

Princip STM, STS pro FPPII

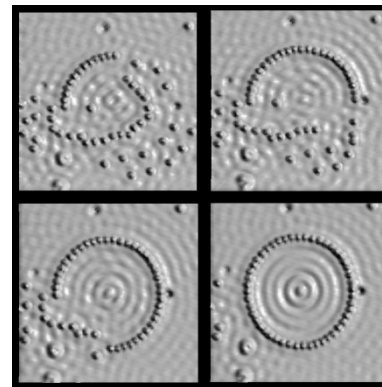
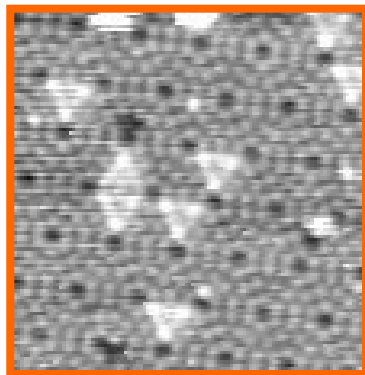
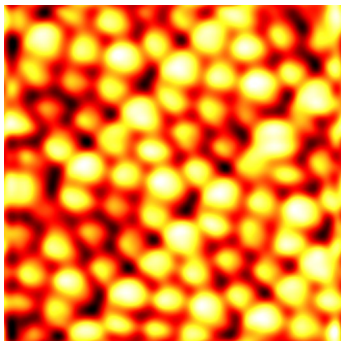
Doc. RNDr. Pavel Kocán, Ph.D.

pavel.kocan@mff.cuni.cz

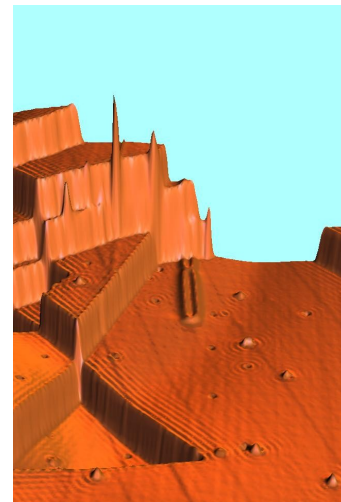
Doc. RNDr. Ivan Ošťádal, CSc.

1. scanning tunneling microscope

STM – řádkovací tunelový mikroskop
(nebo taky rastrovací tunelový mikroskop...)

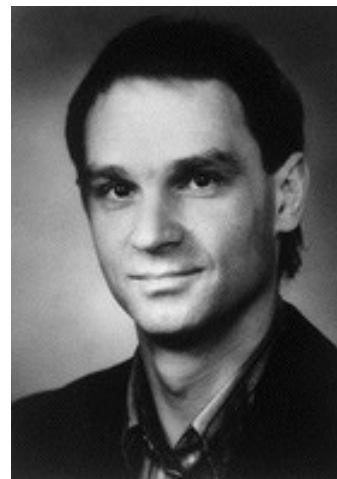
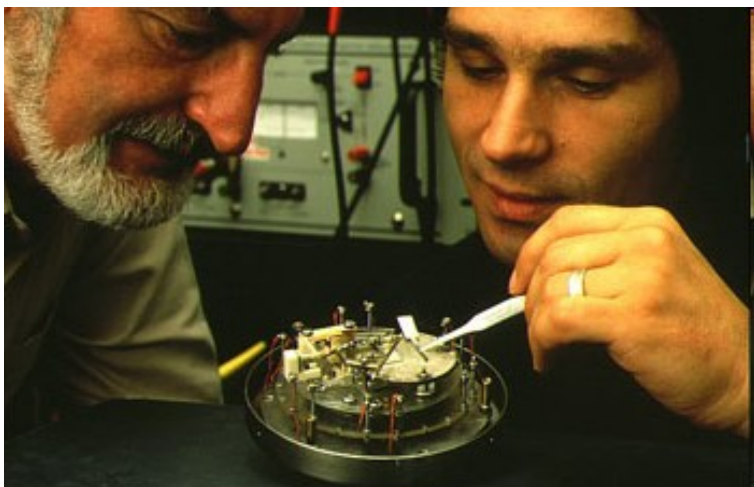


IBM

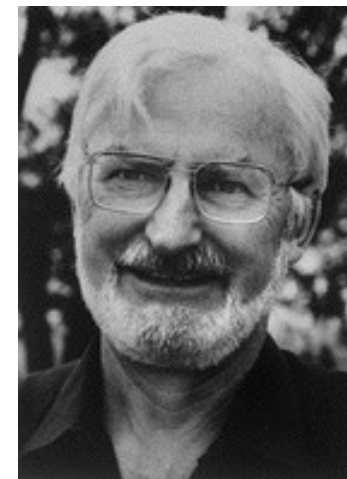


Nature 363, 524-527 (1993)

NC v roce 1986



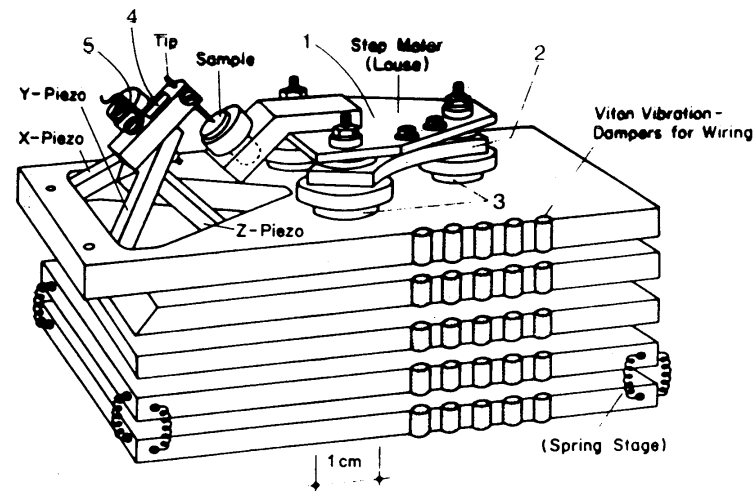
Gerd Binnig



Heinrich Rohrer

Gerd Binnig a Heinrich Rohrer (IBM Research Laboratory, Zurich, Švýcarsko) - Nobelova cena roku 1986 **za návrh rastrovacího tunelového mikroskopu**

společně s prof. **Ernstem Ruskou** (Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft) za základní práci v elektronové optice a za návrh prvního elektronového mikroskopu

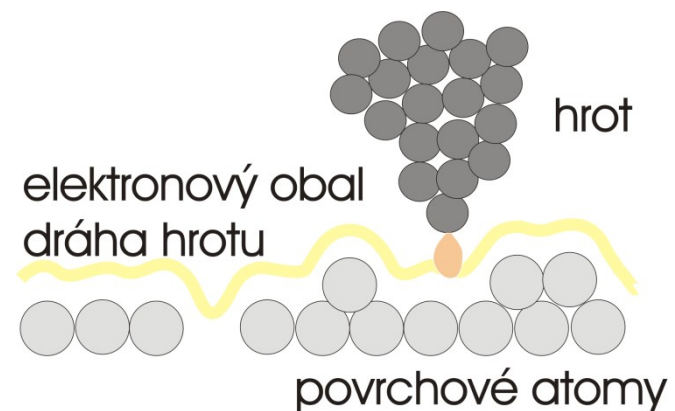


Řádkovací tunelový mikroskop - princip

sonda – poslední atom ostrého
hrotu

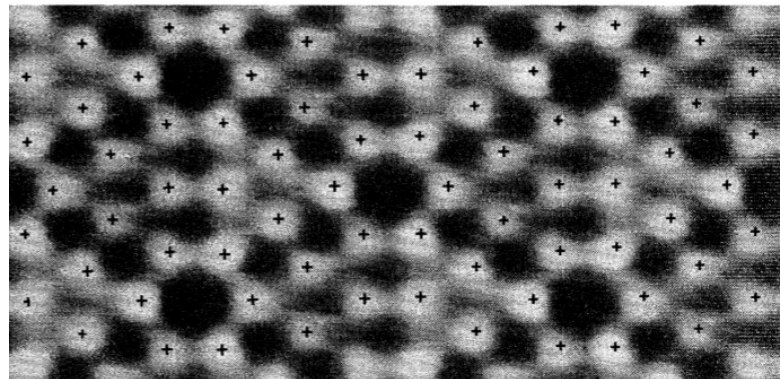
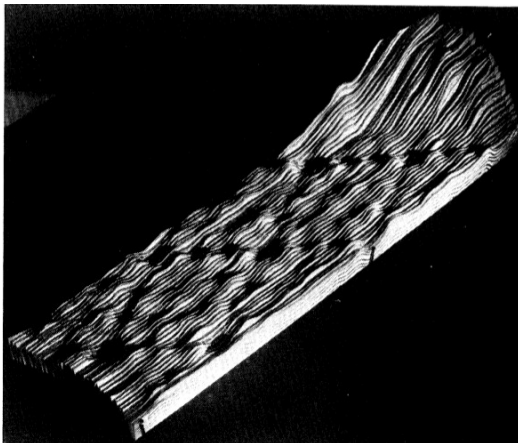
- hrot tak blízko povrchu, že teče tunelový proud – tunelový efekt
- udržení konstantní vzdálenosti od povrchu pomocí regulace konstantního tunelového proudu + skenování povrchu =
- výsledek: atomární rozlišení v reálném prostoru

= STM (Scanning
Tunneling
Microscope)

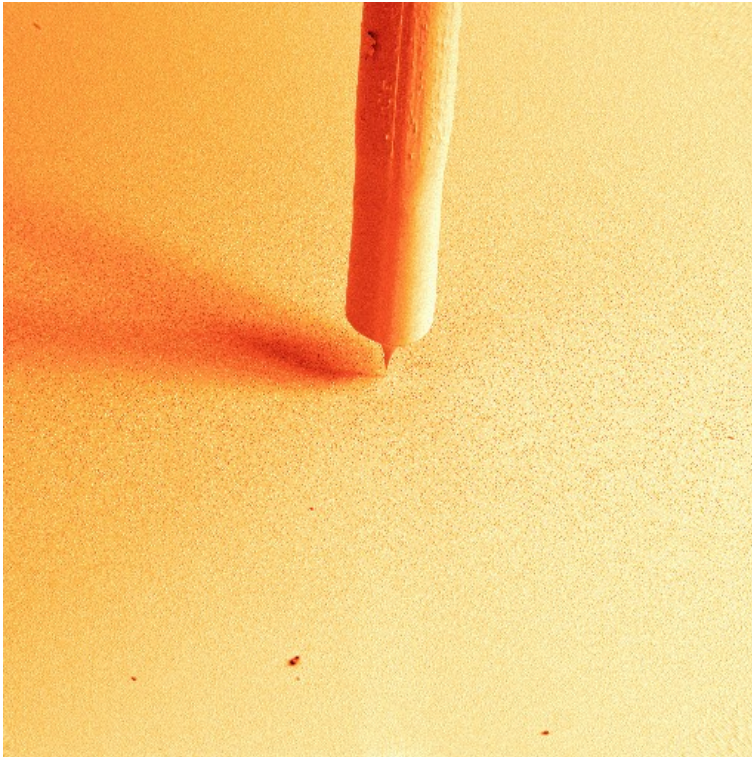


Zasazení do kontextu

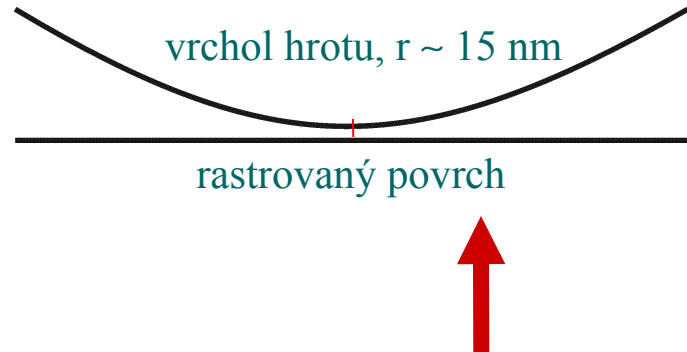
- Povrchové metody
- Integrální metody jsou dlouho známé
 - **Difrakce pomalých elektronů (LEED)** – inv. 1927, populární od 1960
 - **X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)** – efekt znám dlouho, první výsledky 1950s
 - **Auger electron spectroscopy (AES)** – inv. 1920s, populární od 1950s.
- Chybějící informace: lokální uspořádání na atomární úrovni
- Příklad: **Si(111)7x7**
 - známa dlouho, množství navržených a zavržených modelů na základě spektroskopických a difrakčních metod
 - po objevu STM a atomárně rozlišených snímcích 7x7 model rychle dokonvergoval ke správné struktuře



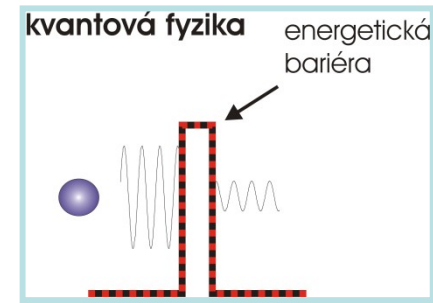
Scanning Tunneling Microscope



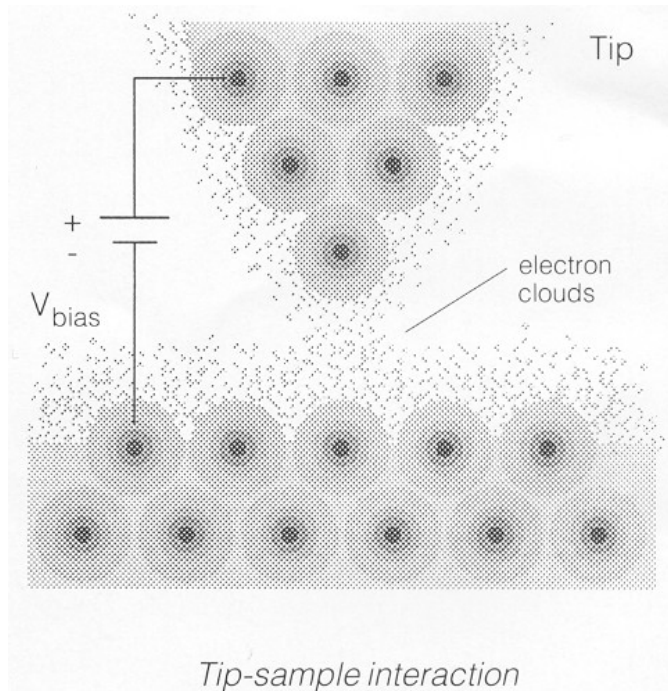
wolframový drát, \varnothing 0.25 mm



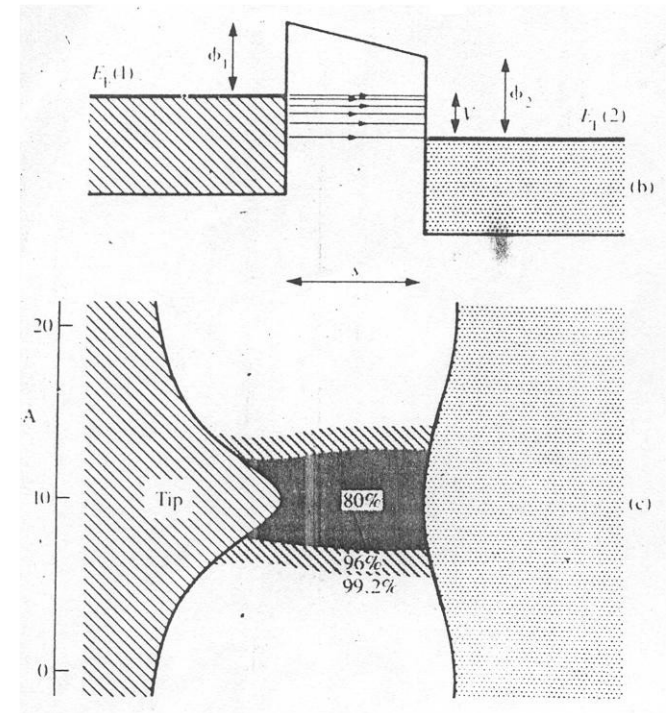
Scanning Tunneling Microscope



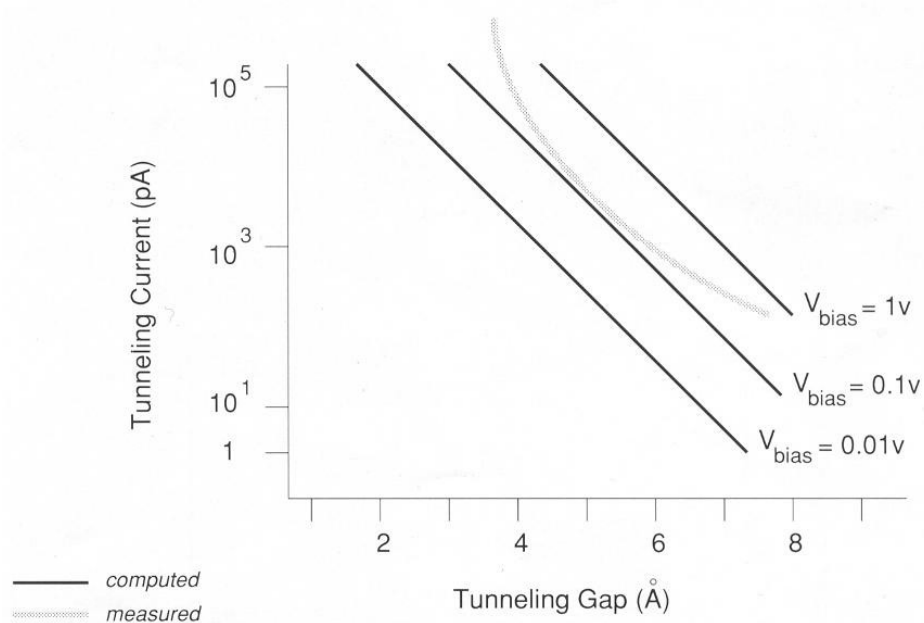
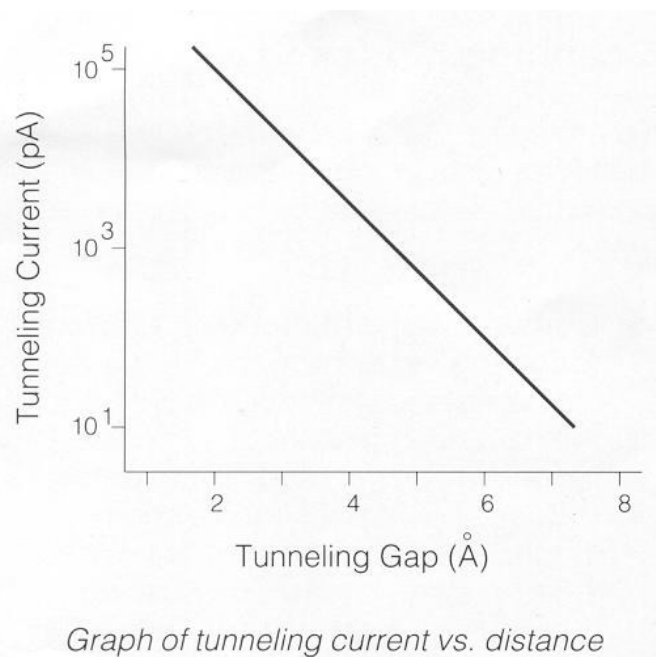
vlnově-částicová dualita - elektron se chová jako částice i jako vlnění



$$I = f(V) \exp(-s \phi^{1/2})$$

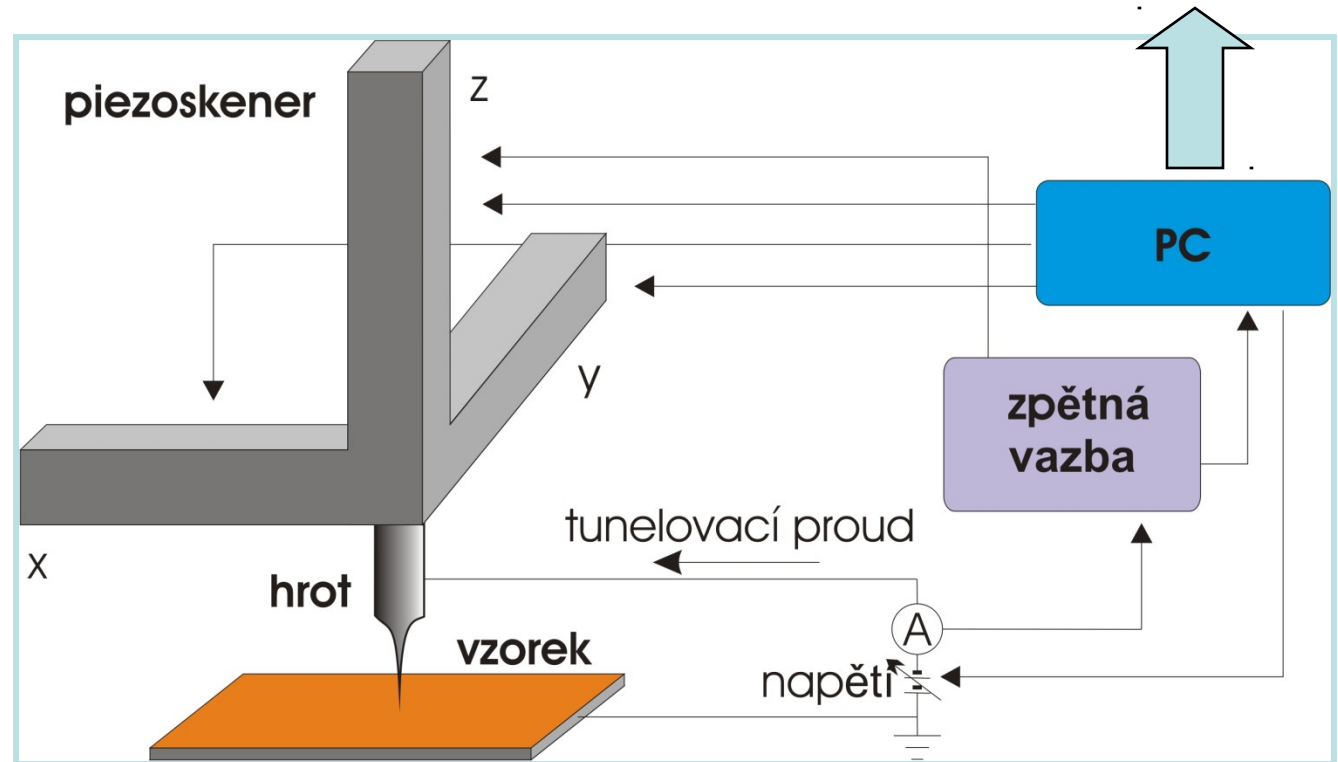
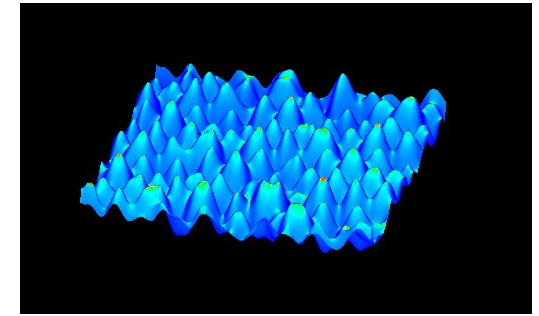


Závislost tunelového proudu na vzdálenosti elektrod

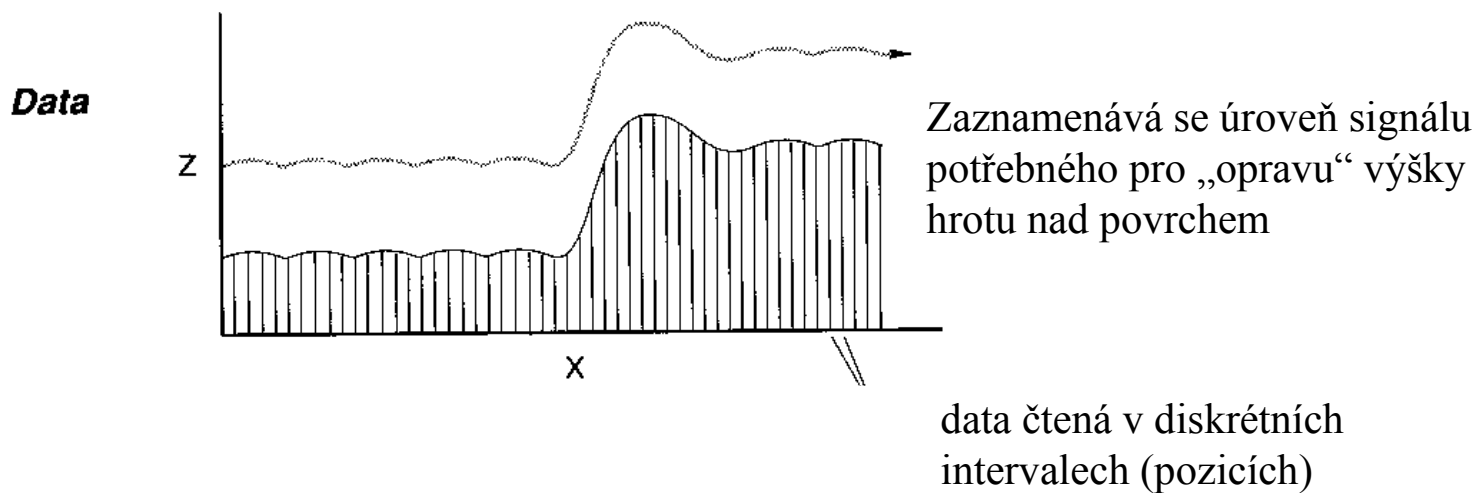
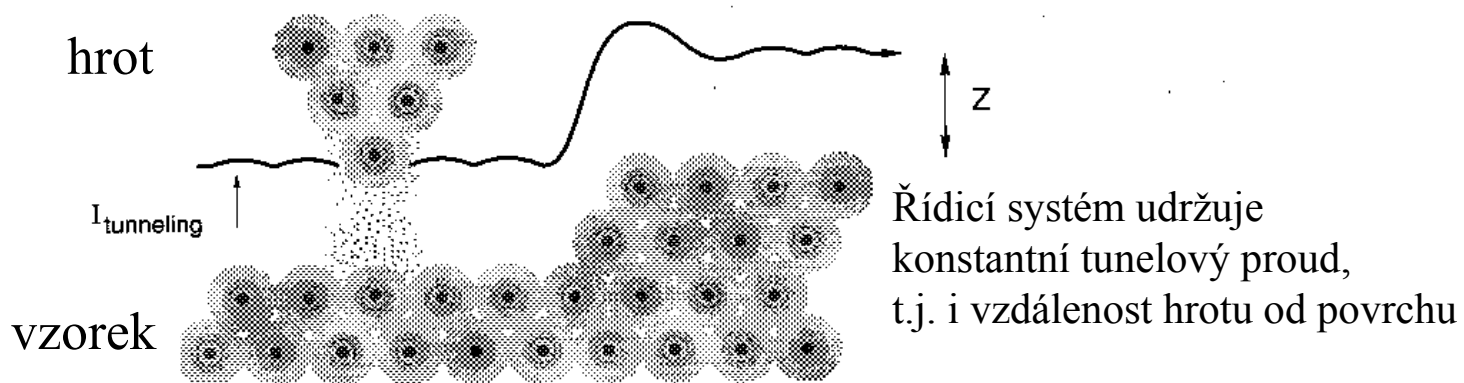


Řádkovací tunelový mikroskop - realizace

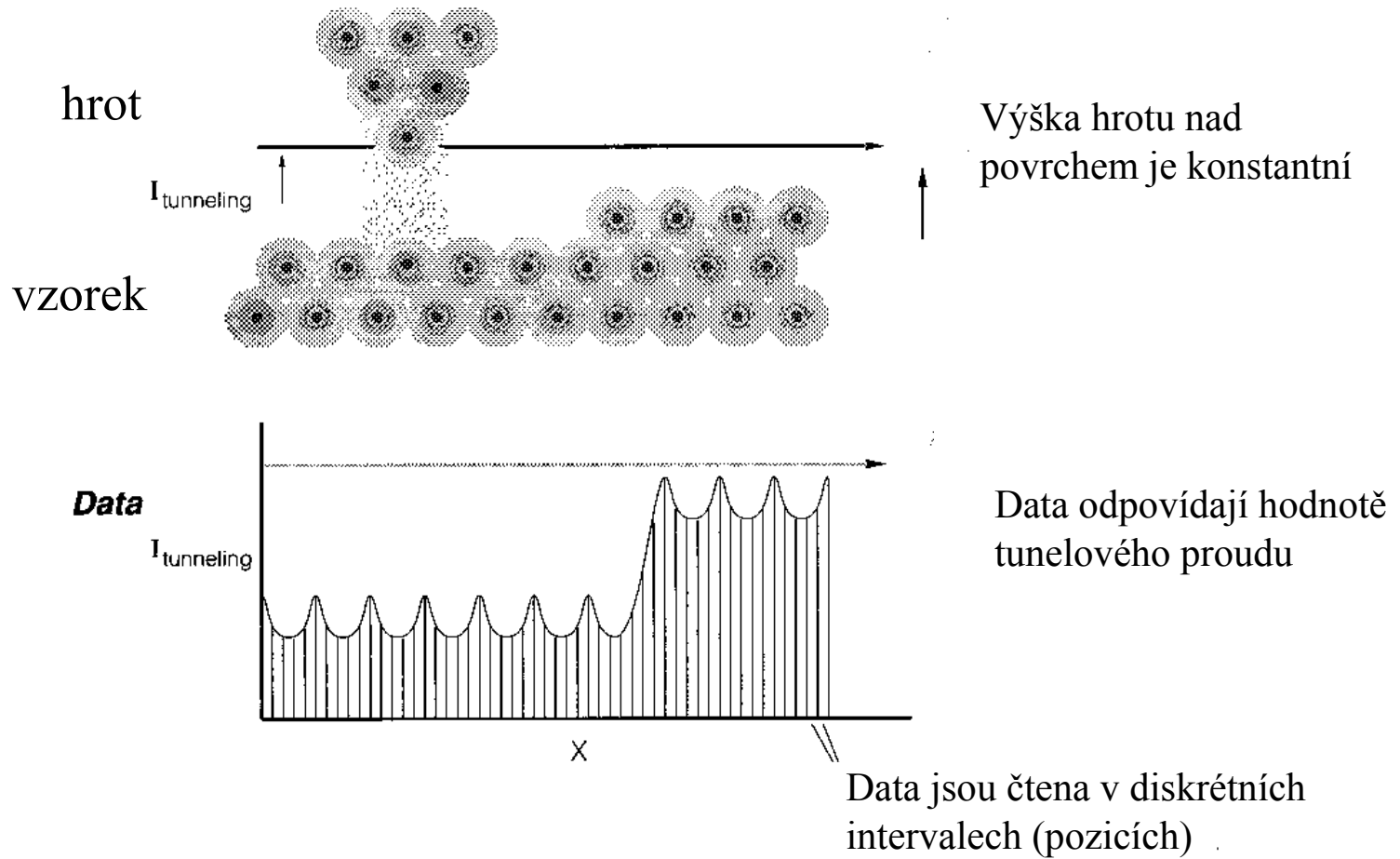
- 1) (polo)vodivý vzorek
- 2) ostrý hrot
- 3) jemný pohyb x,y,z – piezokeramika
- 4) zpětná vazba



Technika STM – mód konstantního proudu

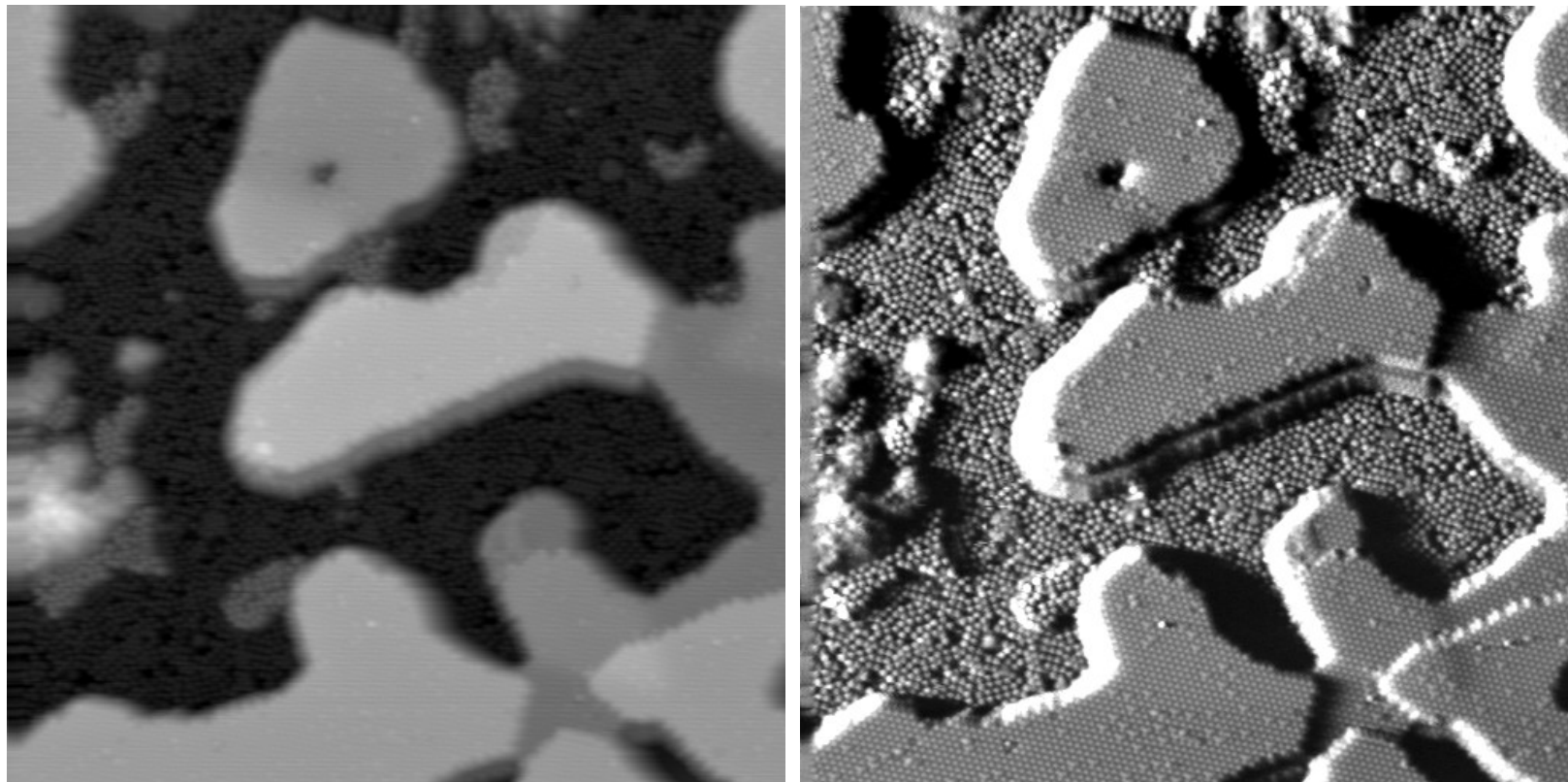


Technika STM – mód konstantní výšky



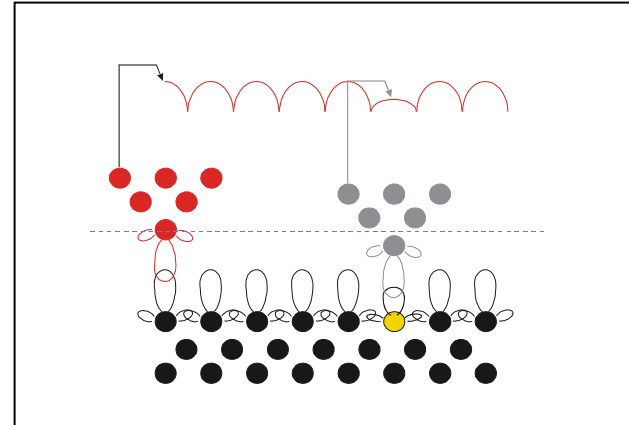
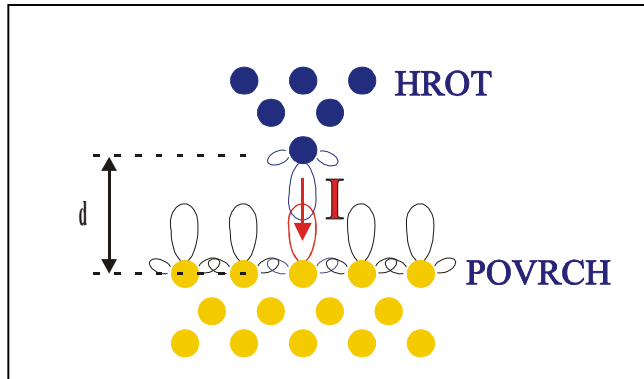
v praxi – zpětná vazba se potlačí pouze částečně – reaguje pouze na „hrubší“ změny, v proudovém obrázku vyniknou detaily

Porovnání z-ového a proudového modu

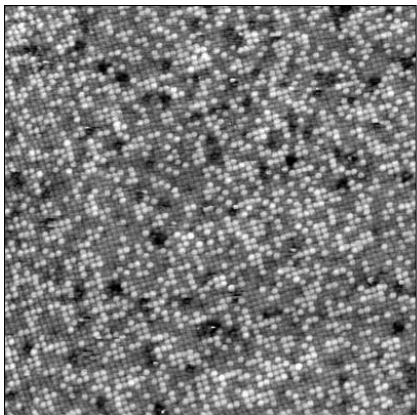


MnSi na Si(7x7)

Princip STM – vliv elektronových stavů



STM zohledňuje lokální hustotu elektronových stavů:



$$I = \frac{2\pi|e|\hbar}{\hbar} \int_0^{eV} \rho_L(E_F - eV + \varepsilon) \rho_R(E_F + \varepsilon) |M|^2 d\varepsilon$$

Hrot sleduje plochu konstantní lokální hustoty stavů pro energii odpovídající potenciálu hrotu vůči Fermiho mezi vzorku. Zdánlivá „výška“ atomu viděná hrotem závisí na elektronické konfiguraci atomů zkoumaného povrchu.

◀ Proto se v obrázku monokrystalické slitiny PtRh jeví Pt tmavší.

► STS – Scanning Tunneling Spectroscopy

vliv elektronových stavů – inverzní kontrast

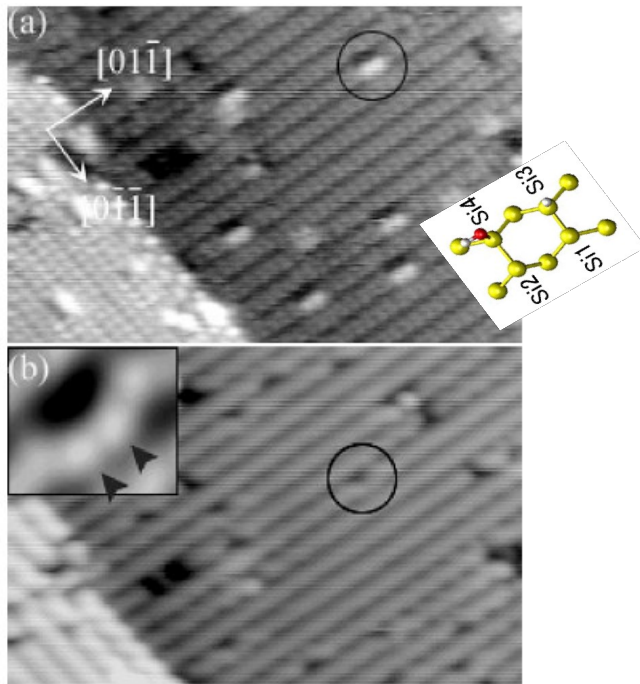
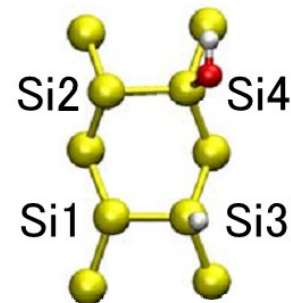


FIG. 1. STM images at the same area of clean Si(100) in (a) the unoccupied and (b) the occupied states at 300 K. Scan area is 15×10 nm² for both images. For (a), $V_{sample} = 1.4$ V, $I = 0.13$ nA and for (b), $V_{sample} = -1.9$ V, $I = 0.13$ nA. A typical C defect is enclosed by the circles. A zoomed-in C defect in the occupied state is shown in the inset where two protrusions on two adjacent dimers are clearly seen and the other half of the dimers is depressed.

PRB 67 153307 (2003)



PRB 77 113301 (2008)

tungsten tips used in experiments

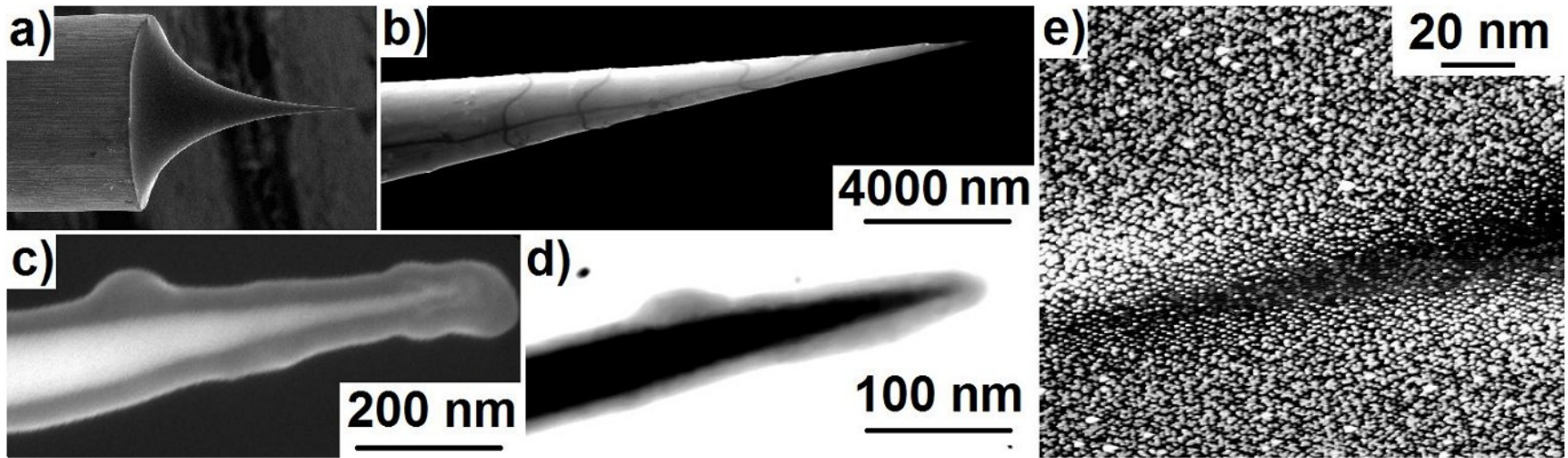
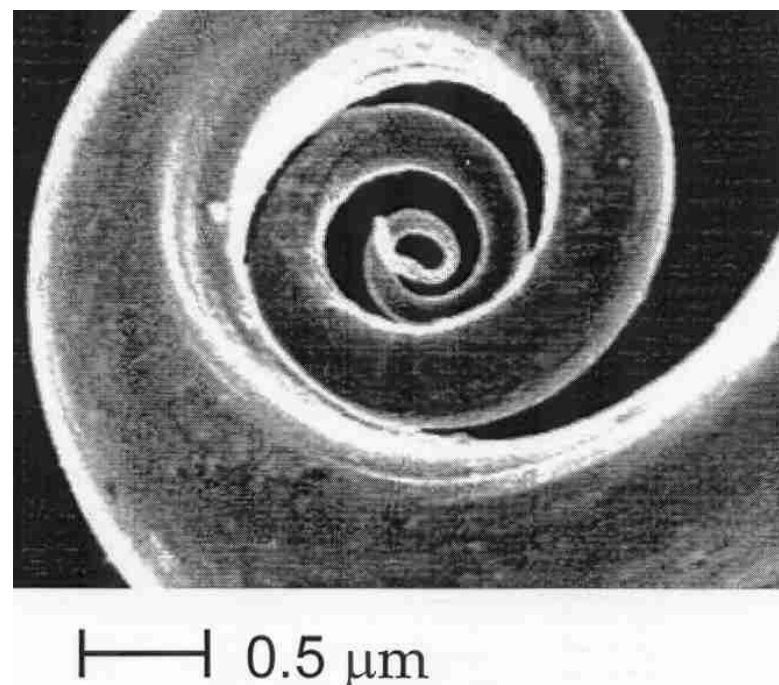
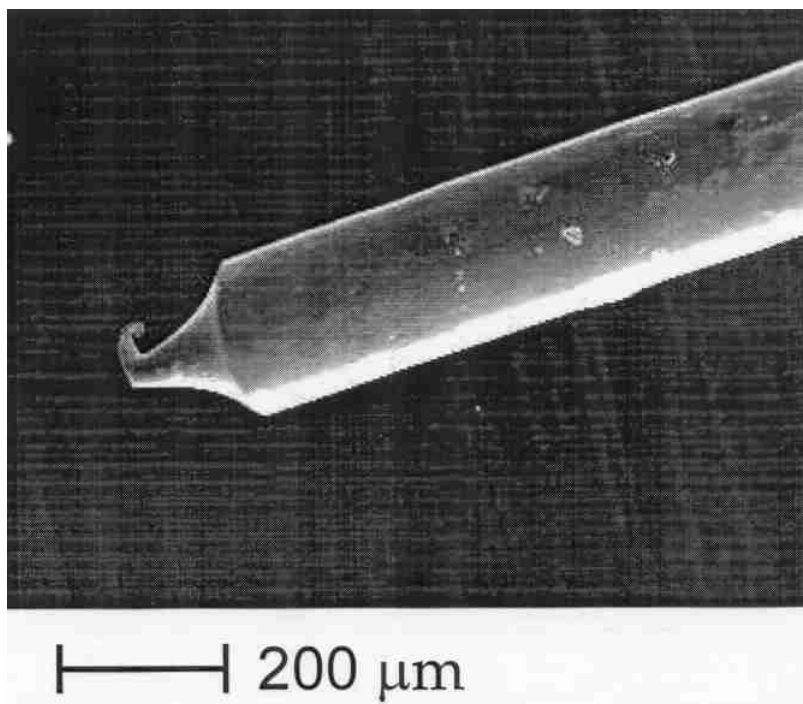
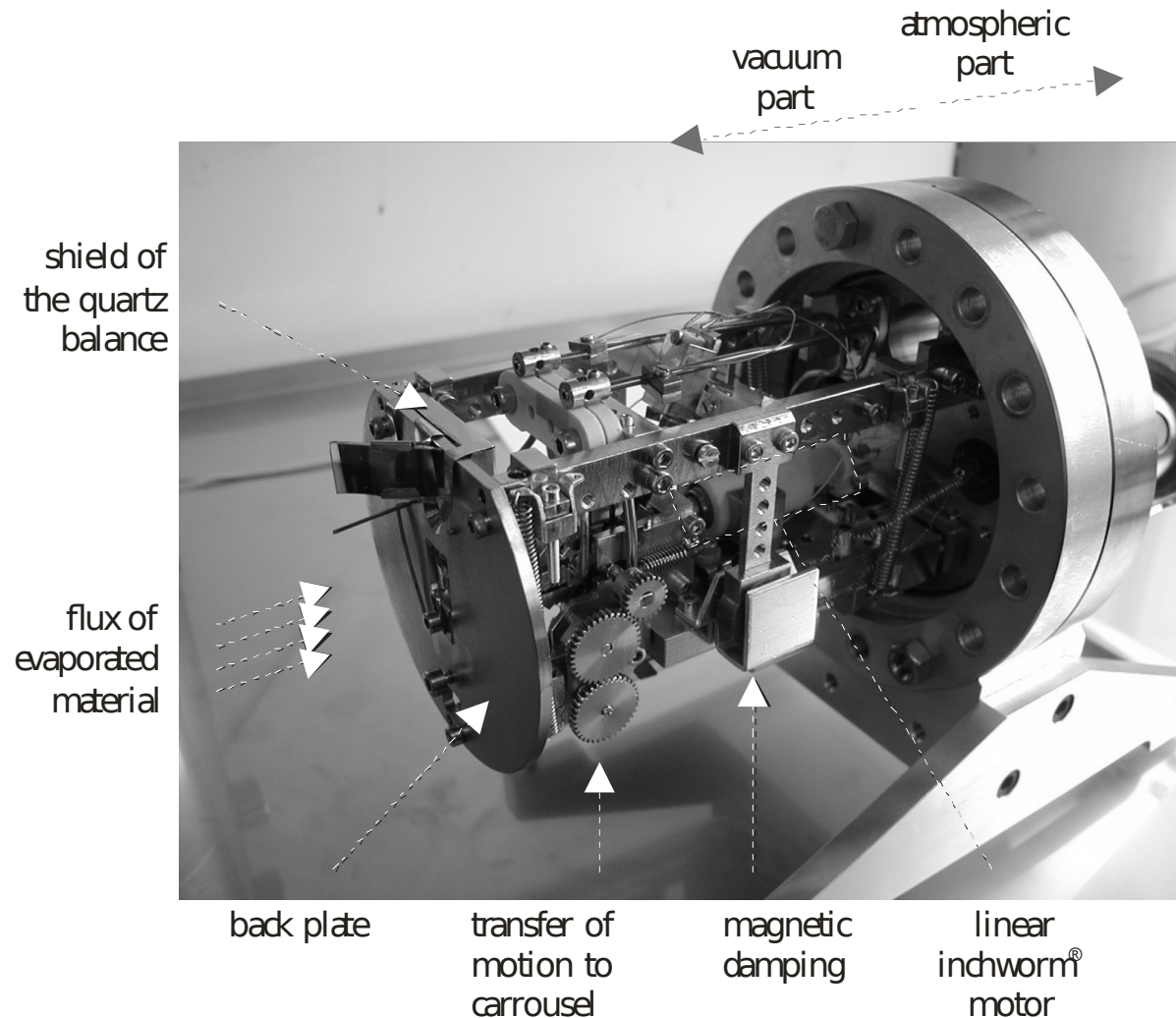


Figure 1: Images of tungsten tips taken few hours after etching. a) Large-scale SEM image, the wire diameter is 0.3 mm; b) SEM image showing microcrystalline structure of the tip; c) and d) SEM and TEM images of tips with curvature radius less than 5 nm. Tungsten core is covered by a thick oxide layer; e) STM image of Ag/Si(111)-(7×7) layer deposited when the tip was in tunneling contact with the surface. The tip 'shadow' is visible in the layer.

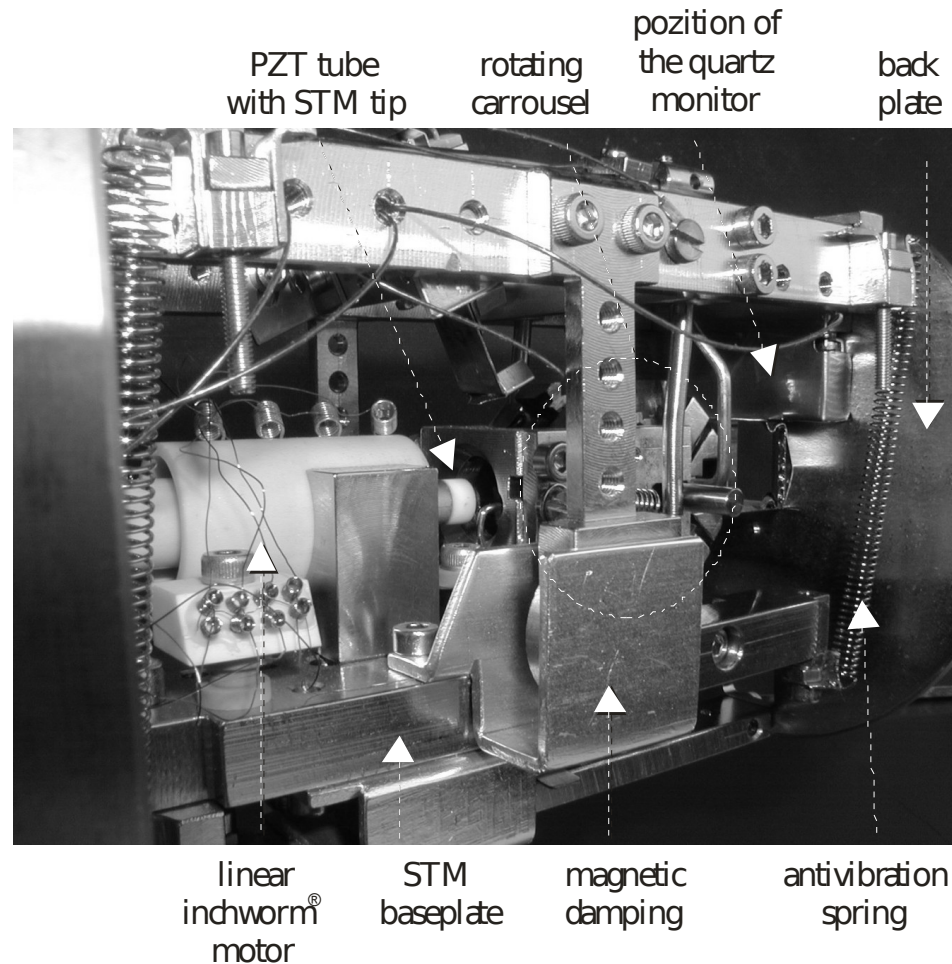


Pt-Ir hrot po kolizi s povrchem vorku
KFPP, snímek ze SEM (J. Macl)

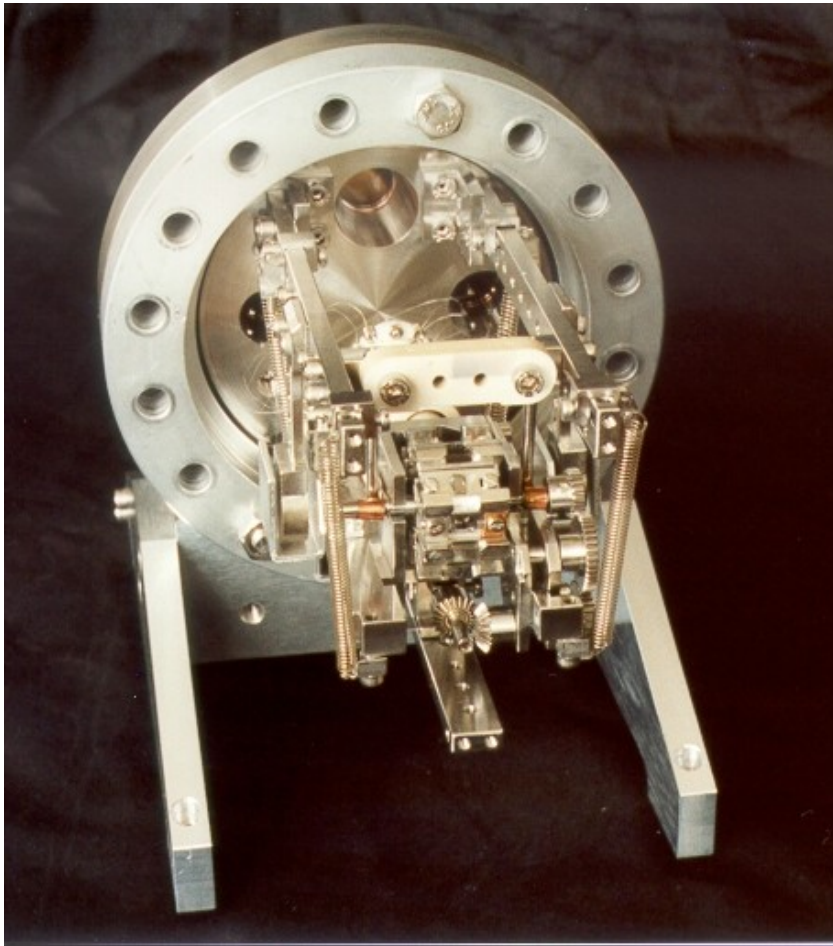
Realizace STM na KFPP



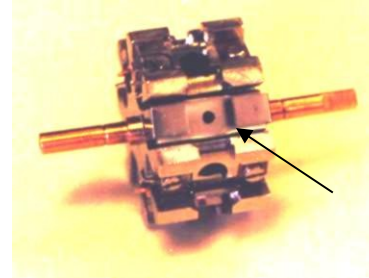
Realizace STM na KFPP



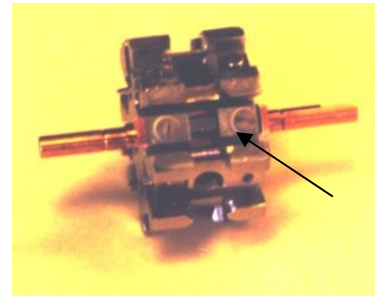
UHV STM head ASCAN



Carrousel

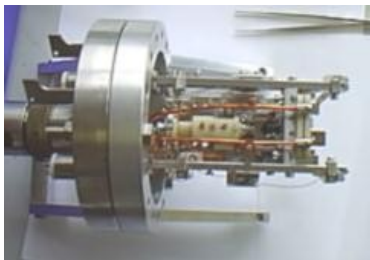


the cell for cleaning
a tip by electron
bombardment

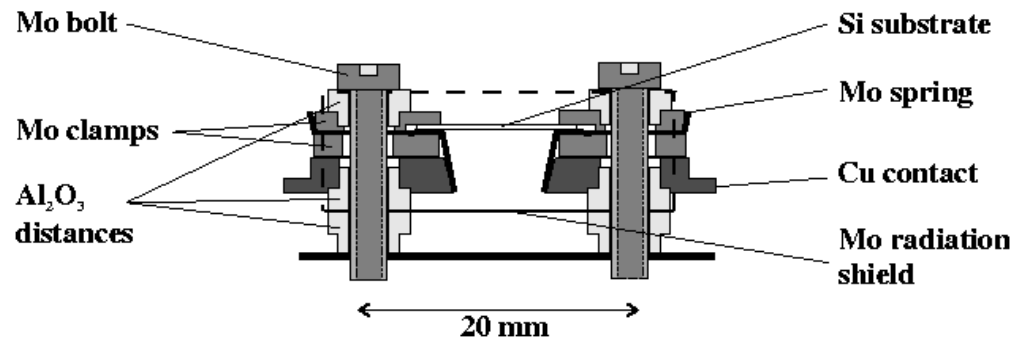


sample position

sample holder



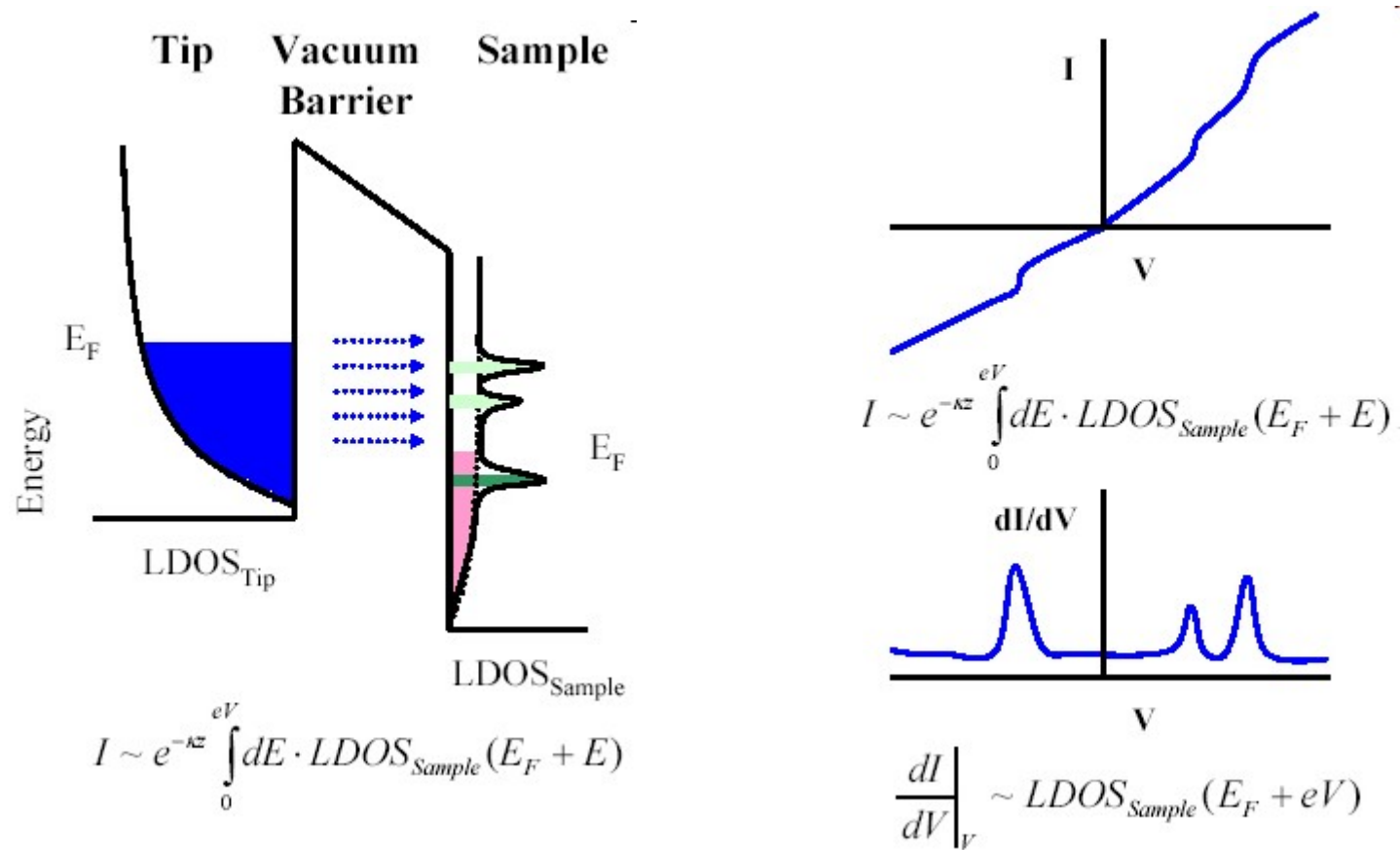
Top view



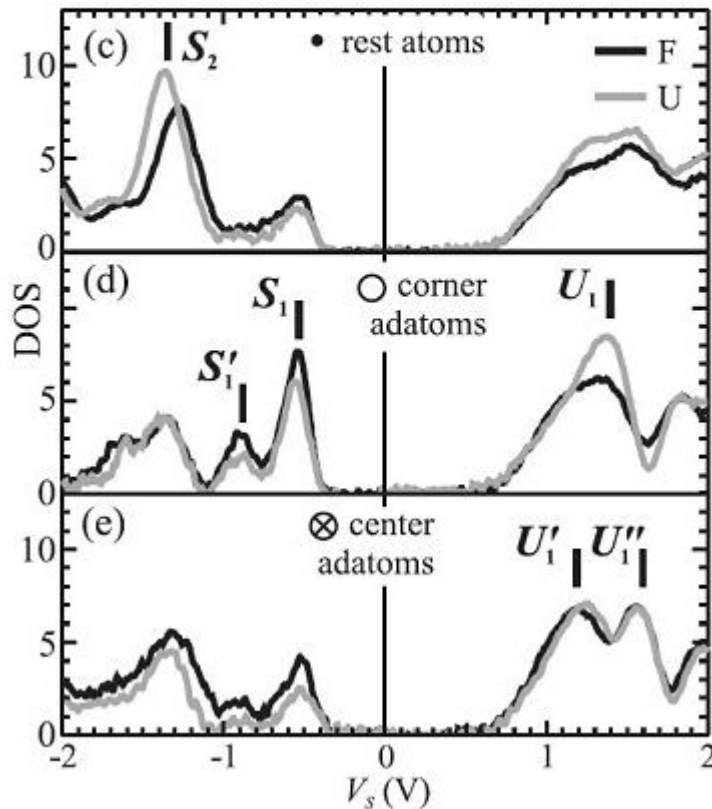
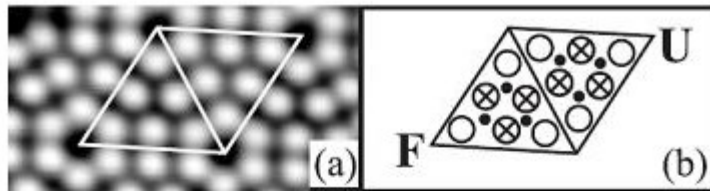
Řádkovací tunelová spektroskopie

scanning tunneling spectroscopy -
STS

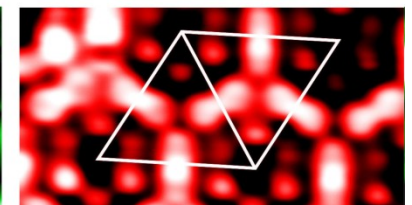
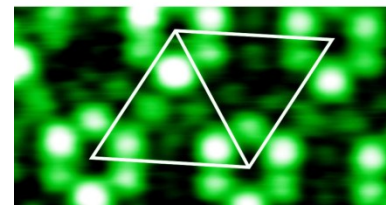
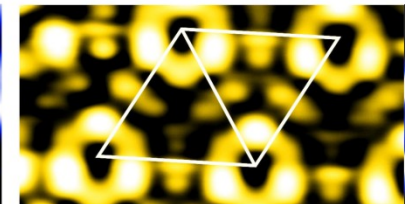
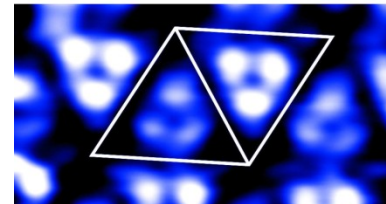
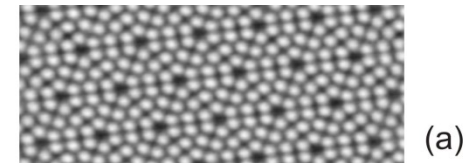
Řádkovací tunelová spektroskopie - princip



Řádkovací tunelová spektroskopie - příklad



Spectroscopic imaging



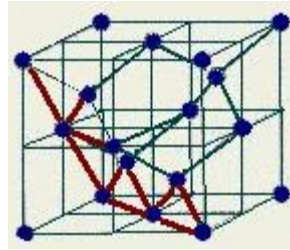
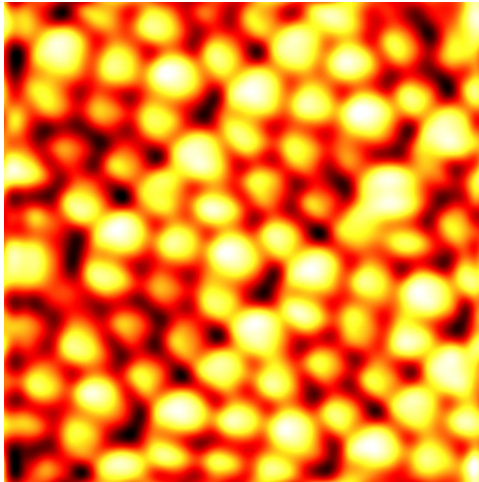
STM – co lze pozorovat - příklady

Co lze pozorovat...

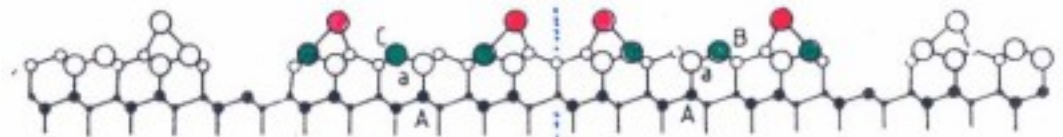
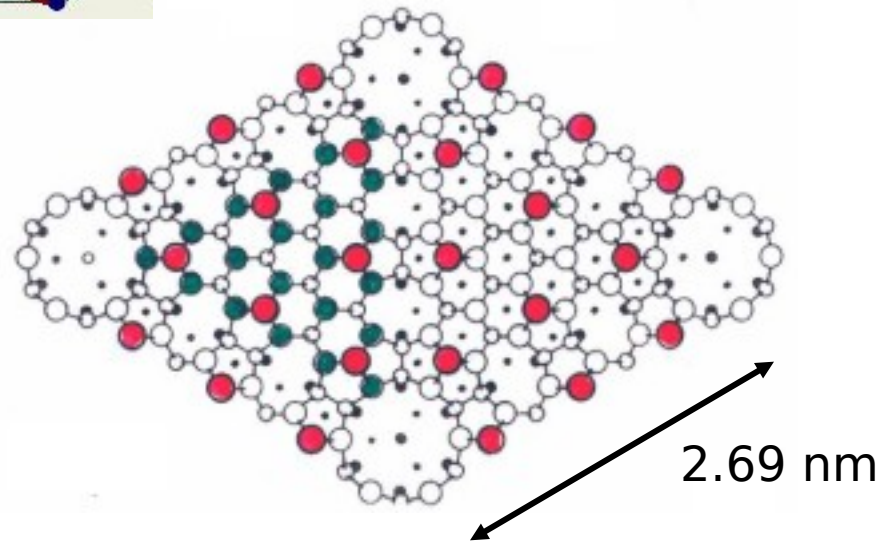
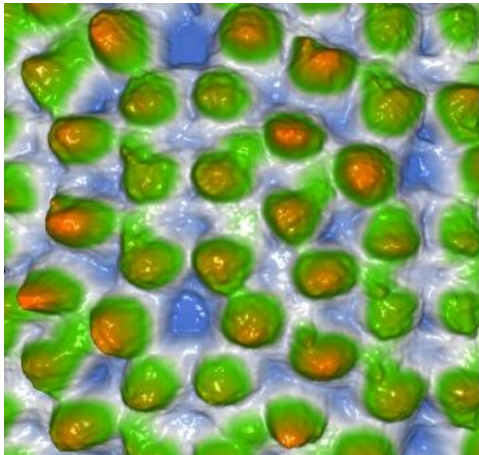
- ... atomární strukturu
- ... pohyb atomů po povrchu
- ... reakce atomů
- ... růst objektů s malou dimenzí (kvantové tečky, dráty a spol.)
- ... fázové přechody
- ... kvantové jevy

Povrch Si (111)7x7

STM

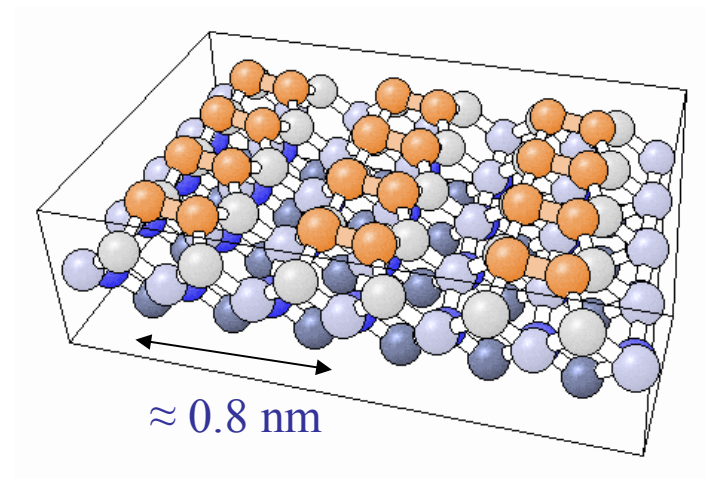
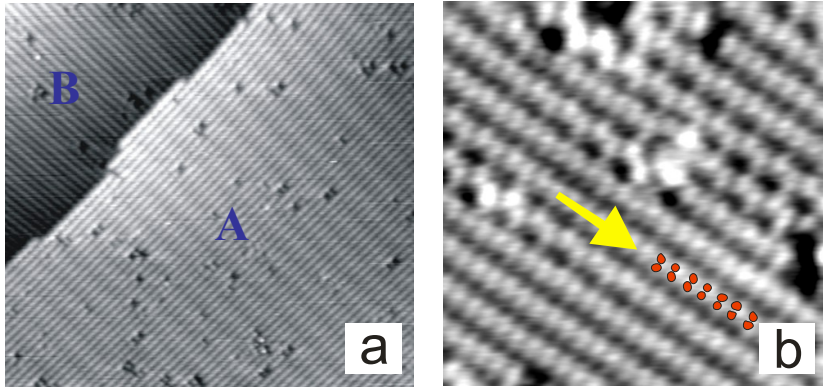


AFM



Surface Si(100) 2x1

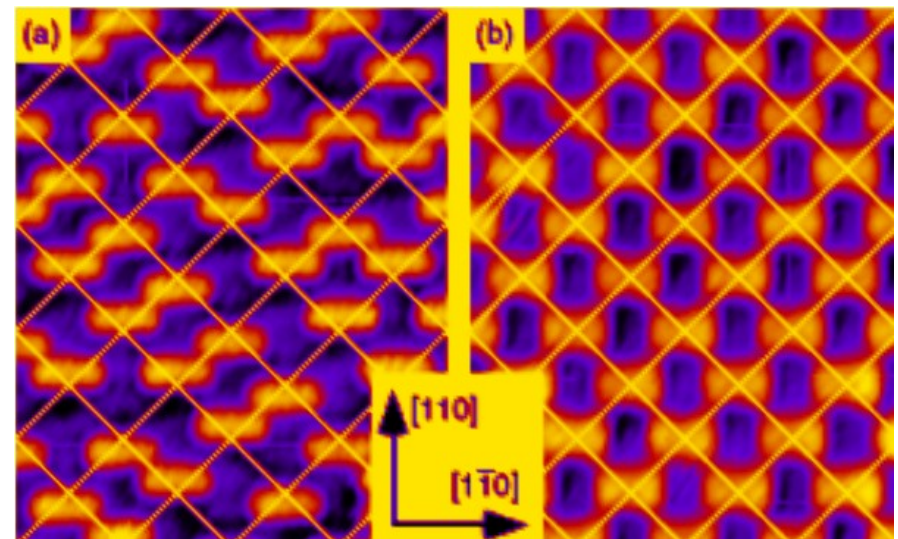
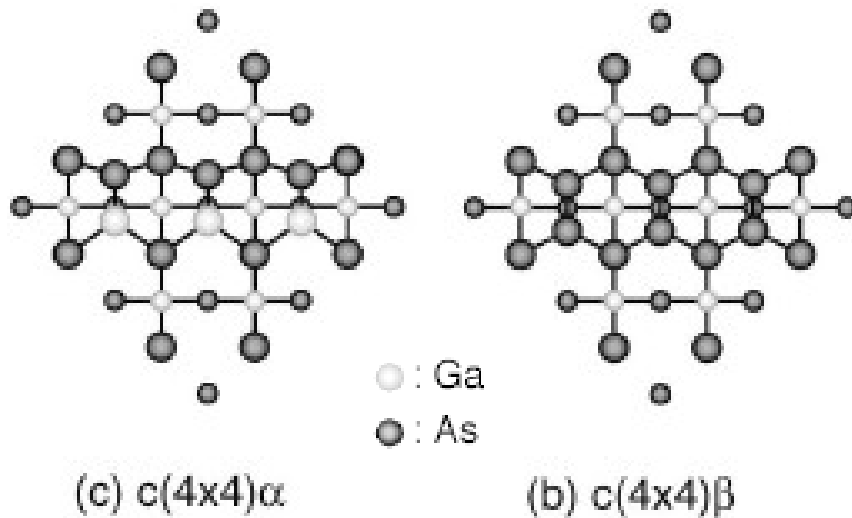
STM imaging



- a) empty state image
- b) filled state image (defects of various types visible)

GaAs (100)

GaAs – polovodič budoucnosti :)



6,4 nm x 8,0 nm **napětí na hrotu ~ 3V**
- **zobrazuje As atomy**

Adsorpce kovů na Si površích povrchová rekonstrukce - předloha pro růst nanostruktur

Si(111)-(7×7)

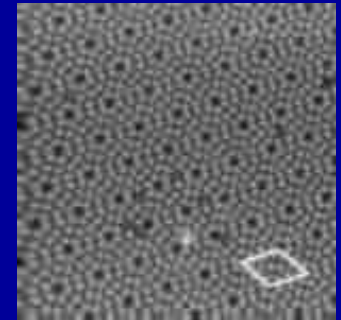
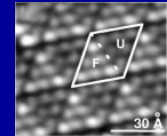
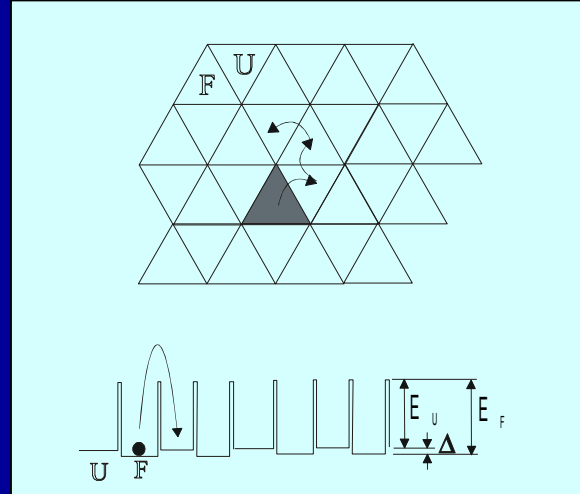
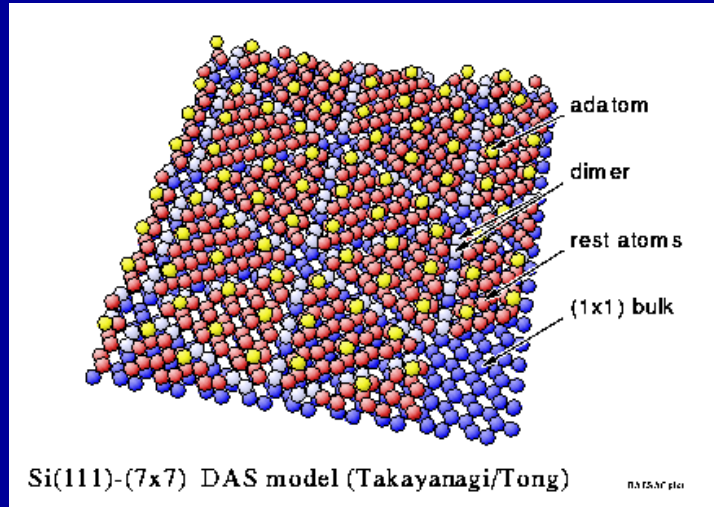
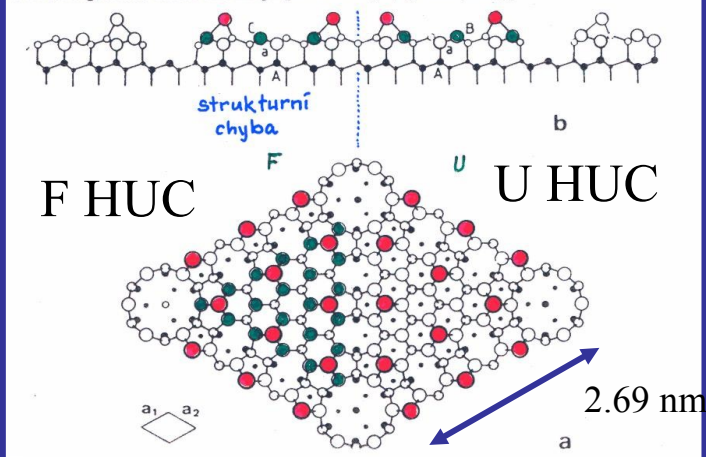
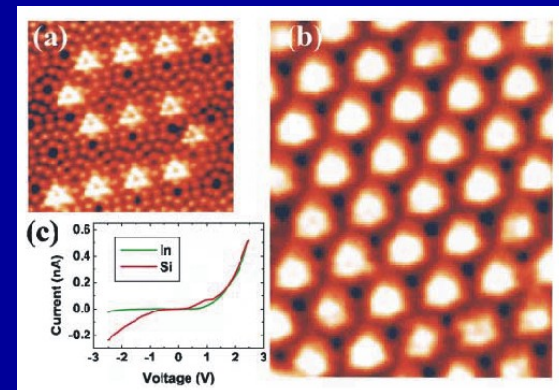


FIG. 30. DAS model of the Si(111)(7 × 7) surface. (a) Top view. Atoms on (111) layers at decreasing heights are indicated by circles of decreasing sizes. (b) Side view. Large open and solid circles indicate atoms on the (101) plane through the long diagonal across the corner holes. Smaller open and solid circles are atoms on the next (101) plane. The unfaulted half of the unit cell is on the right-hand side of the image. [After Takayanagi *et al.* (1985).]



In na Si(111)-(7×7)



Jian-Long Li et al., PRL 88 (2002), 66101