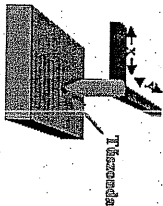


## 10. Pásztázó túszondás mikroszkópok

A pásztázó túszondás mikroszkópok (Scanning Probe Microscope, SPM) nevében ugyan szerepel a „mikroszkóp” szó, de ezek a műszerek nem sorolhatók a hagyományos értelemben vett, az optikai leképezés elvén működő mikroszkópok közé. Képfalképzésük közös jellemzője, hogy egy mechanikus rendszer egy igen hegyese kikepezett tűt (szondát) pásztáz a minta vizsgált felületére felül néhány Angstrom magasságban, miközben érzékeli a tűt és a minta között fellépő valamilyen kölcsönhatást, és ennek segítségével alkot nagyított képet a mintáról. Az érzékelő jelet a jelfeldolgozó rendszer a kép színébe kódolva jeleníti meg, így ad képi formát a detektált információknak. A kép nagyítása abból ered, hogy a minta felületén pásztázott terület kisebb, mint a megjelenített kép mérete.



1. ábra: A pásztázó túszondás mikroszkópok szemantikás rajza

A szonda és a minta közti kölcsönhatás alapján nevezték el a különböző SPM típusokat, pl. ha a szonda a mintáról az ún. alagútáram segítségével alkot képet, akkor pásztázó alagútmikroszkópról (Scanning Tunneling Microscope STM), ha a szonda mintegy rugós erőmértéket a szonda hegye és a minta atomjai közti rendkívül kis erőhatásokat érzékelve ad jeleket, akkor atomi erőmikroszkópról (Atomic Force Microscope, AFM) beszélünk. Egy sor további pásztázó túszondás módszer is létezik, ezeket az ajánlott irodalomból lehet részletesebben megismerni.

### 10.1 Pásztázó túszondás mikroszkópok általános felépítése

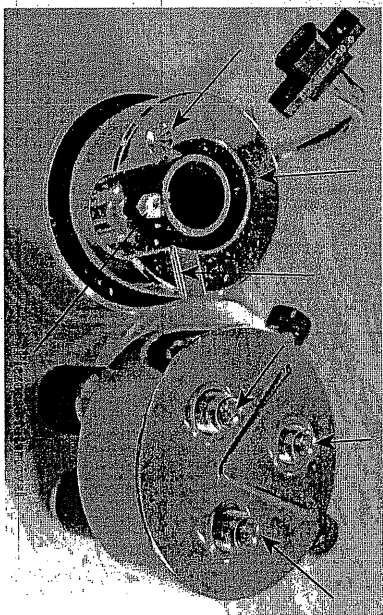
A pásztázó túszondás mikroszkópok mechanikai felépítése rendkívül precizitást igényel, mivel az esetenként atomi felbontású kép egy anyagi szonda mechanikus mozgataása során épül fel. Ez azt jelenti, hogy a minta skijában a túszonda mozgataása legalább egy nagyságrenddel pontosabb kell legyen, mint az atomok néhány tízed nm-es távolsága, a mintára merőleges, Z irányú mozgataásnál pedig a szokásos egytized – néhány ezred nm-es korrugációs amplitúdóval! kisebb zaj engedhető meg. A problémát részben kis-feszítésv, meev szenkezetek kialakításával, részben az egész műszeretést különleges, bár nem feltétlenül drága felülgesztésekkel való rezgésszigetelésével oldották meg.

Egy pásztázó túszondás mikroszkóp általános elvi felépítését az 1. ábra szemlélteti. A szenkezetet lényegében egy meev vízba épített piezo-mozgatóból áll. A vízben meg kell oldani a szonda és a minta közelítését, erre leggyakrabban három, gömbben végződő menetes orsót használnak. A hárompontos alátámasztás mechanikailag a legstabilabb, de az SPM-ek

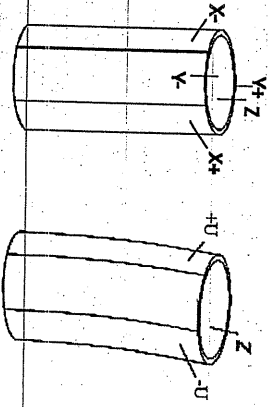
Korrugáció a minta domborzatától függetlenül a képleben megjelenő hullámosság. Részletesebben leírása az 1. ajánlott irodalom 17. és a 23. ábrával kapcsolatban az 1.1.6 és az 1.2.3 szakaszban található.

konstrukciójában ezt egy különleges megoldással is javítani szokták, ahogy azt a 2. ábrán megfigyelhetjük. A 3 gömb egyike kúp nyugszik és ezzel a 3 transzlációs mozgási szabadsági fokot határozza meg, a második egy vágat alakú fészékbe illeszkedik 2 rotációs mozgást blokkolva, a harmadik pedig egy síkfelületen fekszik fel, és a 3. rotációs mozgást akadályozza meg. Ezzel a víz pozíciójának mind a hat szabadsági foka meghatározott, megghozza úgy, hogy a szerkezetben nem ébrednek feszültségek, melyek relaxációja a mérés során képhibát, kúszást okozhatna. A szonda mintához való durva közelítése a csavarok emelésével vagy állíthatóságával történik. A 2. ábrán bemutatott szerkezetben két menetes orsó segítségével a szondát a minta közvetlen közelébe juttatjuk, majd az automatikát bekapcsolva egy léptető-motor a harmadik csavar segítségével elvégzi a közelítés végző szakaszát. A közelítés során a finom-mozgató mechanizmus (általában piezo-cső) z irányban kinyújtott állapotban van, majd elérve azt a minta-szonda távolságot, ahol az SPM típusára jellemző kölcsönhatás erőssége eléri az előre beállított értéket, az automatika a közelítést leállítja. Fontos, hogy a finom-mozgató szabályozása képes legyen a durva-mozgató leállása alatt a piezo-cső kinyúlását oly mértékben csökkenteni, hogy a szonda hegye ne sérüljön. Ez főleg a pásztázó alagútmikroszkópok esetében teszi próbára a szabályozás sebességét.

A finom-mozgató elem napjainkban szinte kizárólag piezo-cső, amelynek külső palástján négy negyedre osztott, belső palástján pedig egybefüggő fém bevonat található. A belső fémbevonatot földelve, és a külső palást szemben fekvő negyedekre orientés feszültséget kapcsolva a cső meggörbül, a cső vége a csőtengelyre merőlegesen elmozdul (3. ábra). Ezzel a mozgással áll elő az x-y pásztázás. A z irányú mozgást vagy a belső palást feszültségének változtatásával, vagy a cső szonda felőli végén kialakított z mozgató gyűrűre kapcsolt feszültséggel állítjuk elő.



2. ábra: A pásztázó túszondás mikroszkóp vízbe a közelítést végző gömbben végződő csavar-menetekkel (jobboldalt nyílakkal jelölve), a kúpos, árkos és sík-fészékkel (baloldalt nyílakkal jelölve). A piezo-cső és a palástjára ragasztott titárvó is jól látható.



3. ábra A piezo-csőves skemmer felépítése és működése

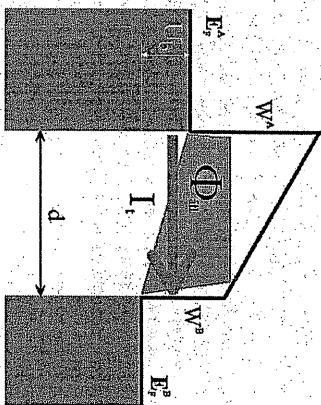
A műszer vázának olyan merev konstrukciónak kell lennie, amelyben az egyes alkatrészek rezgése erősen korlátozott, és jól csillapított. Az SPM-ek z irányú feloldására a 5 pm, x-y irányúra pedig a 0,05 nm jellemző. Ilyen feloldás természetesen csak akkor valósulhat meg, ha a szerkezet rezgését ennél lényegesen kisebbek. Tanulságos ezen adatokat az interferometriai megengedett negyed hullámhossz, azaz kb. 100 nm-es rezgésekkel összevetni, bár ebben az összehasonlásban azt is meg kell jegyezni, hogy az SPM-ekben jellemzően néhány centiméter a szerkezet mérete, ellentétben az interferometerek 100-szor nagyobb méreteivel. Az SPM berendezések elhelyezésénél fontos szempont a rezgésmentes környezet. Gyakran pneumatikus vagy elektromechanikus rezgésmentesítést alkalmaznak, de sok esetben egyszerű rugalmas felfüggesztés is megfelelő eredményt ad.

## 10.2 STM

A pásztázó tűszondás mikroszkópok családjának első tagja az 1981-ben kifejlesztett pásztázó alagút-mikroszkóp, ami Binnig, Rohrer, Gerber és Weibel, nevéhez fűződik. Felfedezést 1986-ban Nobel-díjjal jutalmazták. A pásztázó alagútmikroszkópban képalkotásra a minta és a tűszonda között az ún. bias-feszültség (előfeszítő feszültség) hatására folyó alagút-áramot használjuk. Ezt a kvantummechanikai alagút-effekttussal magyarázható áramot már hosszabb ideje felhasználják az úgynevezett planáris alagútmikroszkópiai kísérletekben. Gyakrabban valóban ez is a helyzet, hogy a tű és a minta közötti távolság elegendően nagy ahhoz, hogy elektronállapotokat figyeljenek tekintsük. Ekkor, amint azt a 4. ábra szemlélteti, a két fémben a Fermi szintek  $8 = U_b$  e energiával elhódnak ( $U_b$  az előfeszítő feszültség, e másik oldal betöltetlen állapotába való mozgására. Az áram azonban nem indul meg, mert az elektronoknak egy potenciálgáton kell átjárnuk, melynek magasságát az adott oldali fém kémiai munkája ( $W_A, W_B$ ), szélességét pedig az elektródok távolsága adja meg (megtint csak a hirtetés közelítésben a vastag vonallal jelölt világosszürke trapéz ábrázolja. Ekkor a két fém között folyó alagútáramot a trapéz alatti gát esetén közelítőleg érvényes

$$I \propto \rho_a \rho_b \frac{U_b}{d} e^{-4d\sqrt{\Phi_{\text{eff}}}}$$

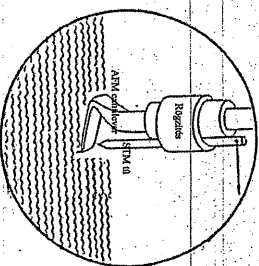
kifejzés adja meg, ahol  $\rho_a, \rho_b$  az elektronok illetve a lyukak állapotsűrűsége a Fermi-nívón,  $\Phi_{\text{eff}}$  a potenciálgát átlagos magassága,  $U_b$  az előfeszítő feszültség,  $d$  a minta és a szonda távolsága, az  $A$  állandó értéke pedig nagyjából  $A \sim 1 \text{ \AA}^{-1} eV^{-1/2} \sim 0,1 \text{ nm}^{-1} eV^{-1/2}$ . Figyelembe véve, hogy az STM-ben a szonda hegyén nem változhat a kilépési munka és az állapotsűrűség, az alagútáram a szonda távolság mellett a minta lokális állapotsűrűségétől és lokális kilépési munkájától függ. Így állandó áramú üzemmódban az állapotsűrűség változásai a minta domborzatába transzformálódnak, az állandó  $\rho_a(r, E_F)$  felületeket letapogató STM apró dombockákkal, míg állandó magasságot üzemmódban áram-púpokkal ábrázolja az atomokat. Ez az atomi felbontás azonban csak akkor jöhet létre, ha a szonda hegye valóban egyetlen pontban vesz mintát a lokális elektronállapot-sűrűségről, azaz egyetlen atom til a végén. A kép atomi korruagációjá akkor is létrejöhet, ha a szonda hegyét több atom képezi, ez a kép azonban több atomi felbontású kép összege.



4. ábra Az STM alagútáramú befolyásoló tényezői

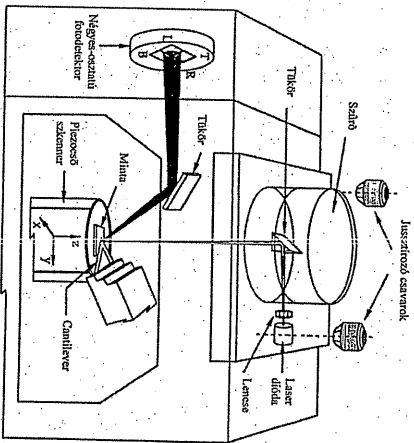
## 10.3 AFM

Binnig, Quate és Gerber 1986-ban publikálta az "Atomic Force Microscope" c. cikket, amely az atomi erő mikroszkóp születését jelentette az STM-ét odaitt Nobel-díj átételének évében. Ez a készülék még egy STM működésén alapult: az STM-tí alá annak szárhoz rögzítve, egy függőleges csúcsban végződő hajlított Ni laprugót szereltek a 5. ábra szerinti elrendezésben.



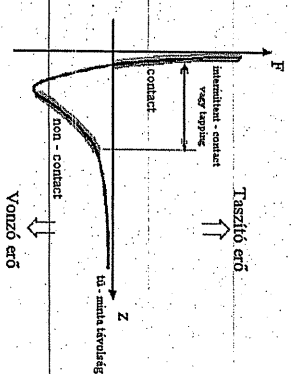
5. ábra: Az ós-AFM tűszondájának szerkezete

Ezzel a Ni csúccsal tapogatták le a szigetelő minta felületét, a rugó és az STM tí közötti állandó nagyság biztosította a csúcsra ható állandó erőt és ezzel a minta domborzatának követését. Egy évvel később ugyanez a csoport már "Atomic resolution with AFM" címen publikált, és megalkoták a ma is legelterjedtebb fénymutató AFM-et, és a mikroelektronikai módszerekkel gyártott AFM szondát (cantilever). A fénymutató AFM megvalósítása a 6. ábrán látható. A lézertároló sugara függőlegesen esik a cantilever tüköröző hátoldalára, ahonnan egy segédtükrön visszaverődve jut a négyes osztajú detektorra. Ha a minta és a szonda között csökken a kölcsönhatás, a cantilever lejjebb hajlik, a fénymutató fényfólyája a detektor alsó szegmensére felé mozdul, a felső-alsó detektorpár közötti feszültségkülönbség megváltozik, amit a szabályzókor kompenzál a "domborzati" kép felvétele esetén.



6. ábra: Egy modern fénymutató AFM mérőfejének szerkezete

Az atomi erő mikroszkópban a szabályzást vezérlő kölcsönhatás a minta és a szonda közötti ható erő. Ez az erő a szonda mintához való közelítése során először vonzó, majd taszító jellegű, amint az a 7. ábrán látható. Kezdetben a túszonda és a minta közötti ható Van der Waals-erők vonzóak, ebben a tartományban ún. non-contact üzemmódot AFM képek készíthetők: a szonda nem érinti a minta felszínét, de ha sikerül az állandó cantilever-lehajlás tartományában tartani a szonda - minta távolságot, az AFM feltekerési a minta domborzatát. Ezt a tartományt általában rezgett szondával lehet stabil képalkotásra használni („non contact” üzemmód). Tovább közelítve a minta felületéhez, a taszító erők jutnak túlsúlyba az erőgőrtben. Ebben a tartományban mikródnál a normál, "contact" üzemmódot AFM, de az ún. kopogtatás ("tapping" vagy „intermittent contact”) üzemmód is ezt az erőtartományt használja.



7. ábra: Az AFM tí és a minta közötti ható erő a tí - minta távolság függvényében

Az AFM metodikája gazdagabb a különböző képalkotási eljárásokban, mint az STM, amit nagyban elősegít, hogy míg az STM tí merev, az AFM egy laprugó, egy rugalmas cantilever végén ülő tüvel tapogatták le a minta felületét. Ez a rugalmas cantilever lehetővé teszi, hogy a minta pásztázása során ébredő laterális, a minta felületével párhuzamos erőt is feltekerjék: a cantilever torzítja ezzel az erővel arányos, a négyes osztajú detektor vízszintes kvadránsai között mérhető feszültségkülönbség pedig ezzel a torzióval arányos. A laterális erő két komponensből tevődik össze: a nyomóerő következtében a minta ferde felületén ébredő laterális komponensből és a tí mozgásából adódó sürítési erőtől. Az előre - hátra pásztázott ilyen ún. "Lateral Force" képek összegén a domborzat meredekségét jellemző laterális komponens megmarad, míg a sürítési komponens kioltódik, a képek különbözősége éppen fordítva, a sürítési kép marad meg, és a domborzat kioltódik. Az ilyen kiértékelést azonban nehezíti, hogy az előre - hátra pásztázott képek nem teljesen azonos módon torzulnak: nemcsak a piezo-mozgató linearitásnak hibáiból, hanem éppen a cantilever deformációiból következően a kép-pár egyazon pixele a minán nem azonos pontnak felel meg, ezért a képek összege és különbsége sem értékelhető szigorúan az elbibi feltételezések alapján (képek összegén illetve különbségén az egyes pixel-értékek összegét illetve különbségét értjük).

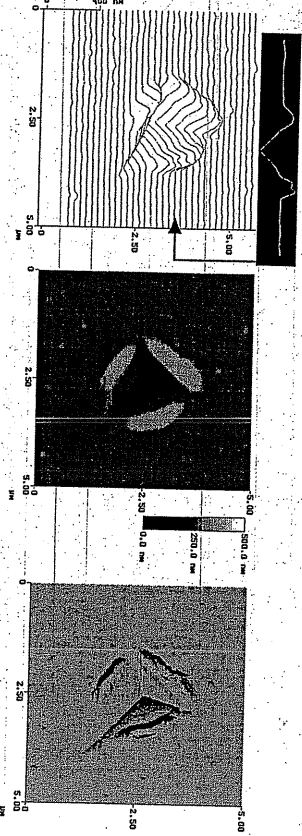
Szintén a rugalmas cantilever teszi lehetővé, hogy a szondát rezgessük. A titartóba, a cantilereket hordozó csipp alá szerelt piezokristályal megrezgetve a tí, a rezgés amplitúdójától függően különböző leképzési körülményeket lehet beállítani. Valamennyi rezgett leképzési mód közös jellemzője, hogy a laterális-erő-kép nem értelmezhető velük kapcsolatban. A legkisebb, nm alatti amplitúdójú rezgéssel stabilan megvalósítható a 7. ábra "non contact" tartományában való képalkotás. A szabályzórendszer ebben az esetben a rezgés amplitúdóját vagy a rezgés-frekvenciáját tartja állandó értéken. A vonzó kölcsönhatás következtében a cantilever látszólagos rugóállandója változik, a rezonancia frekvenciája eltolódik. Ha a rezgett mechanizmus követi ezt az eltolódást, a szabályzórendszer pedig a magasság változtatásával helyreállítja a rezgés frekvenciáját, akkor frekvenciaamplitúdó leképzésről ("non contact") beszélünk, ha az elhangulási márt csökkenő amplitúdón keresztl hat a szabályzás akkor amplitúdó modulált a leképzés (AM "non contact"). Ha a rezgés amplitúdóját nagyobbra választjuk, és a tí vége minden periódusban beleütközik a minta felületébe, kopogtatás leképzésről beszélünk, amit iparjogvédelmi okokból a gyártók "Tapping Mode" vagy "Intermittent Contact Mode" néven neveznek. A periodikusan kicsatolt rezgési energia miatt az elektromechanikus rezgőkör jóságai tényezője, következtésképpen a rezgés amplitúdója változik, ha a szabályzókor nem követné a minta domborzatát. A rezgés gejszítéshez viszonyít-

tott fázis is változik, ami állandó rezgési amplitúdó esetén a minta fajlagos energia-elnyelős képességét (puhaságát) jellemzi és az ilyen fázis-elterésből alkotott kép a "Phase Imaging Mode" kép. Ez az elnevezés azért is találó, mert az így megmért lokális anyagilelemző lebe-tővé teszi, hogy a minta felületén a különböző összetevőket, fázisokat megkülönböztessük.

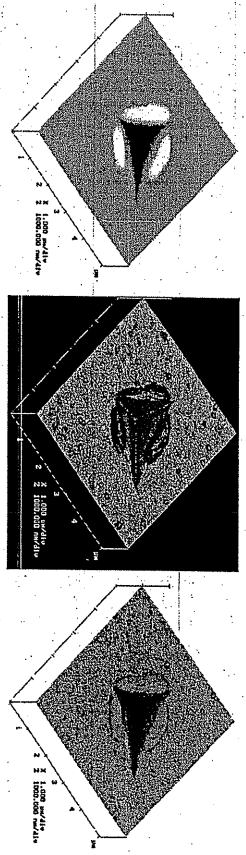
#### 10.4 A kép rögzítése, megjelenítése, képmódosító eljárások, mérés a képen

Az első STM kifejtésekor az eredményeket vonalíró segítségével rögzítették és egyben meg is jelenítették

Az írószekerezet a szondával szinkronban mozgott a vonaliróban, a képletet egyszerű-en y irányú elmozdulásként ábrázolták, azaz összegzették az y irányú pásztázás előtolásával, így jött létre a 8/a ábrán láthatóhoz hasonló kép. Minden egyes vonal a képen a minta felü-letenk egy x-irányú metszetét adja, egy ilyen keresztmetszet látható egy fekete sávban ki-emelten a 8/a kép felső részén is. A PC-k alkalmazása az SPM-ek vezérlésére a képek elektri-onikus tárolására is módot ad: a számítástechnikában szokásos módon a képeket képpontok-feszültségekert került tárolásra. Így egyszerre több kép rögzítése is megoldható, pl. a dombor-het rögzítésre. A számítógép a képek feldolgozására és plaztikus megjelenítésre is módot ad, így valí általában elfogadható a 8/b ábrán látható ún. felülhézeti ábrázolás, ahol az egyes képpontok tónusa, világosságja illetve sötétsége egyben a képlet (jelen esetben a magasság) változását jelenti. Ennek az ábrázolási módnak egy változata az ún. megvilágított ábrázolás, ahol a képre a domborzatnak megfelelő árnyékokat tesz a számítógép (8/c). A harmadik ábra-zolási mód a háromdimenziós axonometrikus ábrázolás, ahogy a 8/d, 8/e és 8/f ábrán látható. A 8/d ábrán a kép tónusában ismét a képlet intenzitása (a magasság) van kódolva, míg a 8/e ábrán a tónusok egy képzeltbeli megvilágításnak felelnek meg. A 8/f ábra a két előző ábrázó-las keveréke, a tónus az árnyékhatsótól is és a magasságtól is függ.



- a.) Vonalas ábrázolás. Az ábra betétje (a jobb felső sarokban) a rögzített y értékkel x irányban mozgatott tit "Z", magassági ko-ordinátáját mutatja.
- b.) Szűrőkalkáljű ábrázolás. A pontok fényessége az adott (X,Y) pontbeli Z koordiná-ta-nyékhatásának felel meg.
- c.) Szűrőkalkáljű ábrázolás. A pontok fényessége az ábrázolás során a Z koordiná-ta-nyékhatásának felel meg.



- d.) Háromdimenziós axonometri-kus ábrázolás. Adott (X,Y) pont látszólagos magassága és a fé-nyessége a Z koordinátával ará-nyos.
- e.) Háromdimenziós axono-metrikus ábrázolás. Adott (X,Y) pont látszólagos ma-gassága a Z koordinátával arányos, a fényessége pedig egy lapos megvilágításnak megfelelő árnyékhatsót ke-ve-rték.
- f.) Háromdimenziós axono-metrikus ábrázolás. Adott (X,Y) pont látszólagos ma-gassága a Z koordinátával arányos, a fényessége pedig egy lapos megvilágításnak megfelelő árnyékhatsót ke-ve-rték.

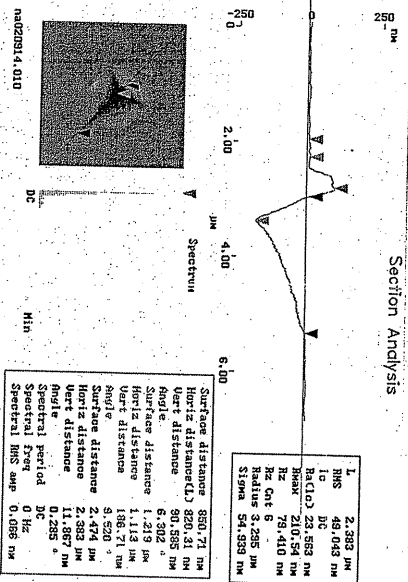
8. ábra SPM képek különböző ábrázolásokban. Valamennyi ábrázolásban egyazon AFM felvétel látható, amely a 10 és a 23 ábrán is megjelenik.

Mint már említettük az SPM technikával sosem valódi képet, csak mérési eredmé-nyek képszerű ábrázolását kapjuk. Ennek kicsit ellenmond, hogy a domborzati (állandó köli-csönhatás módnak felveti) képek minden más mikroszkópi technikánál pontosabban reprodu-kálják egy minta domborzatát. Ezért az SPM képek kiértékelésénél különös jelentősége van annak, hogy milyen képfeldolgozó eljárásokat alkalmazunk, mert ezzel kiemelhetjük a valo-ságnak megfelelő mérési eredményeket, de ugyanúgy el is rejthetjük az elképzeltünknek ellenmondó részteket.

#### 10.5 SPM felvételek kvantitatív kiértékelése

Az SPM felvételek az esetek túlnyomó többségében domborzati képek, vagy kalibrál-hatók úgy, hogy domborzati jelentésük legyen. Ezért a legtöbb SPM berendezésen alkalma-zott képfeldolgozó (pontosabban képanalízis) eljárás során a kép (illetve a minta) domborza-tának paramétereit mérjük meg. Így járunk el pl. a kép jellegzetes pontjai távolságának, illetve jellegzetes vonalak mentén a magasságprofilnak a meghatározásakor (9. ábra). Ezekkel a módszerekkel az x-, y-, z-koordinátákat kb. 5-10%-pontosossággal határozhatjuk meg, ha nem követünk el nagy hibát a piezo-elemek kalibrálásánál. Vigyázat: a szoftver hibája ír ki 5 je-nyet a képernyőn, az általánosan alkalmazott piezo-kerámából készült piezo-mozgatók fe-szültség-elmozdulás függvénye a legmondosabb kalibrálás, állandó környezeti körülmények (hőmérséklet, páratartalom, stb.) és körültekintő mérés esetén is legalább 1-5 % hibát tartal-maz! Gyakran alkalmazott paraméter a minta domborzatának jellemzésére az értesség. Ez matematikailag a kép minden egyes pixelben tárolt érték szorzását jelenti, ami jól jellemzi a minta érdességének változásával járó folyamatok kinetikáját (adszorpció, deszorpció, korrozó, rétegudvekedés). Sajnos részint mérés-technikai okokból, részint néha egyszerű szoftverhiba következményeként a meghatározott érdesség-paraméter értéke függ a kép méretétől, tehát

Ilyen összehasonlító vizsgálatokat csak azonos méretű képek felhasználásával szabad végezni. Más eljárásokkal a magasság-értékek statisztikus kiértékelésével rétegvastagságot lehet meghatározni, de különböző korreláció- és fraktál számolási eljárások is hozzáfertoznak az SPM szoftverek kiértékelő eljárásához.



9. ábra: Keresztmetszeti kép. A bal alsó sarokban az eredeti kép látható. Fellette (a képre bevezetett vonal mentén elvetszve) a minta magasságkontúrja rajzolódik ki. A jobb oldali jelző keretben az egész vonalra vonatkozó hosszúság, átlagosság, magasságkülönbség, sbb. értékek az alsó keretben a képen háromszög alakú jelkékekkel jelölt pontok távolsága és magasságkülönbsége olvasható.

A képfeldolgozó algoritmusok következő csoportjába a zajszűrő módszerek tartoznak. Ezek általában  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $7 \times 7$  sbb. pixelel átlagolva, más esetben differenciát képezve élvezhetőbb képet állítanak elő. Azonban ez az eljárás is veszélyes: ha az adott jellegzetességet nem tudtuk lassabb pásztázással vagy más módon, gondosabb munkával láthatóvá tenni a képen, akkor nem biztos, hogy valóban ott van. Hasonlóan óvatosan kell alkalmazni az SPM képminden SPM szoftverben megtalálható FFT (Fast Fourier Transform) egy, átlagoló zajszűrő eljárás, alkalmas a képen megjelenő periodicitások meghatározására (pl. atomi felbontás esetén a rácsállandó méterére).

#### 10.6 Az SPM módszerek használata az anyagvizsgáló szemszögéből

Az SPM kicsi és viszonylag olcsó berendezés, mégis egyike a három atomi felbontású alkalmazás eszközeinek, ezektől legelterjedtebb típusai (STM, AFM) csak a minta legfelső atomi rétegétől adnak információt. Más hasonló teljesítményű eszközököz viszonyítva csak nagyon egyszerű minta-előkészítést igényelnek, és pontos magassági profil adhat a vizsgált mintától. Ennek megfelelően az anyagtudomány, a nanotechnológia, a biológia azon területén alkalmazni, ahol a különlegesen nagy nagyrítás (például felületi atomsorok átrendeződése, rekonstrukciója a tömbi kristályszerkezethez viszonyítva), a jó mélységi felbontás (keresztmetszeti profilok, érdesség, teraszos szerkezetek meghatározása), egyszerű minta-előkészítés

(parti minták) és a különleges tulajdonságok mérése (mint a kémiai potenciál (kelvin szonda), a méréses tulajdonságok (MFM) vagy a termikus tulajdonságok (STHM)) alkalmazásukat különlegesen előnyössé teszi.

Az SPM műszeresaládá alkalmazásait nagyon kevés tényező korlátozza, inkább az egyes al-típusok alkalmazása tiltózik akadályba egyes esetekben. Például az STM mindenképpen elektromosan vezető mintát igényel, a pásztázó elektronmikroszkópnál alkalmazott fémgőzölési technika általában nem alkalmazható. De a szigetelő minták kitűnően vizsgálhatók AFM-mel.

#### 10.7 Az SPM felbontásának korlátjai

Minden pásztázó szondás mikroszkóp felbontását a szonda mérete korlátozza elsősorban. A pásztázó elektronmikroszkóp esetében ez az elektronsugár fókuszáltsága, a pásztázó túszondás mikroszkópoknál az anyagi túszonda hegyének mérete, görbületi sugara. Amennyiben a szonda mérete megfelelő a következő, a szonda-méretnél fundamentálisabb korlát a kép-jel elbállítására alkalmazható kölcsönhatás térbeli kiterjedése. Ez az általában használt kontakt AFM esetében a Van der Waals erők elektrosztatikus megoszlási erő jellege miatt mindenképpen rosszabb mint az atomi felbontás, de az AFM-nél is lehet olyan kölcsönhatást találni, ami valódi atomi feloldást tesz lehetővé.

#### 10.8 Mérési feladatok

- SPM felépítése, konstrukciós sajátosságai
- STM, HOPG vizsgálata, STM tü előállítás
- AFM, a fényvezető AFM megvalósítása a gyakorlatban, aprószemcsés anyag vizsgálata
- Képfeldolgozási eljárások
- Mérés a képen

#### 10.9 Ajánlott irodalom

- [1] Kálmán Erika, Nagy Péter: Pásztázó túszondás mikroszkópia (SPM), fejezet a Műszaki Felülettudomány és Orvosi biológiai Alkalmazásai c. könyvben, Szerk.: Bertóti I., Marosi Gy., Tóth A., 187, (2003)