



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Mikroskopie skenující sondou

Roman Kubínek, Milan Vůjtek

Katedra experimentální fyziky, Přírodovědecká fakulta

Univerzity Palackého v Olomouci



Tento projekt je spolufinancován *Evropským sociálním fondem* a státním rozpočtem České republiky v rámci projektu *Vzdělávání výzkumných pracovníků v Regionálním centru pokročilých technologií a materiálů* (CZ.1.07/2.3.00/09.0042)

Mikroskopie skenující sondou

SPM – Scanning Probe Microscopy

1981 – STM – Skenovací tunelovací mikroskopie

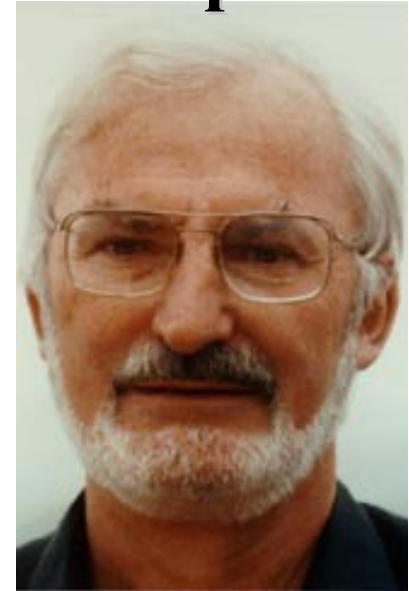


1986 Nobelova cena

Gerd Binnig Heinrich Rohrer

konstrukce STM

(Scanning Tunneling Microscope)



1986 – AFM (Atomic Force Microscopy)
Mikroskopie atomárních sil

1987 – do současnosti – další klony využívající princip přesného polohování a těsného přiblížení sondy k povrchu



Charakteristika metod SPM

- **SPM přístroje pracují v oblasti blízkého pole** – dosažení rozlišení pod tzv. difrakční mezí (u SM srovnatelné s vlnovou délkou), ovšem za cenu získání pouze lokální informace o vzorku.
- **Postupné měření ve více bodech** – skenování sondou nad vzorkem pro charakterizaci celého povrchu vzorku.
- **Metody poskytují trojrozměrný obraz** v přímém prostoru, narozdíl např. od difrakčních technik nebo elektronové mikroskopie s vysokým rozlišením. Techniky SPM tedy vhodně překrývají rozsahy dosažitelné pomocí optické a elektronové mikroskopie – využití k vzájemným kombinacím.
- **Technika SPM nemusí být pouze zobrazovací** – lze ji použít i k modifikaci povrchů až na atomární škále. (Lze provádět litografické zpracování, mechanické odstraňování, manipulace s molekulami i jednotlivými atomy).

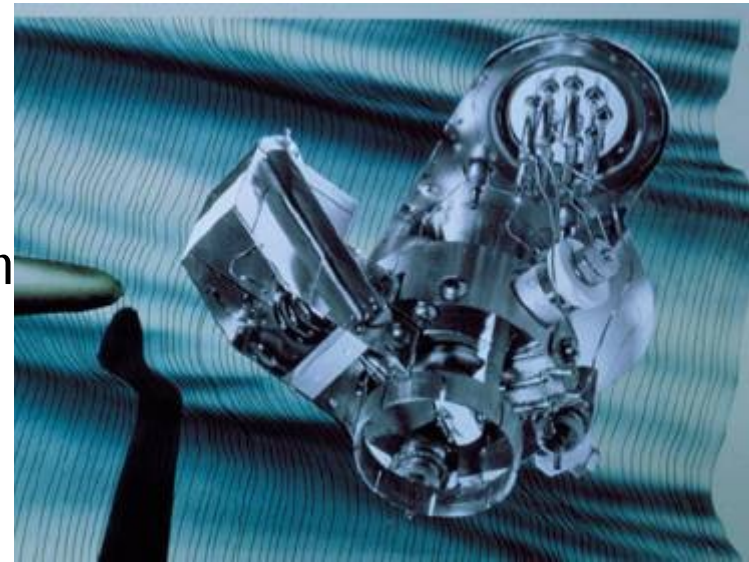


Vývojové fáze metod SPM – 1

1928 Synge - teoretický návrh optického zobrazení ostrým skleněným hrotem těsně nad povrchem (Znovuobjevení předchozího teoretického principu skenování O'Keefe 1956).

1972 Ash - Experimentální ověření rozlišení pod vlnovou mezí s mikrovlnami o $\lambda=3$ cm, rozlišení 150 μm .

1972 Young - Sestrojení Topografineru, přístroje, který mapuje topografii vodivých vzorků s rozlišením 3 nm vertikálně a 400 nm horizontálně

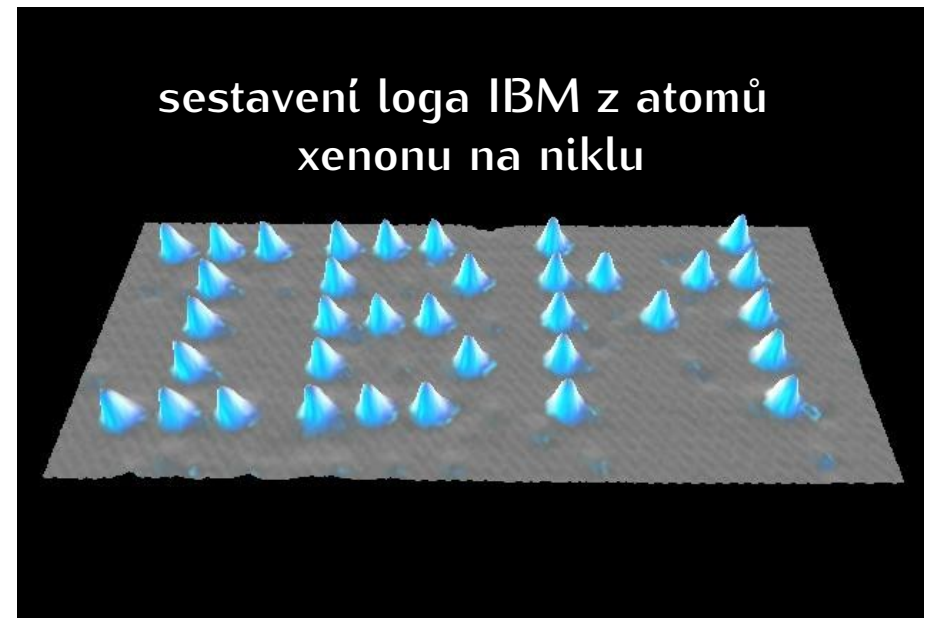


Vývojové fáze metod SPM – 2

1981 První úspěšná realizace tunelování Binnigem a Rohrerem v roce v laboratořích *IBM* – přístroj pracuje ve vakuu, vibrace jsou tlumeny magnetickou levitací, použití zpětné vazby a piezokeramických pohybových členů

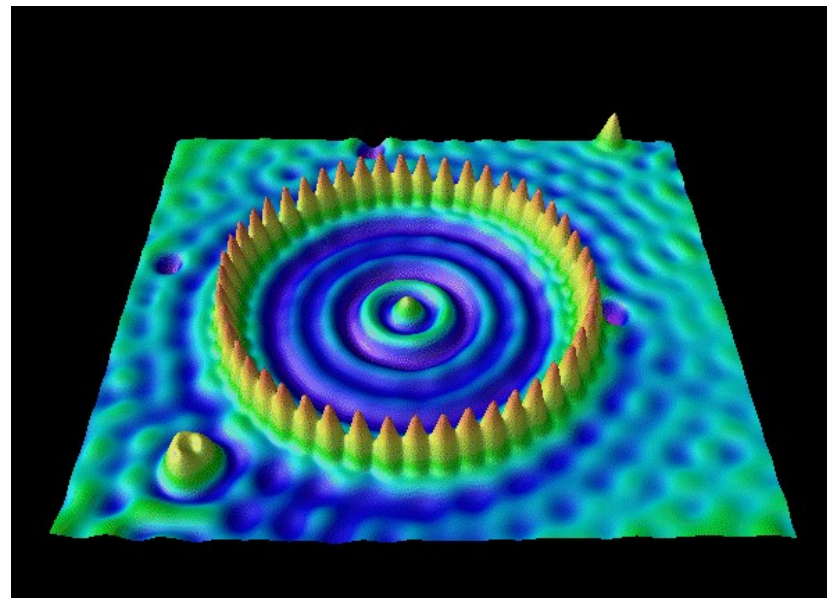
1982 Realizace kapacitní mikroskopie a následně rozvoj mnoha dalších „klonů“, např. **AFM 1986**

1989 První pozorování poškození vzorku vlivem interakce s hrotem a následné využití k modifikaci povrchů (nanolitografie)



Vývojové fáze metod SPM – 3

1993 Demonstrace kvantových vlastností vznikem stojatých vln v kruhové bariéře sestavené z atomů železa na mědi



2000 Řízení chemických reakcí jednotlivých molekul, bouřlivý rozvoj aplikací nejen v oblasti základního, ale i aplikovaného výzkumu.

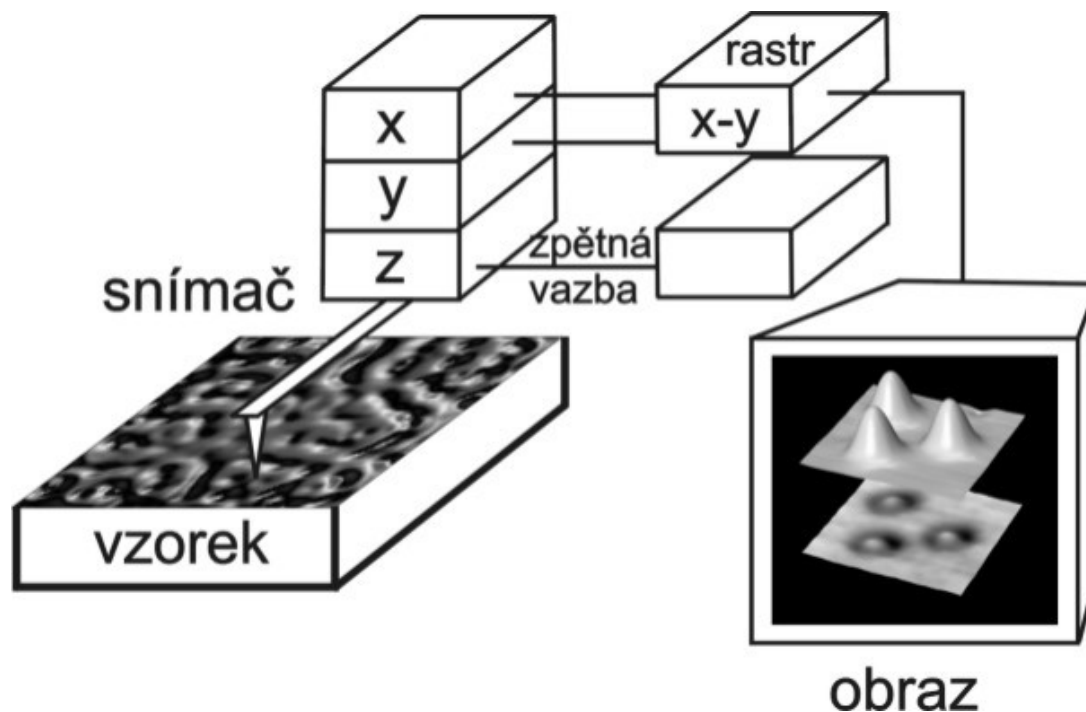


Rozvoj metod SPM v 1. desetiletí

Tunelovací	1981	Binnig, Rohrer
Optická blízkého pole	1982	Pohl
Kapacitní		Matey, Blanctepelná Williams, Wickramasinghe
Atomárních sil	1986	Binnig, Rohrer
Přitažlivých sil		Martin, Williams, Wickramasinghe
Magnetických sil		Martin, Wickramasinghe
Třecích sil		Mate, McClelland, Chiang
Elektrostatických sil		Martin, Abraham, Wickramasinghene
Elastická tunelovací spektroskopie		Smith, Kirk, Quate
Laserem řízený STM		Arnold, Krieger, Walther
Emise balistických elektronů		Kaiser
Inverzní fotoemisní	1988	Coombs, Gimzewski, Reihl, Sass, Schlittler
Akustická blízkého pole	1989	Takata, Hasegawa, Hosaka, Hosoki, Komoda
Šumová		Moller, Esslinger, Koslowskispinová Manassen, Hamers,
Iontová	1989	Hansma, Drake, Marti, Gould, Prater
Elektrochemická	1989	Husser, Craston, Bard
Absorpční	1989	Weaver, Wickramasinghe
Fotonová absorpční	1989	Wickramasinghe, Weaver, Williams
Chemického potenciálu	1990	Williams, Wickramasinghe
Fotonapěťová	1990	Hamers, Markert



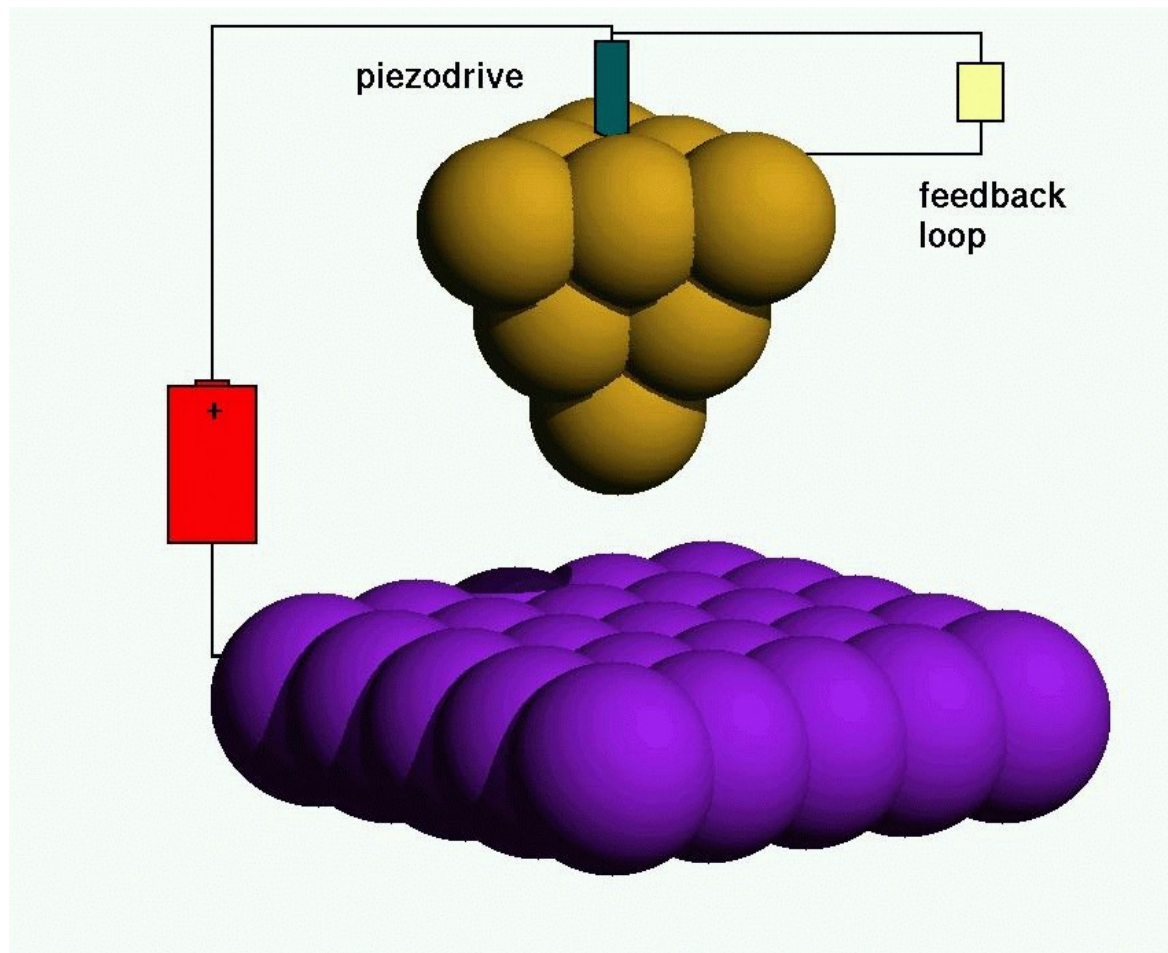
Princip mikroskopů se skenující sondou



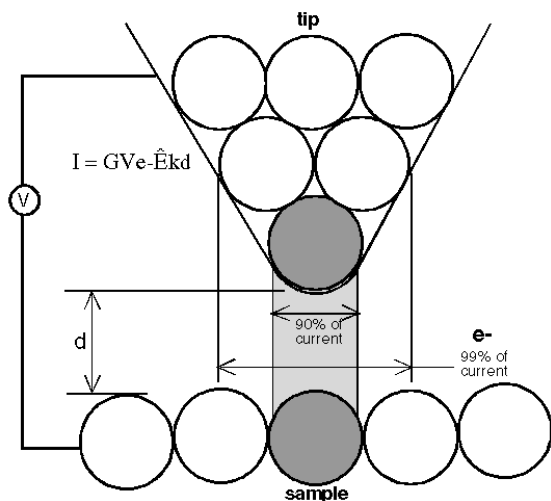
- umístění mechanické sondy do blízkosti povrchu vzorku
- řízení pohybu ve směru x - y , z signálem zpětné vazby piezoelektricky (rozlišení 10^{-10} m)



Pozice hrotu a povrchu



Skenovací tunelovací mikroskopie STM



Podmínka: ostrý vodivý hrot a vodivý vzorek

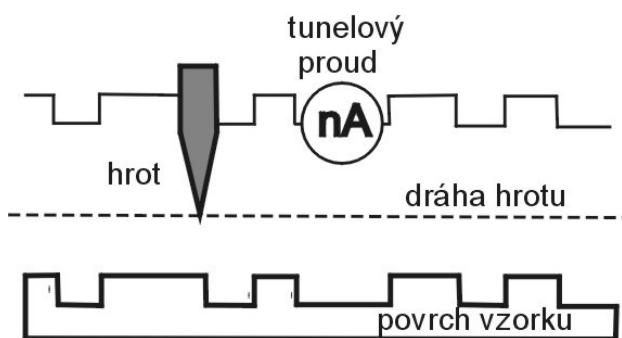
Pravděpodobnost průchodu energetickou bariérou (tunelování)

$$P \approx e^{-\frac{2}{\hbar} \int_0^d \sqrt{2m[U(x) - E]} dx}$$

Tunelovací proud

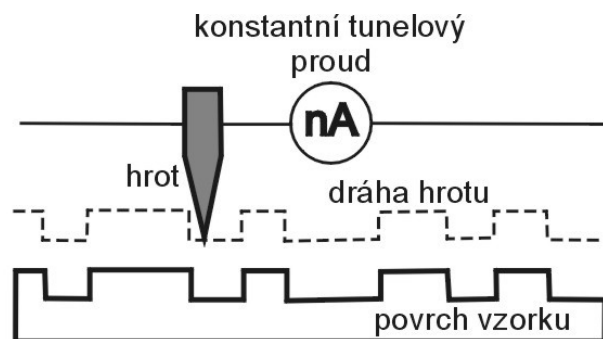
$$I = a \cdot U \cdot e^{-b \cdot \phi^2 \cdot d}$$

obraz povrchu je dán rozložením vlnové funkce atomů



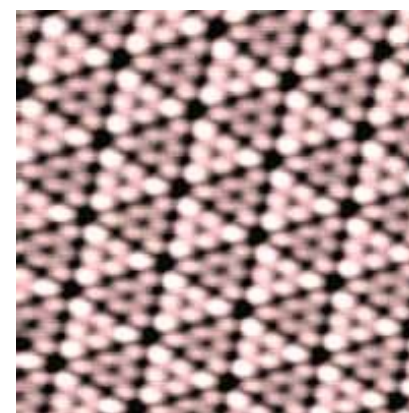
Režim konstantní výšky

- rychlejší
- vhodný pro hladké povrchy



Režim konstantního proudu

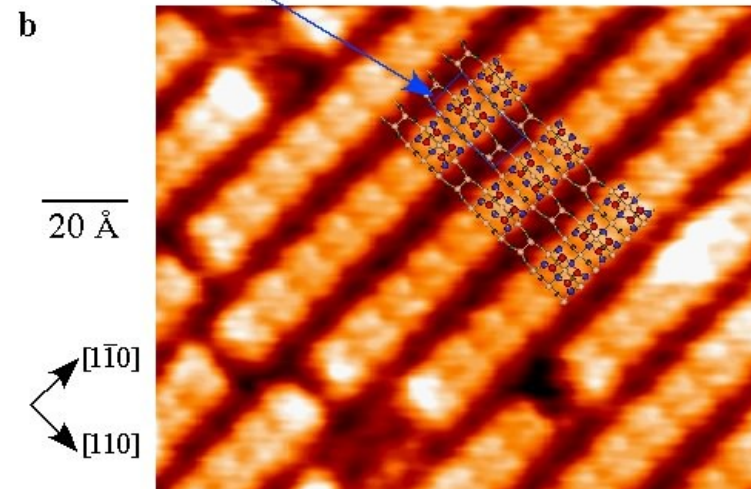
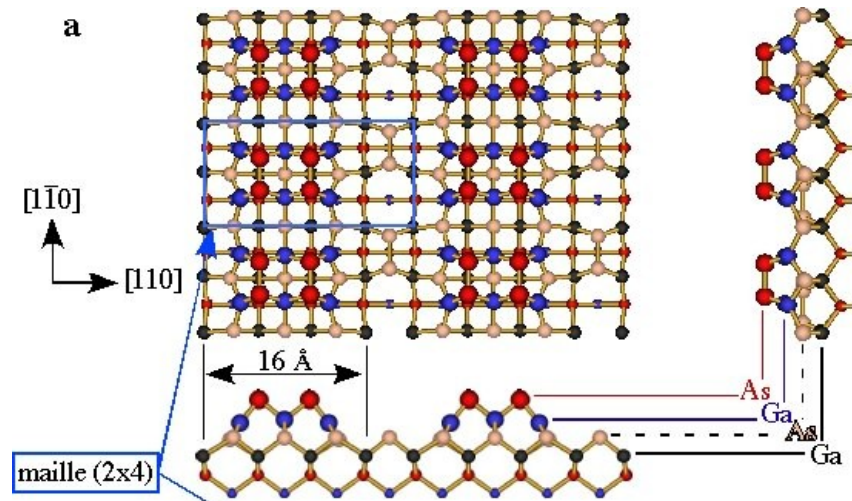
- časově náročnější měření
- přesnější pro členité povrchy



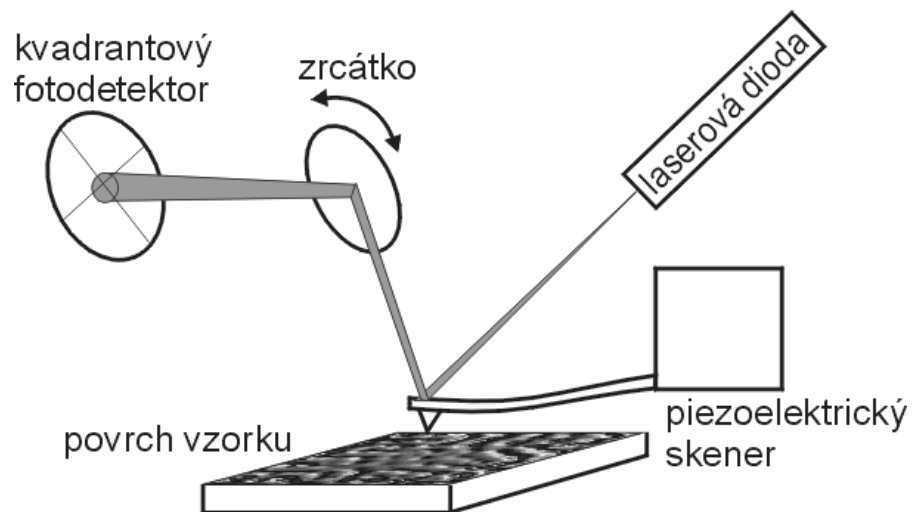
Si (111), 10×10 nm²



Rekonstrukce atomární struktury $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ s využitím STM



Mikroskopie atomárních sil (AFM)



- **kontaktní režim**

$F \approx 10^{-7}$ N – režim konstantní síly
 $d \approx 1$ nm – **tuhé vzorky**

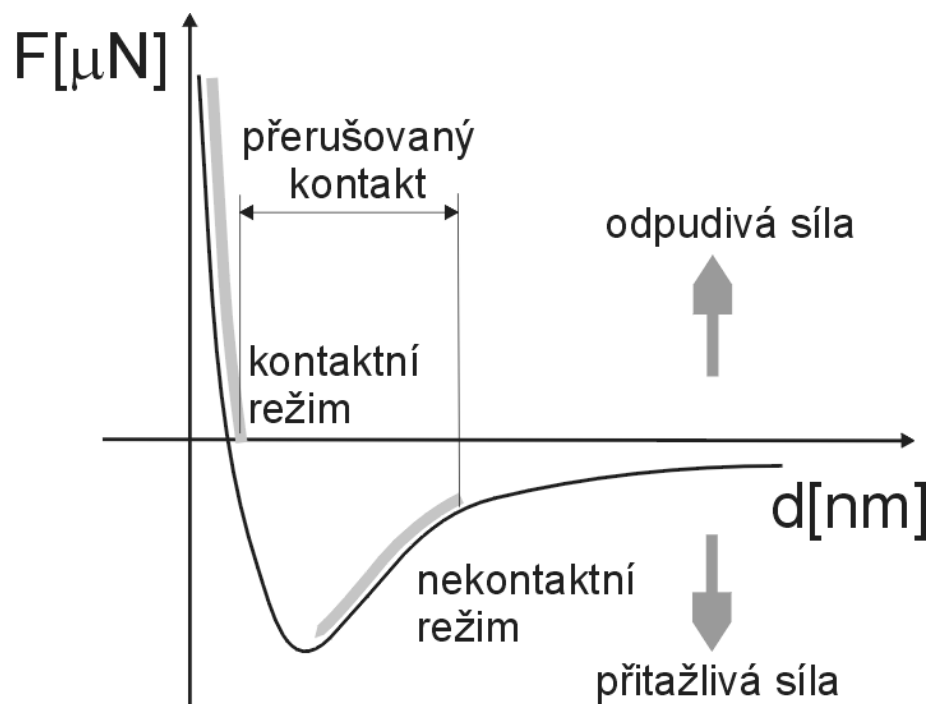
- **nekontaktní režim**

$F_w \approx 10^{-12}$ N, $d \approx 100$ nm,
raménko kmitá s $f_r \approx 200$ kHz
– **měkké, pružné (biologické) vzorky**

- **pokleповý režim**

mapování atomárních sil

- odpuzivé síly elektrostatické
- přitažlivé síly Van der Waalsovy



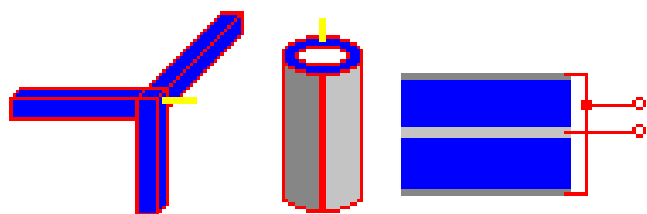
graf závislosti celkové síly na hrot



Polohovací zařízení – skener

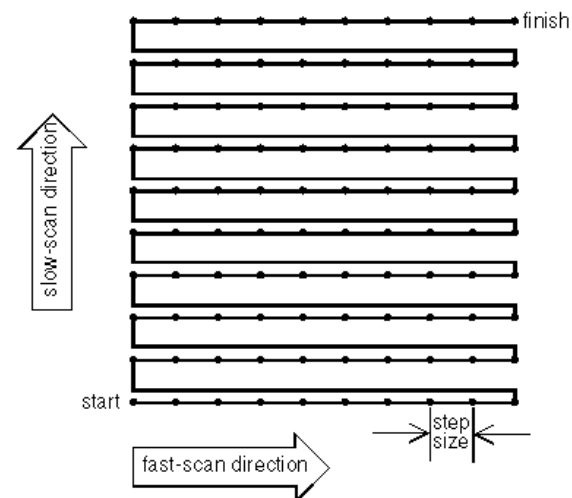
skener – zajišťuje přesnou pozici
vzhledem k povrchu vzorku

piezoelektrická keramika – PbZrO_3 , PbTiO_3



trojnožka – $100 \times 100 \mu\text{m}^2$, $z - 10 \mu\text{m}$

trubička – $2 \times 2 \mu\text{m}^2$, $z - 0,8 \mu\text{m}$



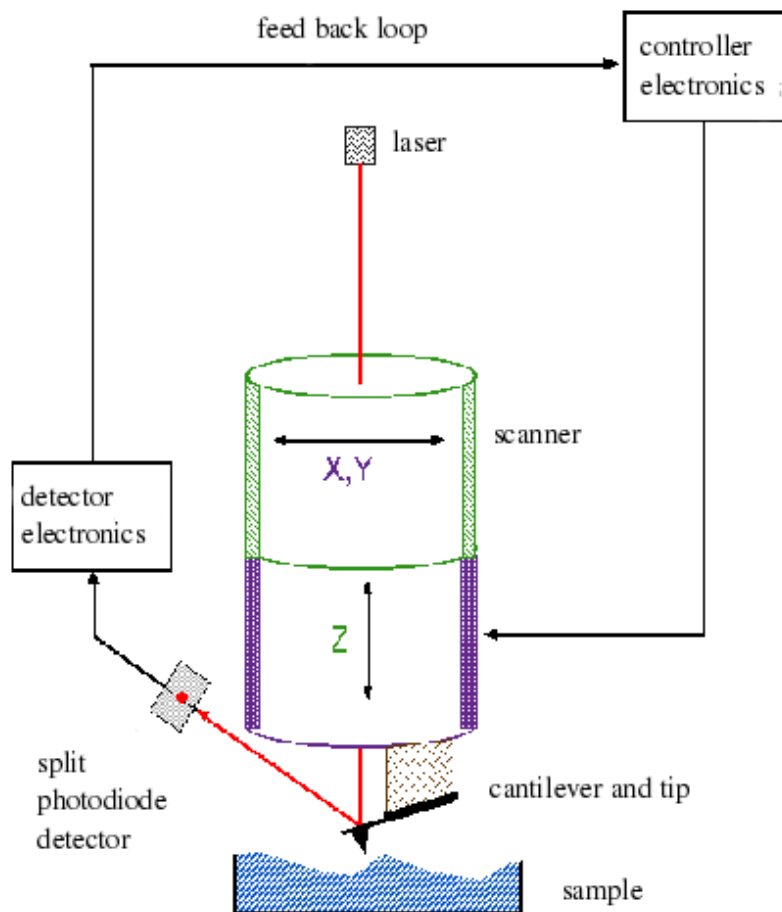
režim skenování:

- počet řádků – až 1000
- počet bodů – až 1000

zkreslení skeneru – chyby skenování:

- **hystereze** – nejednoznačnost při rozpínání a smršťování skeneru
- **nelinearita** – prodloužení není lineární funkcí přiloženého napětí
- **tečení (creep)** – postupné prodlužování skeneru
- **stárnutí** – změna vlastností piezoelektrické keramiky





•kontaktní režim

$F \approx 10^{-7} \text{ N}$ – režim konstantní síly

$d \approx 1 \text{ nm}$

zejména vhodné pro tuhé vzorky

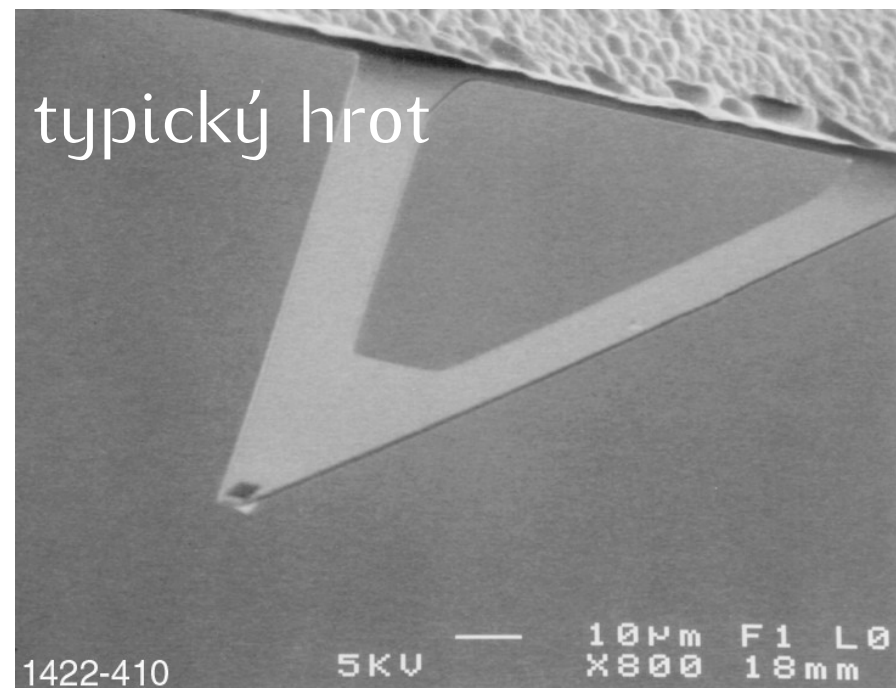


Schéma detekce
v kontaktním režimu



Schéma detekce

v bezkontaktním a pokleповém režimu

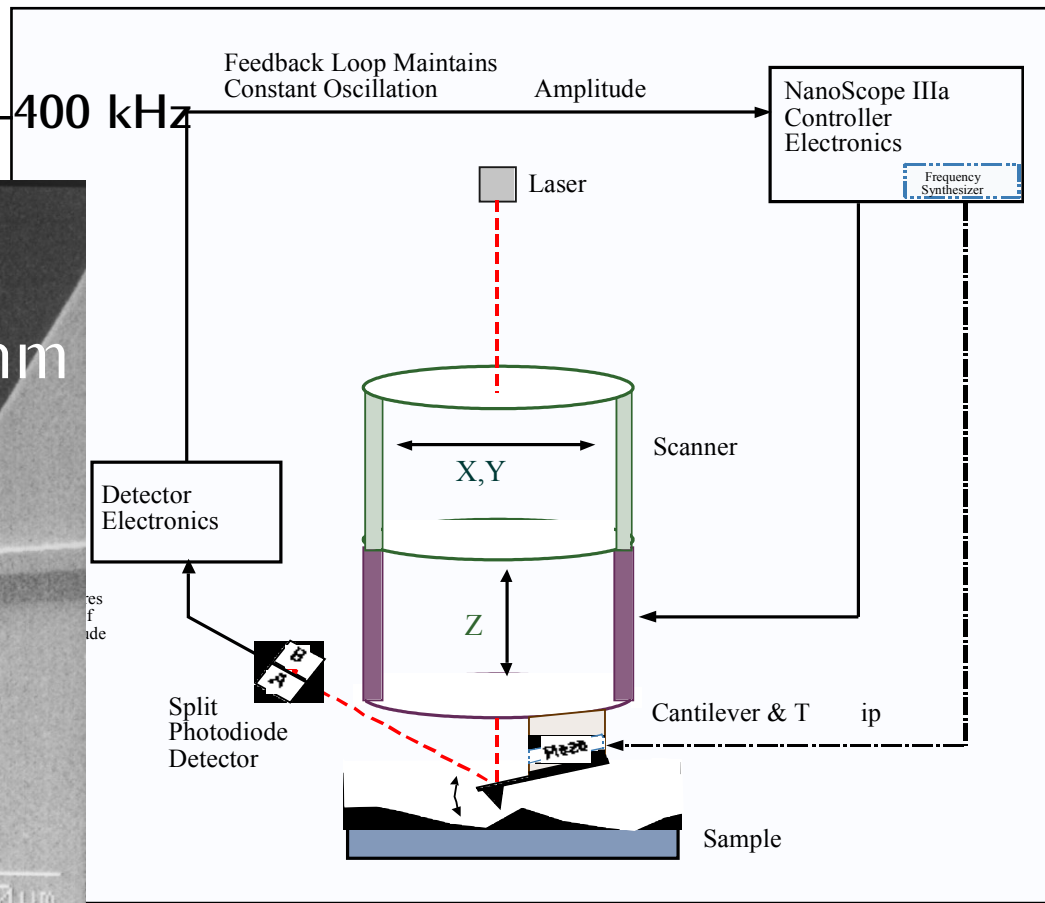
• nekontaktní režim

• pokleповý režim

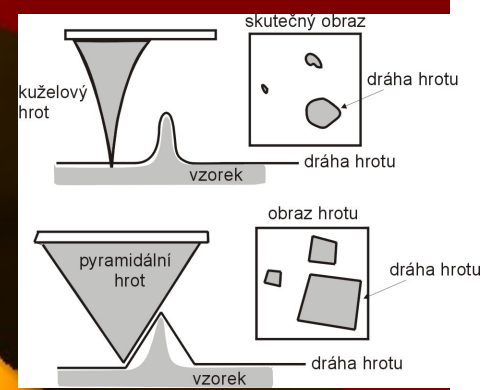
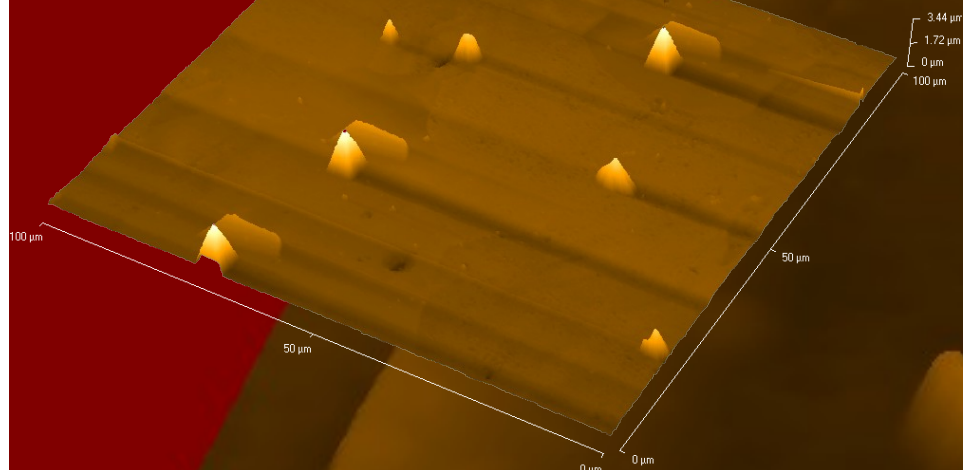
– měkké, pružné (biologické) vzorky

$F_w \approx 10^{-12}$ N, $d \approx 100$ nm,
raménko kmitá s $f_r \approx 200 - 400$ kHz

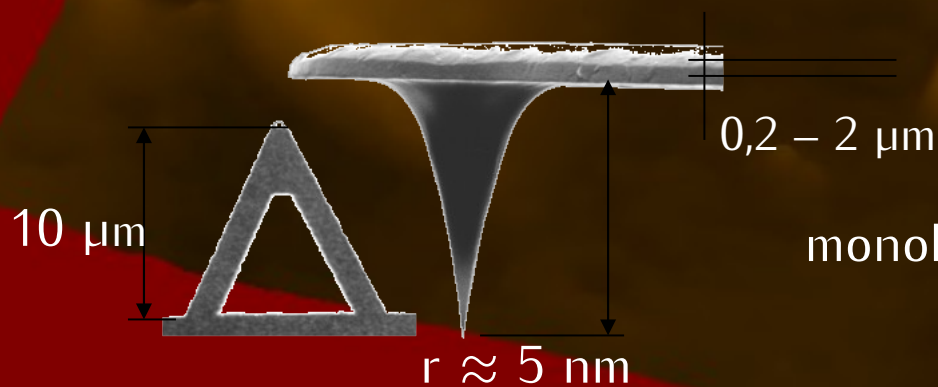
typický hrot
s poloměrem 5 až 10 nm



Rozlišovací mez AFM daná štíhlostí hrotu



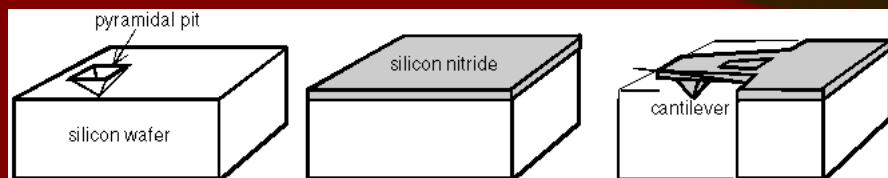
štíhlost hrotu – 1 : 3 speciální hroty – 1 : 10
 (schopnost zobrazit ostré hrany a hluboké zářezy)



monokrystal Si hrot – Si_3N_4



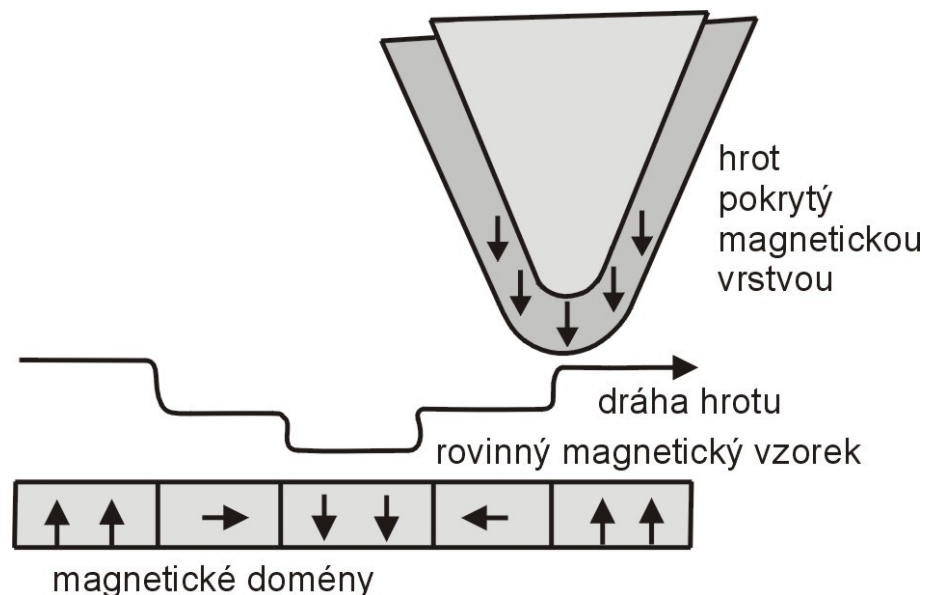
nanotrubičky WS_2 leptaný hrot



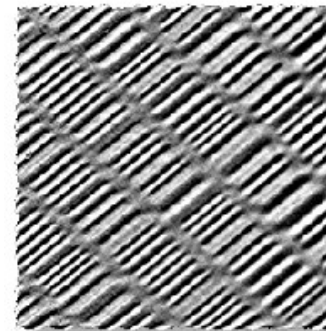
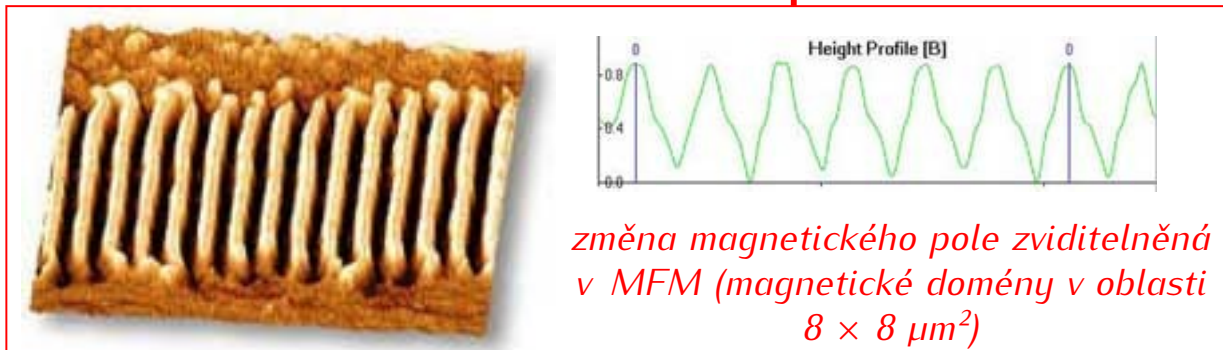
Mikroskopie magnetické síly (MFM)

Systém pracuje v NK režimu –
rezonanční frekvenci raménka
ovlivňuje změna magnetického pole
(magnetická síla) vzorku

1. informace o topografii
2. informace o magnetických vlastnostech povrchu.



MFM mapování domén v magnetických materiálech



MFM obraz harddisku v oblasti $30 \times 30 \mu\text{m}^2$



Skenovací kapacitní mikroskopie (SCM)

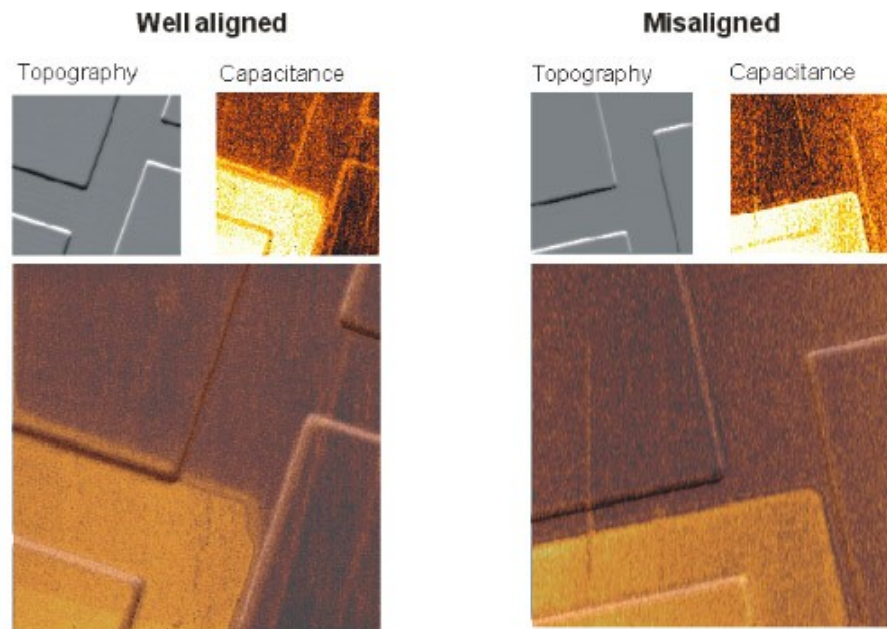
Rastrovací kapacitní mikroskopie (SCM) zobrazuje prostorové změny elektrické kapacity.

Princip:

Raménko s hrotem pracuje v NK režimu (režim konstantní výšky) – speciální obvod sleduje elektrickou kapacitu mezi hrotem a vzorkem.

Použití:

- SCM může sledovat změny obrazu: v závislosti na tloušťce dielektrického materiálu na polovodičových substrátech
- SCM může být použit při vizualizaci podpovrchových nosičů náboje – mapování příměsí (legovacích látek) v iontově implantovaných polovodičích.



Topografický a kapacitní obraz správně a špatně srovnané fotomasky v průběhu procesu implantace legovací látky.



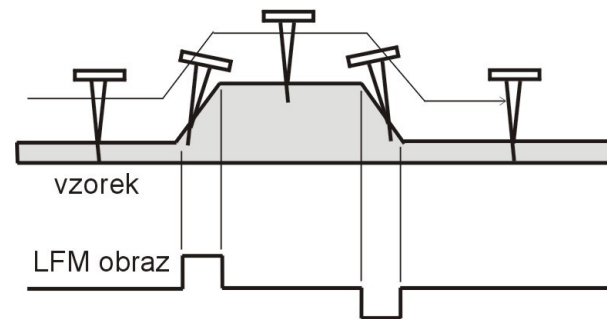
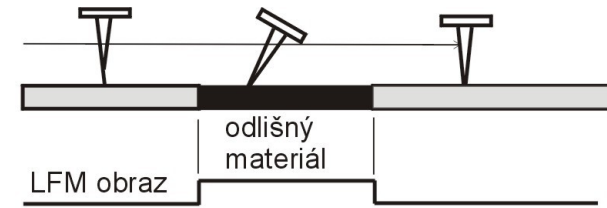
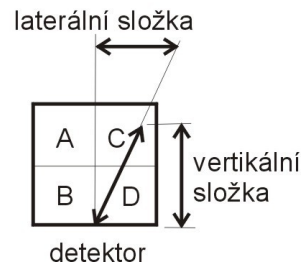
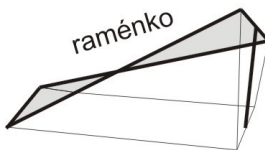
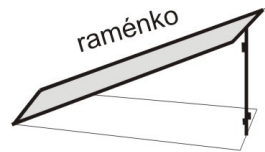
Mikroskopie bočních sil

(LFM – Lateral Force Microscopy)

Princip LFM – vyhodnocení příčného ohybu (krutu) raménka

LFM je vhodný pro:

- zobrazení nehomogenit povrchu (změna koeficientu tření),
- získání obrazu povrchů tvořených stupňovitými nerovnostmi (hranami).



K laterálnímu ohybu raménka dochází ze dvou příčin:

- změnou tření
- změnou náklonu raménka.



Mikroskopie modulovaných sil

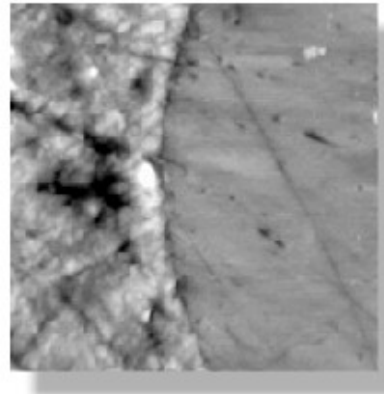
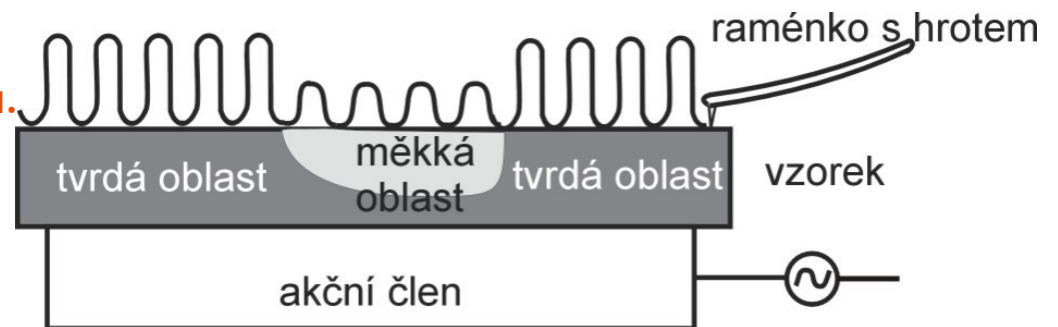
(FMM – Force Modulation Microscopy)

(FMM) používá modulační techniku v dotykovém režimu s konstantní silou.

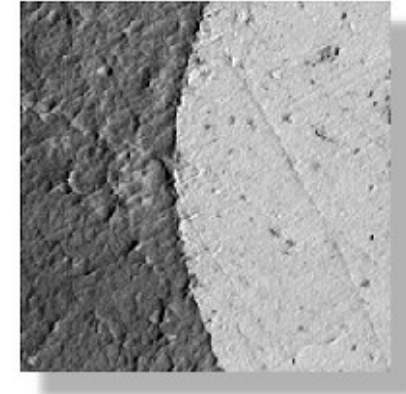
Vzorek vibruje se stálou amplitudou a frekvencí nad mezní frekvencí zpětné vazby a se stejnou frekvencí bude kmitat i hrot, který je s ním v kontaktu.

Amplituda kmitů raménka závisí na elastických vlastnostech vzorku v místě doteku.

Měření je možno provádět současně s AFM, jejíž obraz se získává z napětí na piezokeramice



Kontaktní AFM



FMM obraz

kompozit uhlík/polymer ($5 \times 5 \mu\text{m}^2$)



Mikroskopie detekce fázových posunů

(PDM – Phase Detection Microscopy)

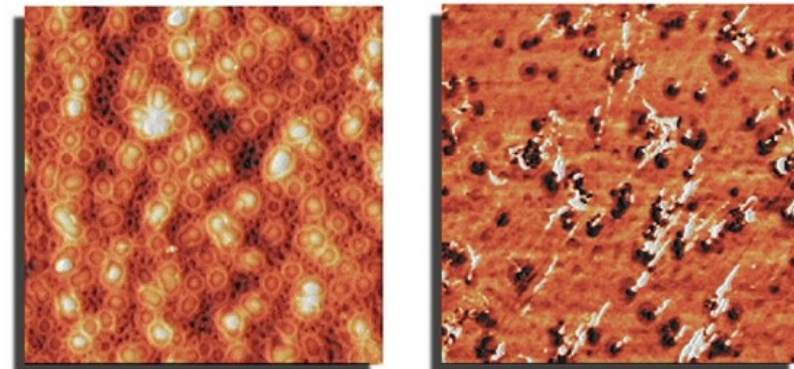
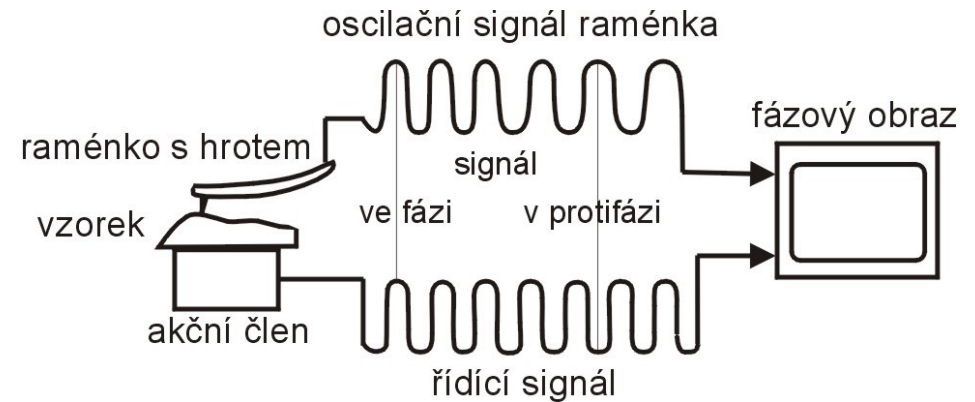
[Mikroskopie detekce fáze \(PDM\)](#) – fázové zobrazení ve spojení s obvyklými režimy (NK, P-K AFM, MFM). Změna fáze může být měřena i v průběhu režimu FMM.

[Detekce fázového posunu – vyhodnocení fázového zpoždění mezi signálem budícím oscilaci raménka a výstupním signálem vyvolaným ve vzorku oscilujícím raménkem](#)

[Příklad použití:](#)

Pořizování informací o materiálových vlastnostech vzorků, jejichž topografie se snadněji měří v NK AFM než kontaktním AFM způsobem.

PDM poskytuje doplňkovou informaci k topografii povrchu).



Porovnání AFM topografie s PDM
Teflonový povrch potažený silikonovým mazadlem (Obrazové pole $9 \times 9 \mu\text{m}^2$)



Mikroskopie elektrostatických sil

(EFM – Electrostatic Force Microscopy)

Princip:

EFM mapuje oblasti (domény) s různou polaritou a hustotou elektrického náboje na povrchu vzorku (obdoba MFM). Velikost výchylky raménka s hrotem je úměrná hustotě náboje. Může být měřena standardním detekčním systémem užívajícím laserový svazek.

Použití:

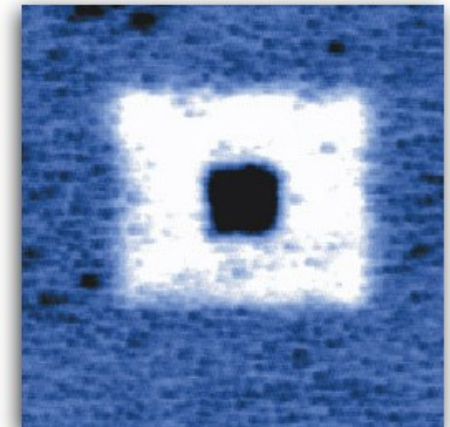
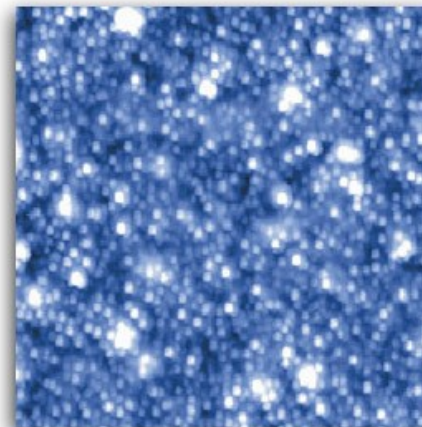
Mapování elektrostatického pole elektronických obvodů při zapnutí a vypnutí přístrojů („napěťová mikrosonda“ pro testování aktivních mikroprocesorových čipů v submikronových mezích).

Ferroelektrický materiál (topografický kontrast vlevo) s implantovaným povrchovým nábojem

(+2,5 V),

(EFM obraz nabité plochy vpravo)

Oblast $5 \times 5 \mu\text{m}^2$



Další metody příbuzné AFM

Mikroskopie disipativních sil

(DFM) mapuje výkon, který nosník ztrácí interakcí se vzorkem. Disipace vzniká následkem hystereze v adhezi mezi vzorkem a hrotem (projevují se i jiné principy).

Výhodou metody je možnost mapovat rozložení hustoty fononů vzorku podél povrchu (v přiblížení obraz závisí jen na vlastnostech vzorku, nikoliv hrotu, což je jistá analogie k STM).

Mikroskopie ultrazvukových sil

(UFM) využívá ultrazvukové excitace vzorku, především pro mapování materiálových vlastností. Klasická mikroskopie využívá „lineární“ režim detekce, v němž je sledována amplituda a fáze pohybu nosníku. V UFM je použit „nelineární“ režim.

Při ultrazvukovém kmitání je modulována vzdálenost hrot–vzorek mezi maximální a minimální hodnotou, které jsou určeny amplitudou buzení a nastavením síly (setpoint). Pro velké amplitudy se projeví nelinearita, středovaná síla obsahuje přídavnou sílu (vlivem ultrazvuku) a tím přídavné ohnutí nosníku → lze provádět mikroskopii.



Skenovací teplotní mikroskopie

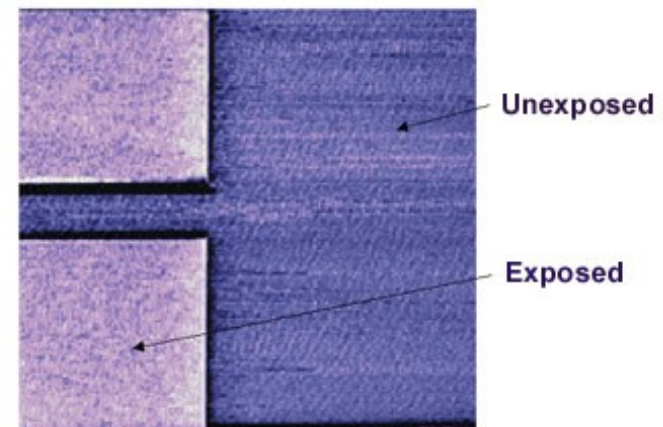
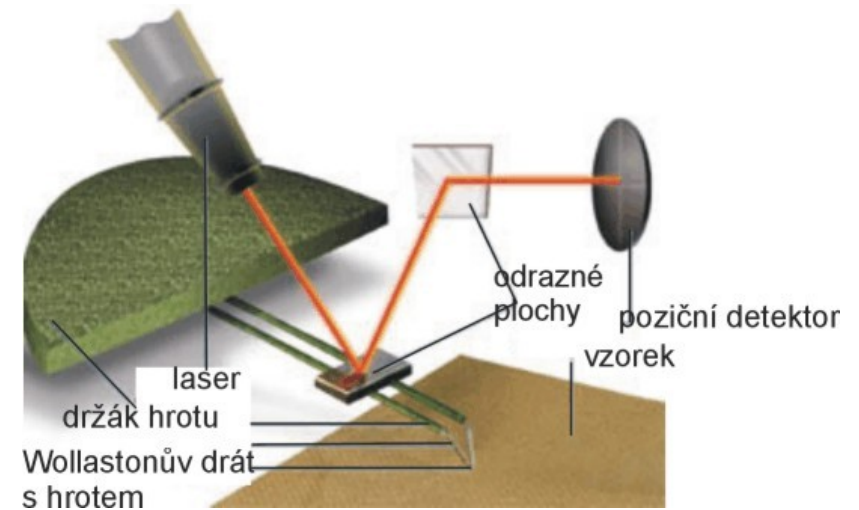
(SThM – Scanning Thermal Microscopy)

SThM umožňuje současné snímání tepelné vodivosti a topografie povrchu vzorku

Princip:

U SThM přístroje je místo hrotu sonda s odporovým prvkem. Řídící jednotka řídí vytváření map teploty nebo tepelné vodivosti. Ke konstrukci raménka SThM se používá Wollastonova drátu (slitiny dvou různých kovů), který představuje tepelně závislý odporový prvek. Vlastním odporovým teplotním čidlem je na konci umístěný prvek z platiny (příp. ze slitiny platiny s 10% obsahem rhodia).

Výhoda této konstrukce je, že může být použita pro oba módy tepelného zobrazování (teplota a tepelná vodivost).



SThM snímek fotorezistu



Mikrotermální analýza

(μ TA – Micro–Thermal Analysis)

Mikrotermální analýze (μ TA) – submikronové mapování teploty povrchu (lokální kalorimetrická měření).

Princip:

Wollastonův drát působí jako aktivní tepelný zdroj (odpor sondy je úměrný její teplotě). Změny proudu vyžadované k udržení sondy na konstantní teplotě vedou ke vzniku teplotních map (a obráceně, změny elektrického odporu sondy při konstantním proudu vedou rovněž ke generaci teplotních map).

současně vzniká:

- obraz zahrnující informaci o tepelné difúzi
- obraz podpovrchových změn materiálového složení.

použití: pro kalorimetrické měření – mikro-diferenciální termální analýza (μ DTA).

Je možné sledovat roztažnost, tloušťku vrstvy, teplotu fázových přechodů, změny tvrdosti, procesy tání, tuhnutí, měknutí apod., vlastnosti polymerů na úrovni doménových struktur a jejich rozhraní.

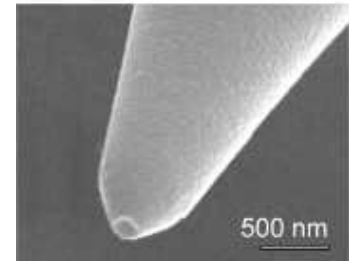
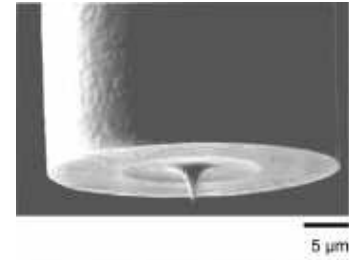


Skenovací optická mikroskopie v blízkém poli (NSOM – Near Field Scanning Optical Microscopy)

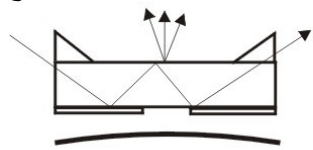
NSOM je skenovací optická mikroskopická technika, která zobrazuje pod difrakčním limitem (λ okolo 300 nm).

Princip:

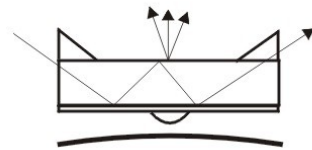
na vzorek dopadá světlo procházející přes jednomódové optické vlákno (několik desítek nm v průměru) pokovené hliníkem (zabránění světelných ztrát). Provádí se detekce evanescentních vln



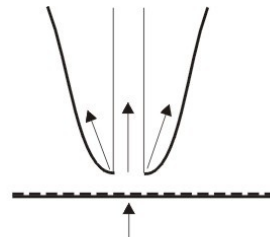
Způsoby detekce světla



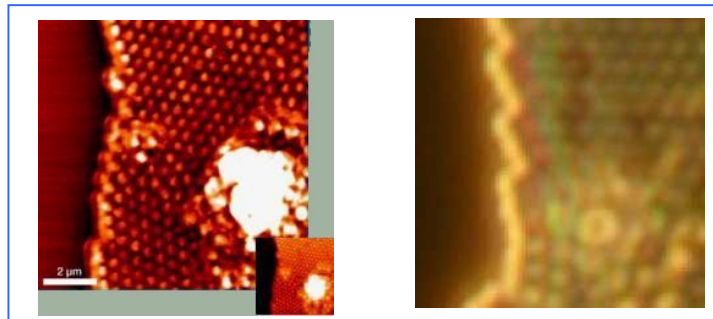
odraz/apertura



odraz/výčnělek

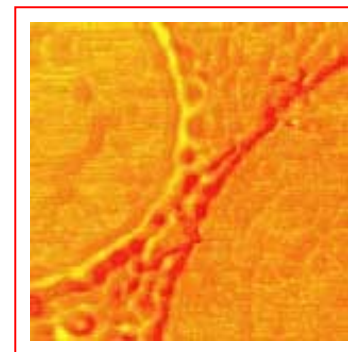


transmisní, sběr sondou



Polystyrénové
kuličky 500 nm

V režimu NSOM a
SM



NSOM obraz srdečního svalu ($10 \times 10 \mu\text{m}^2$)



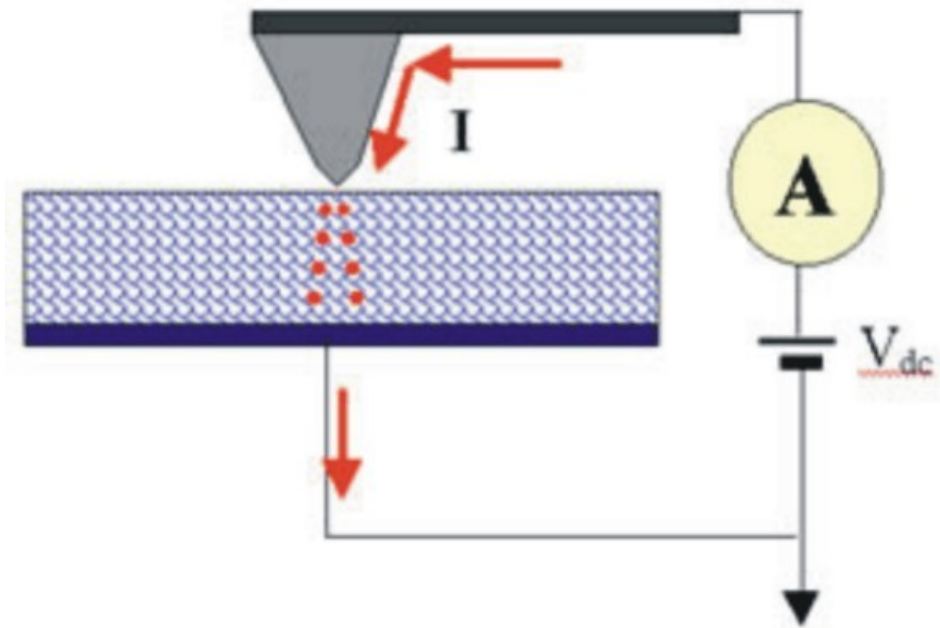
Vodivostní AFM

(Conductive AFM)

Princip: Měření změn vodivosti povrchu. Hrot musí být z vodivého materiálu.

Současně je na hrot přivedeno stejnosměrné napětí a vzorek je uzemněn.

Proud procházející hrotem na vzorek měří vestavěný předzesilovač ve skeneru.

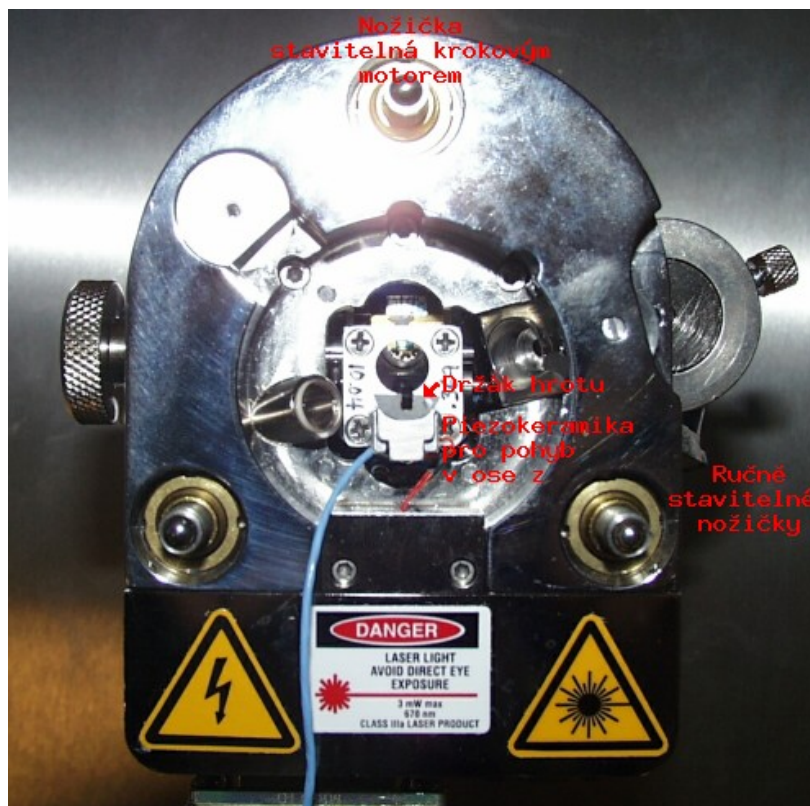
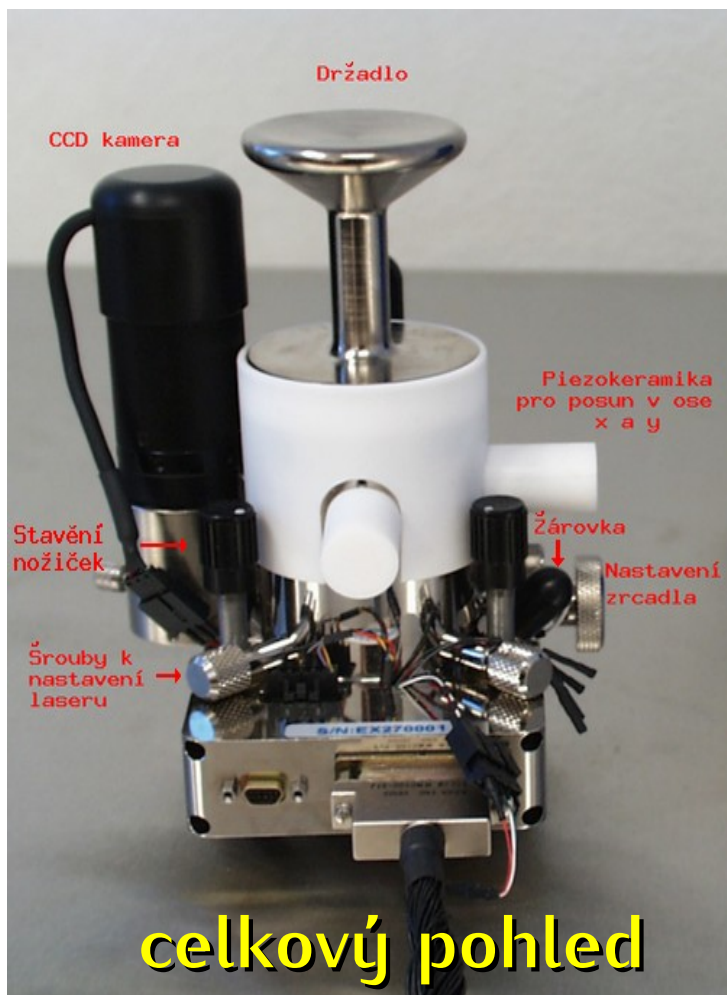


Princip vodivostního AFM



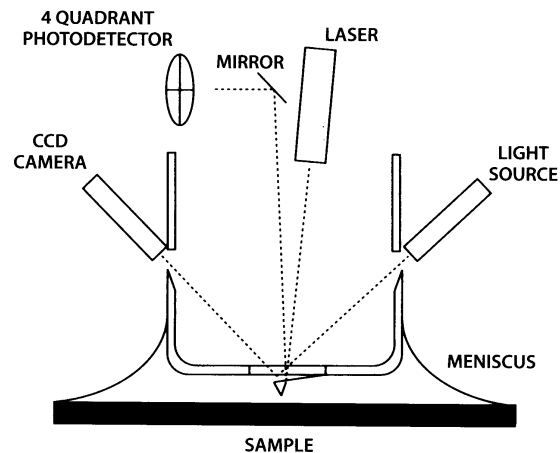
Popis mikroskopu AFM – Explorer

(ThermoMicroscopes-Bruker)



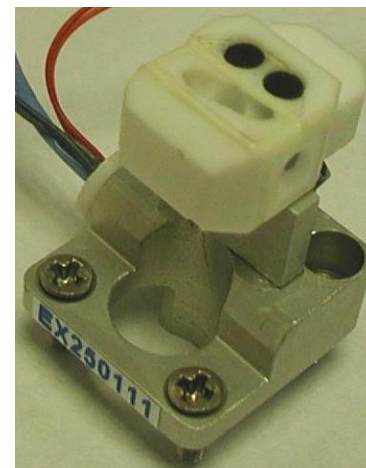
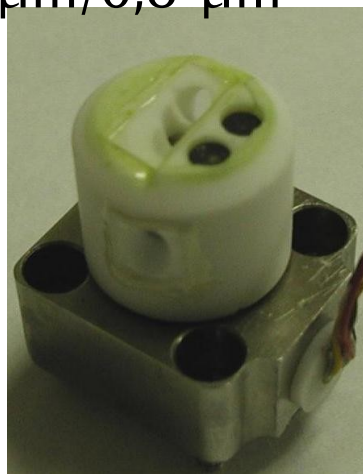
AFM Explorer pro kapalné vzorky

+ inverzní SM Olympus



Trubičkový skener

2 μm /0,8 μm

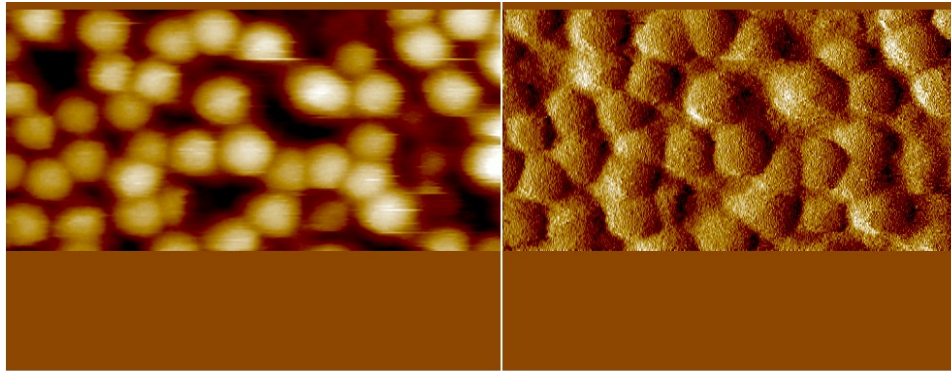


Křížový skener

100 μm /10 μm



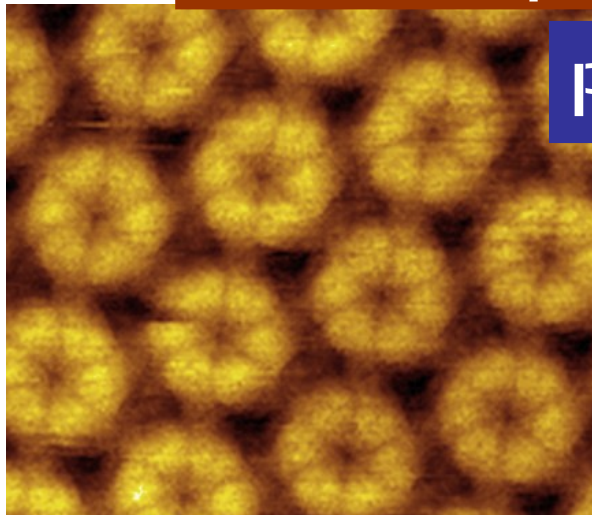
Zobrazení struktury



Virus chřipky, sken 1,5 μm

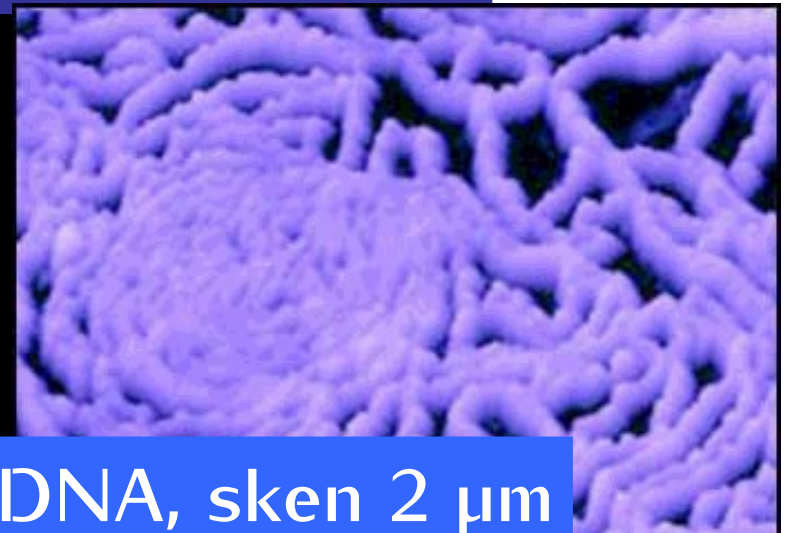
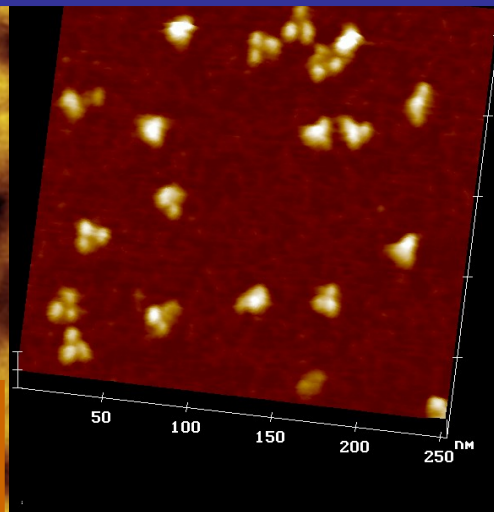


Lipidy, sken 1,5 μm



Cytoplasmatická membrána

Proteiny IgG, sken 250 nm

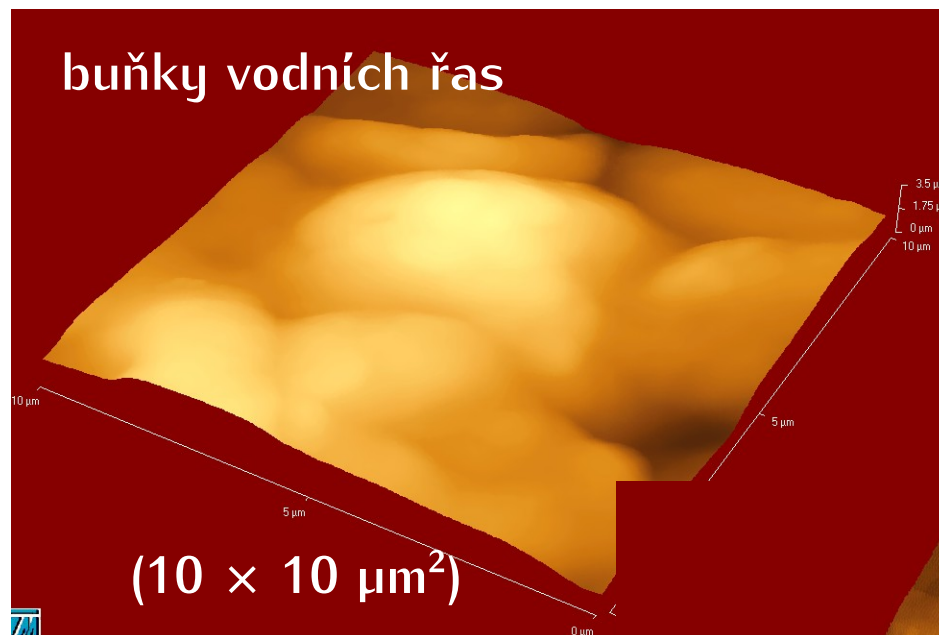


DNA, sken 2 μm

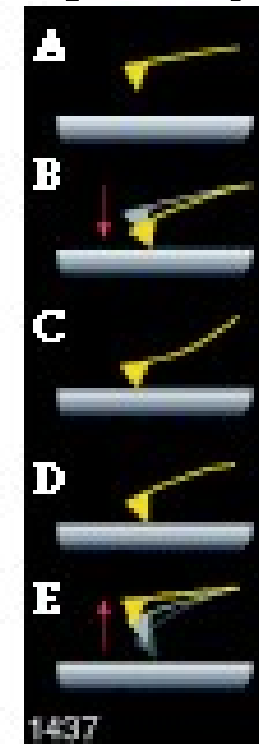
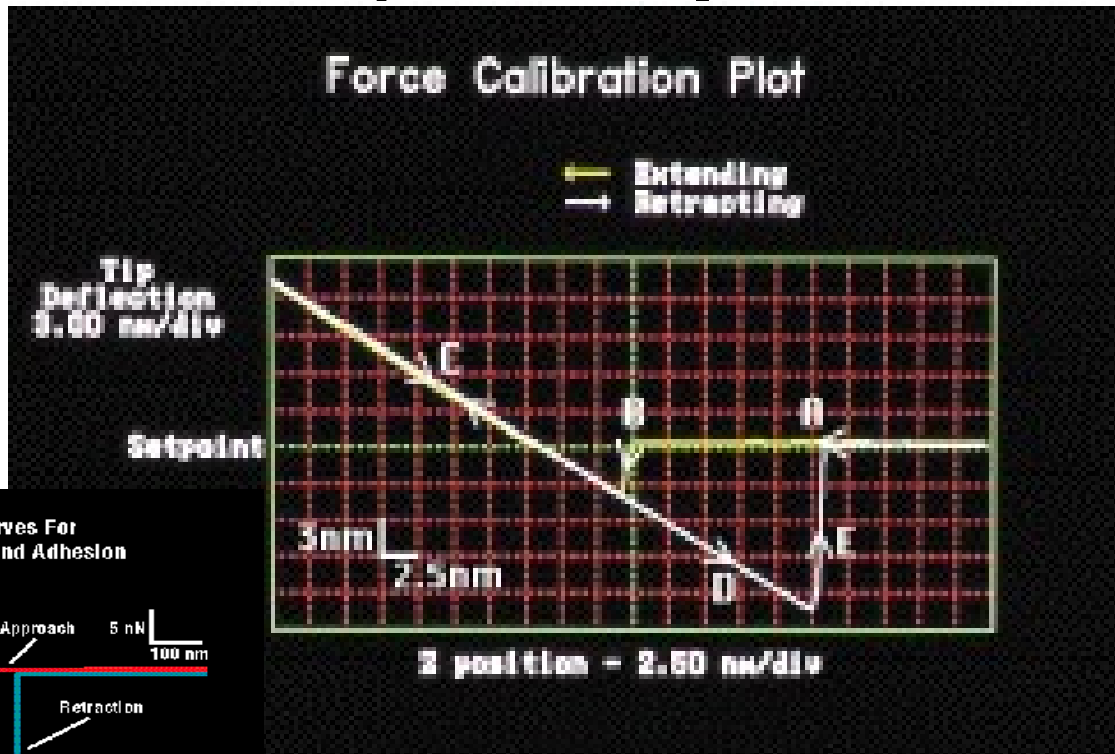
[Click for info about MAC Mode imaging of PUC-19 DNA](#)



Rostlinné buňky a chromozomy



Měření sil ($F-d$ spektroskopie)



Approach

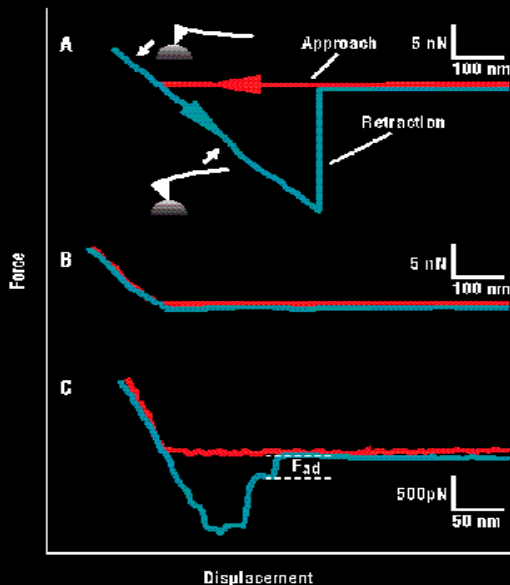
Jump to contact

Contact

Adhesion

Pull-off

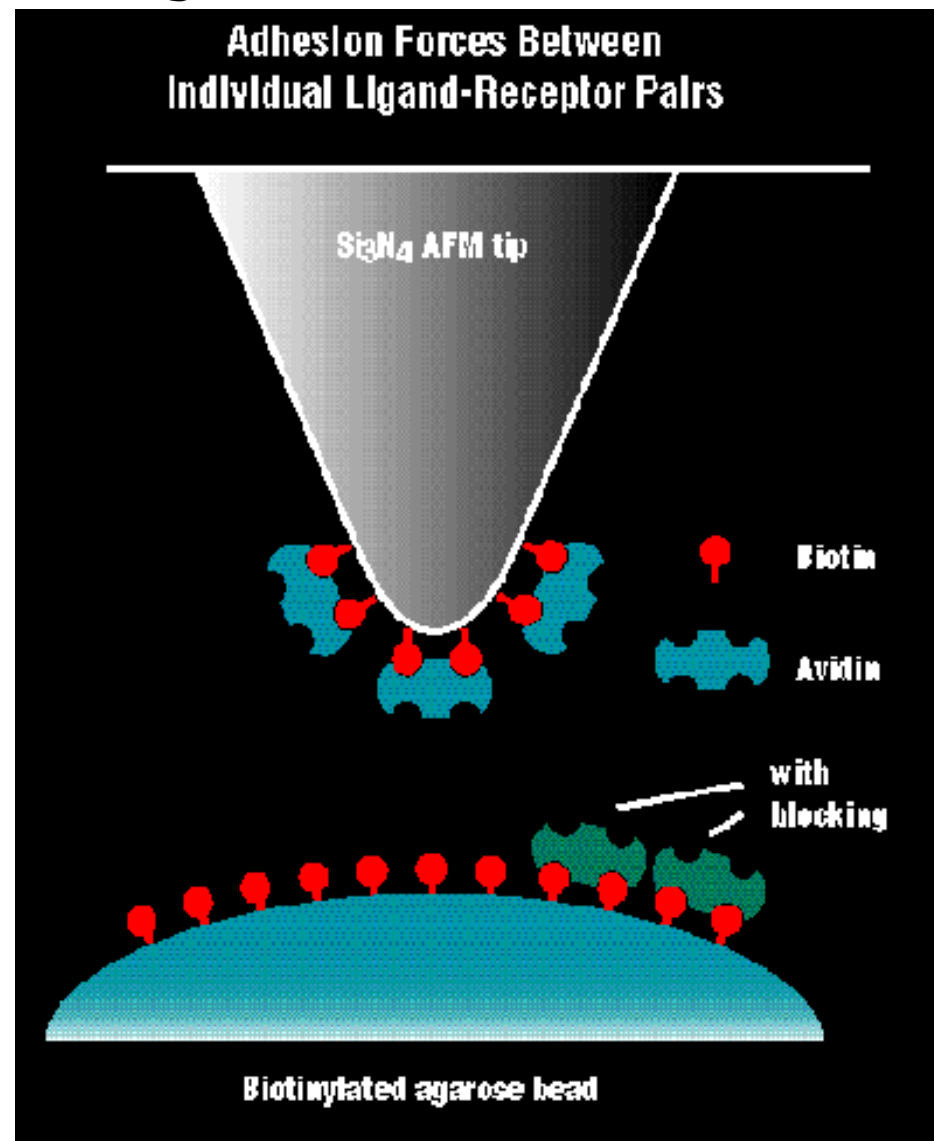
Force Curves For Receptor-Ligand Adhesion



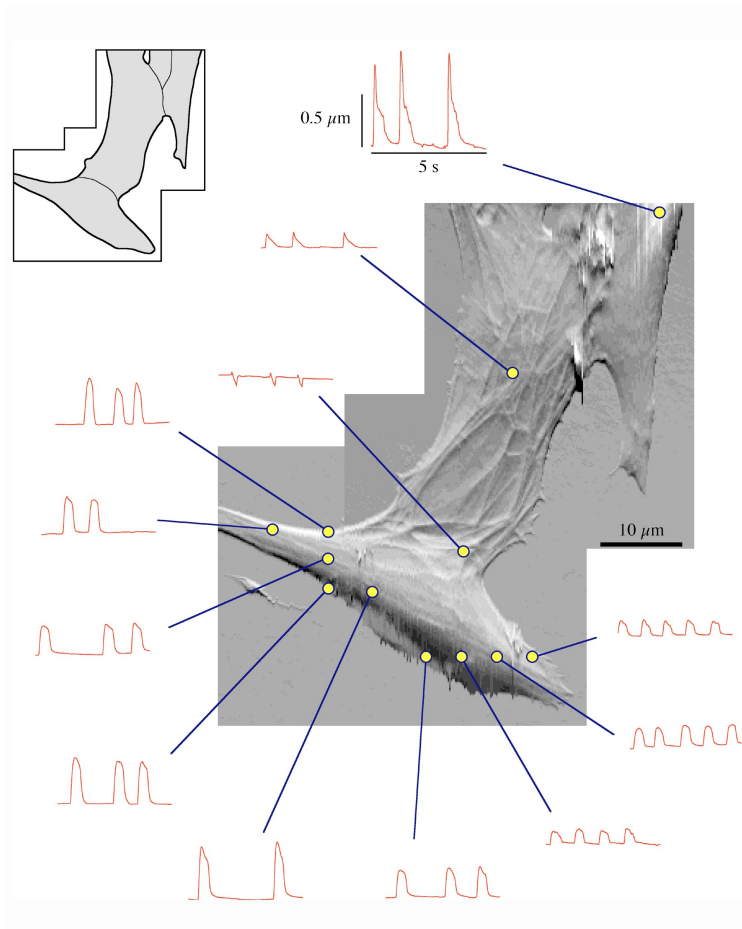
Nezobrazující techniky

Inter a Intra-molekulové síly

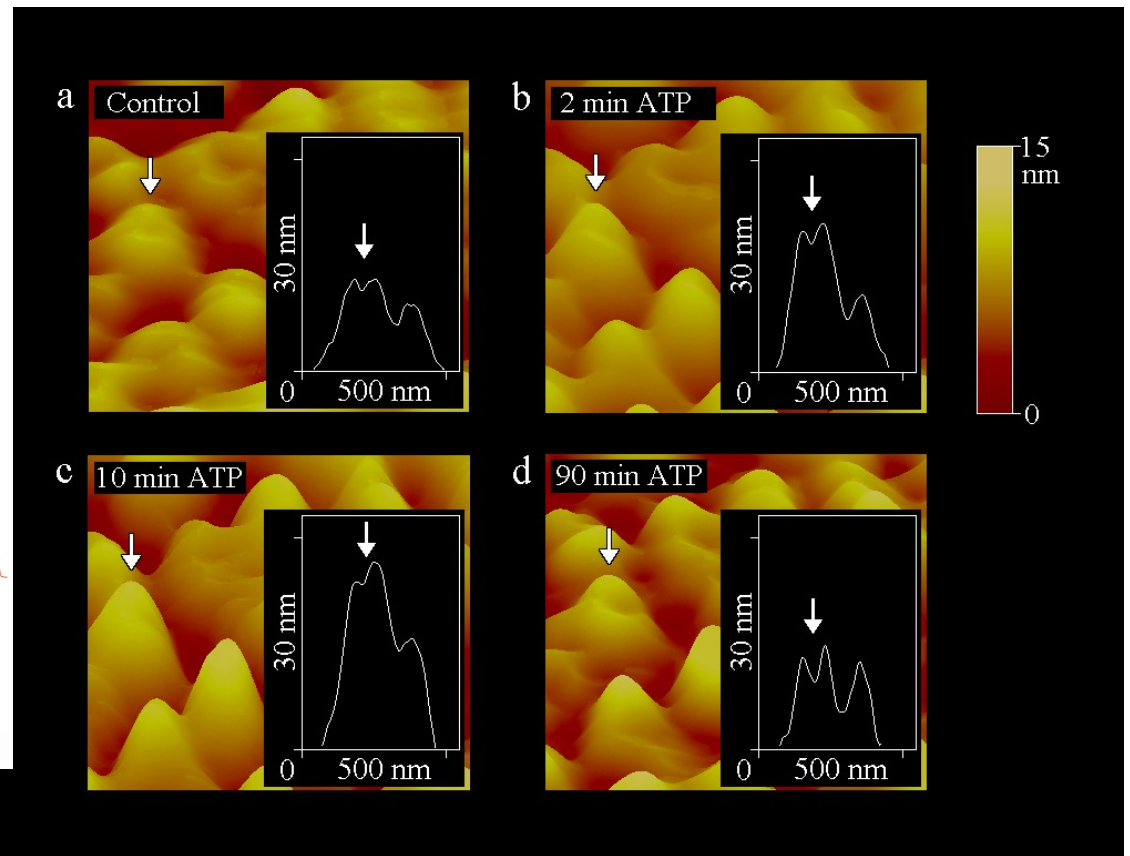
Mechanické vlastnosti vzorků



Molekulární a buněčný pohyb pulsace kardiomyocytů

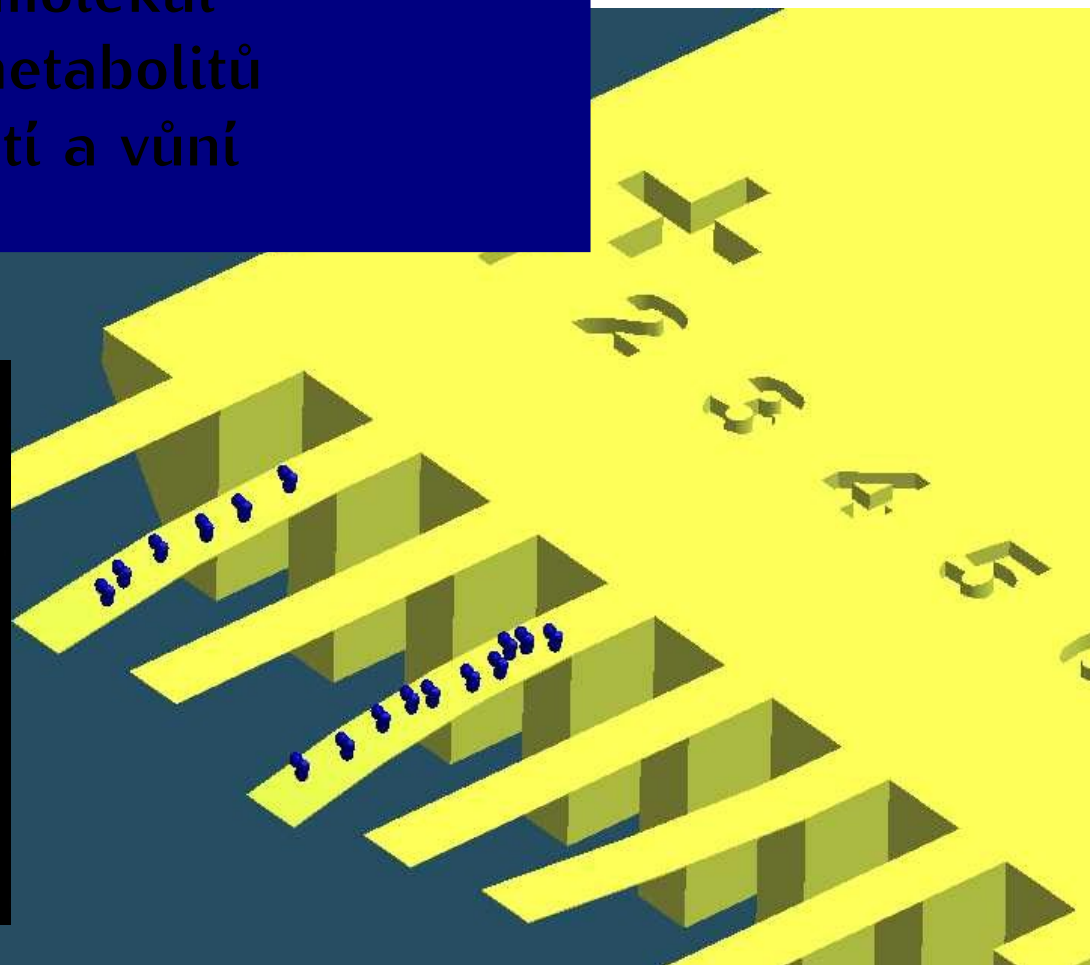
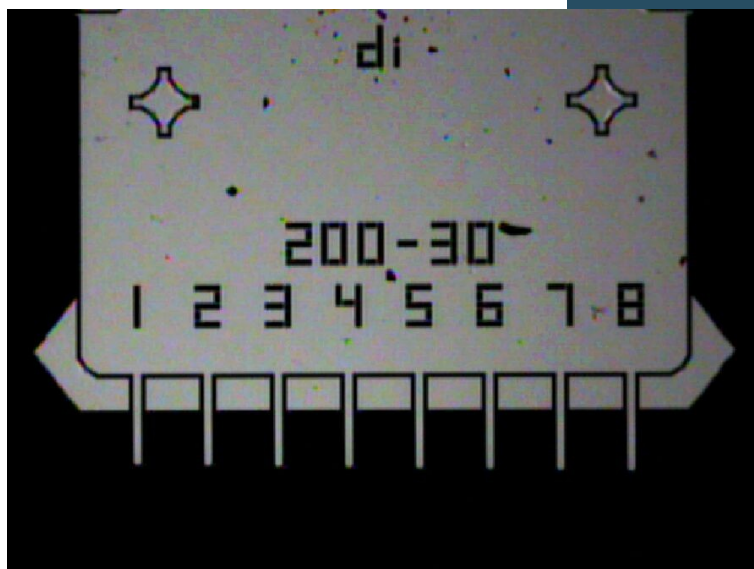


Konformační změny kanály buněčné membrány

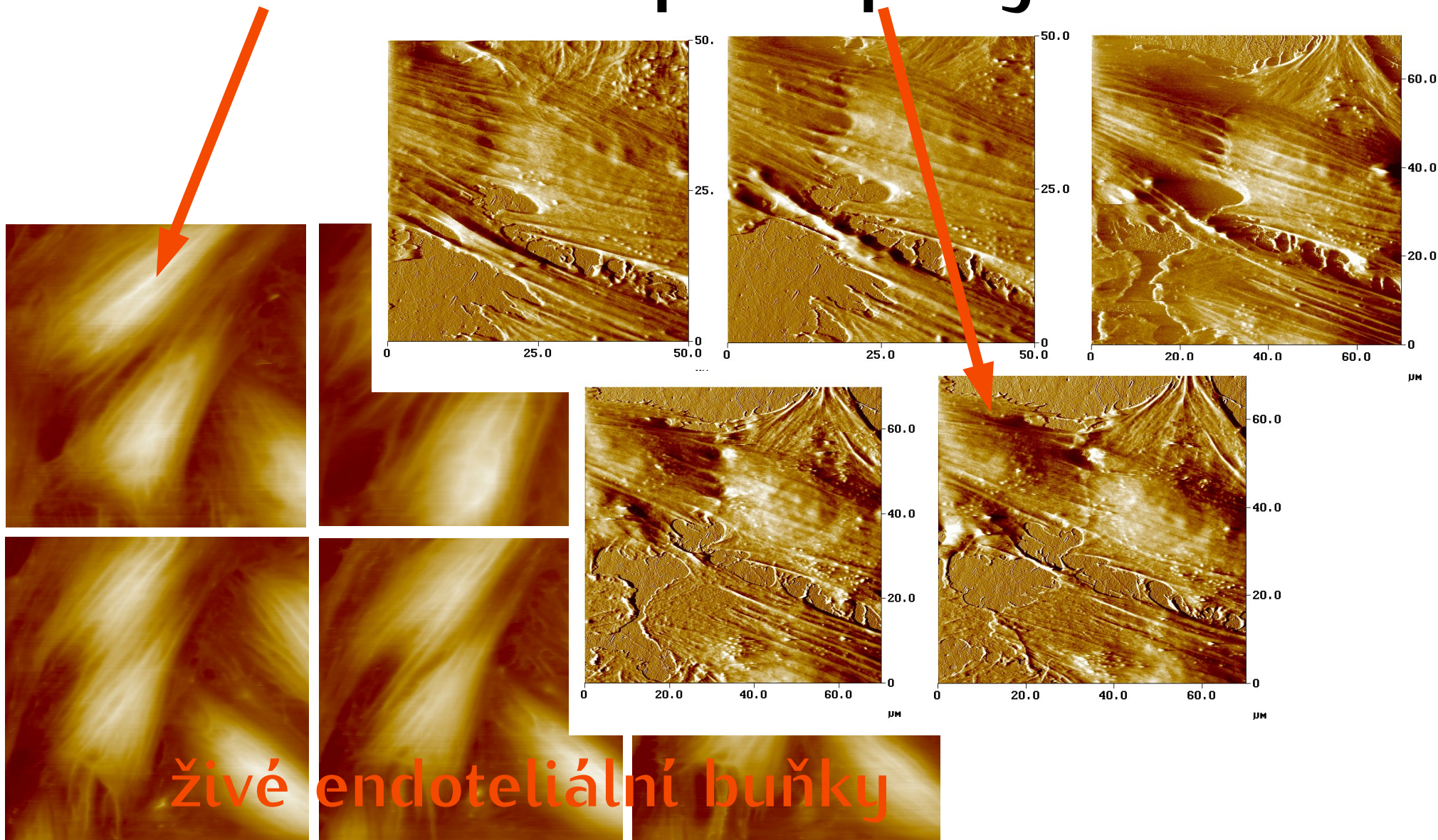


Nosník jako biosenzor?

- * detektor kontaminace ve vodě a ovzduší
- * detektor specifických biomolekul
- * detekce biochemických metabolitů
- * „umělý nos“ – studium chutí a vůní



Kontaktní nebo pokleповý mód?

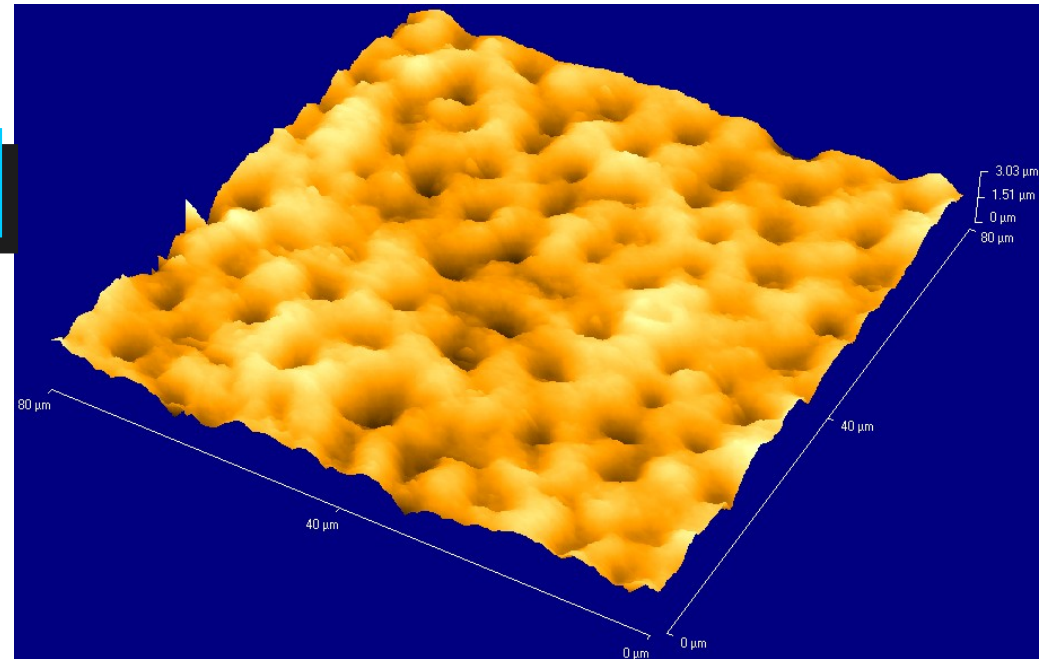


Redukce dentinové hypersenzitivity

po expozici laserem

dentin, sken 80 μm

Průměr ústí dentinových tubulů 3 – 4 μm

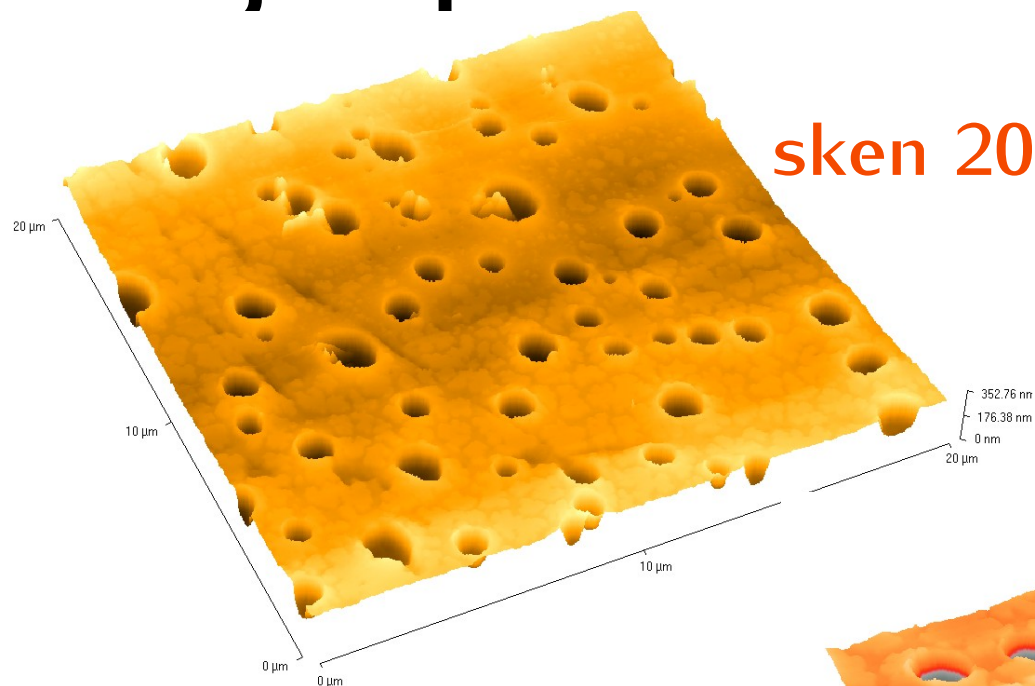


Částečná okluze vstupu dentinových tubulů snižuje hypersenzitivitu zubu a permeabilitu tubulů

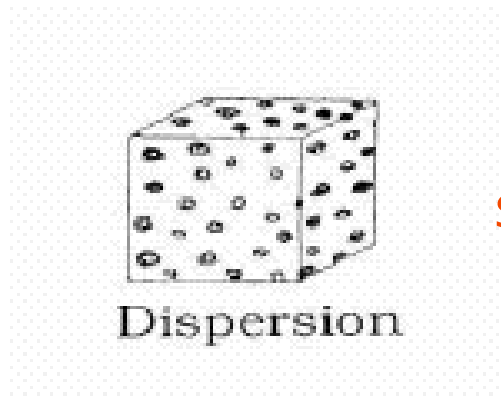
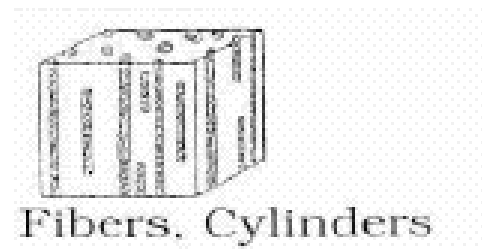
Perspektiva: terapie dentinové hypersenzitivity
modifikací dentinového povrchu laserem



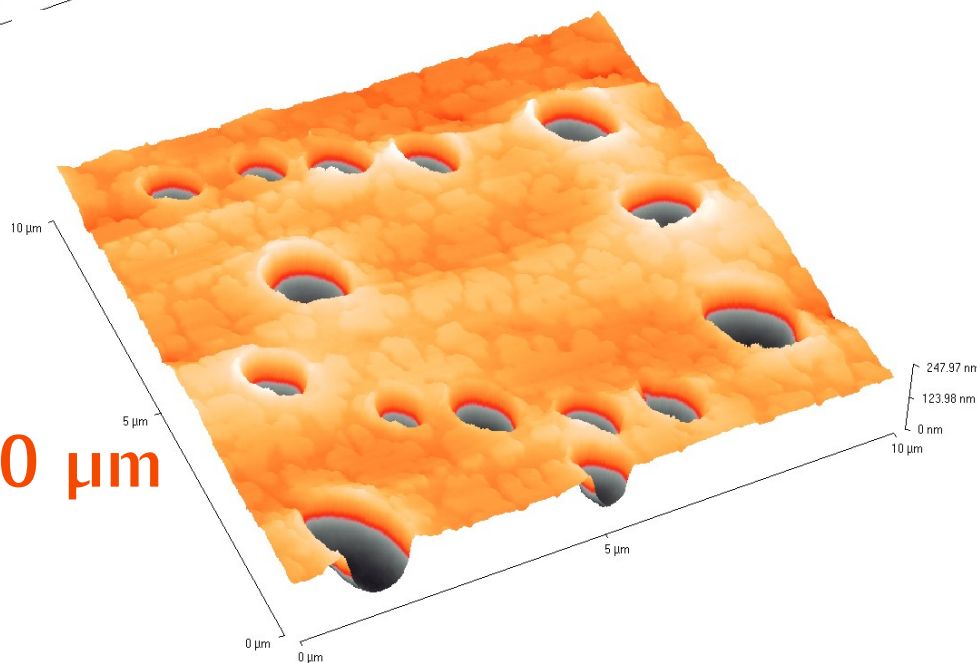
Analýza povrchu kontaktních čoček



skan 20 µm



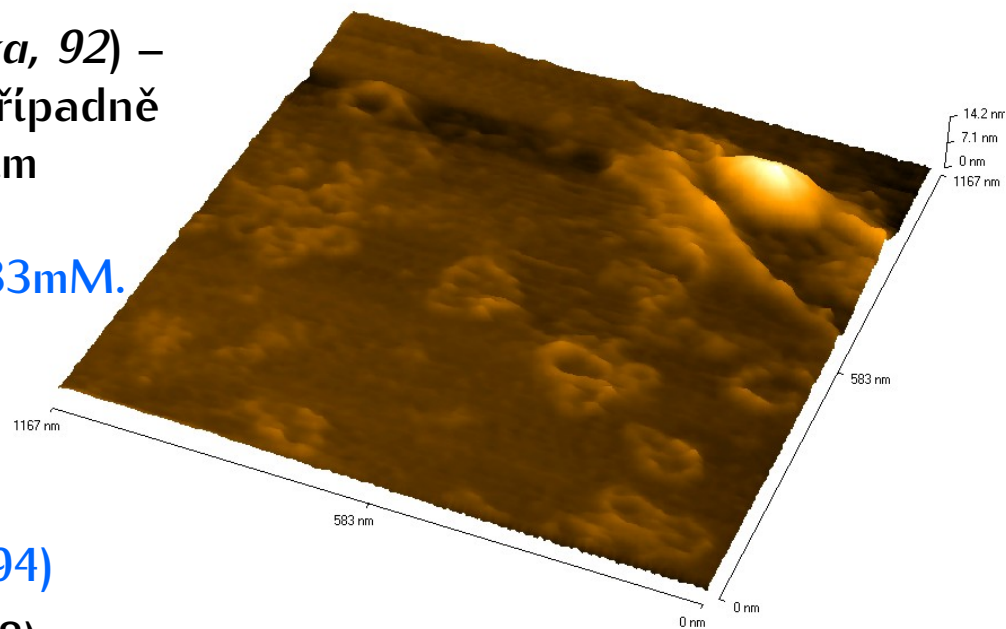
skan 10 µm



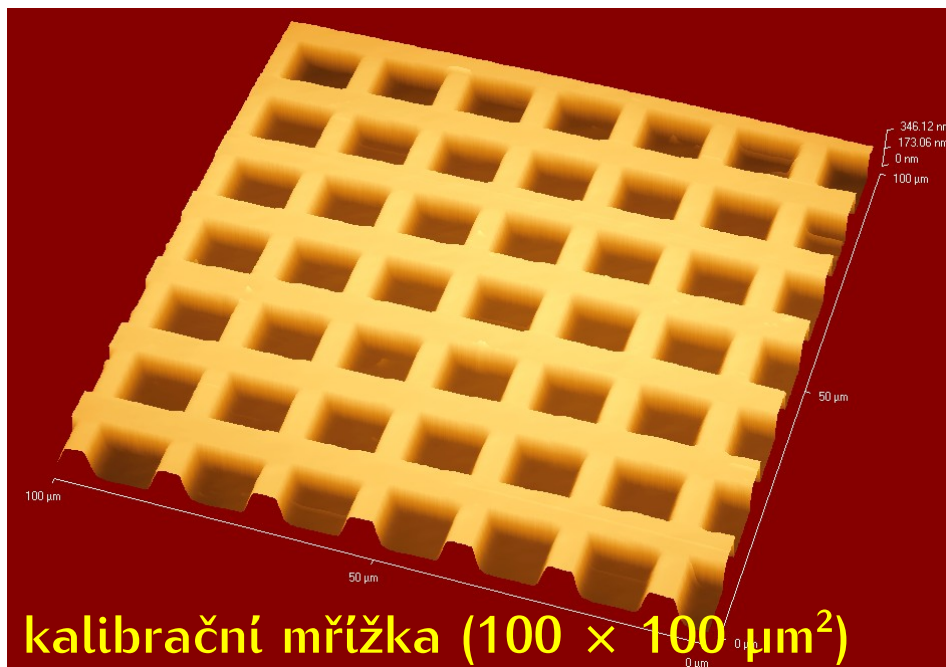
Zobrazení nukleových kyselin

Některé metodiky uchycení NA k slídě

- Povrch slídy předběžně upraven kadmium-arachidátem či OTS a potažen LB filmem (Weisenhorn, Egger, Hansma 91)
- Povrch slídy neupraven (Li, Hansma, Vesenka, 92) – pozorování vysušených adsorbovaných NA, případně v ethanolu, *n*-propanolu (avšak po předchozím vysušení).
- Povrch slídy ošetřený octanem hořčnatým 33mM. (Vesenka, Hansma 1992)
- Povrch slídy upraven 3-aminopropyltriethoxysilanem (APTES) (Y. L. Lyubchenko 92)
- Povrch slídy upraven NiCl_2 (M. Bezanilla 94)
- Povrch slídy ošetřený by spermine (Okada 98) lipidové dvojvrstvy, které vážou DNA skrz interakce mezi fosfátovými skupinami NA a pozitivně nabitými lipidy (Mou 95)



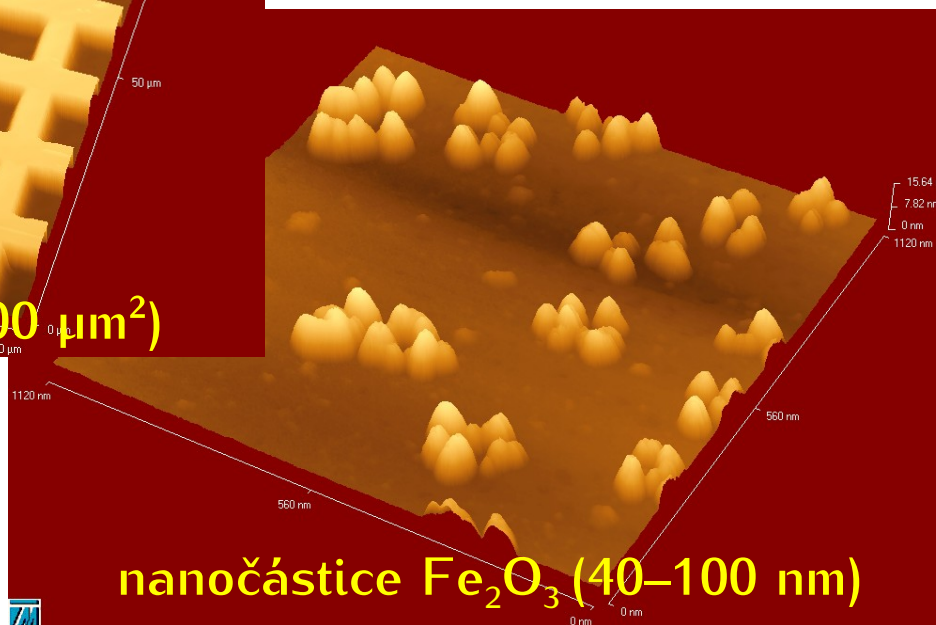
Kalibrace AFM a analytické možnosti



kalibrační mřížka ($100 \times 100 \mu\text{m}^2$)

kontaktní režim

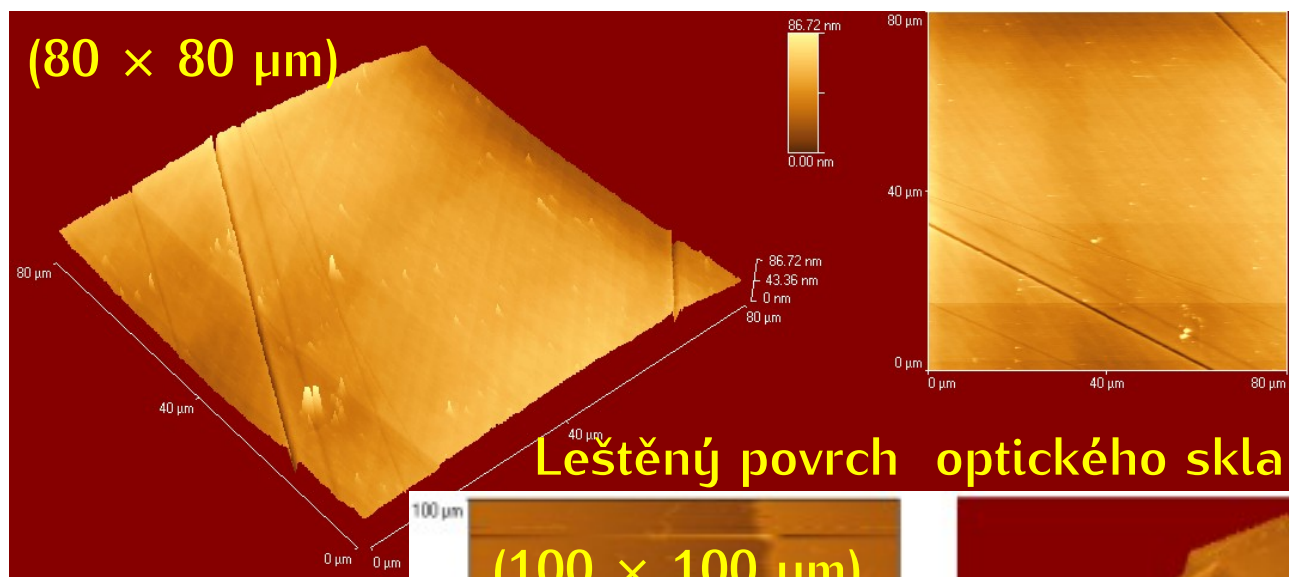
nekontaktní režim



nanočástice Fe_2O_3 (40–100 nm)

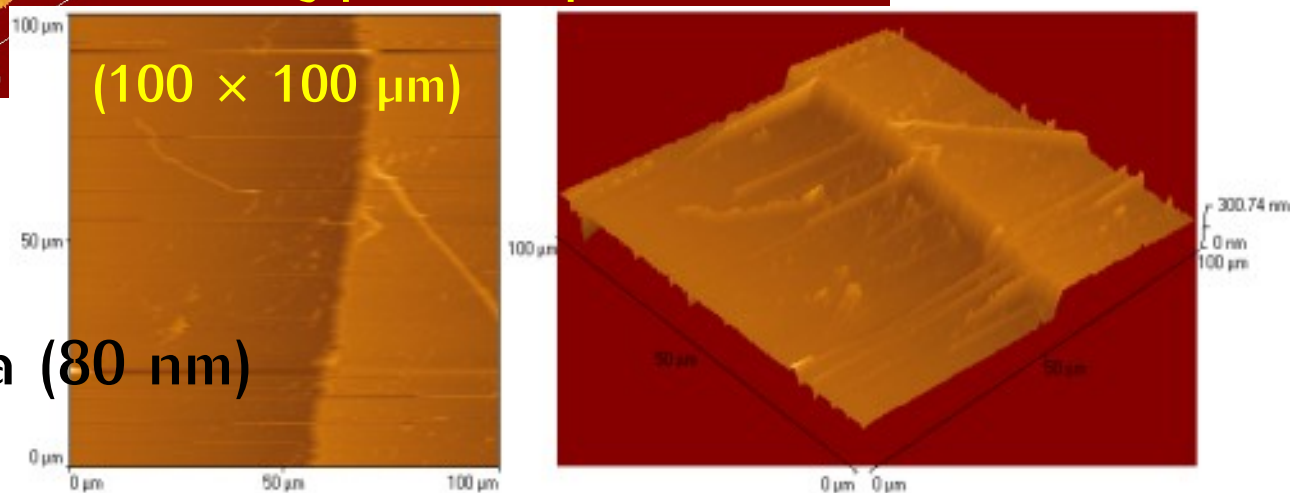


AFM studium optických povrchů

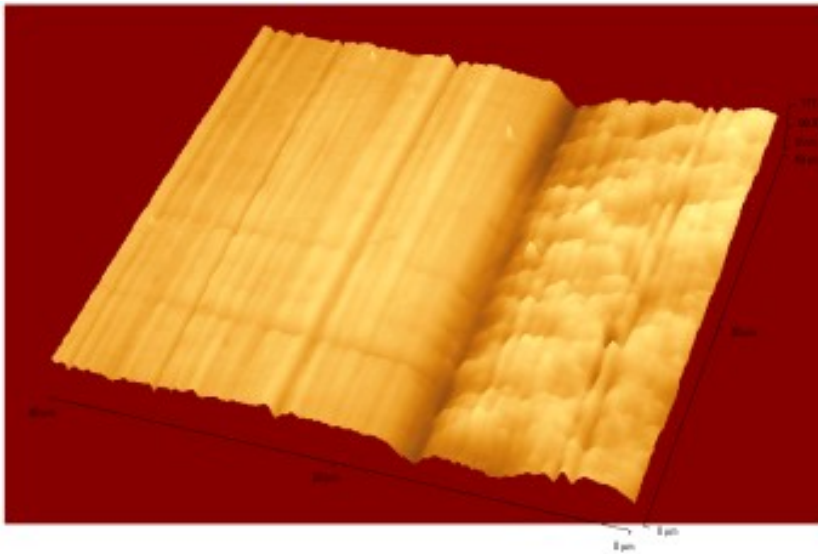


Leštěný povrch optického skla

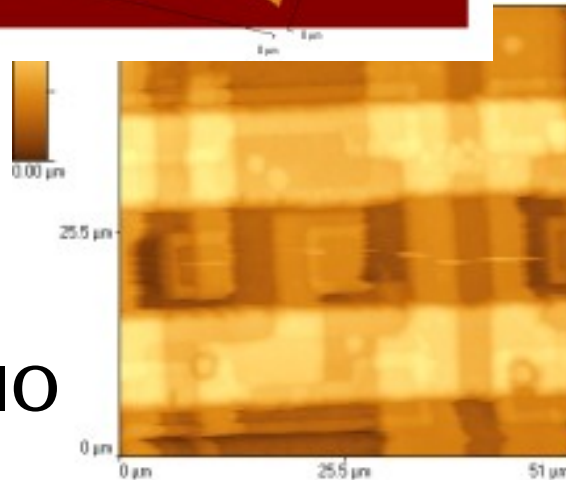
Tenká vrstva (80 nm)



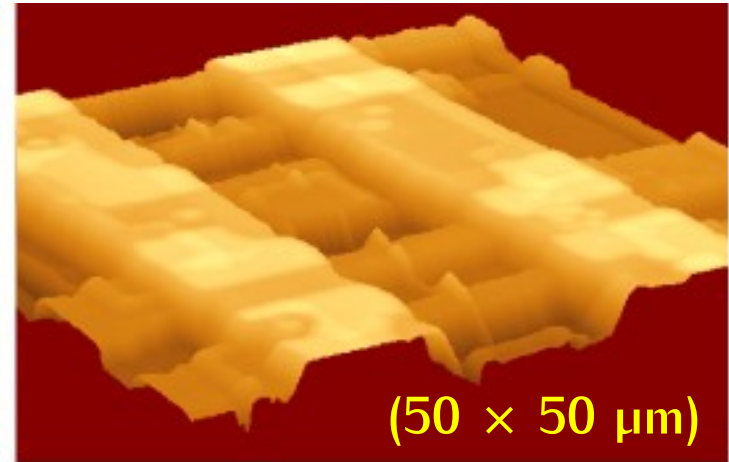
AFM studium povrchů kovů a polovodičů



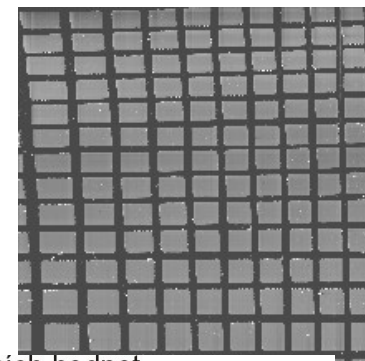
Laserové povlakování



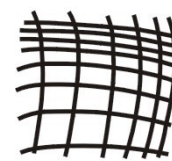
Struktura IO



Korekce chyb při skenování

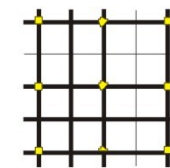


Softwarová korekce (méně přesná) spočívá např. v přeměření testovacího vzorku a určení korekční matice, která se použije k opravě naměřených dat. Druhým způsobem softwarové korekce může být matematické modelování chování skeneru. (Softwarové korekce jsou nenáročné finančně i přístrojově, ale korekce je správná jen pro ten režim měření, při němž byla korekce stanovena).

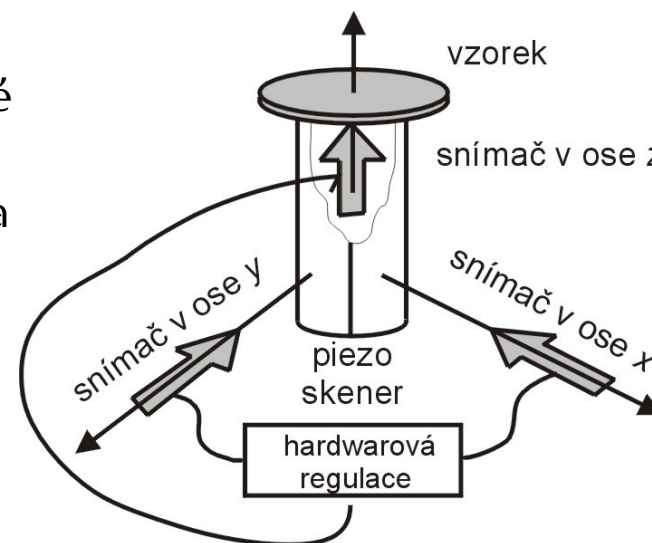


matice korekčních hodnot

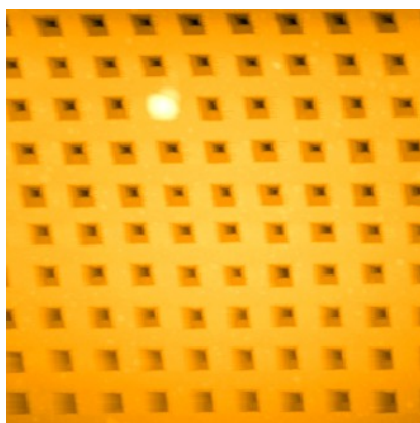
32,1	46	98	14
44,5	125,3	12	332
34,7	996	255	11
3	34	21	25
32	441	58	56
321,2	48	254	12
48	29	87	14
46	224	254	351



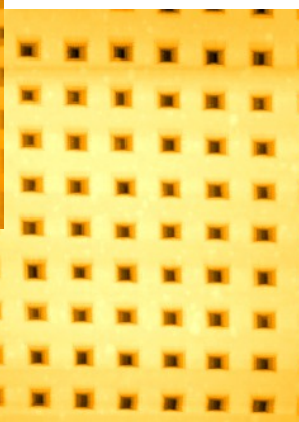
Hardwarové korekce jsou založeny na snímání skutečné polohy skeneru pomocí vnějšího nezávislého zařízení:
optické – na skener je připevněn (odražeč) a jeho poloha je snímána světelným paprskem;
kapacitní – na skeneru je nanášena kovová vrstva a poblíž je další pevná, měří se změna kapacity;
piezorezistivní – ke skeneru je připevněn element, jehož elektrický odpor se mění v závislosti na jeho vnitřním mechanickém napětí.



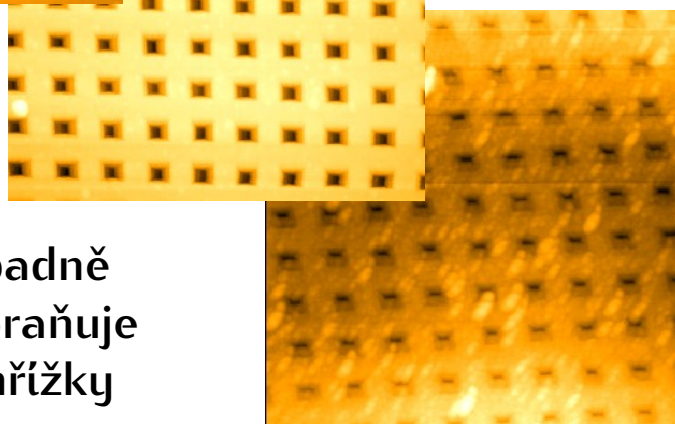
Artefakty na testovací mřížce



Nelinearitou deformovaný tvar mřížky (po delší době nepoužívání testovacího vzoku)

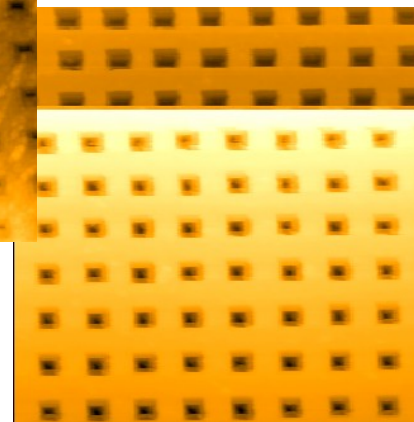


Stejná mřížka, stejný hrot po několika hodinách provozu skeneru



Silné zněčištění, případně deformace hrotu, zabraňuje prokreslení detailů mřížky

Uvolnění uchycené nečistoty na hrotu, která mění jeho koncový poloměr. (Výškový rozdíl v obraze 60 nm)



Artefakty na nanočásticích

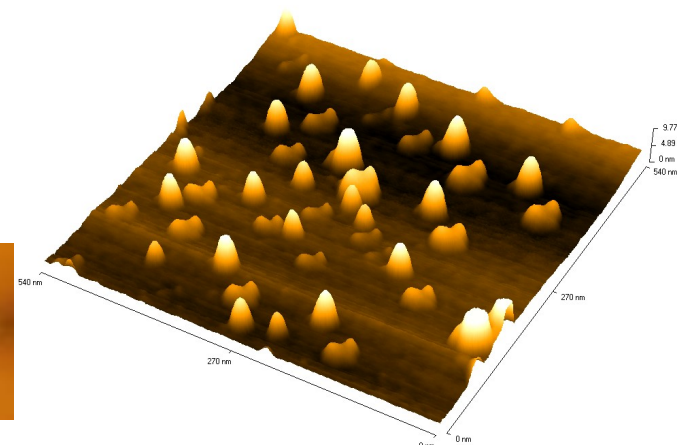
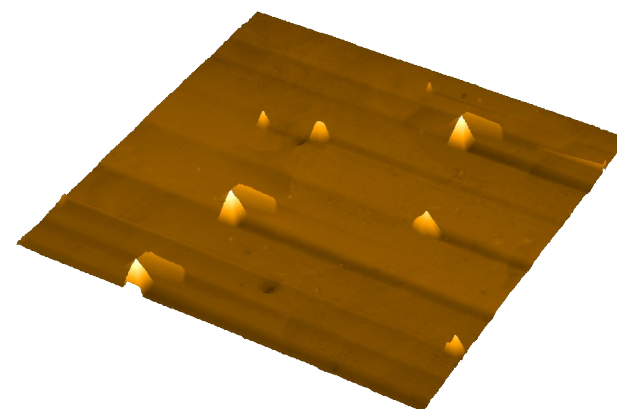
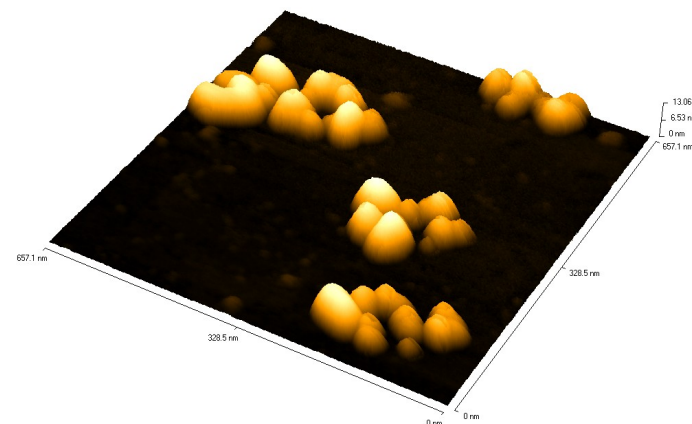
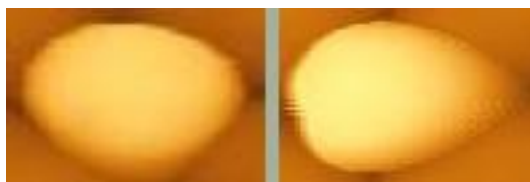
Zrcadlení hrotu, konvoluce

Každý bod v obraze nepředstavuje pouze tvar povrchu, ale je určen prostorovou *konvolucí* povrchu vzorku a hrotu.

Při zobrazení povrchu, který obsahuje ostré hroty, jejichž šířka je menší než šířka hrotu, dojde k „výměně“ funkcí (vzorek) vzorek bude snímat hrot. V obraze se tedy neobjeví povrch vzorku, ale povrch hrotu.

Tvar hrotu

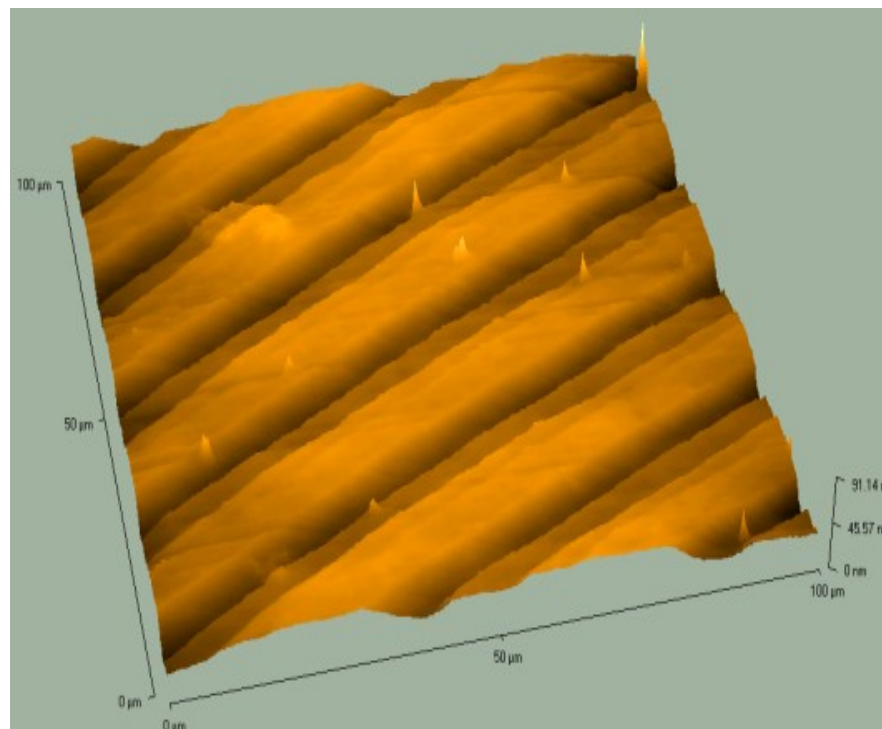
Na kvalitě zobrazení se může podepsat i nesymetrie hrotu, která vytváří zkreslený obraz, závislý na směru skenování. Může se projevit zdvojením (dvě špičky na konci hrotu) nebo prodloužením objektů v jednom směru (elipsovitý hrot)



Artefakt interference

Je-li k detekci ohnutí nosníku použito optické záření, je nutno vzít do úvahy i odrazivost vzorku. Je-li hodně lesklý, může se světlo od něj odrážet do detektoru, který bude přesvícen a ztratí schopnost udržovat zpětnou vazbu.

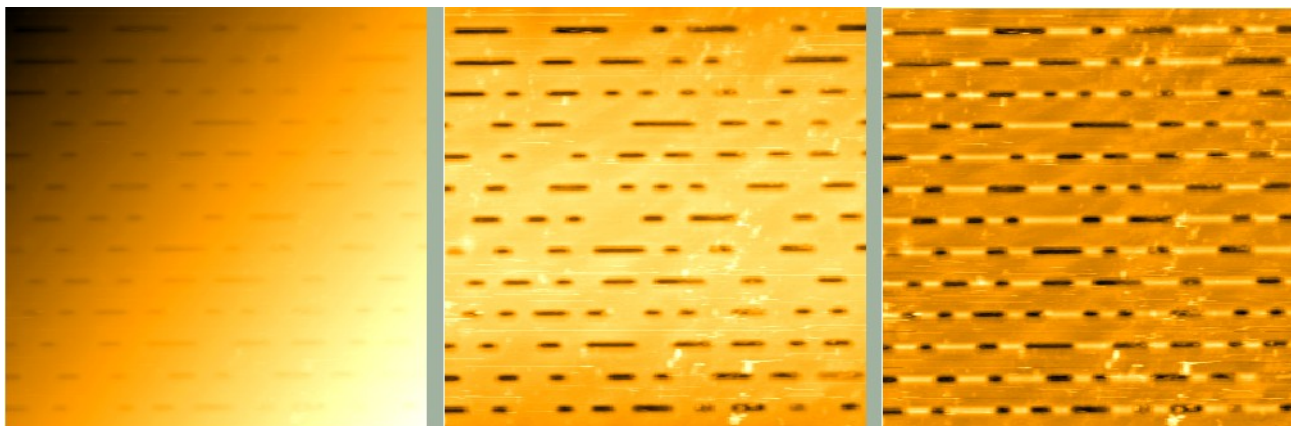
Projevit se může také interference vznikající mezi vzorkem a další odrážející částí, která se projeví vznikem proužků v obraze (tmavá a světlá místa z interferenčního obrazce ovlivňují množství světla dopadajícího do detektoru, který to chybně interpretuje jako signál z nosníku (obrázek vpravo).



obrázek povrchu skla se šikmými interferenčními proužky



Artefakty při zpracování obrazů



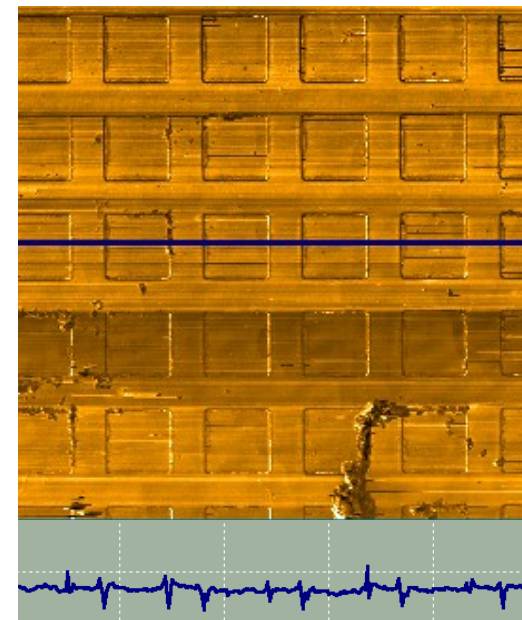
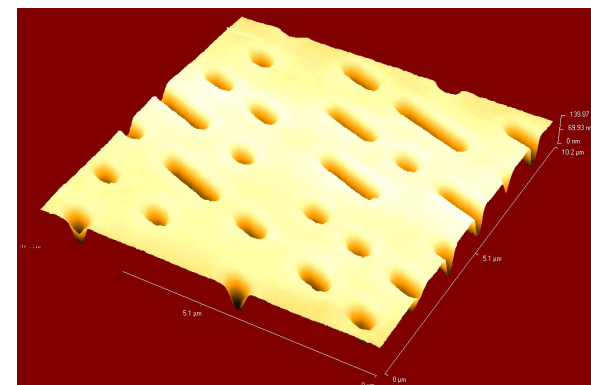
Naskenovaný povrch
nakloněného vzorku CD

Odečtením roviny
získáme správný
povrch

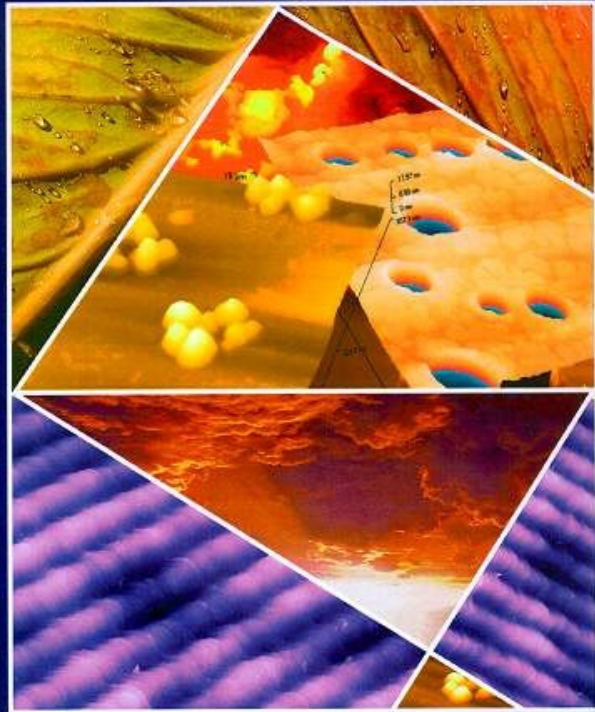
Odečtením řádků
získáme rovný, ale
nesmyslný obraz

Mapa laterálních sil na mřížce, která na pohled přesně zobrazuje mřížku, ale do povrchu zapadají jednotlivé čtverečky. Nabízí se tedy interpretace, že materiál čtverečku vykazuje jiné třecí vlastnosti než substrát. Jedná se o **artefakt**.

Do laterálních sil se promítá i topografie, tj. změna sklonu, a to je jeden z jejích projevů. Jak ukazuje profil, v obraze se žádné čtverce nevyskytují a jsou vidět pouze *hrany* čtverců. **Plné čtverečky jsou tedy jen optický klam.**



Roman KUBÍNEK, Milan VŮJTEK, Miroslav MAŠLÁŇ



Roman KUBÍNEK, Milan VŮJTEK, Miroslav MAŠLÁŇ
MIKROSKOPIE SKENUJÍCÍ SONDOU

<http://atmilab.upol.cz>

