{0i}}{C_\Sigma} (V_i - V_i^{(0)})$$

$C_\Sigma := -\sum_{i=1}^n C_{0i}$  összes kapacitív csatolás a környezethez

Charging energy: 
$$\Delta E_C = \mu_{N+1} - \mu_N = \frac{e^2}{C_\Sigma} + \epsilon_{N+1} - \epsilon_N$$

Coulomb blokádnak → alacsony hőmérséklet:  $k_B T \ll \Delta E_C$

# Scanning Gate Microscopy on Graphene Qdot

A minta felett pásztázó tű egy újabb kapunak felel meg:

$$\mu_N(\mathbf{r}_{\text{tip}}) = \epsilon_N(\mathbf{r}_{\text{tip}}) + \frac{e^2}{C_\Sigma(\mathbf{r}_{\text{tip}})} \left( N - \frac{1}{2} \right) + e \sum_{i=1}^n \frac{C_{0i}(\mathbf{r}_{\text{tip}})}{C_\Sigma(\mathbf{r}_{\text{tip}})} V_i + e \frac{C_{\text{tip}}(\mathbf{r}_{\text{tip}})}{C_\Sigma(\mathbf{r}_{\text{tip}})} V_{\text{tip}}$$

- $V_{\text{SD}}$  kicsi  $\rightarrow$  Coulomb rezonancia  $\mu_{\text{S,D}} = \mu_N$  esetén.

Intenzíven kutatott terület: Qdot hullámfüggvényének  $|\Psi_{\text{dot}}(\mathbf{r})|^2$  mérése.

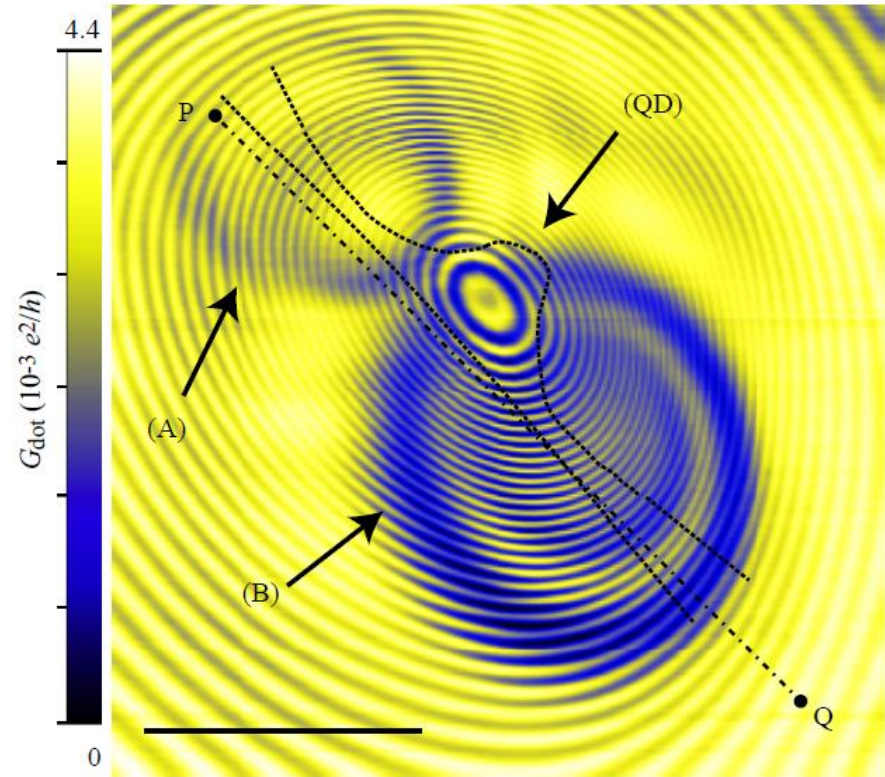
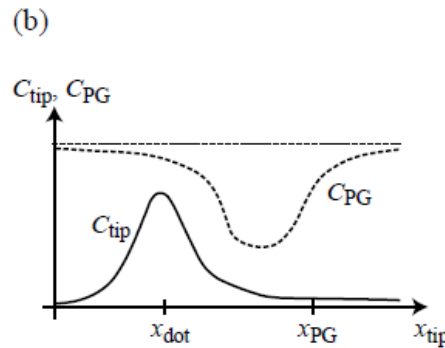
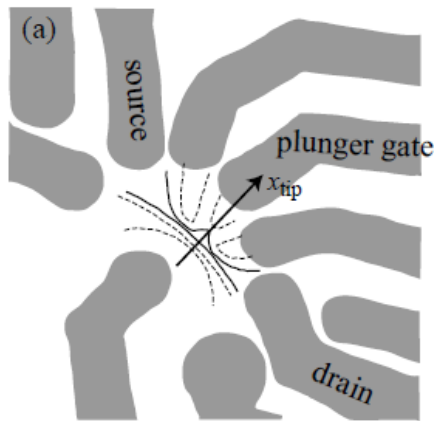
- Tű által okozott energiaszint eltolódás = tű lokális potenciálja és a Qdot hullámfüggvényének konvolúciója.
- Energiaszint eltolódás mérése SGM-el
- Tű lokális potenciáljának meghatározása modell számítás vagy mérés alapján
- Qdot hullámfüggvényének számítása dekonvolúcióval

Feltételek:

1. Tű lokális potenciáljának félértékszélessége  $\approx$  Fermi hullámhossz
2. Kis minta-tű távolság
3. Minél kevésbé ártalmas szonda (alacsony feszültség, ...)

# Scanning Gate Microscopy on Graphene Qdot

- Coulomb gyűrűk a Qdot körül
- A,B: lokalizált állapotok a Qdot-ot a S és D elektródával összekötő vezetéken?
- Az SGM képek értelmezése nem triviális!



$$\mu_N(x_{\text{tip}}) = \frac{e^2}{C_{\Sigma}(x_{\text{tip}})} \left( N - \frac{1}{2} \right) + e \frac{C_{\text{tip}}(x_{\text{tip}})}{C_{\Sigma}(x_{\text{tip}})} V_{\text{tip}} + e \frac{C_{\text{PG}}(x_{\text{tip}})}{C_{\Sigma}(x_{\text{PG}})} V_{\text{PG}} + \text{const.}$$

$$\partial \mu_N / \partial x_{\text{tip}} = 0 = C'_{\text{tip}}(x_{\text{tip}}) V_{\text{tip}} + C'_{\text{PG}}(x_{\text{tip}}) V_{\text{PG}} \quad \Rightarrow \quad \text{Két megoldás } x_{\text{tip}}\text{-re!}$$

Köszönöm a figyelmet!