

Zobrazovací metody v nanotechnologiích

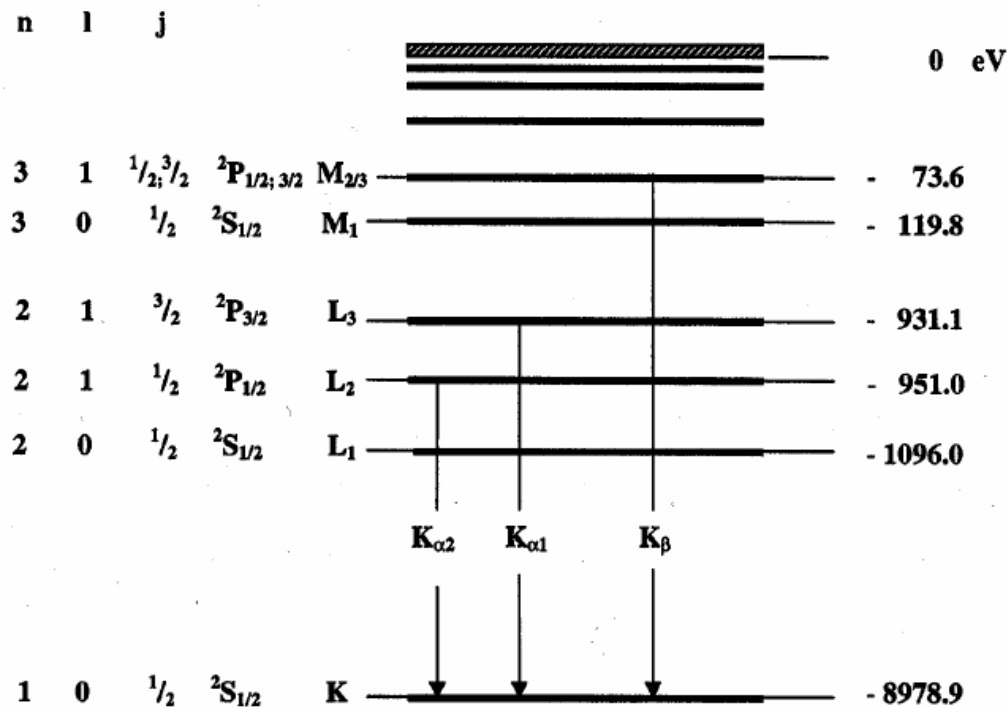
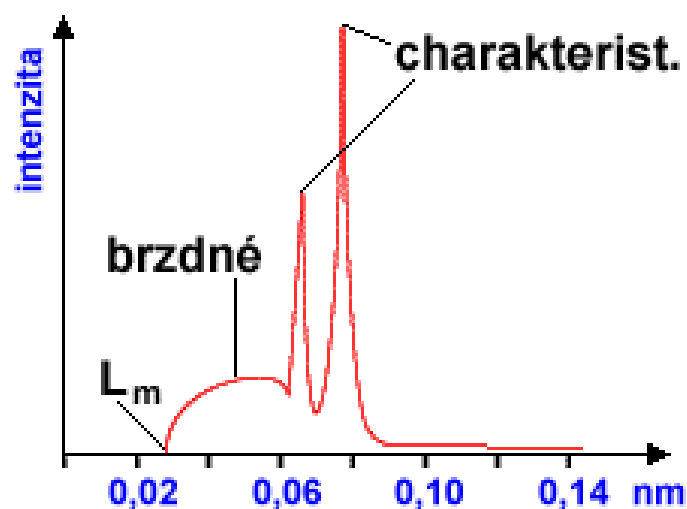
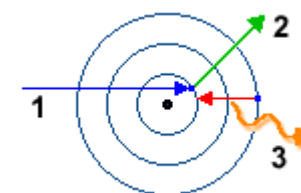
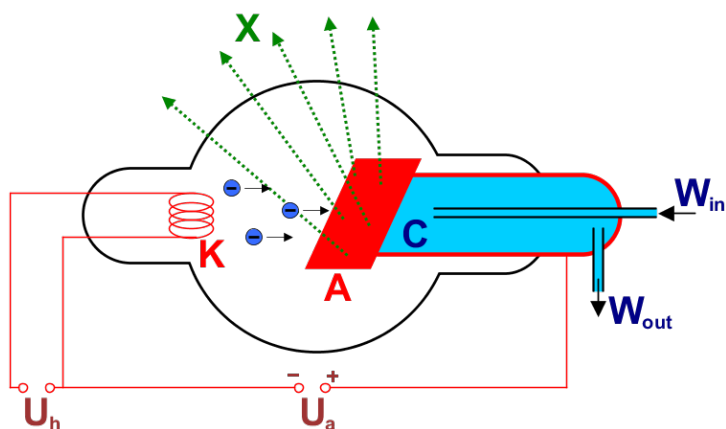
Optická mikroskopie

Z vlnové povahy světla plyne, že není možné detekovat menší podrobnosti než polovina vlnové délky světla. Viditelné světlo má asi 500 nm, nejmenší podrobnosti i při použití zdokonalení jako je imersní nebo UV mikroskopie jsou kolem 200 nm.

Musí být použity vlny s vlnovými délkami srovnatelnými s meziatomovými vzdálenostmi – RTG záření nebo elektrony (protony, neutrony).

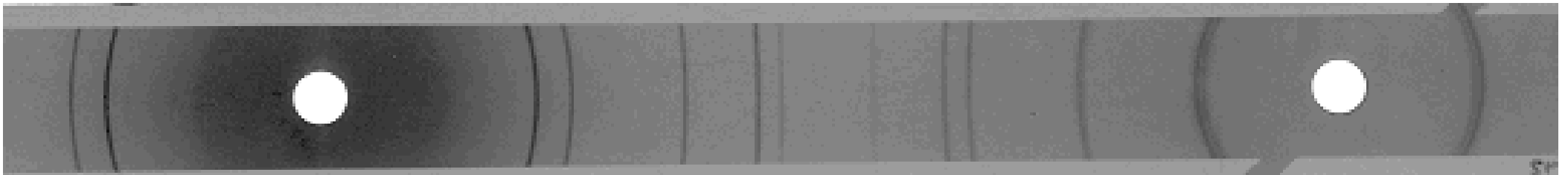
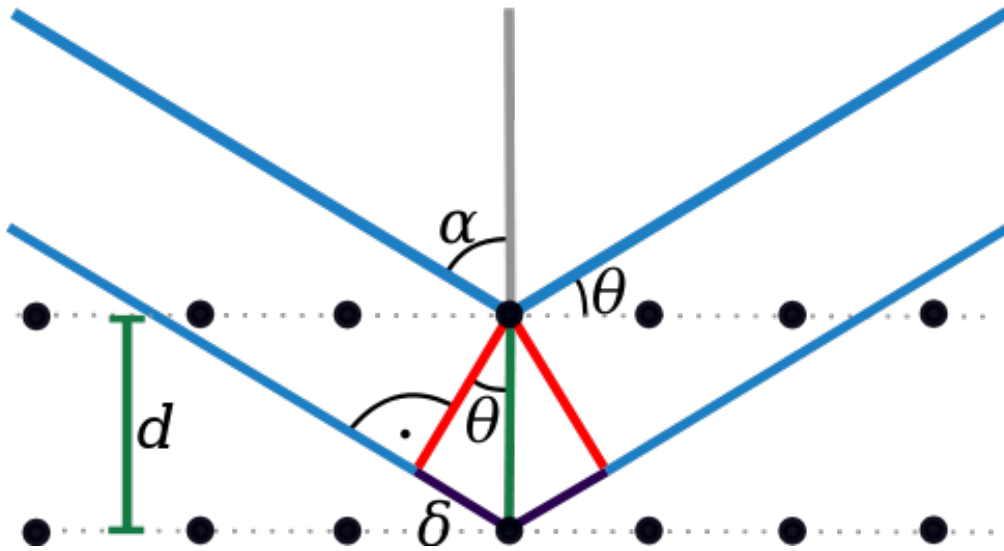
Vznik RTG záření

Rentgenovo záření je elektromagnetické vlnění o velmi krátké vlnové délce 10^{-8} – 10^{-12} m.



Difrakce na krystalu

$$2d \cdot \sin\theta = \lambda$$



Elektronová mikroskopie

RTG záření se špatně láme a odráží. Proto se používají elektrony (podle de Brogliho $\lambda = h/(mv)$).

Odhadněme vlnovou délku, která odpovídá elektronu urychlenému napětím $U=10$ kV. $m=9.10^{-31}$ kg, $e=1,6.10^{-19}$ C.

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU,$$

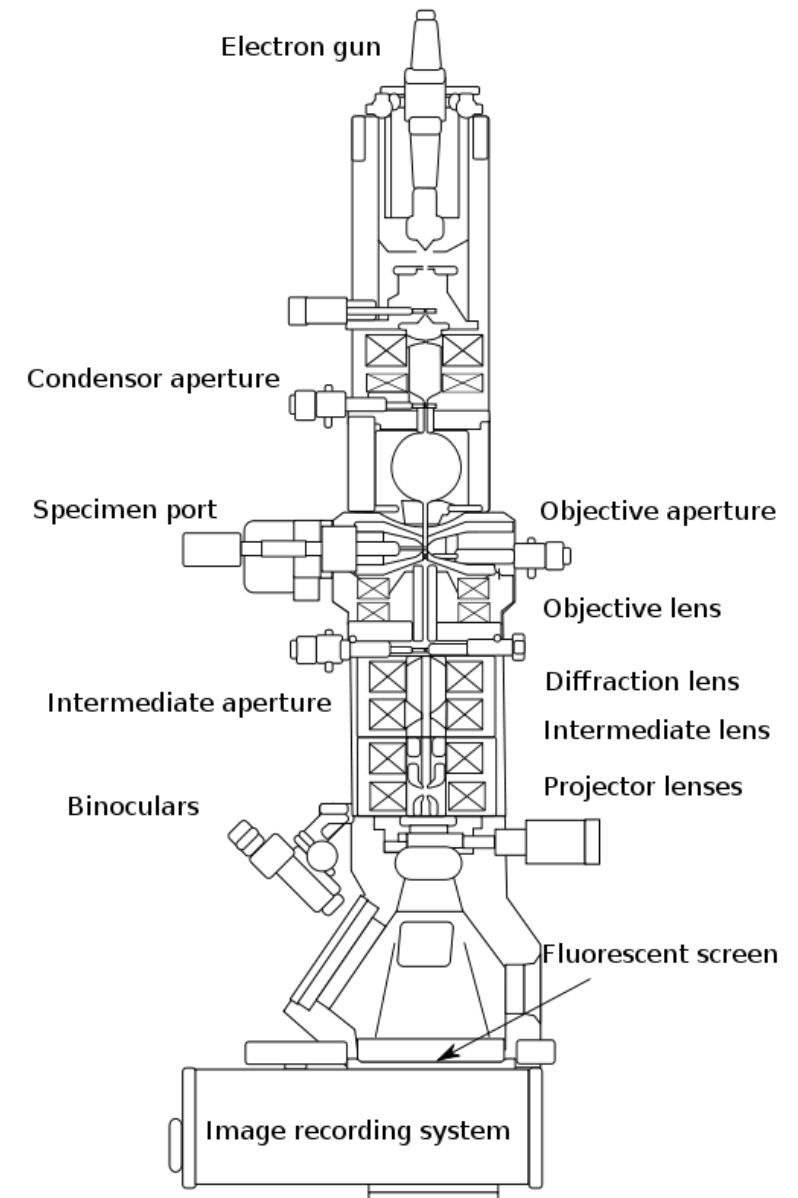
$$v = 6.10^7 \text{ m.s}^{-1},$$

$$\lambda = h/(mv) = 1,1.10^{-11} \text{ m.}$$

Optické čočky jsou nahrazeny elektromagnetickými. Elektronový mikroskop musí pracovat ve vakuu (10^{-5} Pa) a vyžaduje speciální úpravu vzorku (pokovení, zpevnění, odvodnění).

Transmisní elektronová mikroskopie (TEM)

Objevena 1931 v Německu.
Analogie optického mikroskopu.
Vzorek musí být velmi tenký. Při
velkých urychlovacích napětích
(stovky kV) je rozlišení na úrovni
atomů (HRTEM – High Resolution).

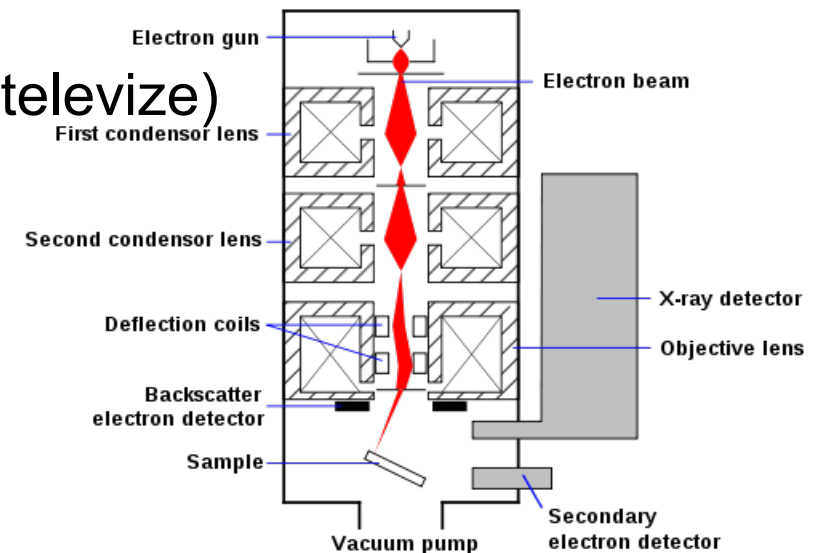


Skenovací elektronová mikroskopie (SEM)

Taky známá pod názvem rastrovací. Elektronový svazek rastruje po povrchu vzorku řádek po řádku a měří se různé vybuzené signály. Rozlišení 1-5 nm.

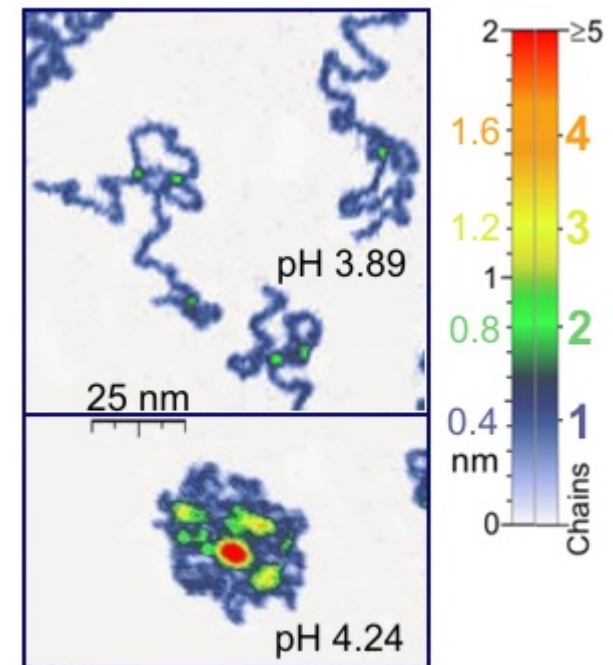
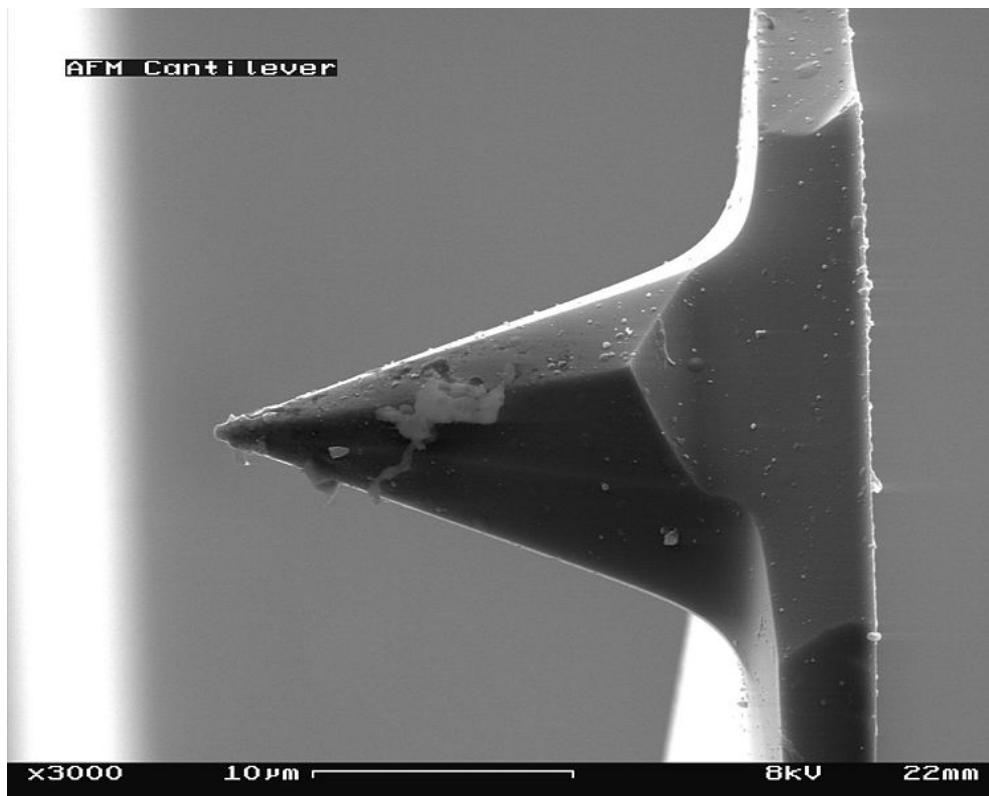
Měří se:

- ▶ nejčastěji sekundární elektrony (elektrony s nízkou energií (asi 50 eV)) vyražené z tenké povrchové vrstvičky vzorku primárním svazkem
- ▶ zpětně odražené elektrony mají energii srovnatelnou s primárními, vyletují z hloubky několik μm .
- ▶ prošlé elektrony
- ▶ charakteristické RTG záření (složení vzorku)
- ▶ světlo (katodoluminiscence) (jako obrazovka televize)



Mikroskopie scanující sondou

SPM (Scanning Probe Microscopy) je soubor experimentálních metod ke stanovování struktury povrchu se subatomárním rozlišením. Velmi ostrý hrot jede nízko nad povrchem. Objevena 1981, Nobelova cena 1986.



poly(2-vinylpyridine)

SPM - výhody

- ♦ atomární rozlišení
- ♦ 3D obraz
- ♦ snímání v reálném čase
- ♦ nepotřebuje speciální úpravy vzorku
- ♦ velký rozsah zvětšení
- ♦ možnost úpravy povrchu vzorku hrotem

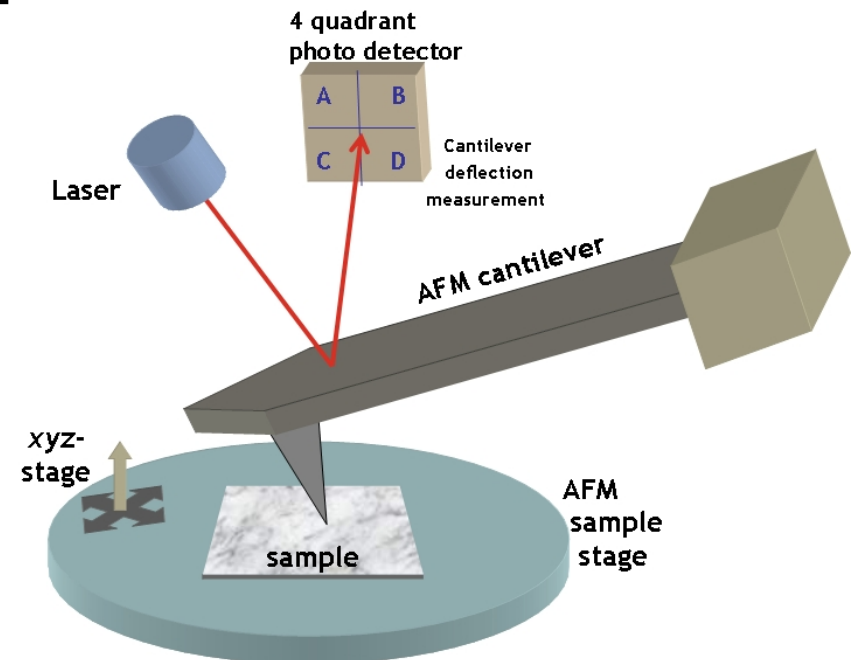
SPM - nevýhody

- ♦ citlivost na otřesy a teplotní drift
- ♦ při menších zvětšeních měří jen pod hrotem a nevidí okolí
- ♦ obtížnost opětovného nalezení stejného místa na vzorku
- ♦ není citlivá na typ atomů vzorku
- ♦ vliv adsorbované vody na povrchu vzorku
- ♦ množství artefaktů
- ♦ časově náročné měření
- ♦ nevidí do děr a trhlin

SPM - konstrukce

Každý SPM mikroskop obsahuje následující části:

- ◆ skenery – piezokeramické pohybové členy, které jednak vytvářejí měřicí rastr, jednak přibližují či oddalují sondu
- ◆ vlastní sondu – umístěnou v držáku, tvořena je zpravidla ostrým hrotem a nosnou částí, liší se dle typu mikroskopie, zprostředkovává měřicí interakci
- ◆ detektor – snímající měřitelnou veličinu (proud, posunutí), někdy je přímo sondou, někdy potřebuje ještě aktivní část (např. laser)
- ◆ obvody zpětné vazby, řídicí elektroniky, záznamu a vizualizace dat.
- ◆ napájecí zdroje
- ◆ stolek pro upevnění a manipulaci se vzorkem (realizace hrubého posuvu)
- ◆ optický systém pro orientaci na vzorku
- ◆ pomocné části (tlumení vibrací, vakuové vývěvy, generátory mag. pole, kryostaty apod.)



Scanovací tunelovací mikroskopie I

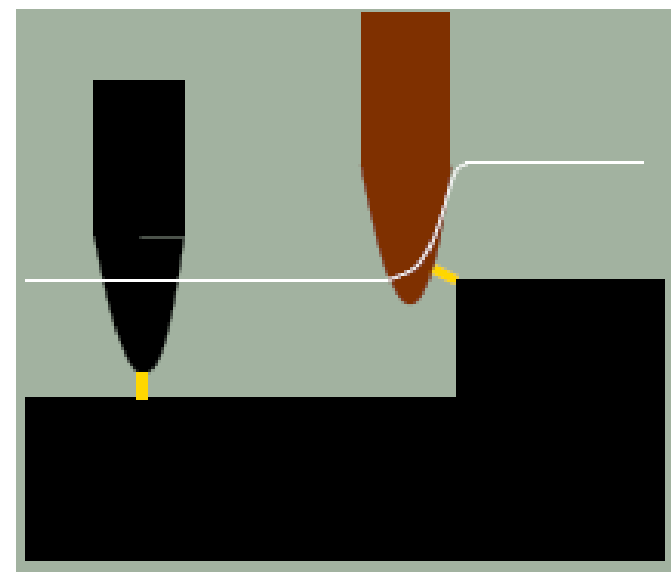
Mikroskopie tunelovacího proudu (Scanning Tunneling Microscopy – STM).

První použitelná SPM. Mikroskopie je založena na monitorování proudu, který protéká mezi vodivým hrotem a vodivým vzorkem, aniž by byly v přímém mechanickém styku. Mezi oběma kovy se vytváří energetická bariéra, kterou elektrony dle klasické teorie nemohou proniknout.

Tunelovací proud je nepřímo exponenciálně úměrný výšce a šířce bariéry.

$$I \approx e^{-\frac{2\sqrt{2m(V-E)}d}{\hbar}}$$

kde m je hmotnost elektronu, E je energie elektronu, V a d je výška a šířka bariéry.

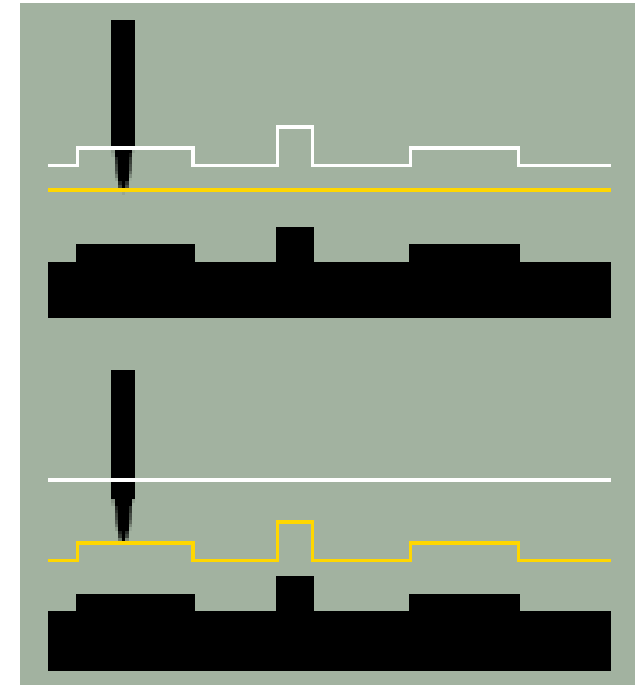


Scanovací tunelovací mikroskopie II

STM může pracovat ve dvou režimech:

- v režimu **konstantní výšky**, ve kterém je po dosažení tunelování svislá poloha hrotu fixována a během skenování se měří velikost tunelovacího proudu,
- v režimu **konstantního proudu**, ve kterém se hrot přibližuje ke vzorku tak dlouho, až tunelovací proud dosáhne přednastavené hodnoty. Pak se během skenování vyrovnávají jeho změny pomocí zpětné vazby a z-piezokeramiky tak, aby byl stále konstantní.

Druhý režim má větší dynamiku, ale je pomalejší (je třeba mechanický pohyb hrotu).



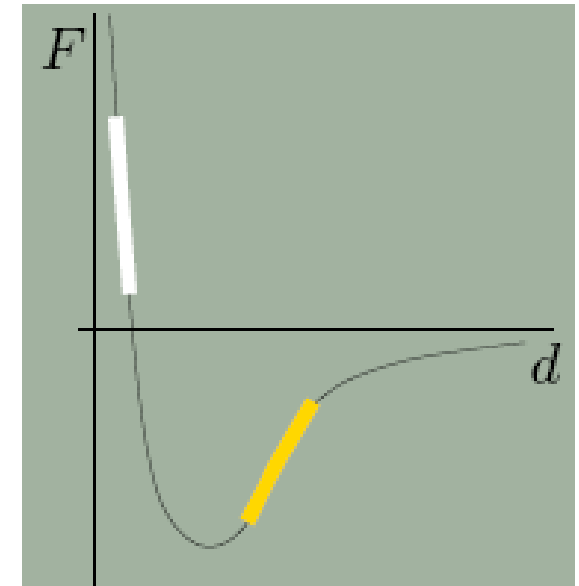
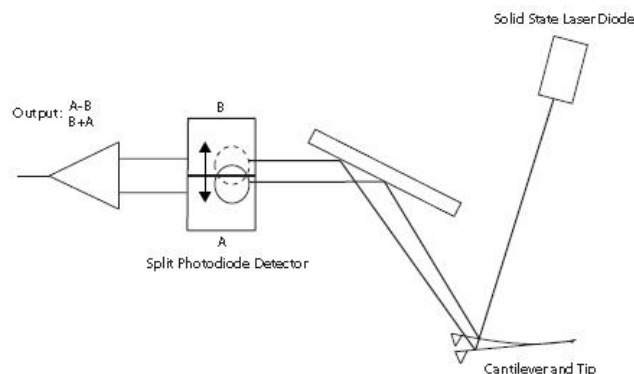
Žlutá barva označuje polohu hrotu, bílá úroveň proudu.

Mikroskopie atomárních sil - AFM

Mikroskopie atomárních sil (Atomic Force Microscopy, 1986), která se stala nejrozšířenější odnoží SPM.

Velmi ostrý hrot se pohybuje nad vzorkem či v dotyku s ním a je odpuzován či přitahován vzorkem. Hrot, který interakci snímá, je kolmo upevněn na tenkém pružném pásku – nosníku. Nosník svým ohybem zprostředkovává informaci o velikosti interakce do okolního světa. Síla obýbající nosník musí být menší než síla držící atomy vzorku pohromadě.

Měří se v režimu s konstantní výškou nebo konstantní silou.



Závislost síly působící mezi hrotem a povrchem na vzdálenosti hrotu od povrchu. Bílá část – kontaktní, žlutá část – bezkontaktní měření.

Skenery

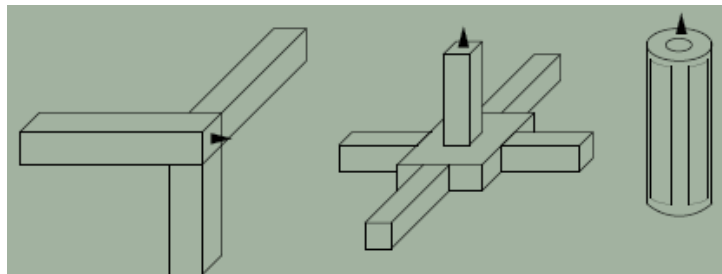
Skener je zařízení obstarávající pohyb hrotu po vzorku.

Typy skenerů:

trojnožka (tripod) je tvořena třemi navzájem kolmými piezokeramickými hranolky, které jsou na jednom konci přilepeny k sobě a zde je také upevněn hrot. Zbylé konce jsou upevněny k podložkám. Uvedenou sestavou je možno docílit pohyb ve všech třech osách s velkým rozsahem. Nevýhodou je křížový efekt.

kříž, tvořený čtyřmi rameny, která jsou po dvojicích kolmá. Protilehlé dvojice slouží k posuvu ve stejném směru a jejich symetrické zapojení vylučuje vlivy teplotních driftů apod.

dutá trubička, jejíž vnitřní elektroda je souvislá, ale vnější elektroda je rozdělena na čtyři symetrické části, přičemž protilehlé elektrody tvoří pár se stejným napětím.



Další metody

Mikroskopie laterálních sil (LFM), Mikroskopie modulovaných sil (FMM), Mikroskopie magnetických sil (MFM), Mikroskopie elektrostatických sil (EFM), Skenovací teploměrná mikroskopie (SThM), Skenovací tunelová spektroskopie (STS), Skenovací tunelovací potenciometrie (STP), Skenovací šumová mikroskopie (SNM), Mikroskopie balisticky emitovaných elektronů (BEEM), Skenovací kapacitní mikroskopie, Tunelovací fotonová mikroskopie (PSTM), Mikroskopie blízkého optického pole (NFSOM).

Využití k manipulaci

SPM může být použita i k manipulaci s atomy. Vyžaduje kvalitní povrch, vakuum (adsorbce) a nízkou teplotu (difuze).

- ▶ Hrot přiblížíme ke zvolenému atomu a napětím vhodné polarity ho přinutíme přeskočit na hrot. Přeneseme a opačnou polaritou vrátíme na povrch (nápis IBM xenonovými atomy na niklu při teplotě 4 K, 1990).
- ▶ Nebo lze atom tlačit hrotem po povrchu vzorku na zvolené místo.