

Mikroskopie atomárních sil (AFM)

Praktická měření

Obsah

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Mikroskopie v blízkém poli | 2 |
| 1.1 | Skenovací tunelová mikroskopie (STM) | 2 |
| 2 | Mikroskopie atomárních sil (AFM) | 3 |
| 2.1 | Princip metody | 3 |
| 2.2 | Technická realizace | 4 |
| 2.2.1 | Nosník | 5 |
| 2.2.2 | Detektor ohnutí | 6 |
| 2.2.3 | Vibrace | 6 |
| 2.2.4 | Elektronika | 7 |
| 2.2.5 | Parametry mikroskopu | 7 |
| 3 | Způsob měření | 8 |
| 3.1 | Požadavky na vzorek, upevnění | 8 |
| 3.2 | Kontaktní mód | 9 |
| 3.3 | Bezkontaktní mód | 10 |
| 4 | Zpracování měření | 11 |
| 4.1 | Prokládání | 11 |
| 4.2 | Odstranění pozadí | 12 |
| 4.3 | Úpravy histogramu | 12 |
| 4.4 | Fourierova transformace | 12 |
| 4.5 | Nelineární filtry | 12 |
| 4.6 | Přímá úprava dat | 13 |
| 4.7 | Volba palety | 13 |
| 5 | Příklady | 13 |



1 Mikroskopie v blízkém poli

V klasické mikroskopii (v dalekém poli) se vzorek pozoruje vždy ze vzdálenosti velké v porovnání s vlnovou délkou světla či elektronů, a je zpravidla pozorován „najednou“, v jednom časovém okamžiku. Tato metoda však má své nevýhody, spočívající především v nízkém rozlišení. Volným prostorem se totiž nešíří vlny s prostorovou frekvencí větší než odpovídá vlnové délce použitého záření λ na vzdálenost větší než λ , dále se uplatňují difrakční jevy na použitých optických prvcích. V dalekém poli tedy nelze získat obraz detailů menších než je λ . Takto určená rozlišovací mez se dá obejít pouze přiblížením detektoru či zdroje záření velmi blízko povrchu vzorku, na vzdálenost menší než λ — v blízkém poli pak bude rozlišení určováno nikoliv vlastnostmi záření, ale poloměrem sondy či detektoru (mírné zvýšení rozlišení – asi $2\times$ – se dá docílit také zobrazováním v prostředí s vyšším indexem lomu). Teoreticky byl tento způsob navržen už roku 1928, ale první experimentální realizace proběhla v 70. letech v mikrovlnné oblasti. Princip je velice jednoduchý: těsným přiblížením vlnovodu, který je na konci zaostřen tak, aby z něj vycházející světlo mělo velmi malý průřez, se docílí jen malého rozšíření vycházejícího svazku před průchodem vzorkem a po průchodu se světelný svazek sice dále rozšiřuje, ale nese informaci pouze o malé části vzorku, kterou svazek prošel. Důležitým rozdílem oproti mikroskopii klasické je „rastrovaný“ charakter obrazu, protože sondou musíme pohybovat v přesně definované síti měřicích bodů a nikdy nezískáme obraz najednou – pro sestavení obrazu je zapotřebí paměťového zařízení.

Druhou metodou, snažící se obejít klasický rozlišovací limit, je využití principu profilometru – tedy snímání povrchu pomocí tažení ostrého hrotu a detekce jeho interakce s povrchem (např. ohnutí nosníku, na kterém je hrot upevněn). Touto cestou se v 70. letech vydal Young, který sestrojil *Topografiner* umožňující trojrozměrné zobrazení povrchu s rozlišením přibližně 100 nm (přístroj byl založen na emisi elektronů). K vyšším rozlišením se nebylo možno dostat vzhledem k mechanické nestabilitě zařízení.

1.1 Skenovací tunelová mikroskopie (STM)

První praktická realizace skenovacích metod s nanometrovým rozlišením se povedla až Binnigovi s Rohrerem (IBM) v roce 1981. Ti však využili jiného fyzikálního principu, totiž tunelování elektronů potenciálovou bariérou. Je známo, že elektrony v kvantovém přiblížení mohou projít i oblastí energií, do které se z hlediska klasické teorie nemohou dostat. Pravděpodobnost průchodu takovou oblastí je však velmi malá a je dána přibližným vztahem

$$P \sim e^{-\frac{2}{\hbar} \int_0^d \sqrt{2m(V(x)-E)} dx},$$

kde $V(x)$ je průběh potenciálové bariéry, E energie elektronu, $2\pi\hbar$ Planckova konstanta, m hmotnost elektronu a d šířka bariéry. Uvažujme nyní uspořádání, při němž je do blízkosti vodivého vzorku přiveden velmi ostrý vodivý hrot a mezi ně je přivedeno napětí. Ve volném prostoru mezi kovy se vytvoří energetická bariéra, kterou však mohou elektrony tunelovat s výše uvedenou pravděpodobností. Protože průběh bariéry je (vlivem přiloženého napětí) nesymetrický, bude počet tunelujících elektronů v jednom směru převažovat a obvodem poteče proud, jehož závislost na vzdálenosti hrotu od vzorku d bude přibližně exponenciální, a tedy velmi strmá. Tato závislost dovoluje mapovat výšku povrchu s rozlišením setin nanometrů, protože velikost tunelujícího proudu se i při takto malých změnách d řádově mění.

Uvedený princip však dovoluje získávání informací pouze o jednom bodě, nikoliv vytvoření celkového obrazu. K tomu je nutno sestavit pohybové zařízení, které však bude natolik přesné, aby dokázalo zhodnotit subatomární přesnost vertikálního rozlišení. Ukázalo se, že takovýto pohyb je možno realizovat pomocí piezoelektrických látek, které dosahují přesnosti pohybu srovnatelné s výše uvedeným rozlišením. Vhodnou konstrukcí (vakuum, magnetické tlumení vibrací) se podařilo rovněž zajistit mechanickou stabilitu celého mikroskopu a tím odstranit technologický problém *Topografineru*. V následném vývoji se ukázalo, že použitý princip může být natolik robustní, že nevyžaduje vakuum ani magnetické tlumení, vystačí pouze s mechanickým (pružiny, pneumatické stoly).

Uvedený princip piezoelektrického skenování se později stal základem celé řady metod pracujících v blízkém poli. Jejich principy jsou různé, ale vždy využívají fyzikálního jevu, který silně závisí na vzdálenosti povrch–detektor. Jako detektor vždy slouží relativně malý prvek (aby bylo dosaženo laterálního rozlišení), jehož některý parametr (popř. parametr soustavy vzorek–detektor) se uvedeným jevem mění.

Příkladem metod může být skenovací kapacitní mikroskopie, tepelná mikroskopie, mikroskopie šumového napětí, fotonová tunelovací mikroskopie (přesná kopie STM, jen místo elektronů „tunelují“ fotony) a také mikroskopie atomárních sil.

2 Mikroskopie atomárních sil (AFM)

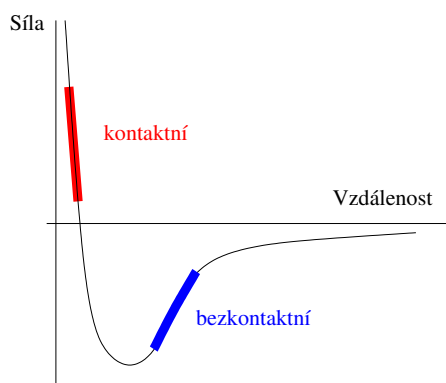
Již při měření povrchů metodou STM se ukazovalo, že zde působí parazitní síla mezi hrotem a měřeným povrchem (vyjma elektrostatické), která způsobuje přitahování či odpuzování hrotu a tím mění skutečnou vzdálenost hrotu od vzorku (měří se totiž vzdálenost, která odpovídá napětí na piezokeramice v příslušném směru). Tato parazitní vlastnost se v roce 1986 dočkala svého uplatnění jakožto hlavního měřicího principu.

2.1 Princip metody

Mezi sondou (hrotem) a vzorkem vždy působí nějaké síly, při malých vzdálenostech především van der Waalsovy, Pauliho odpudivé a čistě elektrické (je-li přivedeno napětí nebo působí-li náboje). Tyto síly způsobují přitahování nebo odpuzování hrotu, které je relativně snadno měřitelné. Prostorová závislost těchto sil pak umožňuje mapování topografie vzorku. Výhodou metody je možnost měřit i nevodivé vzorky, protože není třeba průchodu proudu.

Průběh typických působících sil je vidět na obrázku. Při velkých vzdálenostech se uplatňují přitažlivé van der Waalsovy síly, které přibližováním postupně rostou a v určitém bodě začíná převládat odpudivá Pauliho síla, pramenící z Pauliho vylučovacího principu – hrot je v kontaktu se vzorkem a je od něho odtlačován. Zvolíme-li pracovní režim mikroskopu v oblasti strmé části křivky, můžeme dosáhnout vysoké citlivosti na výškové rozdíly povrchu. Z obrázku je vidět, že tyto části jsou dvě a z toho plyne rozdělení AFM technik na dva módy:

- kontaktní, při němž se pracuje v odpudivé části interakce a sonda je smýkána po povrchu vzorku. Tento režim je starší a dosahuje rutinně vyššího rozlišení (protože je blíže povrchu), ale je vhodný pouze pro tvrdé vzorky, protože měkké (např. biologické) se mohou smýkáním hrotu poškodit. Tření, působící mezi taženým hrotem a vzorkem, může navíc způsobit parazitní silové signály.
- bezkontaktní, při němž se pracuje v režimu přitažlivých sil dále od vzorku. Tímto se sice mírně sníží rozlišení, ale také poškození vzorku. Z důvodu lepšího poměru k šumu se tento režim zpravidla realizuje jako střídavé měření, při němž je nosník rozkmitáván s danou amplitudou poblíž své rezonanční frekvence a měří se změna amplitudy.



2.2 Technická realizace

Mikroskop atomárních sil bývá velmi malým, kompaktním zařízením, které nevyžaduje speciální prostředí. Skenování bývá realizováno piezokeramickými válečky, sestavenými ponejvíce ve dvou variantách:

- trojnožka (angl. tripod) – tři válečky jsou položeny ve vzájemně kolmých směrech a každý vykonává nezávislý pohyb v jednom směru. Válečky bývají z jedné strany upevněny k mikroskopu a na druhé straně jsou spolu spojeny – zde je místo pro umístění sondy. Spojení válečků se samozřejmě projeví jejich ovlivňováním, takže pohyby nejsou zcela vzájemně nezávislé a ortogonální. Z toho důvodu se používá uspořádání, v němž jsou do kříže spojeny dva válečky pohybující sondou ve směru podél povrchu vzorku (tyto se vzájemně ovlivňují – křížový efekt), a v místě křížení je kolmo k nim upevněn váleček pro pohyb kolmo ke vzorku, na jehož druhém konci je upevněna sonda. Tímto uspořádáním se využije vyššího rozlišení v kolmé ose (v bočním směru je rozlišení o řád horší). V mnoha případech je piezokeramika v kolmém směru (vertikální, osa z) doplněna nezávislým senzorem roztažení válečku, často piezorezistivním (upevní se pásek z piezorez. materiálu a měří se změna jeho odporu při natahování piezokeramiky) nebo laserovým, méně často kapacitně.
- trubička (angl. tube) – všechny tři pohyby obstarává jedna dutá trubička z piezokeramiky. Pro zajištění pohybu je trubička na vnitřní ploše opatřena souvislou vodivou vrstvou a z vnější strany čtyřmi stejnými, symetricky umístěnými, elektrodami. Vnitřní elektroda bývá na nulovém potenciálu, napětí na vnějších elektrodách se liší podle žádaného pohybu. Pokud chceme pohyb podél osy trubičky, přivede se na všechny segmenty stejné napětí. Chceme-li pohyb v kolmém směru, přivedeme různá napětí na páry protilehlých segmentů a trubička se ohne, přičemž opíše část kruhové oblouku a změní se i její výška. Pro korekci kruhovitěho pohybu musíme přivést další napětí na všechny čtyři segmenty. Tento skener dosahuje menších skenovacích rozsahů, protože trubička se moc ohýbat nemůže.

Skenery umožňují skenování řádově do $100\ \mu\text{m}$ u největších, dolní mez bývá pak v nanometrech. U mnoha systémů bývá skenovací rozsah pokryt více než jedním skenerem, tyto se pak musí vyměňovat (mohou být i různých typů). Vhodná velikost skeneru se musí zvolit před skenováním, protože je obtížné se vrátit přesně na původní místo. Při výměně skeneru je nutno dávat pozor na ovládací prvky, protože různé skenery používají různá napětí (možnost zničení) a mechanické upevnění.

Existují dva režimy skenování, buď skenuje hrot nebo vzorek. Oba režimy mají své výhody i nevýhody (je nutno uvažovat např. váhu vzorku, přenos vibrací apod.). Nezávisle na skeneru musí být umožněn hrubý vzájemný posuv hrotu a vzorku, který slouží ke vkládání vzorku a výběru makrooblasti měření. Tento pohyb bývá realizován pomocí mikrometrických šroubů, ovládaných buď ručně nebo motorkem.

Rastr Skenování se zpravidla provádí v pevně zvoleném rastru, který je dán výrobcem mikroskopu. Tvarem se jedná o čtvercový rastr, jehož jednotlivé body leží na čtvercové síti. Skenování má rychlý a pomalý směr, které jsou vzájemně kolmé. Sonda se pohybuje po řádku v rychlém směru, na konci řádku se obrátí a bez měření se přesune do výchozího bodu, teprve pak se přesune o jeden řádek v pomalém směru. Při jednoduchém skenování se ve zpětném směru měření neprovádí, protože by se projevovала hystereze pohybu. Pokud se zvolí složitější režim, sbírají se data i při zpětném pohybu, ale z nich se sestavuje druhý obraz (REVERSE) a slouží k odhalování artefaktů způsobených měřicí metodou.

Obsluha může při měření volit počet bodů na řádek (tedy i počet řádků v obraze) a rychlost skenování s ohledem na charakter vzorku, stabilitu mikroskopu a dobu měření (standardně nastavený mikroskop pro 300 bodů na řádek sbírá data pro jeden obraz asi 4 minuty, pro 1000 bodů už 17 minut). Rovněž se dá libovolně měnit směr, ve kterém se provádí skenování, a velikost skenované oblasti.

Zkreslení Při měření se samozřejmě projevují různé nedostatky, chyby skenování se týkají především materiálu piezoelektrik. Mezi projevující se vady patří:

- hystereze – závislost napětí–prodloužení není při změně směru jednoznačná, ale objeví se hysterezní smyčka; projeví se rozdílností obrazů snímaných v obou směrech
- nelinearita – prodloužení není lineární funkcí přiloženého napětí, což se někdy předpokládá; tato nelinearita zkresluje výškové informace a deformuje ekvidistantní měřicí mříž

- tečení (creep) – po přiložení napěťového skoku se piezokeramika prodlouží okamžitě jen o určitou část, zbytek pomalu „dojde“; projeví se posuvem následných obrázků, byla-li provedena změna skenovacího rozsahu nebo jeho poloha
- stárnutí – mění se velikosti piezoelektrických koeficientů (např. poklesem polarizace); projevuje se škálovacím faktorem na absolutních hodnotách, relativní hodnoty nejsou ovlivněny, tvar není zkreslen

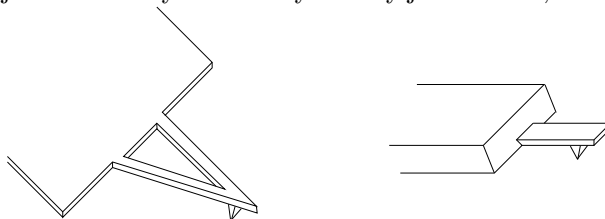
Všechna zkreslení je možno do jisté míry korigovat hardwarově, programově nebo způsobem měření. Jedná se např. o externí detekci prodloužení, programový přepočítání měřeného rastru do pravidelného rastru při znalosti korekční matice nebo pořízení několika obrázků až do ustálení výsledku.

Materiály Nejčastěji se používají keramické materiály (PZT), válečky se z nich vyrábějí lisováním a spékáním. Protože jednotlivá zrna jsou orientována náhodně, musí po výrobě následovat polarizace, při níž se za zvýšené teploty a v jednosměrném elektrickém poli orientují vektory polarizace jednotlivých zrn. Tato polarizace se postupně ztrácí, proto se nesmí keramika vystavovat vysokým teplotám (nad 100 °C), pólovat v opačném směru nebo nechávat velmi dlouho bez napětí (běžný provoz stačí k udržení polarizace). Při měření se musí dbát na mechanické vlastnosti skenovacího systému (např. rychlost skenování), rovněž není vhodné provádět měření v okrajových oblastech, při nichž jsou piezokeramiky dlouho ohnuty – možnost trvalé změny vlastností.

2.2.1 Nosník

Velmi důležitou částí mikroskopu je samozřejmě hrot, kterým se měření provádí. U STM se měřil pouze proud jím procházející, postačoval tedy „pouze“ zaostřený drát orientovaný kolmo ke vzorku. V AFM je nutno měřit změnu vzdálenosti a navíc umožnit její jednoduchou změnu (malou tuhost systému). Proto se měření provádí pomocí nosníku, který je orientován podél vzorku, má vhodnou tuhost a na jeho konci je upevněn vlastní hrot. Při měření snímá působící síly hrot, který mění svou polohu, tím se ohýbá nosník a teprve tento ohyb je mikroskopem vyhodnocován. Nosník tedy má na výsledné rozlišení pouze druhotný vliv, rozlišení je dáno ostrotí hrotu (první mikroskopy AFM měly hrot „integrováný“ s nosníkem, byl totiž tvořen zahnutým špičatým drátem, další byly tvořeny pouze skloněným plochým „kvádrem“ z křemíku, funkci hrotu u něj přejímal nejbližší roh, další konstrukce využíval tentýž kvádrík, ale na jeho konci byl přilepen ostrý diamantový odštěpek). V současnosti se hromadně nosníky vyrábějí s integrovanými hroty, zpravidla metodami známými z výroby integrovaných obvodů, které však dávají nižší rozlišení.

V současnosti jsou ustáleny dva tvary nosníku: plochý kvádr nebo spojení dvou plochých kvádrů vytvářejících písmeno V. Výběr nosníku se řídí režimem měření, pro kontaktní režim se používají „véčka“, pro bezkontaktní ploché kvádry. Nosníky se liší i svou mechanickou odolností, ploché kvádríky bývají mnohem křehčí. Nejběžnějšími materiály na nosníky a hroty jsou křemík, oxid křemíku a nitrid křemíku.



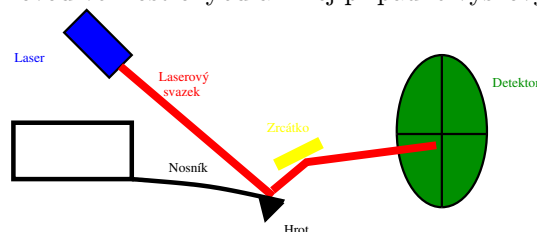
Výroba hrotu Výroba nosníku s hrotem může být například vyleptáním pyramidálního otvoru v monokrystalu křemíku a nanesením vhodné vrstvy (např. nitridu), čímž získáme hrot, který ale míří dovnitř. Proto musí následovat poněkud náročná procedura připevnění k jiné podložce a odleptání zbývajícího křemíku. Existují i jiné technologie, které pomocí kombinace anizotropního a izotropního leptání vytvářejí hroty orientované ven z podložky. Ostřejší hroty mohou být vytvářeny leptáním iontovým svazkem, někdy se vytváří tzv. superhrot, který vzniká rozkladem uhlíkatých látek působením elektronového paprsku na standardním hrotu. Nejnovější hroty jsou tvořeny nanotrubičkami z uhlíku či WS₂, které jsou upevněny na mírně upravený standardní hrot. Tyto hroty mají velmi dobré zobrazovací vlastnosti, ale jsou hodně křehké.

Parametry nosníku Mezi nejdůležitější parametry patří poloměr hrotu při jeho vrcholu, který ovlivňuje maximální rozlišení (zpravidla jednotky nm), jeho délka ($10\ \mu\text{m}$) a štíhlost (běžně 1:3, speciální hroty 1:10), která ovlivňuje schopnost zobrazovat ostré hrany a hluboké zářezy, boční tuhost, mechanická a chemická odolnost. K parametrům nosníku patří jeho délkové rozměry (délka $\sim 100\ \mu\text{m}$, tloušťka $0,5\ \mu\text{m}$), konstanta tuhosti a rezonanční frekvence, dále pak přizpůsobení metodě detekce ohnutí. V neposlední řadě se musí zvažovat způsob upevnění nosníku k mikroskopu.

2.2.2 Detektor ohnutí

První AFM používal k detekci ohnutí nosníku další mikroskop, konkrétně STM, který snímal velikost mezery mezi pevně umístěným STM hrotem a nosníkem. V dalších variantách se používala kapacitní detekce, nyní se používá přednostně detekce optická. Méně často se používá interferenční detektor, častěji detektor založený na odrazu svazku. U obou metod je zapotřebí zadní část nosníku opatřit reflexní vrstvou (pokovit), což však může přinášet problémy s různou tepelnou roztažností.

Princip detekce odrazem („laserová páka“) je následující: Na nosník dopadá svazek z laseru, který se odráží a dopadá na detektor. Detektor je rozdělen na dvě části a před měřením se posuvem nastaví tak, aby do obou částí dopadala stejně velká energie, takže rozdílový signál bude nulový. Dojde-li při měření k ohybu nosníku, změní se úhel dopadu svazku, svazek se odchýlí a naruší se rovnováha. Z rozdílového signálu jsme schopni určit úhlovou velikost ohybu a z něj případně výškový rozdíl.



Pro měření uvedených sil plně postačuje duální detektor, ale přístroje mívají k dispozici kvadrantní detektor. S tímto detektorem je možno měřit i zkrut nosníku, který může být způsoben například třecími silami při kontaktním měření. Projevují-li se účinky obou typů sil vzájemně ortogonálním pohybem, je možno jedním měřením získat obraz topografie i rozložení třecích sil (především materiálový kontrast, ale je zde i vliv topografie – projevují se změny sklonu).

V exotičtějších případech se používá piezorezistivní detekce, při níž je nosník vyroben z vhodného materiálu a jeho ohnutím se zároveň mění jeho odpor, který se posléze měří a slouží k sestavení obrazu.

2.2.3 Vibrace

Při měření je hrot udržován velmi blízko povrchu (nm), je proto velmi náchylný na náhodné změny relativní vzdálenosti, které mohou jednak ovlivnit měření, jednak poškodit vzorek či hrot. Z toho důvodu je nutno mikroskop vibračně izolovat. Izolace spočívá ve vhodné konstrukci mikroskopu (velká tuhost rámu, snížení efektivní délky rámu), umístění ve vhodném prostředí (přízemí, sklep) a na vhodném stolku (hmotné mramorové stoly, stoly s pneumatickým tlumením). Některé mikroskopy se doplňují pružinovým závěsem, na kterém je vlastní plošina mikroskopu, a magnetickým tlumením. Při přesných měřeních nelze zanedbat ani vibrace přenášené vzduchem či el. přívody. Ochranou před vzdušnými vibracemi je nasazovací kryt, vibrace přes přívody se snižují jejich upevněním či použitím lanek.

Podobně jako vibrace se negativně projevuje i tepelný drift. Jednotlivé části mikroskopu mají různou tepelnou roztažnost, což způsobí změnu vzdálenosti hrot–vzorek, zvláště závažná je teplotní změna v průběhu měření (např. vlivem proudění vzduchu). Vliv teploty je rovněž přes piezoelektrické koeficienty apod. Tepelný pohyb atomů se nepříznivě projevuje při atomárních měřeních, u nichž se tedy musí volit velmi vysoké rychlosti skenování, což má zase nepříznivý vliv na kvalitu zobrazení – nutno volit kompromis.

2.2.4 Elektronika

Mikroskop ke své činnosti vyžaduje počítač (řízení měření, zobrazování, zpracování a interpretace dat), napájení piezokeramiky, napájení laseru, obvody zpětné vazby a oscilační obvody. Všechny jednotky musí vykazovat nízkou úroveň šumu.

Počítač je nutný k nastavování parametrů celého měření a ke sběru dat. Tyto funkce jsou rozděleny do dvou částí, vlastního PC, ovládaného přímo uživatelem, a elektronické jednotky, která obsahuje desku se signálovým procesorem, napájecí zdroje apod. Činnost mikroskopu je řízena speciálním programem, který zároveň provádí i některé zpracování obrazu (image processing) v reálném čase, nutné pro správné nastavení parametrů.

Napájení piezokeramiky je realizováno „vysokonapěťovým“ stejnosměrným zdrojem napětí (stovky voltů), které musí být dostatečně stabilní a bezšumové, zdroj musí být odolný proti elektromagnetickému rušení vzdušnému i ze sítě.

Detekční laser (s relativně nebezpečným výkonem ~ 3 mW) musí samozřejmě odpovídat spektrální charakteristice detektoru, ale i odrazivosti nosníku. Důležité je, aby měl stálý výkon bez kolísání, který by zvyšoval šum v detekovaném signálu – zpravidla se musí nechat chvíli ustalovat. Vliv vlastního šumu laseru (a detektoru) lze jednoduše změřit nahrazením běžného nosníku speciálním (spíše zrcátkem), který je velmi pevný (každý nosník podléhá tepelným fluktuacím, které zvyšují úroveň šumu). Při přesném měření nelze zanedbat ani ohřev způsobený pohlcením laserového záření.

Zpětná vazba je nutná k realizaci převážné většiny měření. Jak již bylo uvedeno v kapitole o principu AFM, nosník se působícími silami ohýbá. Ohyb nosníku však dokáže pokrýt jen malý vertikální rozsah, navíc pro přesné měření působících sil (resp. topografie) by byla nutná znalost kalibrační křivky ohnutí–síla. Je proto výhodnější, použije-li se zpětná vazba, která posunuje pomocí piezokeramiky celý nosník tak, aby jeho ohyb zůstal konstantní. Topografický signál se pak určuje z napětí na piezokeramice. Naopak nevýhodou je pomalejší měření (je zapotřebí hýbat relativně velkou hmotou) a silná závislost výsledku na nastavení zpětné vazby. Vazba bývá v uspořádání PID, přičemž derivační člen se téměř nevyužívá (umožňuje sice rozšířit oblast stability, ale tíhne k řízení velkými signály, které jsou mimo platnost lineární aproximace standardně používané při analýze obvodů), nejvíce důležitým je integrální parametr, který ovlivňuje „volnost“ kopírování povrchu a náchylnost k vibracím.

2.2.5 Parametry mikroskopu

Mikroskop AFM Explorer firmy THERMOMICROSCOPES sestává (vyjma elektroniky) z měřicí hlavy a podstavce. Měřicí hlava obsahuje skenery, laser a detektor, všechny nastavovací prvky a tři šrouby (nožičky) pro nastavení hrubého přiblížení k povrchu vzorku, z toho jeden řízený motorkem. Podstavec slouží k uchycení vzorku na magnetický stolek, k hrubém pohybu vzorku ve vodorovné rovině a k mechanickému upevnění hlavy během měření.

Standardní hlava umožňuje AFM měření v suchém režimu v kontaktním, bezkontaktním a poklepovém (tapping) módu, rovněž také měření laterálních sil, bodové spektroskopie (měření křivek síla–vzdálenost) a měření s modulovanou silou.

Standardně jsou k dispozici dva skenery, trojnožka pro skenování $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ vodorovně a $10\ \mu\text{m}$ svisle, a tubou $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m} \times 0,8\ \mu\text{m}$. Maximální skenovací rychlosti jsou 5 řádků/s, nelinearita menší než 1%. Větší skener je vybaven piezorezistivním senzorem prodloužení v ose z . Obdobné parametry mají skenery určené pro zobrazování v kapalině, jen vertikální rozsah je trochu nižší. Skenery jsou od výrobce nakalibrovány, ale je nutno je asi jednou měsíčně ověřit a případně překalibrovat. Kalibrace se provádí pomocí přesných polovodičových mřížek.

Vzorek je možno pozorovat pomocí CCD kamery, sledující pod úhlem 45° zorné pole $1,5\ \text{mm} \times 1,5\ \text{mm}$ s rozlišením $10\ \mu\text{m}$. Osvětlení pole zajišťuje malá žárovka.

Požadavky na prostředí jsou minimální, optimální pracovní teplota $15\text{--}25\ ^\circ\text{C}$ se stabilitou $\pm 2^\circ\text{C}/\text{hod.}$, relativní vlhkost pod 60% a minimální vibrace.

3 Způsob měření

Před vlastním měřením je nutno správně „nastavit“ mikroskop a okolní prostředí. Mikroskop by již měl být delší dobu zapnutý, aby se tepelně ustálil, v místnosti by měla být stálá teplota, bez vzdušných proudů a s vyhovující vlhkostí (při tření hrotu o vzorek dochází k jeho nabíjení, vlhkost pomáhá náboj odvádět). Prostředí by mělo být bez zbytečných vibrací (někdy se projeví i posunutí židle) a vhodným osvětlením (rozdílová detekce polohy laserové stopy by sice měla být imunní vůči homogennímu okolnímu osvětlení, ale přesto se někdy může projevit). Je rovněž dobré v tomto kroku zkontrolovat stav tlaku v antivibračním stole a případně doplnit kompresorem.

Po zapnutí přístroje se spustí ovládací program, který umožní přivedení napájecích napětí, ovládnutí mikroskopu apod. Před vlastním spuštěním je nutno zapojit vhodný skener, správně jej upevnit, elektricky připojit a na magnetický držáček umístit vhodný typ nosníku a zarovnat jej. Poté se může program přepnout do režimu sběru dat, jemuž předchází výběr typu skener z nabídky v dialogu (při špatné volbě možnost zničení skeneru). Umožňuje-li to rozsah skeneru, je po přivedení napětí vidět „cukání“ základny nosníku na monitoru.

Dalším krokem nastavení laseru tak, aby svítil na špičku nosník (protože hrot je v malé vzdálenosti od konce nosníku, měl by laser směřovat kousek od konce). Nastavování se děje pomocí dvou šroubů, které stopou laseru pohybují v navzájem kolmých směrech (bohužel ani jeden směr není rovnoběžný s nosníkem). Šrouby jsou konstruovány tak, že jsou „povytažovací“ a při malém vytažení se přístupná část volně otáčí (aby se snížil přenos vibrací při měření) a teprve po zatlačení směrem ke středu mikroskopu se zasune do drážky a dojde k otáčení závitové části. Nastavování začíná přepnutím programového osciloskopu do režimu SUM. Zde se zobrazuje celkový proud procházející fotodetektozem, který musí překročit mezní hodnotu danou typem nosníku (pro kontaktní režim asi 18 nA, pro bezkontaktní 6 nA). Nastavování může být poněkud zdoluhavější a i když je proud nad mezí, nemusí být systém správně nastaven, protože světlo se nemusí odrážet zrovna od nosníku. Proto je nutná vizuální kontrola polohy laseru (zda svítí tam, kde má), případně při sníženém výkonu přisvětlovací žárovky. Pro ulehčení práce je vhodné nastavování provádět na neodrážející podložce s nosníkem nastaveným velmi nízko (snadná lokalizace polohy laseru podle odražené skvrny na podložce), nebo s využitím optického mikroskopu. Nedaří-li se získat silný signál ani když je laser vidět na nosníku ve správné poloze, bude možná nutno otočit se šroubem nastavení zrcátka.

Je-li laser správně nastaven a signál dostatečně silný, je nutno vyvážit fotodetektor. To se děje ve dvou krocích. Nejprve přepneme osciloskop do režimu L–R (rozdílový signál levý–pravý) a pomocí šroubu posuvu fotodetektoru jej dostavíme (téměř) na nulu. Je nutno ověřit, zda se jedná o správnou nulu, tedy že je v okolí možno získat signál obou polarit, protože nulová hodnota může také znamenat, že laser svítí mimo detektor. Po nastavení provedeme totéž v režimu T–B (rozdílový signál horní–dolní) včetně ověření nuly (tento šroub je mnohem citlivější než předchozí, proto je třeba nastavení provádět pečlivěji). Nyní zpětně projdeme všechny tři signály a kontrolujeme, zda se nastavováním nezhoršily (především celkový proud) a případně proceduru opakujeme.

3.1 Požadavky na vzorek, upevnění

Vzorek je nutno upevnit na magnetický držák, který je pod hlavou mikroskopu. Nedrží-li vzorek samostatně na magnetu, lepší se oboustrannou páskou k podložnímu plíšku. Je-li vzorek vodivý, je dobré jej uzemnit, aby se mohl odvádět třením vzniklý náboj. Vzorek by měl být umístěn tak, aby vyšetřovaná horní plocha byla umístěna „vodorovně“ (je-li vzorek plochý).

Vzorek by měl (pro pohodlné měření, některé podmínky lze obejít) vyhovovat následujícím požadavkům:

- velikost vzorku: výška musí odpovídat možností hlavy pro hrubý posuv ve vertikálním směru, nejvíce omezující je aktivní délka motoru (asi 12 mm); laterální rozměry jsou omezeny požadavkem, aby se jednak vzorek vešel mezi nožičky mikroskopu (i s případným hrubým pohybem pro makroskopický výběr oblasti), jednak aby nedrhl o okraj podstavce (při posunu se pak navíc otáčí); tloušťka vzorku je směrem dolů omezena požadavkem, aby se do obrazu nepromítaly nerovnosti lepicí pásky (nevyhovuje-li samotný vzorek, pokládá se třeba na sklíčko).

- tvar: vzhledem k technice měření je nutné, aby vzorek byl makroskopicky rovný nebo vypouklý, duté povrchy lze měřit jen ve speciálních případech; na povrchu vzorku by se neměly vyskytovat výškové rozdíly větší než pár μm (na ploše skenovací oblasti), nejnebezpečnější jsou odchylky směrem nahoru, které mohou způsobit poškození hrotu.
- fixace: vzorek (popř. jeho části) by měl být natolik upevněn a rigidní, aby se při skenování nepohyboval ve směru skenování ani směrem ke hrotu, zvláště závažný je tento požadavek pro práškovité materiály (nutnost lepení, lisování apod.) nebo měkké vzorky (biologické).
- odrazivost: příliš lesklé vzorky jednak snižují viditelnost a orientaci na monitoru, jednak mohou způsobit interferenční obrazce.

Před vlastním měřením je vhodné nastavit držák vzorku do střední polohy, aby zůstala možnost jeho pohybu na obě strany. Pokud chceme vyšetřovat pouze místně omezený jev na povrchu, je vhodné umístit jej doprostřed.

Nasazení hlavy Je-li vzorek správně upevněn, je možno umístit hlavu do měřicí polohy. Nejprve musíme zvednout všechny tři šrouby tak, aby nedošlo k náhodnému kontaktu nosníku se vzorkem (nezapomenout na žlábků v podstavci). Pak umístíme jednu z nožiček do prodlouženého žlábků a pomalu přiklápíme, aby do kruhového žlábků dosedla i druhá nožička, přičemž stále sledujeme, zda nedojde ke kontaktu se vzorkem. Posledním krokem je spuštění hlavy na přední nožičku, zde již kontrolujeme i obraz na monitoru (nutno nastavit vhodnou intenzitu osvětlení). Hrubě můžeme vzdálenost kontrolovat pohledem z boku, jemněji se orientujeme podle stínu vrženého nosníkem a základnou na vzorek (pozor na průhledné podložky, může se objevit i odraz od spodní strany, který je samozřejmě „dál“).

Po usazení hlavy vybereme místo ke skenování pomocí pohybu stolku se vzorkem, neustále sledujeme monitor, zda je hrot dostatečně vysoko (důležité zvláště pro nepravidelné vzorky). K orientaci na vzorku slouží buď monitor nebo malé zrcátko v přední části. Orientace dle monitoru je ovšem ztížená, protože rysy, které jsou na vzorku okem patrné, nemusí být v monitoru vůbec vidět (např. otisky prstů), popř. je velmi snížený kontrast.

Posledním krokem je nastavení správného sklonu hlavy. Vzhledem k upevnění nosníku a principu je nutné, aby se hlava svažovala směrem k motorickému šroubu. Při nastavování je nutno pamatovat rovněž na omezený rozsah pohybu motorem řízeného šroubu (vysunutí 3–12 mm), takže není obecně vhodné sklon přehánět nadměrným vyšroubováním nožiček. Nyní je vhodné pouze zkontrolovat, zda se náhodným dotykem při manipulaci s hlavou nezměnily parametry laseru.

3.2 Kontaktní mód

Předpokládejme, že hrot je nyní jen pár milimetrů od povrchu vzorku nad místem, které chceme měřit. Další postup už je záležitostí především softwarovou. Nejprve si musíme vybrat, o měření kterých signálů máme zájem. Program umožňuje najednou sběr čtyř signálů, na výběr je topografie, napětí z-piezokeramiky, laterální síly či vnitřní senzor (chybový signál) – některé signály však nelze měřit současně. U všech signálů si můžeme zvolit dopředný (FORWARD) nebo zpětný (REVERSE) sběr obrazu.

Máme-li vybrány měřené signály, provedeme nastavení parametrů: počet řádků v obraze, skenovací rychlost, velikost obrazu, PID parametry vazby (standardně $P = 0,3$, $I = 0,1$ a $D = 0$) a SETPOINT (hodnota proudu, kterou bude udržovat zpětná vazba, odpovídá síle vyvíjené nosníkem na povrch vzorku). Podle hodnoty posledního parametru budeme muset zrcátkem seřídít signál režimu T–B tak, aby po dosažení zpětné vazby byl signál přibližně ve středu detektoru (např. pro SetPoint 20 nA nastavíme signál přibližně na -40 nA, obecně nejméně 50 nA pod SetPointem). Na osciloskopu můžeme zkontrolovat střední hodnotu proudu (rms), která vypovídá o vibracích systému. Jsou-li vibrace příliš velké, bude nutno systém lépe izolovat.

V další fázi můžeme přistoupit k uvedení systému do zpětné vazby (osciloskop musí být v režimu T–B). Je-li hrot velmi vzdálen, můžeme jej přiblížit motorkem předního šroubu (vzdálenost kontrolujeme podle stínu). Konečné přiblížení provedeme automaticky pomocí tlačítka TIP APPROACH. Nosník se začne pomalu přibližovat, což kontrolujeme jednak na monitoru, jednak na průběhu osciloskopu (pole INTERNAL SENSOR – ze začátku jsou vidět jen malé vlnky vznikající vibracemi, poté začne křivka stoupat). Je-li

vidět, že se nosník příliš ohýbá (nosník se v těchto případech silně leskne), vzorek pohybuje apod., můžeme opětovným stiskem tlačítka přibližování přerušit, nosník vyzdvihnout a upravit vzorek nebo nastavení mikroskopu. Pokud se motorek zastaví, aniž by systém byl „ve vazbě“, jsou zřejmě zadní nožičky příliš vysoko a nestačí rozsah motorku, musí se nosník opět vyzvednout a nožičky snížit (aniž by se ztratil náklon hlavy).

Proběhlo-li přibližování správně, systém se dostane do zpětné vazby a udržuje hodnotu SETPOINT. Uvedení do vazby se na osciloskopu projeví prudkým náběhem. Již nyní můžeme otestovat PID parametry vazby: je-li vazba příliš silná, jsou na osciloskopu vidět oscilace a bude třeba snížit parametr I . Nejsou-li kmity vidět, musíme otestovat, zda není vazba „falešná“ (zvolíme-li nízkou hodnotu SetPoint, může systém dosáhnout této hodnoty, aniž by byl v kontaktu se vzorkem). Test se provede tlačítkem SYSTEM RESPONSE, systém se bude snažit vtlačit hrot mírně do vzorku a zaznamenává přitom ohyb nosníku. Je-li vše v pořádku, musí mít výsledná závislost (aproximovaná přímkou) kladnou směrnici a body by neměly být příliš rozptýleny.

Posledním přípravným krokem je přesné nastavení parametrů zpětné vazby. K tomu účelu nejprve osciloskop přepneme do režimu LINE a u všech signálů přepneme rozsah na AUTO (volba rozsahu dle velikosti signálu) a zvolíme volbu LEVEL (proložení přímkou a její odečtení). Na osciloskopu se nyní budou objevovat barevné průběhy odpovídající snímanému řádku (jen jednomu, jeho pořadové číslo v obraze je uvedeno vedle). Různé barvy odpovídají různým průběhům po témže řádku a v ideálním případě by se měly překrývat. Není-li tomu tak, musíme měnit parametry vazby (popřípadě velikost rychlosti) a snažit se průběhy ustálit. Při volbě parametrů lze postupovat tak, že se nastaví nejvyšší hodnota integrálního parametru, při které ještě nedochází k rozkmitání nosníku. Podaří-li se systém nastavit, vyčkáme několik vteřin a můžeme zapnout vlastní sběr dat. Je-li nutno zvednout hrot, musíme se opět přepnout do režimu SCOPE.

I při vlastním skenování je nutno „dohlížet“ na mikroskop, protože výškové změny povrchu vzorku mohou způsobit buď nadměrné ohnutí nosníku (nebo až zlomení) nebo naopak ztrátu kontaktu se vzorkem. Na obě situace je nejlépe zareagovat přerušením skenování. Skenování se vždy po sběru jednoho snímku ukončí, ale je možno zapnout kontinuální režim a skenovat ve smyčce. Tento způsob je vhodný na méně kvalitních površích, které se mohou jevit při prvním skenování rozmazaně a teprve při dalších se poměry dostatečně ustálí.

Během měření mohou zobrazovaná data podléhat zpracování s ohledem na škálování. K dispozici je prokládání lineárním nebo kvadratickým „pozadím“ buď plošným (obnovení obrazu pak probíhá vždy po několika řádcích) nebo řádkovým. Aby se optimálně využilo grafické palety, je rovněž možno měnit část obrazu, která se bude zobrazovat. Provádí se volbou procentuální šířky a polohy histogramu, která bude brána v úvahu.

Po měření je možno data uložit, ale pouze v původním stavu bez uplatnění zmíněného zpracování. Proto bude obrázek po otevření vypadat trochu jinak. Již během měření, ale častěji až po jeho skončení, je možno provést jednoduše změnu velikosti skenované oblasti a směru skenování. Poslední vlastnost je důležitá pro odhalování některých artefaktů, především interferencí a dynamických efektů.

3.3 Bezkontaktní mód

V bezkontaktním módu platí pro nastavování vzorku totéž co v kontaktním. Před začátkem měření je nutno zapnout kmitání nosníku a zvolit vhodnou měřicí frekvenci. K tomu slouží položka NONCONTACT v nabídce. V otevřeném dialogu je nutno zvolit ACTIVE (osciloskop musí být v režimu T-B), čímž se zapne vlastní kmitání, ale zároveň osciloskop přestane zobrazovat původní hodnoty (pokud je NONCONTACT aktivní nelze tedy seřizovat detektor a laser) a signál T-B odpovídá amplitudě kmitů. Nyní se nechá proměřit celé frekvenční spektrum nosníku (tlačítko FULL SPECTRUM) a postupným zmenšováním rozsahu (tlačítkem ZOOM IN se zapne režim výběru, pak se pravým tlačítkem klikne do grafu spektra a objeví se čárový kurzor; postupně přes levé tlačítko vybereme minimální a maximální frekvenci a stiskem pravého tlačítka se výběr potvrdí a vykreslí se spektrum s novým rozsahem) se vybere frekvence odpovídající rezonanci nosníku. Měřicí frekvence se nastaví okolo vrcholu křivky směrem k vyšším frekvencím a sleduje se velikost amplitudy kmitů na osciloskopu. Je-li příliš malá (pod 20 nA), musí se zvýšit řídicí amplituda nebo vstupní zisk. Stabilita nastavení se ověří opětovným stisknutím tlačítka SPECTRUM. Tuto kontrolu je dobré provádět po každém zvednutí hrotu, protože rezonanční frekvence je velmi citlivá na vlastnosti

hrotu (např. znečištění), pík se může posunout a amplituda prudce poklesne, čímž se znemožní měření (tato situace mnohdy nastane i v průběhu měření).

Narozdíl od kontaktního módu zde se nenastavuje absolutní hodnota SETPOINT, ale jen relativní, udávající poměr tlumené amplitudy ve zpětné vazbě k amplitudě volných kmitů. Standardní hodnotou je 50 %, která většinou postačuje, není-li při ní možno vůbec měřit nebo je-li obraz nevýrazný, je možno ji snížit (např. na 35 %), ale za cenu větší interakce se vzorkem.

Další postup je obdobný kontaktnímu režimu, nastaví se parametry měření, provede se ruční přiblížení hrotu a zvolí se TIP APPROACH. Po dosažení vazby (**nesmí** se použít SYSTEM RESPONSE) se spustí řádkové skenování, doladí se parametry vazby a začne se s vlastním měřením.

Poznámka: Bezkontaktní mód nemusí pracovat jen s detekcí amplitudy, ale může také registrovat změnu fázového posuvu mezi budícím signálem a kmitáním nosníku. Tento signál podává obecně jinou informaci než amplitudová detekce.

Pokleповý mód Protože v bezkontaktním módu je hrot dále od vzorku, dosahuje horšího rozlišení. Chceme-li tedy využít výhody snížených laterálních sil, ale zvýšit rozlišení, můžeme použít speciální oscilační metodu – tapping mód. V tomto případě sice hrot také vibruje, ale s takovou amplitudou, že se v každém kmitu na krátký čas dotkne povrchu vzorku. Budou-li frekvence kmitů a rychlost skenování takové, aby se hrot dotkl jednoho bodu několikrát, než se přesune do bodu sousedního, bude rozlišení srovnatelné s kontaktním režimem.

Experimentálně se pokleповý mód realizuje volbou měřicí frekvence na opačné straně píku než v bezkontaktním měření.

4 Zpracování měření

Po získání obrázku je nutno jej uložit pomocí funkce SAVE AS, je vhodné uložit všechny měřené kanály. V souboru budou uloženy jak vlastní data, tak některé nastavené parametry (nastavení zpětné vazby, hodnota SETPOINT, skenovací rozlišení, rychlost, velikost a rotace). Některé informace se ale neukládají, takže je třeba si je poznamenat, např. budicí frekvenci či polohu výřezu v původním okně.

Pro zpracování dat v jiných programech (např. Matlab) je možno data uložit ve formátu textových dat (hodnoty výšky oddělené tabulátory) pomocí funkce EXPORT. V dialogu je možno zvolit, zda chceme datům přiřadit i hlavičku s pomocnými údaji, nebo jen vlastní data.

Většinu dat je nutno nějakým způsobem upravit, aby se zvýraznily studované rysy vzorku. Jednoduché úpravy probíhají již při měření, ale tyto se standardně nepromítají do uložených dat. Důvody pro úpravu dat jsou dva – jednak data mohou být různým způsobem zkreslena či zašuměna, jednak je nutno data zobrazit, což vyžaduje ztrátovou transformaci dvourozměrné matice (téměř) reálných čísel na matici celých čísel v intervalu $\langle 0, 255 \rangle$. V této kapitole budou uvedeny některé vybrané metody.

4.1 Prokládání

Jen málokdy se podaří umístit plochý vzorek tak, aby byl rovnoběžný se skenovací rovinou. Důsledkem toho je superpozice lineárního signálu, kterým je sklon vyrovnáván, s vlastní topografií povrchu. Pokud je sklon výrazný, mohou se změny topografie v obraze úplně ztratit v důsledku již zmíněné transformace. Proto je vhodné pokusit se naměřenými daty proložit rovinu a tu pak odečíst, čímž získáme pouze topografický obraz. Vhodná rovina se zpravidla určuje metodou nejmenších čtverců a odečtení roviny realizuje funkce LEVELING s volbou 2D. V reálném případě nemusí být situace takto ideální, ale povrch vzorku může vykazovat i zakřivení (tento efekt je důležitý především zkoumáme-li vzorek, který musí být nanesen na podložku, která nemusí být rovná), které bychom rovněž rádi odstranili. Proto funkce umožňuje proložení a odečtení i zakřivené plochy, konkrétně až do třetího řádu.

Protože sbírání dat probíhá po řádcích, vzniká možnost vzájemného výškového posuvu mezi následujícími řádky, který může být způsoben nějakým druhem nestability. Proložíme-li takto poškozeným obrazem rovinu, „řádkový“ efekt se neodstraní. Mnohem výhodnější bývá provádět prokládání po jednotlivých řádcích, které uvedený efekt může někdy zmírnit (provedeme-li však proložení ve směru kolmém

ke skenovacímu, dostaneme obraz ještě horší). K tomu slouží funkce LEVELING s volbou HORIZONTAL nebo VERTICAL, přičemž opět můžeme prokládat i křivku vyššího řádu. V případě, že obraz sestává z relativně rovného pozadí, na kterém je pár vyšších objektů (např. částic), vzniknou aplikací uvedeného postupu artefakty – prohlubně – na řádcích, kde se objekt nachází. Chceme-li tomu zabránit, musíme před proložením zvolit v dialogu rozšířené volby, vybrat položku EXCLUDE AREA a v obrázku označit oblasti objektů. Tato místa budou při prokládání vynechána a prohlubně nevzniknou.

4.2 Odstranění pozadí

Předchozí operace odstraňovala zakřivení povrchu, které bylo „homogenní“ v celém obraze. Někdy ovšem potřebujeme odstranit pouze zakřivení lokální (např. vyšetřujeme strukturu povrchu velmi malých kuliček, kterých je ve snímku několik) a zachovat pouze rysy, které mají menší prostorový rozsah (jemnější struktura). K této operaci slouží funkce BACKGROUND, která vyžaduje zadat poloměr. Funkce se poté bude snažit v trojrozměrném znázornění povrchu vtlačit do každého bodu kuličku daného poloměru, kde se to podaří, povrch kuličky se z dat odečte.

4.3 Úpravy histogramu

Protože v paletě obrázku je k dispozici jen 256 barev, musí se provádět již zmíněná transformace. Tímto procesem se mohou potlačit rysy, které mají malou výšku vzhledem k maximální výšce v obraze. Chceme-li tuto situaci napravit, můžeme provést změny histogramu. Histogram udává relativní zastoupení počtu bodů odpovídajících jednotlivým (pseudo)barvám, zpravidla se vykresluje jako čárový graf. V tomto grafu můžeme vyznačit část, kterou chceme v obraze „ponechat“. Poté bude obraz znovu vykreslen tak, že všechny hodnoty mimo zvolený interval budou nulové nebo maximální dle toho, na které straně intervalu leží. Hodnoty z intervalu budou roztaženy tak, aby vyplnily všech 256 úrovní, čímž dojde ke zvýraznění drobných detailů. Průvodním jevem změny histogramu je vizuální rozšíření všech maxim a může dojít ke změně jejich tvaru (provede se řez rovinou zvolené výšky).

4.4 Fourierova transformace

V mnoha případech je výhodné neprovádět úpravu (či analýzu) obrazu v prostorové oblasti, ale v oblasti frekvenční. Filtrace frekvencí umožňuje snadnější odstranění šumu, pokud jsou frekvence zřetelně odlišitelné. Na druhou stranu umožňuje i snadnější vznik chyb při špatném použití. Typickou ukázkou je vznik „atomární“ struktury z měření, při kterém tak vysokého rozlišení nebylo dosaženo. K objevení atomů došlo neuváženou filtrací, protože frekvence odpovídající meziatomové vzdálenosti je ve spektru přítomna téměř vždy, ale pro oprávněnou filtraci musí být zároveň dominantní.

Program umožňuje provádět Fourierovu transformaci jednorozměrnou i dvourozměrnou, znázornění výsledků v logaritmické či mocninné stupnici a filtraci. Protože původní obraz je reálnou funkcí, je filtrace omezena jen na objekty (obdélník, elipsa), které jsou umístěny souměrně podle středu.

4.5 Nelineární filtry

Mnohdy je obraz zatížen drobným impulsním šumem, který se nepříjemně projevuje např. v 3D zobrazení. Ke snížení vlivu této vady lze výhodně použít **konvoluční** filtry. Ty zpracují obraz tak, že původní hodnotu v daném bodě nahradí novou, která bude dána **váženým** součtem všech hodnot ve čtvercovém okolí daného bodu¹, tj. $a'_{ij} = \sum_{k=-m}^{+m} \sum_{l=-m}^{+m} w_{kl} a_{i+k, j+l}$. Velikost okolí m ovlivňuje „sílu“ filtru a jde volit 3×3 , 5×5 a 7×7 . Konkrétní funkce filtru je dána maticí váhových koeficientů w_{kl} , platí-li $\sum_k \sum_l w_{kl} = 1$, pak výsledný filtr téměř nemění intenzitu obrazu.

Pro korekci zašuměných obrazů se používá Gaussův filtr, který využívá koeficienty ve tvaru Gaussovy funkce (hodnoty 8, 4, 2, 0 na kružnicích se středem ve středu matice, nejvyšší hodnota je uprostřed). Největší váha se tedy přikládá původní hodnotě, ale i příspěvek sousední hodnoty je velký a proto se „zahladí“ ostré přechody, typické pro impulsní šum. Druhým často používaným filtrem je filtr pro detekci hran (přechodů), který používá kladné i záporné hodnoty (s nulovým celkovým součtem) uspořádané tak,

¹Na okrajích obrazu je třeba algoritmus přizpůsobit.

aby v oblast bez výškových změn byla výsleňá hodnota nulová a na přechodu maximální (v případě okolí 3×3 mohou být sloupce matice např. $-1, -1, -1; 0, 0, 0; 1, 1, 1$). Zpravidla se vůbec nepoužívá původní hodnota v daném bodě obrazu.

Druhým typem nelineárních filtrů jsou **mediánové** filtry, které opět pracují ve čtvercovém okolí, ale novou hodnotu neurčují z váženého součtu hodnot, ale z pořadí těchto hodnot. Takže hodnoty v okolí se nejprve seřadí podle velikosti a pak se z nich vybere nová hodnota – dle typu filtru je to maximální, minimální nebo prostřední.

4.6 Přímá úprava dat

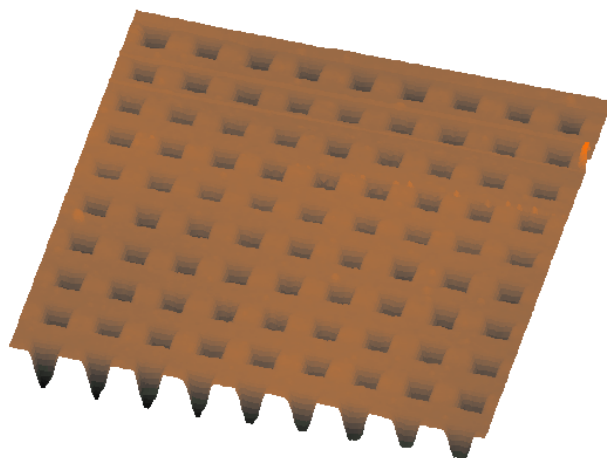
Někdy je vhodnější zasáhnout přímo do naměřených dat, pokud obsahují zřejmé vady. Mezi nejdůležitější vady patří ostré špičky (mohou vzniknout na nečistotách, impulsním šumem apod.), šmouhy ve směru skenování (hrot může zachytit slabě vázanou nečistotu, táhne ji po povrchu a tím vytváří světlou čáru, čára zpravidla končí na hranici skenovací oblasti nebo postupně slábne) a skoky v intenzitě obrazu – jedna část je světlejší než druhá, přičemž hrana přechodu je totožná s jedním řádkem (jev může vzniknout náhlou změnou vlastností hrotu, např. se kousek hrotu ulomí nebo vrchol hrotu změní tvar). Všechny tyto vady lze jednoduše softwarově odstranit pomocí nabídky DATA EDIT.

4.7 Volba palety

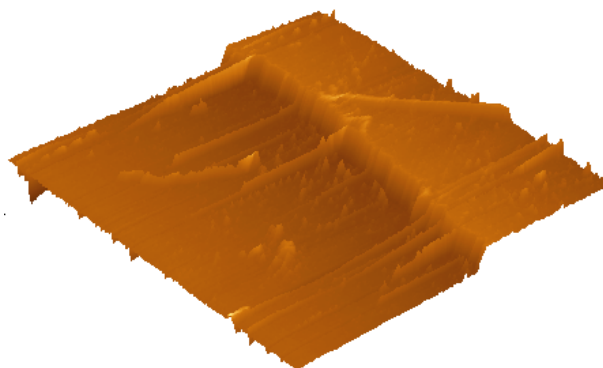
Subjektivně lze kvalitu výsledku ovlivnit vhodnou volbou palety, tedy způsobu barevného ztvárnění. K dispozici jsou palety šedé, barevné a konturové. Šedé palety jsou vhodné spíše pro přípravu k tisku, než pro obrazovku. Konturové palety zobrazují „vrstevnice“ v obraze a hodí se pro detekci malých změn, stanovování symetrie a tvaru objektů apod. Barevné palety jsou nejvhodnější pro práci s obrazovkou, dle typu umožňují zvýrazňování dolních, horních nebo středních výšek v obraze. Je možno rovněž stanovit si nulovou výšku a pro kladné a záporné hodnoty vzhledem k ní použít palet různých barev. Zvláště vhodné je použití dvou palet pro detekci tvarů v obraze. Vlivem způsobu získávání obrazů v AFM jsou totiž ostré přechody zobrazeny jako plynulé a při vizuálním pozorování značným způsobem zkreslují např. tvar částice. Zobrazíme-li však část obrázku do určité výšky šedou paletou a zbytek barevnou, jsou obrysy výrazně ohraničeny, aniž by došlo ke ztrátě kvality ve zbytku obrazu.

5 Příklady

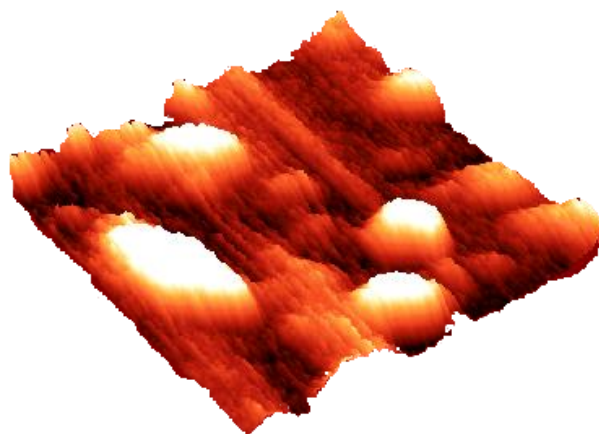
AFM mikroskop lze používat k testování struktur v oblasti mikrometrových rozměrů, např. při výrobě polovodičových obvodů. Nebo naopak tyto struktury lze použít k testování kvality mikroskopu. Za tímto účelem se vyrábějí speciální kalibrační mřížky. Ta na obrázku slouží pro testování malého skeneru a obsahuje síť vyleptaných pyramid s roztečí 200 nm.



Další ukázkou je hliníková vrstva napařená na skleněnou podložku. Zobrazen je kraj vrstvy (zbytek sklíčka byl během napařování zakryt) a je možno určit tloušťku vrstvy. Obrázek byl získán bezkontaktně.



Následující obrázek zobrazuje nanočástice oxidu železitého. Obrázek byl získán v bezkontaktním módu.



Jeden reprezentant atomárního rozlišení – obraz povrchové rekonstrukce křemíku (7×7), získáno v bezkontaktním režimu (zdroj www.spmtips.com).

