

# AFM mikroskop

Obsah:

AFM mikroskop .....	1
Režimy snímání povrchu.....	1
Konstrukce AFM.....	3
Vlastnosti AFM.....	3
Rozlišení AFM.....	3
Historie AFM.....	4
Využití AFM.....	4
Modifikace AFM.....	5
Závěr.....	5
Literatura a odkazy.....	6

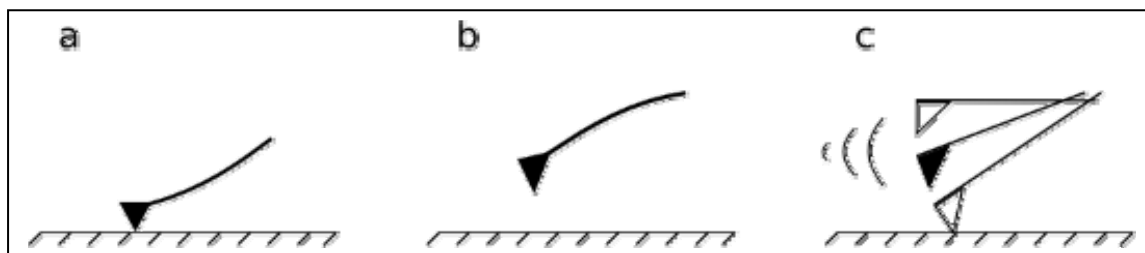
**Mikroskopie atomárních sil (AFM z anglického atomic force microscopy)** je mikroskopická technika, která se používá k trojrozměrnému zobrazování povrchů. Prvně ji realizovali v roce 1986 Binnig, Quate a Gerber. Obraz povrchu se zde sestavuje postupně, bod po bodu. Metoda dosahuje velmi vysokého rozlišení – může zobrazovat i atomy. Techniku AFM lze použít nejen k zobrazování, ale také k tvorbě struktur či zpracování povrchů v nanometrové oblasti.

V principu je AFM podobná metoda jako tunelová mikroskopie. K detekci však neslouží elektrický proud, ale vzájemná meziatomová přitažlivost. **Detekuje se pohyb zkoumacího hrotu při průchodu nad vzorkem.** Umí zobrazovat i nevodivé vzorky. Nazývá se někdy také SFM (scanning force microscopy).

Základem AFM je velmi ostrý hrot, který je upevněn na ohebném nosníku (angl. cantilever, tento termín se používá i v češtině).

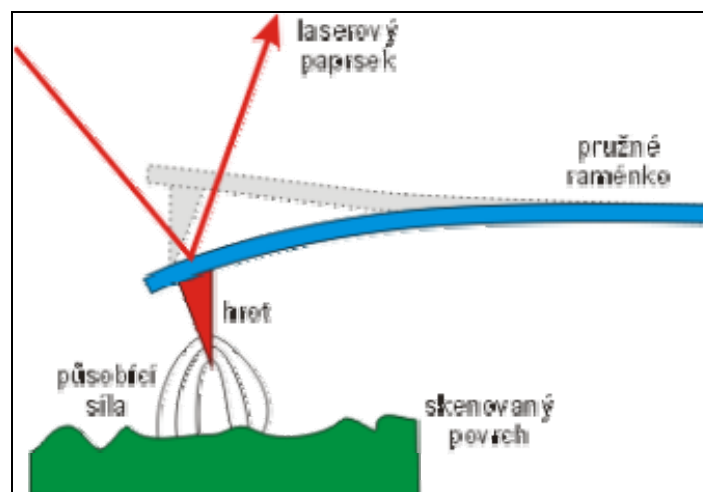
## Režimy snímání povrchu

- **Kontaktní režim:** hrot je mírně vlačován do vzorku a následkem působících sil je nosník ohnutý, v souladu s Hookovým zákonem. Během měření se hrot pohybuje po povrchu vzorku v pravidelném rastru (skenuje) tak, že výška druhého konce nosníku je konstantní. Je-li povrch vzorku nerovný, má nosník v různých místech vzorku různou velikost ohnutí a sledováním závislosti ohnutí na poloze na vzorku můžeme sestavit zvětšený obraz vzorku (a).



- **Nekontaktní režim:** hrot se pohybuje ve vzdálenosti nad vzorkem (**b**), kde působí přitažlivé síly, sledují se změny amplitudy oscilací při interakci hrot – povrch (studium měkkých materiálů). Předchozí způsob měření (a) však vede k poškození hrotu, pokud by nerovnost vzorku byla příliš velká (během přesunu z jednoho bodu do druhého působí mezi hrotem a vzorkem velké třecí síly). Proto se častěji používá režim využívající zpětné vazby, tzv. režim s konstantním ohnutím, ve kterém se v každém bodě rastru porovná současná hodnota ohnutí s přednastavenou hodnotou, a pokud se liší, nosník s hrotem se přiblíží nebo oddálí od vzorku o takovou vzdálenost  $z$ , aby se hodnota ohnutí opět shodovala s přednastavenou hodnotou. Místo velikosti ohnutí se pak k sestavení obrazu použijí hodnoty  $z$ . Konstantní hodnota ohnutí zároveň znamená, že na vzorek působí konstantní síla. Uvedený režim může zobrazovat i drsnější vzorky, ale je pomalejší (sběr obrázku trvá delší dobu).
- **Pokleповý režim:** hybrid mezi kontaktním a nekontaktním režimem (**c**).
- **Dynamický režim (nekontaktní):** raménko osciluje působením harmonické síly. Měření je fázový posuv kmitání způsobený atomárními silami. Hrot je při maximální výchylce oscilačního cyklu raménka vzdálen od vzorku (cca 5 Ångström, tj. deset miliontin milimetru). Také se nazývá Dynamic Force Microscopy (**DFM**).

Používají především bezkontaktní režimy, v nichž není mezi hrotem a vzorkem přímý mechanický kontakt. **Hrot a vzorek na sebe působí především skrze Van der Waalovu a elektrostatickou sílu.** Protože tato síla je velmi malá, provozuje se bezkontaktní režim tak, že je nosník rozkmitáván a místo jeho ohnutí se měří velikost amplitudy. Protože velikost amplitudy závisí na vzdálenosti mezi hrotem a vzorkem, lze sledováním změn amplitudy sestavit obraz povrchu vzorku. Tomuto typu mikroskopu se říká **FM-AFM** mikroskop (Frequency Modulated AFM). Pružné raménko je rozkmitáno harmonickou silou na vlastní frekvenci raménka a jeho vyšších harmonických frekvencích. Měření je fázový posuv kmitání způsobený atomárními silami.

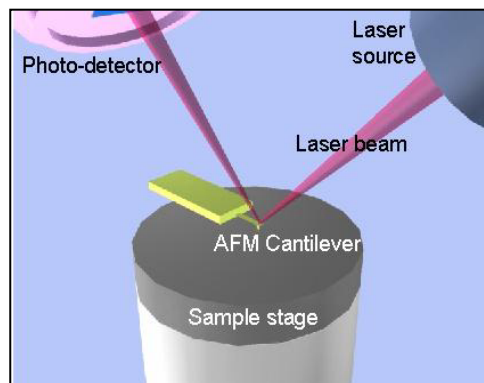


Van der Waalovy síly jsou přitažlivé nebo odpudivé interakce (síly) mezi molekulami. Jsou slabší než kovalentní, koordinačně kovalentní síly a vodíkové můstky. Vznikají převážně v nepolárních molekulách, které neobsahují stálé dipóly, jejich vazby nejsou polarizované.

## Konstrukce AFM

Přesnost AFM je podmíněna přesností udržování polohy hrotu, přesností jeho pohybu a schopností detekce ohnutí. Pro pohybování hrotem se používají výhradně piezoelektrické skenery, které jsou schopny realizovat pohyby menší než desetina nanometru. Aby bylo možno udržet přesnou polohu hrotu, staví se mikroskopy AFM mechanicky velmi pevně a bývají umístěny na **antivibračních stolech**.

Detekce ohnutí nosníku se provádí nejčastěji pomocí laseru. **Laserový svazek z laserové diody** se nechá dopadat na nosník, od něho se odráží podle zákona odrazu a dopadá na **fotodetektor**. Změnilo se ohnutí nosníku, změnil se i úhel dopadu svazku na nosník a proto svazek dopadne do jiného místa fotodetektoru. Bude-li fotodetektor citlivý na místo dopadu svazku, může se z jeho výstupu určit ohnutí nosníku.



## Vlastnosti AFM

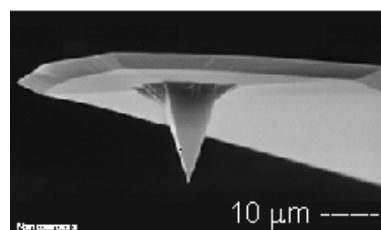
AFM může zobrazovat pouze povrch vzorků, nikoliv jejich objemovou strukturu (vzorek vyžaduje fixaci, nemůže například plavat v roztoku). Ve srovnání s optickou mikroskopií však dosahuje značně většího rozlišení, které je srovnatelné s rozlišením elektronové mikroskopie. AFM však poskytuje trojrozměrný obraz, kdežto elektronová mikroskopie dvojrozměrnou projekci.

AFM zpravidla nevyžaduje, aby se vzorek speciálně připravoval (např. pokovením) ani nevyžaduje vysoké vakuum. AFM může dokonce pracovat v kapalném prostředí, což je výhodné především pro studium biologických vzorků, které mohou být při zobrazování ve svém fyziologickém prostředí a lze v některých případech sledovat jejich funkci nebo reakci na změnu prostředí (změna pH, teploty, chemického složení).

Nevýhodou AFM je velmi omezený rozsah velikosti obrázku a pomalost snímání. Maximální velikost obrazu bývá řádově stovky mikrometrů a sestavení jednoho obrazu trvá řádově minuty. Dále je v AFM omezen i vertikální rozsah (maximální výška vzorku), který bývá typicky desítky mikrometrů. Problémy způsobuje také blízkost hrotu a vzorku (silná interakce, možnost zachycení hrotu, znečištění hrotu, poškození vzorku) a nenulová šířka hrotu, která vede k deformaci obrazu.

## Rozlišení AFM

Je závislé na poloměru křivosti špičky hrotu (cca. 5 nm), velikosti obrazu (1 x 1  $\mu\text{m}$ , 512 x 512 měřících bodů). V tomto případě bude rozlišení 2 nm. Zvětšením snímané plochy dochází k poklesu rozlišení, avšak po překročení hranice závislé na poloměru křivosti špičky hrotu již zmenšením plochy rozlišení nezvětším.



Obecně lze využít rozlišení stovky mikrometrů až nanometry (lze pozorovat periodickou strukturu atomové mříže, jednotlivé atomy zobrazit nelze) [3]. Měření na rozhraní optické a elektronové mikroskopie (OM – zaměřování vzorku). V r. 2004 bylo s použitím DFM dosaženo zatím největšího rozlišení 77 pikometrů ( $77 \times 10^{-12}$  m). V tomto rozlišení je možné rozeznat struktury uvnitř jednotlivých atomů [3].

## Historie AFM

- *Optický mikroskop - OM* (Optical Microscope) zařízení ke sledování drobných předmětů v optickém oboru za pomoci soustavy čoček. Vynalezen byl v roce **1590 H. Janssenem** a jeho synem Z. Janssenem v Holandsku.
- *Elektronový mikroskop - EM* (Electron Microscope) mikroskop, který k zobrazení předmětů využívá vlnových vlastností elektronu. Elektron se chová podobně jako světlo, jeho vlnová délka je ale výrazně kratší a tak je možné sledovat menší předměty než za pomoci světla. Elektronový mikroskop byl vynalezen v roce **1931 E. Ruskem**.
- *Řádkovací tunelový mikroskop - STM* (Scanning Tunnelling Microscope). Zařízení mapuje povrch pomocí pohybu vodivého hrotu nad vodivým povrchem sledovaného materiálu. Množství elektronů, které tuneluje z materiálu do hrotu je exponenciálně závislé na vzdálenosti a pomocí měřeného proudu lze vykreslit mapu povrchu. STM mikroskop byl vynalezen v roce **1981 G. Binnigem a H. Rohrerem**.
- *Mikroskop atomárních sil - AFM* (Atomic Force Microscope). Zařízení skenuje povrch materiálu pomocí hrotu zavěšeného na pružném výkyvném raménku. Hrot je přitahován elektrostatickými a van der Waalsovými silami. Výkyvy raménka nad povrchem jsou sledovány laserem. AFM mikroskop není omezen na vodivé materiály jako STM mikroskop. AFM mikroskop byl vynalezen v roce **1986 G. Binnigem, C. Quatem a C. Gerberem**.

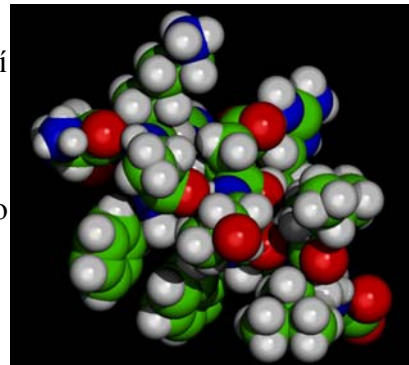
V roce **1994** byla zkonstruována nová varianta tohoto mikroskopu, tzv. **FM-AFM** mikroskop (Frequency Modulated AFM). Pružné raménko je rozkmitáno harmonickou silou na vlastní frekvenci raménka a jeho vyšších harmonických frekvencích. Měření je fázový posuv kmitání způsobený atomárními silami. Právě touto technologií bylo v roce 2004 dosaženo zatím největšího rozlišení: 77 pikometrů ( $77 \times 10^{-12}$  m). V tomto rozlišení je již možné rozeznat struktury uvnitř jednotlivých atomů! Experiment provedli Jochen Mannhart, Thilo Kopp a Franz J. Giessibl na německé universitě v Augsburgu. Mikroskopie se tak dostala poprvé na hranici pikometrové oblasti.

## Využití AFM

- Oblast studia katalytických procesů, povrchů pevných látek.
- Oblast nanotechnologií, záznamové techniky či biologických systémů.
- Možnost kombinace chemické identifikace a schopnosti manipulace jednotlivých atomů pomocí AFM na površích umožňující konstrukci nanostruktur požadovaných vlastností a funkčnosti. Přesné umístění dopantů specifických vlastností na polovodičovém povrchu může výrazně zvýšit výkonnost nanometrických tranzistorů.

## Zajímavosti:

- Vědcům společnosti IBM se podařilo zobrazit „anatomii“, neboli chemickou strukturu molekuly pomocí techniky zvané nekontaktní mikroskopie atomárních sil (AFM). Zobrazení jednotlivých atomů v molekule bylo dlouholetým cílem povrchové mikroskopie. Molekulou zkoumanou v tomto experimentu byl pentacen. Jedná se o obdélníkovou organickou molekulu tvořenou 22 atomy uhlíku a 14 atomy vodíku, na délku měří 1,4 nanometru. Sousedící atomy uhlíku jsou od sebe vzdáleny jen 0,14 nanometru – což je zhruba milionkrát menší vzdálenost než průměr zrnka písku. Výsledky posouvají výzkum využití molekul a atomů v nejmenším měřítku a mohly by výrazně ovlivnit oblast nanotechnologií, u které jde o pochopení a ovládání těch nejmenších objektů známých lidstvu.



Na experimentálním snímku jsou jasně vykresleny šestiúhelníkové tvary pěti uhlíkových prstenců i atomy uhlíku v molekule. Z obrázku lze odvodit i pozice vodíkových atomů v molekule.

Pro zobrazení chemické struktury molekuly metodou AFM je nutné pracovat velice blízko u molekuly. Vzdálenost, kde chemické interakce výrazně přispívají k silám, je menší než nanometr. Proto vědci IBM museli zvýšit citlivost hrotu a překonat zásadní omezení: podobně jako se dva blízké magnety přitahují nebo odpuzují, mohly by i molekuly být snadno vytlačeny nebo naopak přichyceny k hrotu, pokud by se hrot přiblížil příliš. To by znemožnilo další měření.

Vědcům se navíc podařilo odvodit celou trojrozměrnou mapu sil ve zkoumané molekule.

## Modifikace AFM

- MFM – mikroskopie magnetických sil
- EFM – mikroskopie elektrostatických sil
- SThM – mikroskopie termální (sleduje lokální změny teploty vzorku)
- UFM – Mikroskopie ultrazvukových sil (akustická mikroskopie)
- DFM – mikroskopie dynamických sil
- LFM – mikroskopie bočních sil
- FMM – Mikroskopie modulovaných sil
- PDM – Mikroskopie fázových rozdílů
- TDFM – Mikroskopie příčných sil
- DFM – Mikroskopie disipativních sil

## Závěr

Techniky skenování pomocí sondy nabízejí úžasný potenciál pro modelování komplexní funkční struktury a pro přizpůsobení a studium jejích elektronických a chemických vlastností na atomární úrovni. AFM otevírá nové možnosti pro zkoumání přenosu náboje mezi molekulami a molekulárními sítěmi. Porozumět rozložení náboje v měřítku atomů je nezbytné

např. pro výrobu menších, rychlejších a energeticky účinnějších počítačových součástek, než jsou dnešní procesory a paměti (týká se samozřejmě všech odvětví lidského zkoumání).

## Literatura a odkazy

- [1] BŘEŇ D.; KULHÁNEK P., *Pikoškály aneb jak uvidět atom*, ALDEBARAN BULLETIN, 27/2004, ISSN 1214-1674, [http://aldebaran.cz/bulletin/2004\\_27\\_pic.html](http://aldebaran.cz/bulletin/2004_27_pic.html)
- [2] Wikipedie – otevřená encyklopedie, [http://cs.wikipedia.org/wiki/Mikroskopie\\_atom%C3%A1rn%C3%ADch\\_sil](http://cs.wikipedia.org/wiki/Mikroskopie_atom%C3%A1rn%C3%ADch_sil)
- [3] SLÁDEK P., *O mikroskopech*, Oborové novinky, Submodul (2)-(2.1)-(2.1.6), <http://svp.muni.cz/ukazat.php?docId=39>