

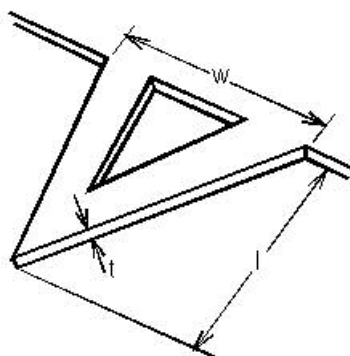
### 3. Raménko s hrotem (cantilever)

Raménka a jejich hroty jsou klíčovou komponentou AFM přístrojů, protože zprostředkovávají sílu mezi hrotem a povrchem vzorku a z jejich konstrukce vyplývá i příčná rozlišovací mez. Obr. 3-1 raménka s hrotem je pořízený v rastrovacím elektronovém mikroskopu.



Obr. 3-1. Snímek raménka s hrotem

Hrot a raménko jako celek může být vyroben z křemíku nebo nitridu křemíku s využitím fotolitografické techniky. Většina ramének s hrotem je připravena jako křemíková monovrstva. Nejběžnější jsou nosníky tvaru V, protože poskytují nízký mechanický odpor k vertikálnímu ohybu a vysoký odpor k příčnému zkroucení (torzi). Běžné nosníky jsou dlouhé od 100 do 200  $\mu\text{m}$ , široké jsou od 10 do 40  $\mu\text{m}$  a jejich tloušťka bývá od 0,3 do 2  $\mu\text{m}$ .



Obr.3-2. Hrot V s vyznačenou délkou ( $l$ ), šířkou ( $w$ ) a tloušťkou ( $t$ ).

- 3.1 Vlastnosti ramének
- 3.2 Jak vybírat raménka
- 3.3 Tvar hrotu a rozlišení
- 3.4 Literatura

#### 3.1 Vlastnosti ramének

AFM nevyžaduje jen ostrý hrot, ale také raménko s optimalizovanou tuhostí (pružností), která by měla být nižší než je vazebná síla mezi atomy v pevných látkách, (řádově  $10 \text{ Nm}^{-1}$ ). Tuhost raménka závisí na jeho tvaru, rozměrech a materiálu, ze kterého je vyrobeno. Kratší a tenčí raménka jsou tužší a mají také vyšší rezonanční frekvenci. Tuhost komerčně dostupných ramének se pohybuje od tisícín do desítek  $\text{Nm}^{-1}$  a pokrývají zvětšení přes čtyři řády. Rezananční frekvence ramének se mění od několika kHz do stovek kHz. Rezananční frekvence je rozhodující faktor pro rychlou odezvu raménka v nekontaktních AFM aplikacích.

### 3.2 Jak vybírat raménka ?

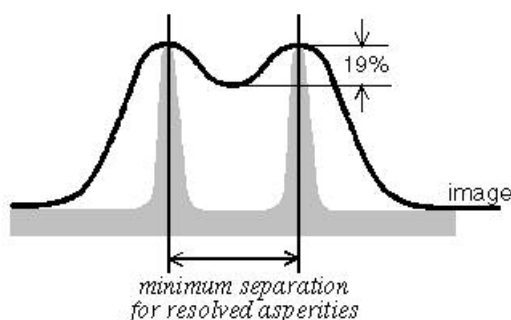
Požadované vlastnosti ramének vyplývají z dané aplikace. V kontaktním režimu jsou potřebná měkká a ohebná raménka z důvodu minimalizace poškození povrchu vzorku. V nekontaktním režimu se více používají tužší raménka s vyšší rezonanční frekvencí.

### 3.3 Tvar hrotu a rozlišovací schopnost

Příčné rozlišení AFM obrazu je určeno dvěma faktory: velikostí obrazu a křivostí špičky hrotu. Uvažujme nabírání obrazu s  $512 \times 512$  obrazovými body. Obrázek  $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$  by měl mít tedy rozlišení okolo 2 nm ( $1\mu\text{m} / 512$ ).

Ostřejší hroty mohou mít poloměr křivosti okolo 5 nm. Protože plocha interakce mezi hrotem a vzorkem je daná křivostí hrotu, tyto hroty obvykle poskytují příčné rozlišení 1 až 2 nm. Proto zvětšení AFM obrazů větší než  $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$  je obvykle dané velikostí skenované plochy a nezávisí na křivosti hrotu.

V mikroskopické společnosti se setkáváme s definicí, která vychází z rozlišení dvou bodů v podobě interferenčních maxim (píků), podle Rayleighova kritéria. V případě AFM mějme dvě blízké ostré vyvýšeniny. Oba detaily budou rozlišené pokud se v obraze projeví přibližně 20 % pokles mezi těmito vyvýšeninami, viz obr. 3-3,.



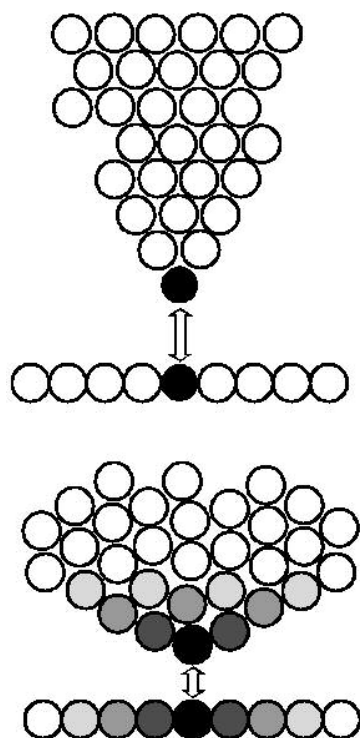
Obr. 3-3. Definice příčného rozlišení podle Rayleighova kritéria

Experimentálně bylo zjištěno, že komerční přístroje jsou schopny dosáhnout rozlišení mezi 1 až 2 nm.

Na první pohled se může zdát rozlišení 1 – 2 nm v rozporu s reklamními obrázky atomů v brožurách zaměřených na AFM techniky. Rozdíl mezi zobrazením povrchu s atomovým rozlišením a přesnou mřížkovou periodicitou a přesným atomovým rozlišením komentujeme dále.

STM dává věrné atomové rozlišení. Protože tunelový proud závisí exponenciálně na vzdálenosti mezi hrotem sondy a povrchem, interagují pouze nejbližší atomy kvalitních STM hrotů s nejtěsnějšími atomy povrchu vzorku, jak je patrné z obr. 3-4.

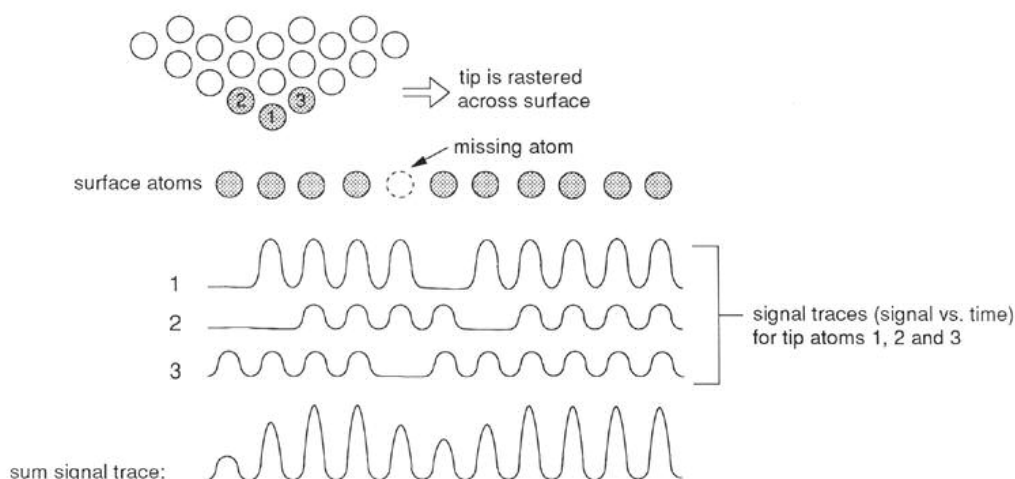
U metody AFM je situace poněkud jiná. Některé atomy na špičce hrotu interagují zároveň s více atomy na povrchu vzorku, viz. obr. 3-4 dole.



Obr. 3-4. Meziatomové interakce pro STM (nahore) a AFM (dole). Stínované atomy znázorňují velikost interakce.

Obr. 3-5 znázorňuje jak tato vícenásobná interakce ovlivňuje AFM obraz. AFM nemůže dosáhnout skutečného atomového rozlišení (např. při zjišťování vakancí v krystalické mřížce – dislokaci)..

Předpokládejme že tři atomy v obrázku (označené 1, 2 a 3) interagují s povrchem. Signály od těchto tří atomů jsou rovněž znázorněny na obrázku. Křivky ukazují časový průběh signálu reprezentujícího změny atomových sil mezi danými atomy hrotu a atomy na povrchu. Jestliže se atom 1 na samém konci hrotu dostává do interakce s povrchem, potom stopa signálu přináší zřetelný obraz. To by mělo odpovídat času nula – v bodě, kdy atom 1 je nad prvním atomem zahrnutým do povrchu. Stopa signálu (označená 1) by měla ukázat 4 maxima, potom prázdné místo (díru) a dále 6 maxim. Aby bylo dosaženo skutečné atomové rozlišení, měla by být atomová vakance detekovaná ve správné pozici.



Obr.3-5. AFM sken periodické mřížky poskytující výsledný signál od tří atomů vstupujících do interakce s povrchem. Chybějící atom (vakance) je vlivem tohoto efektu špatně rozlišitelný.

Pokud ale do procesu interakce s povrchem zahrneme všechny tři atomy hrotu, není obraz zcela věrný. V tomto případě třetí atom je první nad atomem zahrnutým do povrchu. Když se dostane do interakce s tímto atomem, je registrován určitý signál (viz. stopa 3 na obr 3-5) o nižší amplitudě. Pokud jsou do interakce zahrnuty všechny 3 atomy hrotu, potom výsledný obraz má horší rozlišení. Vakance vykazuje pro každou stopu signálů jinou polohu. Obraz je výsledkem součtu příspěvků všech interagujících atomů hrotu. Součet všech 3 signálů od 3 atomů podle obr. 3-5 dole je vespod. Protože atomy jsou příčně posunuté, výsledný obraz vakance je nezřetelný. Minimum je sice zřejmé, ale pozice je posunutá.

V tomto jednoduchém příkladě jsou do interakce zahrnuty pouze tři atomy hrotu. Ve skutečnosti je počet interagujících atomů hrotu vyšší a každý přispívá svým signálem k celkovému obrazu. Pro velký počet interagujících atomů jsou detaily různých typů vakancí obtížně identifikovatelné. Z toho tedy vyplývá, že zatímco periodicitu mřížky je částečně reprodukovatelná, skutečného rozlišení na atomární úrovni není dosaženo.

Pro oba režimy (kontaktní i nekontaktní) platí pravidlo, že se vybírá hrot, který je ostřejší než je nejmenší detail vzorku. V opačném případě se objeví zkreslení, jak je popisováno v předchozím textu. Není možné vždy vybrat nejostřejší hrot, protože ostřejší hrot je dražší a zpravidla méně odolný. Je třeba jej použít v opravdu opodstatněných případech, kdy je vyžadováno nejlepší rozlišení.

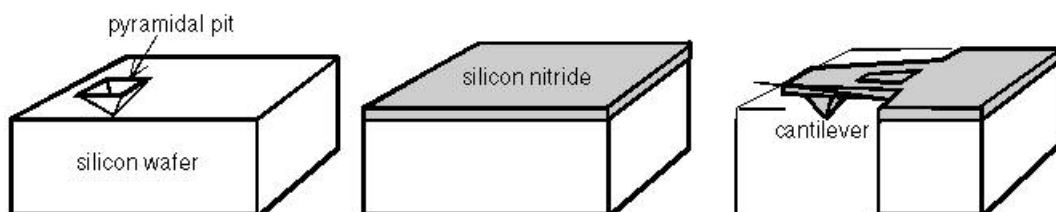
Pro LFM, je třeba použít hrot naopak tupější, protože vykazuje mezi hrotem a vzorkem větší styčnou plochu. Větší styčná plocha vede k většímu laterálnímu ohybu raménka. Je však zřejmé, že příčné rozlišení u tupějšího hrotu bude menší.

Výrobci AFM přístrojů nabízí hroty s geometrií pyramidální, tetraedrální a kuželovou. Kuželové hroty mohou být považovány za nejostřejší pokud je hodnotíme z pohledu jejich průřezového poměru (poměru délky k šířce hrotu). Poloměr křivosti bývá menší než 5 nm. Průřezový poměr pyramidálního hrotu je menší při poloměru křivosti hrotu několik desítek nm. Tyto hroty jsou ale trvanlivější.

AFM hroty jsou vyrobeny z křemíku nebo nitridu křemíku. Způsob přípravy je pro oba druhy materiálu odlišný. Vzhled hrotu je pro každý materiál závislý na výrobním procesu, stejně jako na vlastnostech materiálu, ze kterého je hrot vyroben.

Křemíkové kuželové hroty jsou vyráběny odleptáním křemíku kolem čepičky z oxidu křemičitého. Vysoký průřezový poměr kuželových hrotů umožňuje jejich použití při zobrazení hlubokých ostrých prohlubní. Jsou ale bohužel náchylnější ke zlomení než hroty s pyramidální nebo tetraedrální geometrií. Výhoda křemíku spočívá v tom, že může být doplněn příměsemi, což je výhodné v případě elektrických aplikací AFM (měření vodivosti). Vodivé hroty jsou užitečné pro řízení toku mezi hrotem a vzorkem, případně k prevenci proti nežádoucímu náboji na hrotu.

Hroty z nitridu křemíku jsou vyrobeny nanesením vrstvy nitridu křemíku nad odleptanou pyramidální prohlubní v krystalické křemíkové desce, jak je patrné z obr. 3-6. Tato metoda se používá pro přípravu hrotů s pyramidální a tetraedrální geometrií. Průřezový poměr křemíkových nitridových hrotů je proto limitován krystalografickou strukturou odleptaného materiálu (křemíku). Pyramidální hroty jsou širší než kuželové, takže z důvodu jejich robustnosti jsou méně vhodné pro zobrazování hlubokých a ostřejších povrchových struktur. Nitrid křemíku je tvrdší materiál než křemík, a tak vytváří hroty trvanlivější než křemíkové.



Obr. 3-6. Postup výroby hrotu z nitridu křemíku.

Vrstva nitridu křemíku nicméně obsahuje zbytková pnutí a ta mohou vést k pozdější deformaci. Pro aplikace, které vyžadují tenčí raménka nebo raménka s vyšší rezonanční frekvencí se z tohoto důvodu používá křemík. Tloušťka ramének z nitridu křemíku může být menší než 1  $\mu\text{m}$ , zatímco křemíkové raménka mají tloušťku několik  $\mu\text{m}$ .

Speciálnější typy ramének mají hroty „narostlé“ pod kontrolou v rastrovacím elektronovém mikroskopu. Některé hroty jsou dokonce připravené „obráběním“ existujícího hrotu fokusovaným iontovým svazkem. Rastrovací elektronový mikroskop může být použit pro jiný netradiční postup výroby, který využívá usazování nečistot v tubusu EM. Hroty tak nejsou připraveny z objemného bloku. Rostou na konci raménka a mají výhodu v tom, že mohou mít prakticky neomezený průřezový poměr. Jsou však nepravidelně zaostřené, ohýbají se a jsou křehké.

### 3.4 Literatura

1. H.A. Mizes, Sang-il Park, and W.A. Harrison, "Multiple-tip Interpretation of Anomalous Scanning-tunneling-microscopy Images of Layered Materials," *Physical Review B*, vol. 36, No. 8, pp. 4491-4494.
2. S. Akamine, T.R. Albrecht, M.J. Zdeblick, and C.F. Quate, *IEEE Electr. Dev. Lett.*, 10, 489, 1989

3. J.E. Griffith, D.A. Grigg, M.J. Vasile, P.E. Russell and E.A. Fitzgerald, "Characterization of Scanning Probe Tips for Linewidth Measurement," J. Vac. Sci. Technol. B 9 (6), Nov/Dec 1991.
4. J.E. Griffith, D.A. Grigg, M.J. Vasile, P.E. Russell, E.A. Fitzgerald, "Characterization of Scanning Probe Microscope Tips for Linewidth Measurement," J. Vac. Sci. Technol. B 9 (6), Nov/Dec 1991, pp. 3586-3589.
5. M. Radmacher, R.W. Tillmann, M. Fritz, H.E. Gaub, "From Molecules to Cells: Imaging Soft Samples with the Atomic Force Microscope," Science, vol. 257, Sept. 25, 1992, pp. 1900-1905.
6. F.J. Giessibl, Phys. Rev. B, 45 (23), 13815 (1992).
7. F.J. Giessibl, "Theory for an Electrostatic Imaging Mechanism Allowing Atomic Resolution of Ionic Crystals by Atomic Force Microscopy," Physical Review B, vol. 45, No. 23, 1992, pp. 13815-13818.
8. Jeffrey L. Hutter and John Bechhoefer, "Calibration of Atomic Force Microscope Tips," Reviews of Scientific Instruments, vol. 64, 1993, pp. 1868-1873.
9. F. Ohnesorge and G. Binnig, "True Atomic Resolution via Repulsive and Attractive Forces," submitted to Science, March 1993.
10. C.W. Yuan, E. Batalla, A. de Lozanne, M. Kirk, and M. Tortonese, "Low Temperature Magnetic Force Microscope Utilizing a Piezoresistive Cantilever," Appl. Phys. Lett. 65, 1994, pp. 1308-1310.
11. U. Stahl, C.W. Yuan, A.L. de Lozanne, and M. Tortonese, "Atomic Force Microscope Using Piezoresistive Cantilevers and Combined with a Scanning Electron Microscope," Appl. Phys. Lett. 65, 1994, pp. 2878-2880.