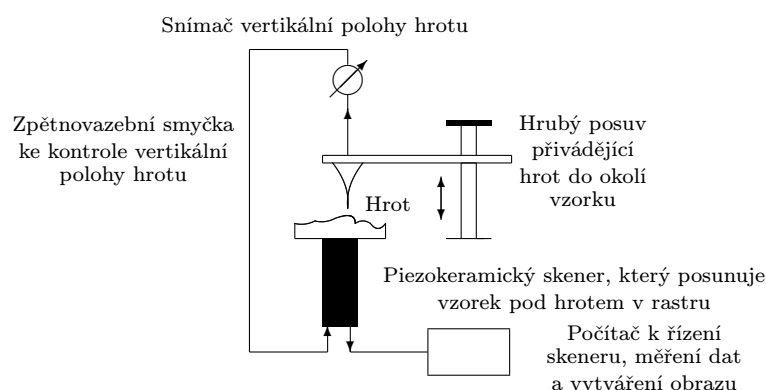


Stručný popis metod SPM

Mikroskopie skenující (rastrující) sondou (**Scanning Probe Microscopy**) je soubor experimentálních metod určených ke stanovování struktury povrchu se subatomárním rozlišením ve směru kolmém k povrchu. První v řadě těchto technik byla skenující tunelovací mikroskopie (STM). Její teoretický popis je založen na kvantové fyzice, konkrétně na **tunelovém jevu**. Byla vyvinuta v laboratořích IBM pracovníky Binnigem a Rohrerem roku 1981, kterým za jejich objev byla v roce 1986 udělena Nobelova cena. Je to jedna z mála metod, která je schopna poskytnout až atomární rozlišení, přičemž je zároveň vcelku jednoduchá. Oproti ostatním metodám (transmisní elektronová mikroskopie, autoemisní iontová mikroskopie) nevyžaduje náročnou přípravu vzorku, ale poskytuje jen informace o povrchu. Její nevýhodou je, že neposkytuje okamžitý a vizuální obraz, ale snímání je postupné a je nutno pro zobrazení využít počítače. Historie metod v blízkém poli sahá do roku 1928, kdy Synge poprvé zavedl princip skenování ostrým skleněným hrotem velmi blízko hrotu. Tehdejší stav technologií však neumožňoval realizaci měření. První přístroj z této kategorie začal pracovat roku 1972, když R. Young sestrojil svůj *Topografiner*, zařízení schopné mapování povrchu ve vzdálenosti 100 nm. Atomárního rozlišení však zde nebylo dosaženo z důvodu značné nestability vzdálenosti hrotu od povrchu.

Uspořádání mikroskopu

Schematický náčrt uspořádání mikroskopu je vidět na obrázku, kde jsou zakresleny jeho hlavní funkční části. Každý mikroskop SPM se skládá z mechanické části – stolku k upevnění vzorku, polohovacího zařízení, umožňujícího pohyb ve třech rozměrech, ze sondy (hrotu, nosníku) a z elektrické části – napájení, zpětné vazby, sběru signálu a ovládání pohybu. Důležitou vnější částí mikroskopu je vybavení k tlumení mechanických vibrací. Mikroskop může být dále vybaven dalším pomocným vybavením, jako je např. vakuová komora, kryostat apod.



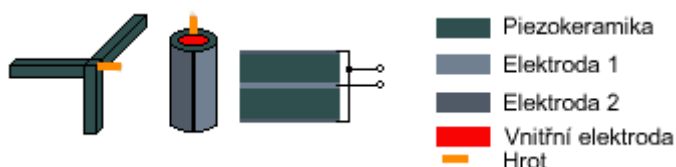
Obrázek 1: Všeobecné schéma skenovacího mikroskopu

Pro funkci všech SPM má největší význam polohovací zařízení, které musí zajistit jednak přesné polohování hrotů, jednak stabilitu polohy. Z technického hlediska je nutno zajistit dvě polohovací funkce:

- makroskopický pohyb vzorku směrem k hrotu po jeho vložení do zařízení, což může být realizováno piezoelektricky, mechanicky pomocí převodních pák či šroubem nebo elektrostaticky;
- nanoskopický pohyb provádějící přiblížení vzorku k hrotu na vzdálenost umožňující měření a výběr oblasti zkoumání. Tato část je realizována výhradně piezoelektricky, přičemž se standardně používá několika konstrukcí polohovacího zařízení (skeneru), které se liší svým maximálním rozsahem, linearitou a dalšími parametry:

1. trojnožka je tvořena třemi hranolky piezokeramiky umístěnými kolmo na sebe a spojenými navzájem jedním koncem, zatímco druhými jsou upevněny; hrot je umístěn na společném konci.

2. dutá trubička, jejíž vnitřek je pokoven, aby vytvářel elektrodu a která je zvnějšku pokovena tak, aby byly vytvořeny čtyři nezávislé segmenty. Je-li přivedeno stejné napětí na všechny elektrody, trubička se protáhne podél své osy. Pro docílení bočního pohybu se vnitřní elektroda uzemní, na protilehlé elektrody se přivedou napětí stejné velikosti, ale opačné polarity, přičemž sousední elektrody mají napětí různé velikosti, a výsledkem je ohyb trubičky po oblouku.
3. dva spojené pásy piezokeramiky, mezi nimiž je tenká vrstva kovu. Přiložíme-li napětí naznačeným způsobem, jeden pásek se zkrátí, druhý prodlouží a výsledkem je ohnutí pásku.



Vlastnosti SPM

- až atomární rozlišení, zobrazení v přímém prostoru
- trojrozměrný obraz v reálném čase, možnost studia dynamických procesů
- možnost použití v různých prostředích, vhodné především pro zobrazování biologických vzorků *in vivo* a *in vitro*.
- vzhledem k malé velikosti SPM hlavy ji lze vestavět do zařízení pro jiné typy mikroskopických technik
- není zapotřebí žádného externího zdroje částic (jako třeba elektronů v elektronové mikroskopii či světla ve světelné)
- lokální interakce (nestředované veličiny)
- není třeba speciálních úprav vzorku (někdy potřeba vodivého pokrytí či fixace)
- velký rozsah zvětšení, nicméně při malých zvětšeních nese obraz informaci pouze o místě těsně pod hrotem (u jiných technik se při menším zvětšení zvětší plocha, z níž se informace snímá)
- vlivem lokálnosti neobsahuje obraz informaci o zbytku povrchu
- mnohdy neexistuje jednoduchá inverzní transformace, tj. z naměřených hodnot není zpravidla možno přímo určit strukturu, lze jen porovnat s očekávanými hodnotami z modelu a ten případně opravit
- citlivost k vibracím a teplotním driftům
- je citlivá pouze na pár povrchových vrstev (často na jednu)
- velké množství artefaktů (falešných obrazů), zvláště hrot se vzorkem si mohou vyměnit roli (tzv. zrcadlení hrotu)
- vliv adsorbované vody na povrchu vzorku
- obtížnost opětovného zobrazení téhož místa na vzorku
- není obecně citlivá na chemickou podstatu atomů, určit typ atomu lze jen z doplňujících metod a úvah
- metoda registruje zvlnění určité fyzikální vlastnosti (např. plochy konstantní hustoty náboje), které ovšem klesá se vzdáleností od povrchu

Jednotlivé metody

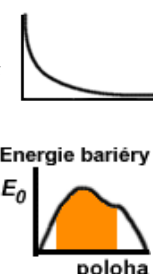
Po uvedení základní metody STM došlo k mohutnému rozvoji této techniky a objevila se celá řada variací, vhodných pro studium různých typů a vlastností povrchů. Vývoj rovněž směřoval k zjednodušení konstrukce (původní přístroj nutně potřeboval vakuum), k vývoji matematického aparátu na zpracování získaných obrazů a odstranění artefaktů, hledání vhodných materiálů a technologií pro vytváření nosníků, hrotů a pohybových zařízení a k vytvoření teoretického popisu metod.

Jednotlivé klony už nemusí být založeny na tunelovém jevu, ale využívají princip přesného polohování a velmi těsného přiblížení sondy k povrchu vzorku. Mnohdy jsou tyto metody sdruženy v jednom přístroji a umožňují i současný sběr více druhů signálů. Na schématu mikroskopu je v případě jednotlivých klonů nutno nahradit vodivý kovový hrot jiným typem (hrot s nosníkem, optický vlnovod, . . .), případně přidat nějaký detektor.

Tunelový jev Jedním ze základních přínosů kvantové fyziky je popsání tunelového jevu. K němu dochází v případech, kdy částice nemá dostatečnou energii na proniknutí energetickou bariérou a tedy by měla dle klasické fyziky zůstat uvnitř oblasti bariérou ohraničené (na obr. vyplněná). V kvantové fyzice, kde je částice popisována vlnovou funkcí, tato funkce v oblasti bariéry (s konečnou energií) pouze exponenciálně klesá a v případě dostatečně tenké bariéry je i po průchodu bariérou nenulová. Vzhledem k tomu, že pravděpodobnost výskytu částice v daném místě je dána kvadrátem velikosti vlnové funkce v daném bodě, existuje *nenulová pravděpodobnost proniknutí částice skrz bariéru*. Tato pravděpodobnost je ovšem velmi malá a přibližně se dá vyjádřit vztahem

$$P \sim e^{-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(V-E)}d},$$

kde konstanta \hbar je Diracova konstanta ($\sim 10^{-34}$ Js), m hmotnost elektronu, E je energie částice, V výška energetické bariéry a d její šířka. Je vidět, že s narůstající šířkou prudce (exponenciálně) klesá pravděpodobnost přechodu a právě tato vlastnost je základem tunelové mikroskopie.



Skenovací tunelová mikroskopie (STM)

Tato metoda je přímo založena na pravděpodobnosti průchodu částice energetickou bariérou. Energetická bariéra je vytvářena prostorem, v němž dochází k částečnému překrytí vlnových funkcí atomů hrotu a povrchu. Elektronů v kovu mají menší energii než elektrony ve vakuu mezi nimi, čímž se vytvoří bariéra. Jsou-li oba kovy shodné, je bariéra naprosto symetrická, oběma směry přecházejí elektrony a **celkový proud je nulový**. Přiložíme-li napětí, symetrie zmizí a celkový proud bude nenulový. Velikost proudu je ovlivňována i přítomností prázdných hladin v jednom kovu a obsazených v druhém (tj. tvarem vlnových funkcí). Z toho plynou dva poznatky:

1. není určován přímo topografický povrch vzorku, ale jen rozložení vlnové funkce atomu (resp. metoda je citlivá na obsazení energetických hladin v blízkosti Fermiho energie, přičemž citlivý energetický rozsah určuje přiložené napětí),
2. pravděpodobnost přechodu (a tím velikost proudu) lze ovlivnit oddálením či přiblížením hrotu k povrchu.

Vlastní měření probíhá tak, že nejprve se provede hrubý posuv vzorku k hrotu ve směru z (hrot je zde tvořen zaostřeným drátkem, např. wolframovým), tento může být čistě mechanický. Poté dojde k přiložení napětí mezi hrot a vzorek, aby mohl procházet proud (je tedy zapotřebí **vodivý vzorek**) a nyní se jemným posuvem (pomocí piezokeramiky) přiblíží vzorek ke hrotu tak, aby procházející proud nabyl měřitelných hodnot, pak se přiblížování zastaví. Získání obrazu (skenování) se provádí skokovým posuvem ve dvou rozměrech (x, y) po příslušné matici měřicích bodů, zpravidla se pohybuje po řádcích a v jednom směru (zpětný pohyb je tedy prázdný). Výstupem měření je matice a_{ij} , jejíž indexy označují polohu bodu a příslušná hodnota je velikost měronosného signálu. Tento signál může být dvojího druhu, v závislosti na režimu měření:

1. **režim s konstantní výškou**, při němž se udržuje jednou nastavená hodnota z_0 a měří se velikost tunelového proudu. Tento režim umožňuje rychlé snímání obrazu, protože není nutno pohybovat vzorkem, ale je méně přesný, neboť při velkých vzdálenostech hrotu od povrchu se proud dostává pod dobře měřitelnou úroveň.
2. **režim s konstantním proudem**, při němž se pomocí zpětné vazby udržuje konstantní úroveň proudu. Měronosnou veličinou je napětí přikládáné k piezokeramickým pohybovým prvkům. Tento režim je pomalejší, umožňuje sledovat větší změny profilu povrchu, je však závislý na převodním vztahu přiloženého napětí a změně rozměru piezopravku. Tato závislost může být odstraněna vnějším měřičem polohy, např. laserovým. Další nevýhodou může být poškození povrchu, přejde-li hrot nad oblast s výrazně odlišnými elektrickými vlastnostmi (např. zoxidovaná místa) – aby byl udržen nastavený proud, dojde k velkému snížení hrotu.

Mikroskopie atomárních sil (AFM)

Mikroskopie AFM je založena na mapování rozložení atomárních sil na povrchu vzorku. Tyto síly jsou mapovány těsným přiblížením hrotu k povrchu, čímž vzniká přitažlivá nebo odpudivá síla, která způsobí ohnutí nosníku, na němž je upevněn hrot. Toto ohnutí je snímáno citlivým, zpravidla laserovým snímačem a vytváří měronosnou veličinu. Zřejmou výhodou této metody je možnost studovat jak nevodivé, tak i vodivé vzorky.

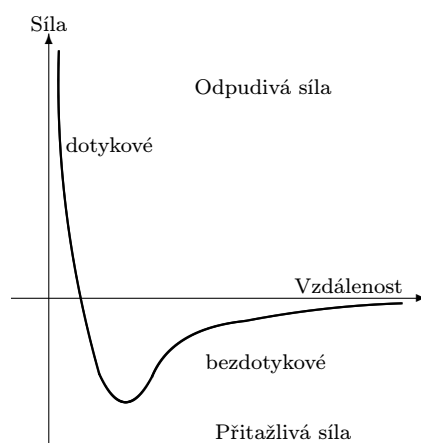
Detektor ohnutí je tvořen laserovou diodou, která vytváří skvrnu konečné velikosti, která dopadá na špičku nosníku a od něj se odráží. Odražené světlo dopadá na světelný detektor, který je rozdělen na dvě citlivé části. Před vlastním měřením se systém mechanicky vyváží tak, aby energie svazku dopadající do obou částí (duantů) byla stejná. Při měření se ohyb projeví posunem odrazu, takže energie v jednotlivých duantech už nebudou stejné a z jejich poměrů je možno určit vychýlení nosníku. V současné době se zpravidla využívá kvadrantní detektor, který je rozdělen na čtyři části a umožňuje detekovat pohyb skvrny v dalším kolmém směru – tedy zkrut nosníku.

Síly ohýbající nosník mohou být různé fyzikální podstaty, především se však uplatňuje přitažlivá van der Waalova síla působící mezi dvěma atomy na větší vzdálenosti a odpudivá síla plynoucí z Pauliho principu, která působí na menších vzdálenostech. Celková síla může být jak odpudivá, tak i přitažlivá v závislosti na vzdálenosti hrotu. Z tohoto „rozdělení“ je možno odvodit následující režimy činnosti:

1. **dotykový** – zde je vzdálenost hrotu a povrchu tak malá, že výsledná síla je odpudivá a snaží se ohýbat nosník od povrchu. Bude-li jeho tuhost menší než efektivní tuhost držící pohromadě atomy povrchu, lze ohnutí nosníku použít k měření sil. V opačném případě se nosník neohne, ale může způsobit poškození vzorku. Do ohnutí nosníku se však ještě promítají i jiné síly, které brání kvalitnímu zobrazení. Jde především o kapilární síly vznikající v kapičkách vody zkondenzované na povrchu vzorku z okolní vlhkosti. Další působící veličinou může být vlastní pružnost nosníku. V této oblasti působí na vzorek zpravidla síla řádově 10^{-7} N. Tento režim lze rovněž provozovat ve dvou modifikacích, a to sice:
 - (a) s **konstantní výškou**, při níž je udržována určená hodnota výšky z_0 a měří se ohnutí nosníku;
 - (b) s **konstantní silou**, kdy se udržuje konstantní ohnutí nosníku a posunuje se vzorkem (či hrotem) ve směru osy z . Tato modifikace je častěji používaná, protože se vyvarujeme závislosti prohnutí na kapilárních silách a pružnosti nosníku, je ovšem pomalejší (potřeba pohybu vzorku, závisí na odezvě zpětné vazby).

Při dotykovém měření se zpravidla projevuje hystereze. Při přibližování k povrchu je nejprve síla konstantní, při určité vzdálenosti d_1 prudce vzroste a přitáhne hrot skokově k povrchu, pak zvolna narůstá odpudivá síla. Při oddalování nejprve klesá odpudivá síla, zvolna přechází v rostoucí přitažlivou a v jisté vzdálenosti $d_2 > d_1$ prudce klesne a nosník odskočí.

2. **bezdotykový**, je vibrační technika, při níž je vzdálenost mezi hrotem a vzorkem udržována v strmé části vzestupné závislosti van der Waalových sil (mají velikost řádově 10^{-12} N, desítky až stovky nm). Výhodou této metody je měření bez mechanického kontaktu, což umožňuje měřit i měkké a



Obrázek 2: Závislost působících sil na vzdálenosti

elastické vzorky a zabraňuje možnému znečištění. Protože je v této metodě hrot ke vzorku přitahován, musí být dostatečně tuhý, aby nedošlo k přiskočení ke vzorku a jejich poškození. Zároveň však na něj v této vzdálenosti působí malé síly a je tedy ohnutí velmi malé, tudíž i měřicí signál je velmi malý. Z tohoto důvodu se často používá střídavého měření. Celý nosník je rozkmitáván blízko své rezonanční frekvence s rozkmitem jednotek nm a může být měřena změna rezonanční frekvence při přiblížení k povrchu.

Obě metody se výrazně liší v případech, kdy je zkoumaný povrch částečně pokryt zkondenzovanou vodou. Bezdotyková metoda bude snímat reliéf odpovídající povrchu **vodní kapky**, ale dotyková metoda bude sledovat povrch **vzorku** (samozřejmě se zde může nepříznivě projevit vliv kapilarity).

3. **poklepový**, který je velmi podobný předchozím, jen rozkmit je tak velký, že dochází k dotyku hrotu s povrchem. Povrch je zde opět mapován ze změny rezonanční frekvence. Tato modifikace je výhodnější než dotyková v případech, kde by hrozilo poškození povrchu třením nebo tažením a je rovněž vhodnější než bezdotyková, je-li nutno snímat větší plochy zahrnující větší rozpětí v ose z .

Mikroskopie laterálních sil (LFM)

Při tažení hrotu v dotykové AFM působí na vzorek parazitní třecí síly, které mohou vzorek poškodit. Alternativně lze právě tyto síly využít k mapování mechanických vlastností vzorku, protože oblasti s různými vlastnostmi budou vytvářet různě velkou třecí sílu. Tato síla bude zkrucovat nosník (ve směru kolmém k měření s AFM) a tento zkrut je možno měřit např. optickou cestou. Výhodou této metody je možnost simultánního použití s AFM.

Mikroskopie modulovaných sil (FMM)

Je určena pro měření elastických vlastností povrchu. Metoda je založena na dotykové AFM s konstantním ohybem, přičemž je navíc přidán periodický pohyb vzorku nebo hrotu s frekvencí nad mezní hodnotou zpětné vazby. V tomto případě se výsledná amplituda kmitání hrotu mění v závislosti na elastických vlastnostech vzorku.

Mikroskopie magnetických sil (MFM)

Zobrazuje prostorové rozložení magnetických sil na povrchu vzorku podobným způsobem jako bezdotyková AFM, jen hrot je pokryt ferromagnetickou vrstvou. Rozlišení je však asi desetkrát horší. Ve výstupním signálu jsou zahrnuta jak data topografická, tak i magnetická a lze je rozlišit snímáním obrazu

při různých výškách, protože magnetické síly jsou dalekého dosahu, tedy blízko povrchu je obraz převážně topografický, dále jen magnetický.

Mikroskopie elektrostatických sil (EFM)

Slouží k mapování rozložení elektrostatických nábojů na povrchu. Hrot i povrch jsou připojeny k napětí, ale vzájemně se nedotýkají. Při změně náboje na povrchu dojde k ohnutí nosníku v závislosti na velikosti náboje, což lze měřit podobně jako u magnetických sil. Druhou cestou může být rozkmitání nosníku a sledování změn jeho rezonanční frekvence.

Skenovací teploměrná mikroskopie (SThM)

Může být založena na rozdílných principech. Jednak lze měřit teplotní vodivost povrchů, když je nosník vytvořen ze dvou rozdílných materiálů tak, že tvoří mikrotermočlánek (hrot je kovový, na něm je izolační vrstva, která ponechává nekrytý pouze vrchol hrotu a přes vrstvu je nanesen druhý kov; termočlánek je vytvořen na konci hrotu), který je zahříván průchodem konstantního proudu. Při přiblížení k povrchu dojde k zvýšení tepelného odvodu v závislosti na místní teplotě vzorku a jeho tepelné vodivosti, což se projeví na velikosti termonapětí. Druhý způsob měření spočívá v tom, že při těsném přiblížení dvou různých kovů (asi 0,5 nm) dojde k vyrovnání Fermiho energií, což se projeví vznikem potenciálního rozdílu mezi kovy. Třetím způsobem je konstrukce nosníku ve tvaru dvou spojených pásků s rozdílnou tepelnou roztažností, což se při změně teploty projeví ohybem nosníku.

Skenovací tunelová spektroskopie (STS)

Je variantou STM určenou ke stanovování energetické struktury látek. Navazuje na starší spektroskopickou metodu MIM, u níž byla tunelovací mezera vytvořena vrstvičkou izolantu na povrchu vzorku a pod nanesenou kovovou vrstvou. Tato metoda samozřejmě nedovolovala vysoké prostorové rozlišení. U rastrovací spektroskopie je izolační vrstva nahrazena vakuem a druhý kov hrotem. Cílem metody je stanovení hustoty energetických stavů vzorku v závislosti na energii povrchového stavu. K tomu využívá závislosti tunelového proudu na hustotě stavů a faktu, že elektrony tunelují jen z určitého energetického pásma, závislého na přiloženém napětí. Měření se provádí tak, že se nastaví hrot nad určité místo a do určité vzdálenosti od vzorku, zde se vypne zpětná vazba, plynule se mění napětí mezi vzorkem a hrotem a registruje se protékající proud.

Skenovací tunelovací potenciometrie (STP)

Tato varianta slouží k současnému měření topografie a rozložení napětí podél povrchu. Oproti STM je zařízeno doplněno dvěma protilehlými elektrodami (upevněnými na vzorku), mezi nimiž je stejnosměrné napětí. Napětí mezi hrotem a vzorkem zde je naopak střídavé, což umožňuje rozlišení obou složek. Amplituda střídavého proudu slouží k udržování stálé vzdálenosti hrotu od vzorku (režim s konstantním proudem), zatímco stejnosměrnou složku se snažíme vynulovat pomocným napětím V_R . Je-li dosaženo nulové hodnoty, určuje velikost V_R hodnotu napětí v daném bodě. Tedy z průběhu V_R určíme rozložení potenciálu a z průběhu vyrovnávacího napětí piezoelektrika topografii povrchu. Tato metoda je vhodná především ke studiu zrnitých materiálů a polovodičových elektronických struktur, neboť umožňuje stanovit rozložení rezistivity.

Skenovací šumová mikroskopie (SNM)

Tato variace základní STM nepoužívá vnějšího napětí mezi hrotem a vzorkem, ale měří hodnotu kvadrátu tepelného šumového napětí (ne proudu), vzniklého na odporu mezery a používá jej k udržování konstantní velikosti mezery. Metoda je vhodná pro speciální aplikace, u nichž je zapotřebí nulový střední proud.

Mikroskopie balisticky emitovaných elektronů (BEEM)

Všechny uvedené metody vyšetřovaly pouze povrchovou vrstvu atomů. Někdy je však potřeba charakterizovat i podpovrchové vrstvy. K tomuto účelu byla vymyšlena mikroskopie balisticky emitovaných elektronů, která používá trojelektrodové uspořádání. Měřený vzorek obsahuje dvě rozdílné vrstvy vytvářející podpovrchové rozhraní (heteropřechod, zpravidla s vnější vrstvou kovovou – bází a vnitřní polovodičovou – kolektorem, tvořícími Schottkyho vrstvu), které vytváří potenciálovou bariéru V_B a nad ním je umístěn kovový hrot. Po přiložení napětí V mezi hrot a bází elektrony z hrotu tunelují skrz vakuovou bariéru do vzorku, a vzhledem k nízkému zeslabovacímu koeficientu některé z nich mohou přecházet skrz heteropřechod, aniž by předtím utrpěly srážku. Je-li $V < V_B$, nemohou však tyto elektrony bariéru přechodu překonat a proud I tekoucí mezi bází a kolektorem je malý. V okamžiku, kdy napětí V překoná napětí bariéry, nastane prudký vzrůst proudu I .

K vlastní mikroskopii se využívají prostorové rozdíly ve velikosti *prahového* napětí nebo změny proudu I . Z konstrukčního hlediska je mikroskop stejný jako pro STM, pouze je zapotřebí citlivějšího zesilovače a většinou je nutno provádět měření ve vakuu.

Skenovací kapacitní mikroskopie

Na soustavu hrot-vzorek můžeme nahlížet jako na kondenzátor, jehož elektrody jsou tvořeny vodivým vzorkem a hrotem a dielektrikem jsou povrchové vrstvy na vzorku nebo vakuu. Přiložíme-li na elektrody střídavé napětí, můžeme vyhodnocovat kapacitu tohoto kondenzátoru, ovlivněnou lokální geometrií a dielektrickým prostředím. Metoda se využívá např. ke stanovování lokální koncentrace dopantů v polovodiči.

Tunelovací fotonová mikroskopie (PSTM)

Je obdobou STM, jen dochází k *tunelování fotonů* místo elektronů. Sonda je tvořena optickým mikrovláknem, kterým jsou zaregistrované fotony vedeny k detektoru. Vzorek je upevněn na podstavě hranolu a na tuto podstavu dopadá zvnějšku světlo pod mezním úhlem a dochází k totálnímu odrazu, přičemž přes podstavu prochází evanescentní vlny, které jsou zachytávány vláknovým hrotem. Při průchodu upevněným vzorkem dochází ke změně vlny a tím k registraci obrazu. Uvedená metoda umožňuje rozlišení řádově menší než vlnová délka použitého světla.



Mikroskopie blízkého optického pole (NFSOM)

V klasické optické mikroskopii jsme použitím optických prvků a velké vzdálenosti omezení v rozlišení na hodnotu poloviny vlnové délky použitého osvětlení. Toto omezení může být překonáno, budeme-li osvětlovat vzorek skrz velmi malou štěrbinu velmi blízko povrchu vzorku. Pak se světlo nestačí rozšířit před průchodem vzorkem a jeho intenzita tedy ponese informaci o vzorku v místě pod štěrbinou (to, že se světelná stopa rozšíří po průchodu vzorkem, už hodnotu informace nesníží) s rozlišením rovným velikosti otvoru. V praxi je štěrbinu realizována otvorem ve vláknovém hrotu nebo hrotem podobným mikropipetě. Lze použít i opačný postup, kdy je vzorek rovnoměrně osvětlován a snímání je prováděno v blízké oblasti mikrovlnovodem. Metoda NFSOM může obecně využívat kontrastu v důsledku rozdílné absorpce, odrazivosti nebo lomu světla.

Aplikace SPM

Všechny metody SPM jsou využívány ke studiu vlastností a uspořádání nejrůznějších povrchů, povrchových procesů (chemických reakcí, difúzí, adsorpcí, katalýz) apod. Kromě fyziky a chemie povrchů je však metoda použitelná i v dalších oborech.

Biologické využití

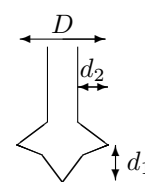
Pro biologii je největším přínosem metody možnost zobrazovat v libovolném okolním prostředí, což zabrání např. vysychání struktur a umožňuje zobrazit i živé organizmy (např. bakterie, často se zobrazuje DNA). Problémem při těchto měřeních je nalezení vhodného podkladového povrchu (nejčastěji se používá čistý pyrolitický grafit pro STM a slída pro AFM), fixace vzorku a zajištění jeho vodivosti (pro STM) nebo volba vhodné síly (pro AFM). Velkým problémem však zůstává interpretace naměřených výsledků.

Metodu známou z AFM je možno také využít pro detekci malého množství biologicky aktivních materiálů (toxinů, bakterií, virů ...), přítomných v prostředí. Základem detektoru je ohebný nosník, k němuž jsou chemicky navázány „protikusy“ k detekovanému materiálu (tedy molekuly, které jsou přednostně citlivé k jisté části detekovaného materiálu a vážou se na něj). Nosník s protikusy je obtékán prostředím, v němž se může nacházet daná látka. Je-li přítomna, dojde k jejímu navázání. Po určité době se do prostředí vpustí supermagnetické částice (např. polystyrenové kuličky napuštěné Fe_3O_4), které jsou rovněž opatřeny protikusy k dané látce (které se nevážou ani na nosník, ani na již přítomné protikusy), ty se připojí k obsazeným protikusům nosníku a zbylé magnetické částice jsou odstraněny propláchnutím. Nyní se aplikuje magnetické pole kolmé k rovině nosníku, které bude přitahovat navázané magnetické částice a ohýbat nosník. Protože výsledný ohyb závisí na ohýbací síle a ta na množství navázaných částic, je možno z ohybu určit koncentraci detekované látky. Z popisu je vidět, že se jedná o metodu statistickou, a tedy přesnost určení koncentrace závisí na počtu protikusů na nosníku.



Metrologie

V metrologii je možno využít SPM jako prostředek pro přesná rozměrová měření. Jako příklad je uveden na obrázku speciální hrot určený k měření zářezů v površích. Hrot má tři vrcholy v takovém uspořádání, že umožňuje stanovit hloubku zářezu, jeho šířku i v dolní části zářezu a dokonce i „podřezání“ okrajů zářezu. Další možnou aplikací v metrologii může být určování drsností povrchů či posuzování kvality testovacích mřížek.



Nanotechnologie

Možnost zobrazovat atomy a přesné polohování lze využít také k manipulaci s atomy. Tímto způsobem je možno vytvářet struktury na atomární úrovni, i když zatím spíše jen pro dekorační účely než k užitku. Pro manipulaci s atomy je zapotřebí kvalitního povrchu, zpravidla ve vakuovém zařízení, aby nedocházelo k adsorpci a za nižší teploty, aby se zamezilo vlivu difúze. S jednotlivými atomy je možno manipulovat dvěma způsoby:

1. pomocí STM hrotu, který nastavíme nad přemísťovaný atom a přiložíme napětí vhodné polarity. Tím dojde k přechodu atomu na hrot, který posléze oddálíme a přesuneme na žádané místo a přiložíme napětí opačné polarity, čímž dojde k depozici atomu na povrch vzorku. Prvním takto vytvořeným obrázkem byl nápis IBM, vytvořený z atomů xenonu na povrchu niklu, ochlazeném na 4 K (-269 °C).

2. pomocí jakéhokoliv hrotu je možno manipulovat také tak, že hrot přiblížíme k povrchu za zvoleným atomem a v blízkosti povrchu atom tlačíme před hrotem na žádané místo.

Podobným způsobem je možno také manipulovat s celými molekulami (např. C_{60}). Další formou zpracování povrchu může být např. vytváření čar v povrchových vrstvách rytím hrotem či nanolitografie. Při ní je na povrch nanesen citlivý film, který hrot STM v požadovaných místech „vyvolá“ pomocí emitovaných elektronů. Velkou výhodou uvedených metod je přesnost zpracování a možnost přetvořený povrch ihned zobrazit (týmž hrotem). Naopak nevýhodou je nutnost sériové výroby, což znemožňuje průmyslovou aplikaci.

Jinou formou povrchových modifikací je přímý přenos materiálu. Je možno např. při použití zlatého hrotu jeho přiblížením a použitím intenzivního napěťového pulsu vytvořit na povrchu zlatou „hromádku“, tzv. kvantovou tečku. Vytvářet kopečky lze i zatlačováním hrotu do povrchu. Je-li hrot dokonale čistý, dojde po jeho odtažení k vytvoření kopečku (materiál povrchu se jakoby táhne za hrotem). Je-li povrch pokryt adsorbáty, zůstane po jeho zatlačení zpravidla důlek. Vzhledem ke konstantnímu množství atomů, jsou poslední dva typy modifikací vždy obklopeny doplňkovými (kolem kopečku je kruhová oblast vtlačení, důlek je lemován převýšením).

Uvedené metody byly použity i k ověření závěrů kvantové mechaniky. Byla vytvořena kruhová ohrádka ze 48 atomů železa na měděném povrchu a byla nasnímána metodou STM. Vzhledem k tomu, že metoda je citlivá na hustotu el. stavů (čtverec absolutní hodnoty vlnové funkce), vytvořily se uvnitř bariéry (kde nejsou žádné adsorbované atomy) soustředné kružnice, což je obrazec, který kvantová mechanika předpovídá pro částici uvnitř kruhové bariéry.

V nanotechnologii lze využít také metodu AFM, ovšem doposud ne na atomární úrovni. Jednou možností je využití sil mezi hrotem a vzorkem v kontaktním režimu, které způsobí tažení částic po povrchu podložky a tím získáme možnost sestavovat z nich struktury. Při zvětšení působící síly lze do vhodné podložky vytvářet rýhy a tvořit obrazce. Častěji se využívají metody lokální oxidace. Necháme-li pokovit hrot AFM nosníku, můžeme mezi hrot a vzorek přivést napětí. Při vhodné kombinaci podložky a napětí bude na povrchu docházet k elektrochemickým reakcím, které povedou k vytvoření oxidové struktury o šířce řádově deset nanometrů. Bude-li se hrot pohybovat, může vytvářet čáry, jejichž tloušťka a šířka závisí na napětí a rychlosti skenování.

Doplňky

Vlnová funkce

V klasické mechanice je částice přesně popsána, jsou-li známy všechny její souřadnice (tedy poloha) a její rychlost (velikost i směr). Pak lze její pohyb popsat pomocí Newtonových rovnic a o částici máme veškeré možné informace (z mechanického hlediska). V kvantové fyzice tomu tak není, protože zde nejsme principiálně schopni změřit zároveň polohu i rychlost částice. Proto bylo nutno zavést zcela nový způsob popisu částice i jinou „pohybovou“ rovnici. Ukázalo se, že je vhodné popisovat částici vlnovou funkcí $\psi(x, t)$, která vyhovuje tzv. Schrödingerově rovnici. Informace o částici se tedy získá tak, že se vytvoří dle fyzikálních podmínek ona rovnice a jejím řešením se získá vlnová funkce. Mírně problematický ovšem zůstal význam vlnové funkce. Protože funkce sama není vždy reálná, ale může být komplexní, nepředstavuje žádnou přímo měřitelnou veličinu. Měřitelným je však čtverec jejího modulu, tedy výraz

$$P \sim |\psi(x, t)|^2,$$

který je interpretován jako **pravděpodobnost**, že částice bude nalezena v bodě x (symboly $||$ znamenají absolutní hodnotu). Podstatnou změnou tohoto přístupu je „rezignace“ na přesný popis polohy částice, ale je známa pouze pravděpodobnost, s jakou se v daném místě nachází (nicméně tento popis je z hlediska kvantové fyziky maximální možný).

Piezoelektrika

U některých speciálních pevných látek, které nemají strukturu se středem souměrnosti, může docházet k piezoelektrickému jevu. Podstata tohoto jevu je následující: v klidovém stavu jsou polohy kladných a záporných nábojů po vystředění přes objem buňky shodné a materiál nevykazuje elektrické projevy. Je-li však mechanicky stlačen, polohy nábojů se rozposunou a na krajích látky se objeví náboj – látka se začne chovat elektricky. Pro SPM je však důležitější chování opačné, tedy změna rozměrů po přiložení elektrického napětí. Právě tato délková změna umožňuje využití piezoelektrik jako polohových manipulátorů. Důležitým rysem obou jevů je závislost efektu na vzájemné poloze krystalografických os látky a směru přiloženého pole (elektrického či mechanického).

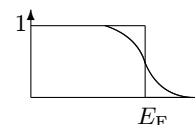
Mezi nejznámější látky s piezoelektrickým chováním patří křemen, LiNbO_3 a LiTaO_3 , z polymerů pak např. PVC. Z hlediska SPM je však nejdůležitější piezokeramika, což je materiál vytvořený spečením zrn nějaké piezoelektrické látky (nejdůležitější má označení PZT a je tvořen tuhým roztokem PbZrO_3 a PbTiO_3). Vzhledem k zrnitému charakteru však materiál po spečení piezoelektrický jev nevykazuje, neboť jednotlivá zrna jsou orientována náhodně a jejich účinek se vzájemně ruší. Proto se po výrobě provádí tzv. orientace, při níž se materiál zahřeje na zvýšenou teplotu a vnoří se do elektrického pole vhodného směru. Tato orientace bohužel není trvalá, ale dochází k jejímu poklesu s časem (depolarizaci), zvláště je-li materiál vystaven vyšším teplotám. Na zabránění depolarizace je nejvhodnější pravidelný provoz piezoelektrika, neboť pracovním napětím se materiál i cyklicky orientuje.

Piezoelektrické elementy mohou být různých tvarů, nejčastěji se však používají pásy a disky. Pro velikost prodloužení l pásku délky L ve směru napříč přiloženému napětí V platí $l = LdV/t$, kde t je tloušťka pásku a d je piezoelektrická konstanta daného materiálu.

Fermiho energie

Fermiho energie je jednou z charakteristik pevných látek. Jak je známo, při vytváření pevné látky se původní energetické hladiny plynných atomů rozštěpí v téměř plynulé pásy. Tento jev je důsledkem Pauliho pravidla, podle kterého žádné dva elektrony v systému nemohou zaujmout stejný stav, vzhledem ke dvěma hodnotám spinu elektronů mohou tedy stejnou energii mít pouze dva elektrony. Pásy, takto vzniklé, mohou se buď překrývat, jako je tomu u kovů, nebo je mezi nimi mezera, takzvaný zakázaný pás. Uvažujeme-li pevnou látku z N atomů, bude mít každý pás právě N podhladin, na něž je možno umístit $2N$ elektronů. Protože ale máme pouze N elektronů, je možno mít i neobsazené stavy. To, s jakou pravděpodobností bude daná hladina obsazena, závisí na její energii E dle vztahu

$$P = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1}.$$



Zde je k Boltzmanova konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K), T absolutní teplota v kelvinech a E_F je právě Fermiho energie. Význam této energie je patrný z obrázku. Pro nulovou teplotu je závislost vyznačena lomenou čarou, podle které je Fermiho energie nejvyšší obsazenou hladinou při $T = 0$ K a všechny pod ní jsou zaplněny s jistotou. Pro vyšší teploty (plynulá čára) se graf pozmění a zde je Fermiho energie interpretovatelná jako hladina s pravděpodobností obsazení 50%.

Ze statistického hlediska má Fermiho energie význam chemického potenciálu. Pro vysvětlení pojmu uvažujme systém velkého počtu elektronů, který je v jistém stavu a má danou energii. Přidáme-li do systému jeden jediný elektron, dá se očekávat, že většina charakteristik se nezmění, vyjma celkové energie. Právě rozdíl energie původní a nynější, tedy energie vnesená částicí, je chemický potenciál, v daném případě Fermiho energie. Protože při velkém počtu elektronů musí totéž platit i pro vyjmutí jednoho elektronu, má Fermiho hladina význam energetické hladiny, z níž elektrony pevnou látku opouštějí. Rozdíl energie vakua a Fermiho energie je tedy výstupní práci kovu.

Uvažujme nyní dva kovy s různými hodnotami E_F , které uvedeme do kontaktu a necháme teplotně ustálit. Protože v tomto případě máme pouze jeden systém a energie, kterou vnese částice by neměla záviset na místě vniku částice, musí se Fermiho energie obou kovů vyrovnat. To je možno tak, že se mezi kovy vytvoří napěťový rozdíl – **kontaktní napětí** $eV = E_{F1} - E_{F2}$, kde e je náboj elektronu ($\sim 10^{-19}$ C). Vzhledem k tomu, že Fermiho energie závisí na teplotě, závisí na teplotě i kontaktní napětí. Při konstantní teplotě závisí ovšem jen na stýkajících se kovech.

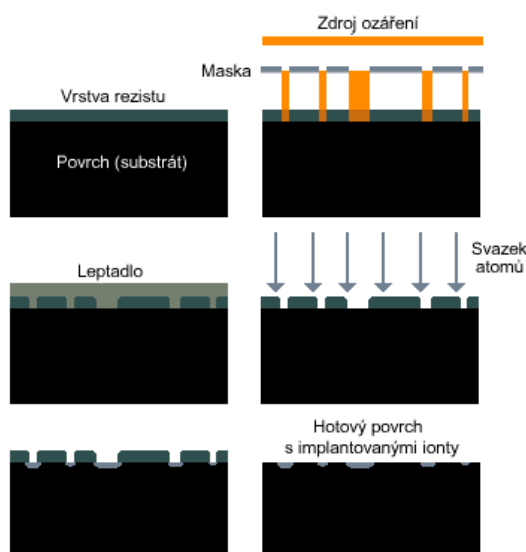
Litografie

Litografie je metoda hromadného chemicko-fyzikálního zpracování povrchu, používaná především při vytváření polovodičových struktur. Využívá se tam, kde je potřeba zpracovat jen určitou část povrchu (zpravidla i dost složitě tvarovanou). Její postup je přibližně následující:

1. Po vytvoření vhodného povrchu a jeho případné úpravě (leptání, broušení, oxidace apod.) je na něj nanášena tenká vrstva tzv. rezistu, což je chemická substance, která má citlivost na určitý podnět takového druhu, že se změní její rozpustnost v určitém rozpouštědle. Například může být citlivá na světlo nebo elektrony, které v místě dopadu vytvoří nový typ vazby (nebo naopak vazby rozruší).
2. Nyní je rezist **ozářen** v místech, která nemají být odstraněna. Ozáření je zpravidla provedeno z plošného zdroje přes stínící masku, ale může být rovněž použito nějaké rastrovací zařízení s bodovým zdrojem.
3. Na rezist je nanášena vrstva leptadla, které působí jen na **neozářená** místa, ozářená ponechá beze změny. Zde je důležité jednak aby leptadlo leptalo především směrem dolů, jinak by se vyleptala i ozářená místa, jednak aby nepůsobilo na původní povrch. Po vyleptání je k dispozici původní povrch, krytý v patřičných místech vrstvou ozářeného nerozpuštěného rezistu.
4. Nyní se provede technologická operace, kvůli níž se to vše dělalo. Je však nutné, aby zbylá vrstva rezistu byla pro danou operaci „nepropustná“. Příkladem operace může být vyleptání původního povrchu nebo nanášení nové vrstvy.
5. Posledním krokem je odstranění ozářeného rezistu a omytí povrchu.

Poznámka: Je samozřejmě možný i opačný postup, při němž budou odstraněna místa neozářená. V tomto případě je nutno změnit typ rezistu (chemické složení).

Na obrázku je ukázán postup a využití litografie při vytváření dotované vrstvy v polovodiči pomocí implementace (vstřelování urychlených atomů) arsenu.



Jiné metody studia povrchů látek

Pro orientaci jsou na této stránce uvedeny stručné principy jiných metod, které lze použít ke studiu povrchového stavu látek a které představují jistou alternativu k mikroskopii skenující sondou.

Autoemisní elektronový mikroskop (FEM)

Jak bylo uvedeno ve stati o tunelovací mikroskopii, je nutnou podmínkou tunelování vytvoření dostatečně tenké energetické bariéry, která je v STM vytvořena mezi dvěma kovy. Jinou možností vytvoření bariéry je použití silného elektrického pole (záporný pól napájení je připojen ke vzorku), které zdeformuje původně konstantní hodnotu energie v oblasti mimo potenciálovou jámu. Vytvoří se tím přibližně trojúhelníková bariéra, skrze kterou může probíhat tunelování. K vytvoření bariéry je nutno velmi silného pole, řádově 10^{-9} V/m, což je obtížné dosáhnout s rovinným vzorkem. Proto jsou v autoemisní mikroskopii použitelné pouze silně zaostřené vzorky (hroty). Mikroskop pracuje jako projektor bodového hrotu na fluorescenční stínítko, přičemž nevyžaduje žádnou elektronovou optiku a dosahuje vysokého zvětšení, určeného poměrem vzdálenosti stínítka od hrotu a poloměru hrotu. Obraz lze zaznamenat fotograficky.

Na obrázku jsou vyznačeny průběhy bariér pro neutrální či nabitý vzorek. Oranžová oblast znázorňuje energetické stavy v kovu, modrá potenciálovou bariéru atomu v blízkosti vzorku (pro FIM).

Obraz je tvořen rozložením intenzity, která je úměrná počtu dopadajících elektronů. Tento počet závisí na pravděpodobnosti tunelování skrz bariéru a tedy na velikosti výstupní práce v daném místě hrotu. Protože hrot je velmi malý a „kulatý“, je tvořen uskupením mnoha krystalových ploch (s různou orientací), které mohou mít obecně různou výstupní práci. Výsledné tmavé a světlé skvrny tedy odpovídají jednotlivým krystalovým rovinám.

Velkou nevýhodou této metody je nutnost použití zaostřených vzorků a potřeba vysokého vakua (zobrazuje pomocí elektronů na makroskopickou vzdálenost). Naopak vlastní mikroskop je konstrukčně velmi nenáročný, je tvořen pouze baňkou, držákem vzorku, jeho žhavením a stínítkem.

Přes velmi vysoké zvětšení (přibližně milionkrát), nemá metoda vysoké rozlišení, protože získaný obraz je rozmazán tepelným pohybem elektronů, které mají velkou rychlost i ve směru rovnoběžném s povrchem (je to dáno jejich energií, protože z kovu vystupují z Fermiho hladiny, která je poměrně vysoko).

Autoemisní iontová mikroskopie (FIM)

Poslední použitelnou metodou k vytvoření bariéry je přiblížení jiné potenciálové jámy na velmi malou vzdálenost (nanometry). Toto lze realizovat přiblížením izolovaného atomu s vhodnými energetickými hladinami (aby mohly elektrony tunelovat bez dodání vnější energie) a připojením vzorku na kladný

pól napájení (rozdíl oproti STM – v STM je blízká bariéra tvořena dalším kovem, ne pouze atomem z okolního plynu). Elektron v tomto případě tuneluje z atomu plynu do kovu a zanechává tedy kladný iont, odpuzovaný od vzorku. Kladné napětí je nutné, aby elektron na dně bariéry v atomu mohl tunelovat na **neobsazené** stavy v kovu.

Experimentální uspořádání může být obdobné jako u FEM, přičemž se nejčastěji jako zobrazovací plyn používá helium při tlaku 10^{-3} Pa. Toto uspořádání však dává velmi slabý a nežřetelný obraz. Proto se baňka doplňuje kanálovým zesilovačem (je tvořen destičkou s mikrokapilárami, které po dopadu iontů emitují několik sekundárních elektronů, tyto pak působí obdobně a v kapiláře se vytvoří celá kaskáda, dodávající patřičné zesílení) a vlastní obraz se vytváří elektrony. Vzorek je navíc obklopen tepelným štítem, který je chlazen kapalným dusíkem, jednak aby se zamezilo ohřátí vzorku, jednak se při dopadu atomu na chladný štít sníží jeho energie a tím se sníží i rozmazání výsledného obrazu.

Výsledný obraz podává informaci o poloze jednotlivých atomů a hran atomových vrstev, ovšem jednotlivé atomy jsou viditelné pouze na atomárně hladkých krystalových plochách, na nichž jsou meziatomové vzdálenosti větší než rozlišovací schopnost mikroskopu. Dále se ukazuje, že nejžřetelněji jsou vidět ty oblasti, na kterých jsou vlivem silného elektrického pole adsorbovány atomy zobrazovacího plynu, protože tyto způsobí rezonanční zesílení pravděpodobnosti tunelování mezi vzorkem a „dopadajícím“ atomem.

Difrakce pomalých elektronů (LEED)

Metody difrakce elektronů jsou založeny na vlnových vlastnostech částic, tedy na tom, že částici s hmotností m a rychlostí v přísluší také vlnová délka $\frac{h}{mv}$, kde h je Planckova konstanta (přibližně 10^{-34} Js). Bude-li tato vlnová délka srovnatelná se vzdálenostmi mezi atomy na povrchu látky, bude po dopadu elektronového svazku na povrch vznikat difrakční obrazec (úhlové rozložení počtu elektronů rozptýlených do daného směru), který v sobě ponese informaci o struktuře povrchu, ovšem **středované** přes ozářenou plochu. Difrakce elektronů je v podstatě proces pružného rozptylu (elektrony neztrácejí svou energii), který ovšem nerozptyluje do všech směrů stejně (izotropně), ale některé směry zvýhodňuje. Které směry budou zvýhodněny závisí na struktuře povrchu, což podává informaci o povrchu. Nevýhodou této metody je ovšem zakódování informace, protože metoda zprostředkuje zobrazení tzv. reciprokého prostoru.

Difrakce pomalých elektronů používá elektronů relativně nízkých energií, které dopadají na povrch vzorku. Sběr informace může být provozován v několika modifikacích (registrace celého difrakčního obrazce, měření úhlových závislostí pohybem detektoru, nakláněním vzorku nebo změnou energie (vlnové délky) elektronů). Měření musí být prováděno ve vakuu a difraktometr musí být vybaven elektronovou tryskou, goniometrem a detektorem elektronů. Z výsledku mohou být získány informace o symetrii (průměrné) elementární buňky a její struktuře, ale projeví se také jednotlivé poruchy pravidelnosti, jejich rozpoznání ovšem vyžaduje vysokou přesnost měření.

Difrakce rychlých elektronů na odraz (RHEED)

Tato metoda je z experimentálního hlediska jednou z nejjednodušších metod. Postačuje pouze zdroj úzkého svazku elektronů (energie 10 až 100 keV), vzorek a stínítka; je zapotřebí vakua alespoň 10^{-3} Pa. Svazek musí na vzorek dopadat téměř tečně (podél jeho povrchu), zde dochází k difrakci (na té se vzhledem k malému úhlu dopadu uplatní pouze vrstva těsně pod povrchem) a difrakční obraz se snímá ze stínítka. Metoda je vhodná především ke studiu atomárně rovných povrchů a k monitorování růstu tenkých vrstev. Výhodou metody je téměř rovinný řez reciprokou mřížkou.



Elektronová mikroskopie (EM)

Elektronová mikroskopie je opět metoda založená na vlnových vlastnostech elektronů a je analogií klasické optické mikroskopie. Místo zdroje světla zde je elektronová tryska, optické čočky jsou nahrazeny zpravidla elektromagnetickými čočkami (cívkami). Narozdíl od optického však elektronový mikroskop musí pracovat ve vakuu – řádově 10^{-5} Pa (neuvažujeme-li tzv. „environmentální“ skenovací elektronové mikroskopy, které pracují s volitelným vakuem). Podle typu elektronového mikroskopu můžeme výsledný

zvětšený obraz pozorovat okem (transmisní mikroskopy používají fluorescenční stínítko), případně ve většině případů se používá záznam na film či fotografickou desku nebo se snímá CCD kamerou. Posledně jmenovaný záznam umožňuje digitalizaci obrazu, jeho následnou úpravu a elegantní archivaci v počítači nebo na jiných záznamových médiích.

Z vlnové povahy svazku elektronů (podle Luie de Broglieho) vyplývá schopnost elektronových mikroskopů rozlišit detaily řádově v desetínách nm (TEM) až jednotkách nm (SEM). Hodnota teoretické rozlišovací meze při použití elektronového paprsku je 10^{-11} m, což je přibližně o 4 řády lepší rozlišení než u světelného mikroskopu.

Jistou nevýhodou elektronmikroskopických metod (pokud nepoužíváme elektronové mikroskopy s volitelným vakuem) je nutnost speciální přípravy vzorku. U nevodivých pevných materiálů a tvrdých biologických vzorků (kosti, vlasy, kutikula hmyzu apod.) stačí jejich pokovení. Pro materiály, jako jsou např. měkké rostlinné a živočišné tkáně, je nutná poměrně komplikovaná příprava obnášející fixaci (zpevnění), odvodnění (vzorek se zbavuje volné vody), vysušení a konečné naprášení vodivé vrstvy. Výsledkem musí být preparát odolný proti elektronům bombardujícím povrch.

Elektronová mikroskopie je provozována v mnoha režimech, z nichž nejvýznamnější jsou:

1. transmisní elektronová mikroskopie (TEM), kdy se „prozařuje“ celý vzorek najednou a detekují se elektrony na fluorescenčním stínítku po průchodu vzorkem. Je zřejmé, že vzorek musí být dostatečně tenký (ultratenké řezy asi 50 nm), aby elektrony nebyly vzorkem zcela pohlceny. Při vysokých urychlovacích napětích (několik set kV) se rozlišení této varianty při splnění dalších podmínek blíží rozlišení jednotlivých atomů (HRTEM – TEM s vysokým rozlišením);
2. skenovací (rovněž známá pod názvem rastrovací) elektronová mikroskopie (REM). Metoda se používá nejčastěji pro zobrazení „tlustých“ vzorků. Primární elektronový paprsek skenuje povrch vzorku řádek po řádku synchronně s elektronovým paprskem v pozorovací obrazovce. Podle režimu zobrazení se tak bod po bodu vytváří celkový obraz. Z každého bodu jsou primárním svazkem vybuzeny signály, které přináší užitečné informace o topografii (sekundární elektrony¹), materiálovém složení (zpětně odražené elektrony²) případně chemickém složení (charakteristické rtg. záření³) analyzovaného vzorku;
3. STEM je metodou kombinující oba předchozí režimy (transmisní i rastrovací);
4. rastrovací elektronové mikroskopy s volitelným vakuem (environmentální) jsou určeny pro biologické aplikace, kdy je možné pozorovat biologické vzorky *in vivo*, tedy v původním stavu. Vakuový systém tohoto elektronového mikroskopu umožňuje ponechat v preparátové komoře přirozené prostředí biologických vzorků (dostatečnou relativní vlhkost) při tlacích nad 660 Pa (tlak trojného bodu vody).

¹Sekundární elektrony jsou elektrony uvolněné po dopadu primárního svazku, avšak mají mnohem menší energii (asi 50 eV). Mohou být uvolněny některými nepřímými procesy. Sekundární elektrony jsou uvolňovány z tenké povrchové vrstvy a přináší perfektní informaci o povrchové topografii (prostorový obraz s velkou hloubkou ostrosti).

²Zpětně odražené elektrony mají energii srovnatelnou s energií primárního elektronového svazku. Vystupují z větší hloubky (řádově desítky mikrometrů) a přináší tedy informaci o lokálních změnách materiálu. Hovoříme o materiálovém kontrastu.

³Charakteristické rentgenové záření je buzeno vysokoenergetickými elektronovými svazky a nese informaci o chemickém složení. Detekci rtg. záření buď s rozkladem podle energie (polovodičové detektory) nebo vlnové délky (krystalové detektory) je možná kvalitativní i kvantitativní mikroanalýza vzorku (objem řádově desítky až stovky krychlových mikrometrů)

Literatura v češtině

1. Kubínek, R; Vůjtek, M.; Mašláň, M.: **Mikroskopie skenující sondou**, *VUP 2003*
2. Král, J.; Frank, L.: **Metody analýzy povrchů, iontové, sondové a speciální metody**, *Academia 2002*
3. Eckertová, L.; Frank, L.: **Metody analýzy povrchů, elektronová mikroskopie a difrakce**, *Academia 1996*
4. **Vesmír 11/1990, 10/1994, 3/1995, 7/1998, 11/2000, 5/2002**
5. **Elektronika 6/1991**
6. **Československý časopis pro fyziku 3/1986, 1/1990, 2/1994, 3–4/1998, 1/2001, 1/2002, 2/2003, 2/2006, 5/2006**
7. **Jemná mechanika a optika 3/2000, 4/2001, 11–12/2002, 6/2004, 9/2004, 3/2007**
8. **Matematika – Fyzika – Informatika 10(9)/2000/2001**